

**ANTONIO DOMINGUES DE FIGUEIREDO**

**CONCRETO PROJETADO:  
FATORES INTERVENIENTES NO  
CONTROLE DA QUALIDADE  
DO PROCESSO**

**Dissertação apresentada à Escola  
Politécnica da Universidade de São  
Paulo para obtenção do título de  
Mestre em Engenharia.**

**São Paulo  
1992**

**ANTONIO DOMINGUES DE FIGUEIREDO**

**CONCRETO PROJETADO:  
FATORES INTERVENIENTES NO  
CONTROLE DA QUALIDADE  
DO PROCESSO**

**Dissertação apresentada à Escola  
Politécnica da Universidade de São  
Paulo para obtenção do título de  
Mestre em Engenharia.**

**Área de Concentração:  
Engenharia de Construção Civil**

**Orientador:  
Paulo Roberto do Lago Helene**

**São Paulo  
1992**

**À Ivone, Thaís e Gabriel**

**AGRADECIMENTOS**

Tenho muito a agradecer:

Em primeiro lugar, ao meu amigo e orientador Paulo Helene que, além da simples tarefa de me orientar, tanto me incentivou a executar bem este trabalho e, mais do que isso, depositou em mim uma confiança que só os amigos são capazes.

Aos meus colegas do Projeto de Pesquisa EPUSP/CBPO/IPT-01 "Concreto Projetado para Túneis", Luiz Roberto Prudêncio Jr., Hugo Sogayar Armelin e Maristela Gomes da Silva que dividiram comigo alegrias, desorientações, descobertas, riscos de vida e, principalmente, uma grande amizade formada num trabalho comum que, sem eles, não teria a mínima condição de ter chegado ao nível de realização que atingiu.

Ao IPT, em especial ao amigo Francisco de Assis Souza Dantas que além de apresentar em todo o momento de trabalho comum um espírito positivo inabalável e uma laboriosidade invejável, sempre encontrou um momento para aquela conversa que tantas dúvidas tirava. Ao Djalma Nascimento, técnico dedicado, com preocupação contínua em colaborar no trabalho e pelo esmero na realização de tantos ensaios.

À Companhia Brasileira de Projetos e Obras (CBPO), que simplesmente tornou possível a realização deste trabalho arcando com os elevados custos e a pesada infra-estrutura necessária ao trabalho com o concreto projetado. Em especial ao Pedro Boscov, que pelo seu elevado zelo profissional tanto colaborou no sentido da conjugação de esforços entre a universidade e a empresa privada. Ao Elias Raguzzani Gonçalves e ao Cilênio Silva da Central de Equipamentos da CBPO, que viabilizaram todas as modificações por nós solicitadas no equipamento de projeção. Aos engenheiros Norberto Silva e Geraldo Caracini Filho e ao mestre Messias Ribeiro da Silva da Obra da Extensão Norte do Metrô de São Paulo, que forneceram todo o apoio necessário à manutenção do laboratório de campo e o acesso aos resultados obtidos na obra.

Ao Josué Januário Barbosa, mangoteiro responsável pela moldagem de quase todas as placas de concreto projetado usadas neste trabalho, que acabou assumindo como sua a pesquisa; e ao José Abreu Silva o "Maranhão", que com seu bom humor e dedicação, sempre colaborou no duro trabalho da projeção. Ambos afastados do serviço por motivo de acidente no momento de fechamento deste trabalho, o qual espero que de alguma forma contribua para amenizá-lo de alguma maneira.

Gostaria de agradecer também às secretárias Maria Conceição Firmino de Macedo Santos e Engracia Maria Bartuciotti, que tanto aliviaram o meu trabalho no penoso campo das atividades administrativas e burocráticas, tornando possível uma maior dedicação ao trabalho da pesquisa.

## SUMÁRIO

CAPÍTULO I: INTRODUÇÃO .....	1
1.1. OBJETIVO .....	1
1.2. JUSTIFICATIVA .....	1
1.3. ENFOQUE DA PESQUISA .....	3
1.4. METODOLOGIA ADOTADA .....	3
1.5. CONTEÚDO DA DISSERTAÇÃO .....	4
CAPÍTULO II: O CONCRETO PROJETADO .....	7
2.1. DEFINIÇÃO DO CONCRETO PROJETADO .....	7
2.2. APLICAÇÕES DO CONCRETO PROJETADO .....	8
2.2.1. Revestimentos .....	9
2.2.2. Obras subterrâneas .....	10
2.2.3. Contenção de taludes .....	11
2.2.4. Reparos e reforços estruturais .....	12
2.2.5. Impermeabilizações .....	13
2.2.6. Elementos auto-portantes .....	15
2.2.7. Formas livres .....	16
2.3. HISTÓRICO E EVOLUÇÃO .....	16
2.3.1. No exterior .....	16
2.3.2. No Brasil .....	20
2.4. ESPECIFICAÇÕES .....	23
2.4.1. Materiais constituintes .....	24
2.4.2. Concreto projetado para túneis .....	25
2.4.3. Outras aplicações .....	31
2.4.4. Normalização .....	32
2.4.4.1. No exterior .....	33
2.4.4.2. No Brasil .....	38
2.5. CONCRETO PROJETADO ESPECIAL .....	41
2.5.1. Concreto projetado com fibras .....	41
2.5.2. Concreto projetado com microssílica .....	44
2.5.3. Concreto projetado com fibras de aço e microssílica .....	46
2.5.4. Concreto projetado com o uso de polímeros .....	47

CAPÍTULO III: O PROCESSO DE PROJEÇÃO .....	50
3.1. PROCESSOS DE PROJEÇÃO DISPONÍVEIS .....	50
3.1.1. Via seca .....	50
3.1.2. Via úmida .....	52
3.2. EQUIPAMENTOS DE PROJEÇÃO POR VIA SECA .....	57
3.2.1. Produção da mistura seca .....	57
3.2.2. Máquinas de projeção .....	58
3.2.2.1. Máquinas com câmara pressurizada .....	58
3.2.2.2. Máquinas com rosca-sem-fim .....	61
3.2.2.3. Máquinas com rotor .....	61
3.2.3. Sistema de alimentação .....	64
3.2.3.1. Sistema convencional .....	65
3.2.3.2. Alimentação contínua .....	66
3.2.3.3. Alimentação direta .....	67
3.2.3.4. <i>Pre-bagging</i> .....	68
3.2.4. Dosadores de aditivo .....	69
3.2.4.1. Dispositivos vibratórios .....	69
3.2.4.2. Rolo dosador .....	69
3.2.4.3. Dosador com rosca-sem-fim .....	70
3.2.4.4. Dosadores de aditivos líquidos .....	71
3.2.5. Compressor de ar .....	72
3.2.6. Braço mecânico (robô) .....	73
3.2.6.1. Sistema básico .....	74
3.2.6.2. Vantagens do braço mecânico .....	76
3.2.6.3. Desvantagens do braço mecânico .....	78
3.3. OPERAÇÃO DO PROCESSO .....	79
3.3.1. Equipe de projeção .....	80
3.3.1.1. Encarregado de projeção .....	80
3.3.1.2. Mangoteiro .....	81
3.3.1.3. Outros membros .....	82
3.3.2. Operação da máquina de projeção .....	82
3.3.3. Cuidados com as mangueiras .....	85
3.3.4. Umidificação da mistura .....	85
3.4. PERSPECTIVAS FUTURAS .....	88

CAPÍTULO IV: PROPRIEDADES DO CONCRETO PROJETADO .....	91
4.1. IMPORTÂNCIA E FORMA DE CONTROLE .....	91
4.2. REFLEXÃO .....	94
4.2.1. Definições .....	94
4.2.2. Dinâmica da reflexão .....	95
4.2.2.1. Influência da espessura da camada .....	97
4.2.2.2. Influência da granulometria da mistura .....	97
4.2.2.3. Influência do teor de umidade .....	98
4.2.2.4. Influência do substrato .....	99
4.2.2.5. Variação do traço em função da reflexão .....	99
4.2.3. Efeito do processo de projeção .....	101
4.2.3.1. Tipo do processo .....	101
4.2.3.2. Velocidade de projeção .....	101
4.2.3.3. Inclinação do jato .....	102
4.2.3.4. Distância de projeção .....	103
4.2.4. Oclusão da reflexão .....	104
4.2.5. Controle da reflexão .....	104
4.3. DESPLACAMENTO .....	107
4.3.1. Causas dos deslocamentos .....	108
4.3.2. Controle do deslocamento através da consistência .....	108
4.4. POEIRA E NÉVOA .....	109
4.4.1. Causas da produção de poeira .....	109
4.4.2. Causas da produção de névoa .....	110
4.4.3. Controle da poeira e da névoa .....	110
4.5. HOMOGENEIDADE .....	110
4.5.1. Defeitos típicos .....	111
4.5.1.1. Efeito de sombra .....	111
4.5.1.2. Laminação .....	112
4.5.1.3. Imperfeições superficiais .....	114
4.5.2. Variação das propriedades .....	114
4.5.3. Controle da homogeneidade .....	115
4.5.3.1. Controle visual .....	116
4.5.3.2. Controle da pega e endurecimento .....	117
4.5.3.3. Controle da resistência à compressão .....	119
4.6. ADERÊNCIA .....	120
4.6.1. Causas da falta de aderência .....	120
4.6.2. Controle da aderência .....	121
4.7. DURABILIDADE E PERMEABILIDADE .....	122
4.7.1. Concreto projetado como material estrutural durável .....	122
4.7.2. Características que interferem na durabilidade ..	123
4.7.2.1. Consumo de cimento .....	123
4.7.2.2. Porosidade e permeabilidade .....	123
4.7.2.3. Possíveis efeitos do aditivo acelerador de pega ..	125
4.7.3. Alternativas para aumentar a durabilidade .....	126
4.7.4. A qualidade do produto .....	127



CAPÍTULO V: ASPECTOS DA INFLUÊNCIA DO PROCESSO DE PROJEÇÃO NAS PROPRIEDADES DO CONCRETO PROJETADO .....	128
5.1. METODOLOGIA UTILIZADA .....	128
5.2. UMIDIFICAÇÃO DO CONCRETO PROJETADO .....	130
5.2.1. Erros do enfoque tradicional .....	130
5.2.2. Propriedades afetadas pelo teor de umidade .....	132
5.2.2.1. Resistência à compressão .....	132
5.2.2.2. Compactação .....	134
5.2.2.3. Consistência .....	135
5.2.3. Controle da umidificação .....	136
5.3. ADITIVOS ACELERADORES DE PEGA E ENDURECIMENTO .....	137
5.3.1. Tipos e forma de atuação .....	137
5.3.2. Propriedades afetadas pelo teor de aditivo .....	139
5.3.2.1. Pega e resistências iniciais .....	139
5.3.2.2. Resistência à compressão .....	143
5.3.2.3. Compactação .....	146
5.3.2.4. Controle do teor de aditivos .....	149
5.3.3. Efeito da pré-hidratação .....	151
5.4. VELOCIDADE DE PROJEÇÃO .....	153
5.4.1. Importância e forma de controle .....	153
5.4.2. Propriedades afetadas pela velocidade de projeção .....	154
5.4.2.1. Compactação .....	154
5.4.2.2. Resistência à compressão .....	157
5.4.2.3. Reflexão .....	158
5.4.3. O controle da pressão de ar comprimido .....	158
5.5. DIREÇÃO DE PROJEÇÃO .....	159
5.5.1. Importância da técnica de projeção .....	159
5.5.2. Propriedades afetadas pela direção de projeção ..	160
5.5.2.1. Reflexão .....	160
5.5.2.2. Traço .....	163
5.5.2.3. Compactação .....	166
5.5.2.4. Pega e resistências iniciais .....	167
5.5.2.5. Resistência à compressão .....	168
5.5.3. Influência do aditivo à base de aluminato .....	169
5.5.3.1. Compactação .....	170
5.5.3.2. Pega e resistências iniciais .....	171
5.5.3.3. Resistência à compressão .....	172
5.5.3.4. Permeabilidade .....	173
5.5.4. Controle do concreto segundo a direção de projeção .....	174
5.6. AVALIAÇÃO DO CONCRETO PROJETADO ATRAVÉS DE RESULTADOS DE CONTROLE DE OBRAS DE TÚNEIS .....	176
5.6.1. Caracterização das amostragens .....	176
5.6.2. Resultados obtidos nas amostragens .....	178
5.6.3. Análise dos resultados .....	180
5.6.3.1. Perspectiva histórica .....	180
5.6.3.2. Influência da injeção de água sob pressão .....	181
5.6.3.3. Influência da marca do aditivo acelerador .....	183
5.6.3.4. Influência da mecanização do processo .....	183

CAPÍTULO VI: RECOMENDAÇÕES PARA O CONTROLE DO PROCESSO DE PROJEÇÃO DO CONCRETO .....	185
6.1. INTRODUÇÃO .....	185
6.2. CUIDADOS ANTERIORES À PROJEÇÃO .....	186
6.2.1. Formação e qualificação da mão-de-obra .....	186
6.2.1.1. Palestras e aulas práticas .....	187
6.2.1.2. Roteiro para qualificação do mangoteiro .....	188
6.2.1.3. Roteiro para qualificação do encarregado .....	190
6.2.2. Equipamentos .....	192
6.2.2.1. Betoneira .....	192
6.2.2.2. Alimentadora contínua .....	193
6.2.2.3. Dosador de aditivo .....	193
6.2.2.4. Bomba de água .....	194
6.2.2.5. Máquina de Projeção .....	194
6.2.2.6. Compressor de ar .....	195
6.2.2.7. Sistema de pré-umidificação e bicos .....	195
6.2.3. Dosagem .....	196
6.2.4. Materiais .....	197
6.2.4.1. Cimento .....	198
6.2.4.2. Agregados miúdos .....	198
6.2.4.3. Agregados graúdos .....	199
6.2.4.4. Aditivos aceleradores de pega .....	199
6.2.5. Preparo da superfície .....	200
6.3. CUIDADOS DURANTE A PROJEÇÃO .....	201
6.3.1. Confeção da mistura seca .....	201
6.3.1.1. Cuidados gerais .....	202
6.3.1.2. Controle da mistura seca .....	202
6.3.2. Verificação das condições dos equipamentos .....	203
6.3.3. Início da projeção .....	204
6.3.3.1. Seqüência de início de operações .....	204
6.3.3.2. Controle da consistência .....	205
6.3.3.3. Controle da pressão de ar comprimido .....	205
6.3.4. Técnica de projeção .....	205
6.3.4.1. Direcionamento do jato .....	205
6.3.4.2. Distância de projeção .....	206
6.3.4.3. Projeção da camada inicial .....	207
6.3.4.4. Projeção das demais camadas .....	208
6.3.4.5. Preenchimento de espaços delimitados por cantos .....	208
6.3.4.6. Projeção sobre armaduras .....	209
6.3.5. Encerramento da projeção .....	210
6.3.6. Segurança e higiene no trabalho .....	210
6.3.7. Cura .....	211
6.4. CONTROLE DO PROCESSO APÓS A PROJEÇÃO .....	212
6.4.1. Controle do concreto em baixas idades .....	212
6.4.1.1. Índices físicos do concreto recém projetado ...	212
6.4.1.2. Resistência a baixas idades .....	215
6.4.2. Controle do concreto em idades avançadas .....	216
6.4.3. Controle das falhas de produção .....	217
6.4.3.1. Defeitos localizados .....	217
6.4.3.2. Defeitos generalizados .....	217
6.4.3.2. Desplacamentos .....	218
6.5. SÍNTESE .....	218

CAPÍTULO VII: COMENTÁRIOS FINAIS .....	222
ANEXOS .....	225
ANEXO 1: CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS EMPREGADOS NO TRABALHO .....	226
ANEXO 2: ESTUDO SOBRE A INFLUÊNCIA DO TEOR DE UMIDADE (EQUIPAMENTO CONVENCIONAL) .....	228
ANEXO 3: ESTUDO SOBRE A INFLUÊNCIA DO TEOR DE UMIDADE (EQUIPAMENTO COM INJEÇÃO DE ÁGUA SOB PRESSÃO) .	231
ANEXO 4: ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO TEOR DE ADITIVO NAS PROPRIEDADES DO CONCRETO PROJETADO .....	234
ANEXO 5: ESTUDO DO EFEITO DA DOSAGEM MANUAL DE ADITIVO .	241
ANEXO 6: ESTUDO DO EFEITO DA PRÉ-HIDRATAÇÃO .....	245
ANEXO 7: ESTUDO DO EFEITO DA VELOCIDADE DE PROJEÇÃO ....	249
ANEXO 8: ESTUDO DA VARAÇÃO DE TRAÇO SEGUNDO A DIREÇÃO DE PROJEÇÃO (RECONSTITUIÇÃO) .....	251
ANEXO 9: ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA DIREÇÃO DE PROJEÇÃO NO CONCRETO COM ADITIVO À BASE DE CARBONATO .....	253
ANEXO 10: ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA DIREÇÃO DE PROJEÇÃO NO CONCRETO PROJETADO COM ADITIVO À BASE DE ALUMINATO .....	255
ANEXO 11: RESULTADOS DO ACOMPANHAMENTO DA OBRA DA FERROVIA DO AÇO .....	258
ANEXO 12: RESULTADOS DO ACOMPANHAMENTO DA OBRA DA EXTENSÃO NORTE DO METRÔ DE SÃO PAULO .....	259
ANEXO 13: TESTES DE HIPÓTESE PARA OS RESULTADOS DOS ANEXOS 11 E 12 .....	264
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	274

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1: Requisitos austríacos para a evolução da resistência do concreto projetado a baixas idades .....	26
FIGURA 2.2: Evolução da resistência do concreto projetado com o tempo .....	27
FIGURA 2.3: Esquema de bico de projeção de concreto polímero .....	48
FIGURA 3.1: Diagrama do processo de projeção por via seca	51
FIGURA 3.2: Esquema do sistema de pré-umidificação .....	52
FIGURA 3.3: Diagrama do processo de projeção por via Úmida .....	52
FIGURA 3.4: Tipos de fluxo de concreto no mangote .....	53
FIGURA 3.5: Máquina de projeção via seca de câmara-dupla.	59
FIGURA 3.6: Esquema de funcionamento da máquina de projeção de câmara-dupla .....	59
FIGURA 3.7: Detalhe de funcionamento da máquina de projeção de câmara-dupla (base da câmara inferior) .....	60
FIGURA 3.8: Detalhe de funcionamento da máquina de projeção de câmara-simples (base da câmara) .....	60
FIGURA 3.9: Esquema de funcionamento da máquina de projeção do tipo rosca-sem-fim .....	61
FIGURA 3.10: Esquema de funcionamento da máquina de projeção de rotor tipo calha em "U" .....	62
FIGURA 3.11: Esquema de funcionamento da máquina de projeção com rotor de câmaras .....	63
FIGURA 3.12: Entrada de água na projeção por via seca ...	64
FIGURA 3.13: Exemplo de transporte da mistura seca até o equipamento de projeção num túnel .....	65
FIGURA 3.14: Esquema de lançamento manual da mistura seca e de aditivo acelerador de pega na máquina de projeção ....	66
FIGURA 3.15: Esquema de alimentadora contínua .....	67
FIGURA 3.16: Esquema de alimentação contínua por conduto.	68
FIGURA 3.17: Esquema de dosador de aditivo em pó com rolo dosador .....	70
FIGURA 3.18: Esquema de dosador de aditivo em pó com rosca-sem-fim .....	71
FIGURA 3.19: Braço mecânico para projeção de concreto e detalhe do bico .....	75
FIGURA 3.20: Controle remoto eletrônico dotado de <i>joy-stick</i> para operação de robô e operador .....	76
FIGURA 3.21: Arranjo para a projeção imediata de concreto projetado via seca logo após a escavação .....	77
FIGURA 3.22: Sinais do mangoteiro .....	81
FIGURA 3.23: Detalhe de montagem do conjunto rotor de câmaras, discos de fricção e discos de borracha .....	84
FIGURA 3.24: Detalhe de bico de projeção via seca convencional .....	86
FIGURA 3.25: Esquema da porção umidificada da mistura seca pelo bico convencional (corte transversal) .....	86
FIGURA 3.26: Detalhe de bico de projeção via seca afunilado .....	87
FIGURA 3.27: Bicos de projeção especiais .....	87
FIGURA 3.28: Sistema de pré-umidificação simples .....	88
FIGURA 3.29: Esquema do sistema de pré-umidificação com injeção de água sob pressão otimizado .....	89
FIGURA 4.1: Variação qualitativa da reflexão ao longo do tempo .....	96
FIGURA 4.2: Dinâmica da formação da camada de amortecimento do concreto projetado .....	96

FIGURA 4.3: Efeito da relação água/cimento na reflexão do concreto projetado por via seca .....	98
FIGURA 4.4: Influência do ângulo de projeção na reflexão .....	102
FIGURA 4.5: Avaliação qualitativa da reflexão em função do ângulo de projeção .....	102
FIGURA 4.6: Quantificação da reflexão em função da distância de projeção segundo Längerle e Kobler .....	103
FIGURA 4.7: Esquema de posicionamento de fôrma e lonas para determinação da reflexão em placas .....	107
FIGURA 4.8: Efeito de sombra .....	112
FIGURA 4.9: Esquema da laminação do concreto projetado .	113
FIGURA 4.10: Penetrômetro de Meynadier .....	118
FIGURA 4.11: Penetrômetro de Energia Constante .....	118
FIGURA 5.1: Resistência do concreto em função da relação água/cimento .....	131
FIGURA 5.2: Relação entre a umidade e a consistência do concreto projetado .....	137
FIGURA 5.3: Resistências iniciais para aditivo à base de silicato .....	140
FIGURA 5.4: Resistências iniciais para aditivo à base de carbonato .....	141
FIGURA 5.5: Resistências iniciais para aditivo à base de aluminato .....	142
FIGURA 5.6: Correlação entre as resistências à compressão aos 7 e aos 28 dias e o teor de aditivo à base de silicato .....	144
FIGURA 5.7: Correlação entre as resistências à compressão aos 7, aos 28 e aos 91 dias e o teor de aditivo à base de carbonato .....	145
FIGURA 5.8: Influência do teor de aditivo a base de aluminato no volume de vazios permeáveis do concreto projetado .....	147
FIGURA 5.9: Influência do teor de aditivo a base de silicato no volume de vazios permeáveis do concreto projetado ...	147
FIGURA 5.10: Resultados obtidos na análise da evolução da resistência inicial em placas moldadas em obra .....	150
FIGURA 5.11: Bico largo utilizado na segunda série de ensaios .....	155
FIGURA 5.12: Influência da pressão de ar comprimido na compactação do concreto projetado com bico afunilado ...	156
FIGURA 5.13: Influência da pressão de ar comprimido na compactação do concreto projetado com bico largo .....	156
FIGURA 5.14: Dificuldades do mangoteiro em realizar a projeção sobre o teto .....	161
FIGURA 5.15: Dinâmica da reincorporação do material refletido .....	162
FIGURA 5.16: Esquema utilizado para a projeção em diversos ângulos .....	163
FIGURA 5.17: Correlação entre o ângulo de projeção e a perda total de agregados .....	165
FIGURA 5.18: Resistências iniciais para as três direções de projeção obtidas com o uso de aditivos à base de carbonato .....	168
FIGURA 5.19: Relação entre a resistência à compressão aos 7 e aos 28 dias e a direção de projeção .....	169
FIGURA 5.20: Resistências iniciais para as três direções de projeção obtidas com o uso de aditivos à base de aluminato .....	172

FIGURA 6.1: Esquema de pré-umidificação com afunilamento do bico ..... 197

FIGURA 6.2: Movimento circular do bico de projeção ..... 206

FIGURA 6.3: Direcionamento do jato de concreto contra o alvo de projeção segundo sua altura e sua inclinação ..... 207

FIGURA 6.4: Seqüência de preenchimento de vão entre cambotas ou placas ..... 209

## LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1: Classes de resistência do concreto projetado .....	29
TABELA 2.2: Faixas granulométricas ideais em função da dimensão máxima do agregado .....	32
TABELA 3.1: Fatores ligados à projeção por via seca e úmida .....	55
TABELA 3.2: Coeficientes de variação da resistência à compressão obtidos para via seca e via úmida em obras de grande consumo de material .....	57
TABELA 3.3: Resumo das características das máquinas de projeção CP-6 da ESTE e ALIVA 260 .....	63
TABELA 3.4: Capacidade do compressor para os equipamentos de projeção por via seca .....	74
TABELA 3.5: Vida útil das peças mais sujeitas a desgaste na CP-6 .....	84
TABELA 4.1: Valores estimados para os traços de mistura seca, reflexão e concreto projetado para um índice de reflexão de 25% .....	100
TABELA 4.2: Variação típica do traço do concreto projetado .....	100
TABELA 5.1: Influência do umidade na resistência à compressão axial do concreto projetado com umidificação convencional .....	133
TABELA 5.2: Influência do teor de umidade na resistência à compressão axial do concreto projetado com pré-umidificação a alta pressão .....	133
TABELA 5.3: Influência do teor de umidade (H) na compactação do concreto projetado com umidificação convencional ....	134
TABELA 5.4: Influência do teor de umidade (H) na compactação do concreto projetado com pré-umidificação a alta pressão .....	135
TABELA 5.5: Valores obtidos para a resistência à compressão para diversos teores de aditivo à base de aluminato ....	145
TABELA 5.6: Influência do teor de aditivo à base de carbonato na compactação do concreto projetado .....	148
TABELA 5.7: Resistência à compressão axial do concreto projetado executado em obra .....	150
TABELA 5.8: Valores obtidos do volume de vazios permeáveis do concreto projetado em obra .....	151
TABELA 5.9: Efeito da pré-hidratação na resistência à compressão axial do concreto projetado executado com cimento ARI .....	152
TABELA 5.10: Efeito da pré-hidratação na resistência à compressão axial do concreto projetado executado com cimento CPE .....	153
TABELA 5.11: Valores obtidos de resistência à compressão para as diversas pressões de ar comprimido .....	157
TABELA 5.12: Resultados obtidos para a reflexão em função da pressão de ar comprimido do tipo de bico utilizados no estudo .....	158
TABELA 5.13: Valores esperados para a reflexão em função do ângulo que o jato faz com a horizontal .....	162
TABELA 5.14: Resultados obtidos para a reconstituição de traço dos concretos que ficaram incorporados à parede segundo o ângulo de projeção .....	164
TABELA 5.15: Análise da compactação do concreto projetado com aditivos à base de carbonatos segundo o ângulo de projeção .....	166

TABELA 5.16: Análise da compactação do concreto projetado com aditivos à base de aluminato segundo o ângulo de projeção .....	171
TABELA 5.17: Influência do ângulo de projeção na resistência à compressão axial do concreto projetado com aditivo à base de aluminato .....	173
TABELA 5.18: Resultados obtidos para o coeficiente de permeabilidade do concreto projetado .....	174
TABELA 5.19: Caracterização das amostragens obtidas no acompanhamento de obras .....	176
TABELA 5.20: Resultados de resistência à compressão aos 28 dias de idade obtidos para cada uma das amostragens ....	179
TABELA 5.21: Resultados de resistência à compressão às 10 horas de idade obtidos na sexta à nona amostragem .....	179
TABELA 6.1: Limites admissíveis para avaliação do aproveitamento do mangoteiro .....	189
TABELA 6.2: Frequência de amostragem e realização dos ensaios no concreto projetado via seca .....	214
TABELA 6.3: Síntese das recomendações para o controle do processo de projeção .....	219



## RESUMO

Concreto projetado é aquele pneumaticamente transportado e projetado a alta velocidade, sobre uma superfície, sendo auto-compactado. Assim, denota-se que suas propriedades são dependentes do processo de projeção utilizado.

Desta forma, para se estudar o material, é importante ter-se o conhecimento do seu processo de produção (se por via seca ou úmida, equipamentos e mão-de-obra utilizados, etc.) e das propriedades específicas do concreto projetado (como a reflexão, o deslocamento e a liberação de poeira ou névoa) e as respectivas formas de controle.

Foi executado o estudo experimental do concreto projetado via seca, onde foi possível caracterizar algumas diferenças de comportamento em relação ao concreto convencional. Entre elas está o fato de que a maior compactação e resistência mecânica é obtida com o teor ótimo da mistura e não com a menor relação água/cimento. Constatou-se o fato da projeção do concreto no teto fornecer um material de melhor qualidade que aquele projetado na parede.

Finalmente, para a obtenção de um material boa qualidade, é fundamental o controle rigoroso do teor de aditivo acelerador, a utilização de bicos afunilados, pressão de ar comprimido adequada, pré-umidificação com injeção de água sob pressão e seguir as recomendações para o controle da qualidade do processo de projeção como um todo.

**ABSTRACT**

Shotcrete is concrete pneumatically conveyed and projected at high speed onto a surface, compacting itself. Thus its properties depend on the shooting process.

It is important to know the shooting process (wet or dry-mix process, equipments and working crew, etc.), the specific properties of shotcrete (rebound, sloughing and dust generation) and respective means of control.

An experimental study was made using dry-mix shotcrete, where it was possible to point out some differences of the plain concrete analysis. One of these is the high compaction and strength achieved with the optimum water/dry materials ratio and not the minimum water/cement ratio. Shotcrete, gunned in overhead, generates a better material compared to the vertical walls.

Finally, to obtain a good quality material, it's very important to make a rigorous control of the accelerator admixture content. Also, it is recommended to use a funnel-shaped nozzle, adequate compressed air pressure, hydromix with high water pressure and to follow the recommendations on all shotcreting process quality control.

## **CAPÍTULO I: INTRODUÇÃO**

### **1.1. OBJETIVO**

Este trabalho tem por objetivo a análise teórico-experimental de fatores ligados ao processo de projeção do concreto que intervêm na qualidade final do material e, conseqüentemente, devem receber atenção no momento de se executar o controle da qualidade do mesmo.

### **1.2. JUSTIFICATIVA**

O concreto projetado é uma forma alternativa de aplicação do concreto, cuja importância pode ser avaliada pelo grande volume produzido atualmente e a grande perspectiva de utilização futura. Apesar disto, as informações disponíveis sobre o assunto a nível nacional são muito escassas. Num levantamento bibliográfico realizado obteve-se poucos trabalhos específicos sobre concreto projetado publicados no Brasil até 1989.

Nos Estados Unidos, na década de 70 foram promovidos dois simpósios pelo *American Concrete Institute* (ACI), destinados à sua aplicação em obras subterrâneas, um em 1973<sup>(1)</sup> com 29 trabalhos publicados e outro em 1976<sup>(2)</sup> com 40 trabalhos publicados, o que representa um número maior que o da somatória de todos os trabalhos publicados sobre o tema no Brasil até 1992, que foram vinte e oito. Vários outros trabalhos foram publicados posteriormente em revistas e periódicos americanos colocando-se à disposição do público técnico norte americano e europeu uma série de normas e recomendações sobre a utilização do concreto projetado. A nível nacional ainda não existe nenhuma norma publicada.

A grande preocupação dos americanos era eliminar a grande quantidade de dúvidas que preocupava o meio técnico desde a década de 60. Reading<sup>(3)</sup>, na época, apontou como principais problemas "a grande variedade de opiniões e escasses de dados confiáveis sobre o concreto projetado - suas propriedades e desempenho - e sobre o equipamento e métodos de aplicação".

Essa grande diversidade de opiniões, proveniente de uma grande variedade de resultados, advém do fato de nem sempre se ter executado uma correta avaliação do material.

Palermo<sup>(4)</sup> relaciona a experiência brasileira de execução do concreto projetado com a realização de grandes obras como a contenção de taludes e os túneis da Rodovia dos Imigrantes; o revestimento definitivo do túnel sete do sistema Cantareira de abastecimento de água da região metropolitana de São Paulo, com 5.885m de extensão em rocha; os túneis em rocha e em solo, com 70km de extensão no total, executados pela Engefer na Ferrovia do Aço e os túneis metroviários em solo no prolongamento Norte da Companhia do Metropolitano de São Paulo.

Apesar do imenso volume de concreto projetado executado nestas obras o controle de qualidade foi, praticamente, inexistente. Prova disto residiu no fato dos construtores da Ferrovia do Aço necessitarem mudar o critério de aprovação de resistência característica para resistência média, para que o material fosse aprovado<sup>(5)</sup>. Isto atesta o fato dos executores não dominarem a tecnologia de projeção, uma vez que não conseguiam atender ao especificado.

Esta dissertação visa diminuir a carência que o setor técnico brasileiro possui no tema e fornecer informações sobre a influência do processo de projeção nas propriedades do concreto projetado. Conseqüentemente, procurou-se desenvolver também, ao final do trabalho uma análise de alguns dos aspectos do controle da qualidade do processo de projeção em função dos resultados obtidos tanto na parte experimental quanto no levantamento de informações junto à

bibliografia internacional.

Concomitantemente a este trabalho outros estão sendo desenvolvidos e, como este, tiveram origem no projeto de pesquisa EPUSP/CBPO/IPT-01 "Concreto projetado para túneis". Estes outros trabalhos abordam temas específicos do material concreto projetado, como a utilização de fibras e microssílica. Um outro tema importante, que guarda uma certa complementariedade a este, é a dosagem do material concreto projetado.

### **1.3. ENFOQUE DA PESQUISA**

A pesquisa tem seu enfoque dirigido ao estudo do concreto projetado pelo processo de via seca com máquina de projeção dotada de rotor de câmaras. Este é o processo mais empregado no Brasil até os dias de hoje. Só ao final da década de 80 e início da de 90 foram realizadas as primeiras utilizações da via úmida em larga escala, sendo o seu domínio restrito a algumas grandes construtoras.

Apesar do grande número de possibilidades de utilização do concreto projetado, este estudo direcionou-se para o uso do material no revestimento de túneis, onde são consumidos os maiores volumes.

### **1.4. METODOLOGIA ADOTADA**

Este trabalho principiou por uma extensa revisão bibliográfica, a qual possibilitou o levantamento das informações necessárias à caracterização do material e do processo de projeção, como também serviu de base para a elaboração das atividades experimentais.

A metodologia de ensaios utilizada, no que se refere especificamente ao concreto projetado, foi desenvolvida dentro do próprio projeto de pesquisa EPUSP/CBPO/IPT-01<sup>(6)</sup>. Uma vez que ao longo de todo o projeto de pesquisa se lançou mão destes ensaios, procurou-se utilizá-los de forma a viabilizar uma análise mais precisa dos fenômenos ligados ao concreto projetado. A maioria dos métodos de ensaio desenvolvidos no âmbito do projeto EPUSP/CBPO/IPT-01 estão sendo estudados para fins de normalização pela Comissão de Estudos CE 18:306 do CB 18 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

Os ensaios foram realizados em três situações, basicamente. A primeira seria em laboratório, utilizando-se dos recursos laboratoriais de locais onde se poderia dispor de condições ambientais uniformes. A segunda situação seria aquela definida como em laboratório de campo, isto é, foram utilizados os mesmos materiais, mão-de-obra e equipamentos empregados na execução de túneis só que em locais reservados à execução de ensaios dentro do canteiro de obras. Nesta situação era possível ter um melhor controle das variáveis inerentes ao processo. A terceira situação foi o próprio acompanhamento de obra, isto é, foram realizados ensaios no concreto projetado aplicado na execução dos túneis da Extensão Norte da Linha Norte-Sul do Metrô de São Paulo. Além disso, foram analisados os resultados do controle rotineiro da obra. Isto tinha o duplo objetivo de se verificar a existência de disparidades entre os resultados obtidos no laboratório de campo com os do próprio túnel e analisar a influência das melhorias implantadas nesta obra nas propriedades do material.

### **1.5. CONTEÚDO DA DISSERTAÇÃO**

A revisão bibliográfica do assunto compõe os capítulos II, III e IV. No Capítulo II, intitulado "O Concreto Projetado",

aborda-se a definição do concreto projetado, suas aplicações, seu histórico e evolução no Brasil e exterior, suas especificações e a utilização de fibras, microssílica e polímeros, isto é, dos concretos projetados especiais, que podem ser considerados como a tendência mais forte de utilização do material no futuro.

O Capítulo III descreve o processo de projeção. Neste capítulo descrevem-se os dois processos básicos disponíveis de projeção, ou seja, o de via seca e o de via úmida, detalhando-se mais o primeiro, e relacionando-se os principais equipamentos utilizados.

A partir dos conceitos básicos discutidos nos capítulos II e III faz-se, no Capítulo IV, um apanhado das principais características do material concreto projetado, procurando enfocar com maior detalhe os aspectos que o diferenciam do concreto moldado pela forma convencional, tais como a reflexão, os deslocamentos, a liberação de poeira, e outros. A principal preocupação é estabelecer os requisitos específicos de avaliação do concreto projetado, os quais diferem do concreto convencional, e assim evitar incorrer nos erros comuns.

No Capítulo V encontra-se a parte experimental do trabalho. Nele aborda-se a influência de aspectos do processo de projeção ligados aos materiais constituintes (umidificação e aditivo acelerador) e ao método de projeção (equipamento e velocidade e direção de projeção) nas propriedades do concreto projetado. Além disso, a partir da análise dos efeitos do método de projeção no concreto, pode-se ter uma idéia da influência da mão-de-obra no mesmo.

No Capítulo VI são feitas algumas recomendações para a execução do controle da qualidade do processo de projeção, cujo principal objetivo é fornecer alguns parâmetros de ação, uma vez que, atualmente, executa-se apenas um controle de produto acabado (quando isto ocorre). Estas recomendações abordam os cuidados a serem tomados antes, durante e após o serviço de projeção propriamente dito. Nos cuidados

anteriores á projeção estão incluídos os aspectos ligados à formação e qualificação da mão-de-obra ou mais especificamente ao treinamento de pessoal, à seleção de equipamentos, ao recebimento e armazenamento do material. Dentre os cuidados a serem tomados durante o serviço de projeção estão os cuidados na mistura, as regras básicas para a operação de projeção do concreto e para a segurança e higiene neste tipo de trabalho. Por último são analisados aspectos dos cuidados a serem tomados após a execução da projeção do material. Na verdade, nesta última etapa procura-se indicar algumas alternativas que podem levar à resolução dos problemas típicos do concreto projetado (a reflexão, o deslocamento, a heterogeneidade, a laminação). Para isso, foram descritos os possíveis procedimentos de correção a serem adotados dentro de um plano de ação corretiva.

Finalmente, no capítulo VII encontram-se as considerações finais sobre o trabalho.



## CAPÍTULO II: O CONCRETO PROJETADO

### 2.1. DEFINIÇÃO DO CONCRETO PROJETADO

Como é descrito a seguir, pode-se encontrar na literatura uma série de definições para concreto projetado. Todas estas definições têm como ponto em comum, o fato de serem uma descrição do processo de projeção.

Um exemplo disto é o *Gunite Contractors Association*<sup>(8)</sup> que define gunite como "uma mistura de cimento Portland e areia secos, perfeitamente miscigenados entre si, que passam por uma máquina de projeção sendo transportados por ar comprimido através de um tubo flexível, hidratados no bico de projeção no final deste tubo e depositado pela pressão de ar no local onde finalmente repousará". A definição de concreto projetado segundo essa mesma fonte seria "uma combinação proporcionada de cimento Portland, agregados e água que são misturados por métodos mecânicos e bombeados em estado plástico até o bico, onde adiciona-se ar para expelir o material" compactando-o pela força do jato de ar. Destas definições conclui-se que o gunite é uma argamassa projetada por via seca, pois não possui agregados graúdos, e o concreto projetado deverá ser necessariamente executado em via úmida.

O "*American Concrete Institute (ACI) Committee 506*" no seu "*Guide to Shotcrete*"<sup>(9)</sup> define concreto projetado como "argamassa ou concreto pneumaticamente projetado a alta velocidade sobre uma superfície". Neste caso tem-se uma definição mais sucinta e abrangente, pois insere a possibilidade de utilizar ou não agregados graúdos e optar pelo processo de projeção, se via seca ou úmida.

Hills<sup>(10)</sup>, pesquisador inglês, define concreto projetado como sendo "uma mistura de cimento, agregado e água

projetados a alta velocidade a partir de um bico até um local onde produzirá uma massa densa e homogênea". Esta versão foi complementada pelo também inglês Webb<sup>(11)</sup> que salientou o papel da corrente de ar para garantir a alta velocidade de projeção.

Os suíços<sup>(12)</sup>, definiram concreto projetado como sendo aquele que é "transportado através de uma tubulação fechada sob pressão, em cuja saída se projeta sobre uma superfície, compactando-se simultaneamente".

Nestas definições observa-se a nítida preocupação de valorizar a alta velocidade de projeção como um meio para se garantir a auto-compactação do concreto projetado. Esta característica, juntamente com o fato de não necessitar fôrmas, apenas de um anteparo é suficiente, ajudou na difusão do emprego deste material.

No Brasil a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) através da Comissão de Estudos CE 18:306<sup>(13)</sup> fez uma boa definição contemplando todos estes aspectos: "o concreto projetado é um concreto com dimensão máxima do agregado superior a 4,8 mm, transportado através de uma tubulação e projetado, sob pressão, a elevada velocidade, sobre uma superfície, sendo compactado simultaneamente".

O que fica claro em todas estas definições de concreto projetado é a sua total interdependência com o processo de projeção, o que constitui o enfoque principal deste trabalho.

## **2.2. APLICAÇÕES DO CONCRETO PROJETADO**

Segundo a bibliografia consultada<sup>(8)(9)(12)(14)</sup>, pode-se relacionar uma série de 40 aplicações diferentes para o concreto projetado, o que denota a grande versatilidade deste material. As diferentes aplicações podem ser agrupadas

nos seguintes grandes temas: revestimentos, obras subterrâneas, contenção de taludes, reparos e reforços estruturais, impermeabilizações, elementos auto-portantes e formas livres.

### 2.2.1. Revestimentos

Neste tipo de aplicação do concreto projetado encontram-se as obras de revestimento de fachadas ou estruturas de concreto convencional (para protegê-las do intemperismo) e de estruturas metálicas, para protegê-las do fogo. O concreto projetado pode ser utilizado em conjunto com impermeabilizações, tanto para regularização do substrato como para proteção das mesmas.

Duas grandes aplicações do concreto projetado como revestimento estão na construção de túneis pelo método NATM (*New Austrian Tunnelling Method*)<sup>(15)</sup> e no revestimento refratário<sup>(14)</sup>, notadamente de fornos da indústria metalúrgica e cimenteira.

No caso dos túneis, além do papel estrutural analisado mais adiante, o concreto projetado deverá proteger a obra do túnel contra a penetração de água e agentes agressivos do solo. Os túneis executados em presença de água podem apresentar uma série de problemas<sup>(15)</sup>, o que se encontra mais detalhado no item 4.7.1.1.

Neste caso, portanto, o concreto projetado deve ter baixa permeabilidade e ser homogêneo para garantir uma boa durabilidade para a obra subterrânea. Uma outra característica das obras de túneis é o elevado grau de insalubridade provocado pela grande liberação de poeira durante a projeção<sup>(16)</sup>, o que faz com que o controle desta poeira seja de importância fundamental.

O concreto projetado refratário consiste basicamente<sup>(14)</sup>

numa mistura de cimento Portland comum ou cimento aluminoso e agregados refratários como, por exemplo, tijolos refratários moídos. As funções dos revestimentos refratários são: prevenir o superaquecimento da estrutura externa (aço, concreto ou alvenaria), agir como revestimento protetor da estrutura externa (prevenir corrosão), minimizar as perdas de calor do fluxo de gases e impedir que a temperatura interna da chaminé desça até o ponto de orvalho do ácido dos resíduos gasosos.

### 2.2.2. Obras subterrâneas

Na construção de túneis o concreto projetado deve, além da função de revestimento anteriormente comentada, desempenhar uma função estrutural adequada. Quando o maciço é rochoso esta função estrutural pode acontecer devido aos seguintes fatores<sup>(15)</sup>:

- a. O impacto obtido com a projeção do concreto induz ao preenchimento de juntas, fissuras, junções e irregularidades da superfície do substrato rochoso, proporcionando certa ligação entre os blocos de rocha;
- b. O concreto projetado impede a percolação de água pelas juntas da rocha e, desse modo, impede a lixiviação dos finos das juntas e a deterioração do maciço rochoso pelo contato com o ar e a água;
- c. O concreto projetado por sua própria resistência e a aderência à rocha impede a queda de blocos soltos;
- d. Camadas de concreto projetado de 15cm ou mais proporcionam um arranjo estrutural comparado a anéis fechados ou cascas de concreto em arco.

Jones<sup>(15)</sup> realça a importância da resistência ao cisalhamento e a aderência ao substrato como pontos fundamentais para evitar o desprendimento de blocos de rocha

do teto do túnel. Para melhorar a resistência ao cisalhamento pode-se lançar mão da adição de fibras e, para melhorar a aderência, utiliza-se a microssílica, a qual também melhora as propriedades mecânicas.

No Brasil, além das obras em rocha, executa-se uma grande quantidade de túneis pelo método NATM em solos como nas obras do Metrô de São Paulo<sup>(17)</sup> que, além do risco de desprendimento de blocos soltos (comuns em solos argilosos fraturados), apresentam maiores deformações<sup>(18)</sup>, exigindo um maior ganho de resistência nas primeiras idades, normalmente conseguido com o uso de aditivos. De qualquer forma, como aponta McClure<sup>(19)</sup> o concreto projetado "é um elemento efetivo de suporte" em obras subterrâneas e "não só o é para rochas fraturadas, mas também em solos e áreas bastante molhadas".

### **2.2.3. Contenção de taludes**

O concreto projetado utilizado para a contenção de taludes tem um papel semelhante ao das obras subterrâneas<sup>(12)</sup>. Ocorrem, porém, certas diferenças significativas pelo fato dele estar exposto ao intemperismo, notadamente as variações de temperatura. Sofre a ação do vento e insolação direta, que proporciona uma secagem prematura com conseqüente risco de retração e fissuramento intenso. Devido a estes fatores exige-se que o concreto projetado nestas condições apresente a maior compacidade possível e que seja executado numa espessura adequada e com a armadura necessária. Normalmente, não se faz necessária a utilização de aditivos aceleradores de pega ou endurecimento mas, quase sempre, exige a utilização de procedimentos de cura adequados.

Neste emprego específico fica realçado o que Kaden<sup>(20)</sup> chamou de consideração ambiental para o concreto projetado: Ele analisa a necessidade do projetista americano obedecer à rígida legislação que controla o impacto ambiental das obras

civis. Seja qual for a situação da obra, "o impacto ambiental pode ser reduzido pelo estabelecimento de alguns obstáculos naturais à visão" (como plantas trepadeiras<sup>(12)</sup>), e o uso de "cores em tons que mimetizem o concreto projetado com os arredores". O concreto projetado colorido pode ser conseguido com a adição de 2% a 8% de óxido de ferro<sup>(21)</sup>, o que está disponível no mercado brasileiro em vários tons. Essa possibilidade de variar a tonalidade da cor, abre espaço para a utilização do concreto projetado colorido em meios urbanos, reduzindo a poluição visual.

#### 2.2.4. Reparos e reforços estruturais

Os franceses<sup>(22)</sup> têm como possíveis aplicações para o concreto projetado no campo da recuperação de estruturas os seguintes serviços: preenchimento de cavidades, rejuntamento de alvenaria, execução de um revestimento superficial de proteção, aumento da seção resistente de concreto e execução de elementos portantes suplementares. É um dos principais campos de aplicação do concreto projetado, principalmente dos que são chamados pelo ACI<sup>(9)</sup> como concretos projetados especiais, onde se incluem aqueles destinados às aplicações sujeitas à deterioração química e à corrosão. As propriedades especiais são conseguidas às custas de adições como microssílica e fibras ou de aditivos como os silicatos de sódio e potássio, que trabalham como aceleradores de pega.

A utilização de microssílica no concreto projetado para a recuperação de estruturas tem se mostrado vantajosa no caso de obras marítimas. Assim relata Morgan<sup>(23)</sup> ao descrever a recuperação do *Pier B-C do Canadá Place Trade & Convention Centre* em Vancouver B.C. de 60 anos de idade, ocorrida em 1983. Isto porque, a microssílica teria um efeito positivo tanto nas propriedades ligadas à aplicabilidade do material quanto à sua durabilidade<sup>(23)(24)</sup>.

A utilização do concreto projetado armado com tela no reforço de vigas, muito empregado nas recuperações de estruturas de concreto, foi estudada a nível teórico e experimental por Lub e Van Wanroij<sup>(25)</sup>. Eles estudaram três outros métodos de reforço de vigas para comparação: colagem de chapas de aço, instalação de uma flange pré-moldada e revestimento com concreto projetado. "A vantagem dos dois primeiros métodos é o pequeno aumento nas dimensões da viga. As desvantagens são: a separação parcial das chapas de aço coladas, o fato de serem sensíveis a ataques físicos e químicos, a exigência de mão-de-obra especializada durante a execução e não serem a prova de fogo". Já o uso da flange tem as desvantagens de exigir "chumbadores ou outros conectores de aço para prevenir a separação entre ela e a superfície do concreto antigo e a necessidade de fôrmas". Conclui que o reforço de vigas com concreto projetado armado com tela é de aplicação prática com boa durabilidade estimada com economia de fôrmas.

No Brasil foram realizadas várias obras de reparo e reforço de estruturas de concreto armado com o auxílio do concreto projetado, tendo-se alguns exemplos citados no item 2.3.2. No entanto, raras são as experiências documentadas a respeito.

#### **2.2.5. Impermeabilizações**

Um concreto projetado de boa qualidade é muito pouco permeável<sup>(22)</sup>. Por essa razão, ele é utilizado intensamente para impermeabilizações de obras hidráulicas e de cavidades subterrâneas<sup>(12)</sup>. Normalmente, o que compromete o desempenho do concreto projetado é o aparecimento de fissuras devidas à retração, à variação térmica, ao carregamento e recalques ou mesmo as falhas de execução do mesmo. Para evitar este tipo de problema pode-se começar pela substituição do concreto por um revestimento flexível, ou se lançar mão de uma

armadura apropriada. Outro cuidado apontado para a execução, seria o de evitar o contato do concreto com a água antes de plenamente endurecido para evitar a lixiviação dos finos.

A exigência de impermeabilidade do concreto projetado é evidente na execução de reservatórios. Dykmans<sup>(27)</sup> apresentou, em 1966, o que chamou de "técnicas especiais de aplicação" para a execução dos mesmos, onde se destaca a cura. A cura tem por objetivos garantir a hidratação apropriada do cimento e prevenir a fissuração devida à retração. Para que ela tenha sucesso não basta uma cura simples (umedecimento da superfície durante uma semana) mas sim lançar mão de uma cobertura contínua de água (no caso dos pisos) ou de membranas de cura. Outra recomendação importante seria garantir a boa qualidade da execução reservando-se este serviço àquelas companhias com experiência comprovada.

Os fatores que proporcionam o desempenho satisfatório do concreto projetado na execução de reservatórios são os seguintes, segundo Schupack e Poston<sup>(28)</sup>:

- a. Proporcionamento e mistura adequada dos materiais constituintes;
- b. Preparação adequada das superfícies para garantir a boa aderência;
- c. Ausência de bolsões de areia produzidos pelo aprisionamento do material da reflexão;
- d. Garantia do cobrimento adequado da armadura;
- e. Fazer as considerações adequadas durante o projeto para minimizar a fissuração;
- f. Revestimento adequado da armadura ativa cujo o espaçamento deve ser tal que garanta o pleno envolvimento de cada fio e permita, também, a boa aderência entre o concreto projetado fresco e o antigo.

Isto foi comprovado pelos autores citados após analisarem



cerca de cem reservatórios de concreto projetado protendido. Alguns deles tinham mais de trinta anos e, pelo seu estado, comprovaram que o concreto projetado é um material durável nesta aplicação. Os principais problemas de deterioração ocorreram nas coberturas dos reservatórios, mais sujeitos ao intemperismo e com maior dificuldade de aplicação, o que fez com que suas características variassem com maior intensidade.

#### **2.2.6. Elementos auto-portantes**

Uma das utilizações de concreto projetado como elemento auto-portante está na execução de edificações. Um exemplo disto é o sistema patenteado de construção de casas de Turner<sup>(29)</sup>, que utiliza fôrmas infláveis como anteparo para a projeção.

A aplicação construtiva do concreto projetado é muito flexível, indo das volumosas barragens às finas estruturas em casca<sup>(30)</sup>. Nesta última situação, pode-se executar a estrutura posicionando uma tela metálica e projetando-se sobre ela. Após o endurecimento desta primeira camada, executa-se a segunda pelo lado oposto de modo a formar uma estrutura tipo sanduíche<sup>(12)</sup>. É muito importante nestes casos o controle de execução da obra para que se garanta o cobrimento da armadura. Além disso, a mão-de-obra tem papel preponderante na garantia da boa compactação do material, sem apresentar falhas que proporcionem uma movimentação danosa à estrutura<sup>(30)</sup>. Neste caso, como a estrutura estará exposta à insolação direta, devendo-se tomar cuidado com os riscos de retração e fissuração.

### 2.2.7. Formas livres

Devido à sua versatilidade na criação de elementos sem formas geometricamente rígidas, o concreto projetado se adequa muito bem à execução de simulações de terreno natural em zoológicos imitando rochas<sup>(18)(23)</sup> ou para a execução de esculturas. Alguns<sup>(8)</sup> apontam esta última utilização como a motivadora para o surgimento do concreto projetado ainda no século passado.

## 2.3. HISTÓRICO E EVOLUÇÃO

### 2.3.1. No exterior

O inventor do processo de projeção de uma argamassa, o que posteriormente redundou na projeção do concreto, foi o Dr. Carl Ethan Akeley, curador do *Field Museum of Natural Science* de Chicago nos EUA. Ele desenvolveu o processo por volta de 1895, com o objetivo provável de aplicar argamassa na construção de réplicas de animais pré-históricos<sup>(8)</sup>. Isto ocorreu pelo fato do sistema de moldagem convencional não possibilitar a execução de réplicas com boa resolução para as formas volumosas da musculatura dos grandes animais. O equipamento inicialmente utilizado consistia numa câmara simples pressurizada por ar comprimido. O ar comprimido forçava a saída do material da câmara por um bocal e conduzia-o por uma mangueira conectada a este até um bico de projeção onde era umidificada. Este equipamento foi aperfeiçoado com a colocação de uma segunda câmara pressurizada sobre a primeira, o que permitia a alimentação desta sem interromper a projeção. Além disso foi adaptado um rotor de câmaras dotado de um agitador na câmara inferior, o que possibilitou a projeção contínua do material. Este

equipamento, patenteado em 1911, é utilizado até os dias de hoje, principalmente nos serviços de recuperação de estruturas<sup>(12)</sup>.

Existe uma segunda versão para a real motivação da invenção do processo de projeção<sup>(12)</sup>, que seria a necessidade de revestimento da fachada do *Field Columbia Museum* de Chicago nos EUA. De qualquer forma, isto de fato ocorreu por volta de 1907, tornando-se a primeira aplicação prática do método em construção civil. Já em 1911 o processo era utilizado no revestimento de estruturas metálicas como proteção contra incêndio.

O rápido desenvolvimento da utilização do processo se deve em grande parte à atividade da *Cement-Gun Company*, fundada em Allentown, Pensilvânia, EUA, que lhe deu o nome de *gunite*. Ainda em 1911, utilizou o *gunite* para consolidar os taludes de *Culebra-Cut*, atualmente *Gaillard-Cut*, na linha divisora de águas do canal do Panamá. Assim, foram surgindo algumas "marcas concorrentes"<sup>(9)</sup> como *Guncrete*, *Pneucrete*, *Blastcrete*, *Blocrete*, *Jetcrete* para descrever o processo que se difundia pelo mundo. Em 1921, um colaborador da Allentown fundou a *Torkret GmbH* na Alemanha, ajudando a difundir a utilização do concreto projetado por toda a Europa<sup>(12)</sup>. No começo da década de trinta a *American Railway Engineering Association* apresentou o termo genérico *shotcrete* que, em 1951 foi adotado pelo *American Concrete Institute*, ganhando aceitação universal nos Estados Unidos. Da mesma forma, na Inglaterra, o concreto projetado foi denominado *sprayed concrete*, na Alemanha *Spritzbeton*, na França *béton projeté* e na Espanha *hormigón proyectado*.

A máquina de duas câmaras tinha capacidade de projetar uma mistura de cimento e agregados com diâmetro máximo inferior a 10mm<sup>(12)</sup> pelo processo de via seca. A projeção de misturas com agregados de maior diâmetro só foi possível a partir de 1950, aproximadamente, com a invenção da máquina de projeção com rosca-sem-fim por parte do mecânico suíço Georg Senn. Isto possibilitou a utilização do concreto projetado em obras subterrâneas onde ele assumiu sua moderna concepção.

No entanto, este tipo de equipamento não é mais utilizado, tendo sido substituída pela máquina de projeção com rotor de câmaras. A concepção deste último ocorreu nos Estados Unidos depois da Segunda Guerra Mundial, a partir de uma patente holandesa de 1929.

Uma máquina de rotor de câmaras foi comprada pela *Meynadier & Cie SA* de Zurique que chegou a um modelo melhorado em 1957, denominado *Meyco GM57*, cujo princípio foi adotado por outros fabricantes, inclusive brasileiros<sup>(32)</sup>. Na década de 50 também ocorreu a invenção do processo de projeção por via úmida em conjunto com a alimentação contínua<sup>(9)</sup>.

As décadas de 60 e, principalmente a de 70, foram marcadas por uma grande preocupação, por parte dos americanos, quanto à divulgação de informações sobre o concreto projetado<sup>(1)(2)(3)</sup>. Na década de 60 o uso da máquina de projeção de câmara dupla ou simples ainda era apontada como a típica da via-seca<sup>(33)</sup> e ainda se discutia a aplicação de concreto projetado com agregados graúdos<sup>(34)</sup> em túneis. Nessa discussão já era apresentado o equipamento de projeção *ALIVA BS-12*, com rosca-sem-fim, e a reflexão já era apontada como a consideração mais importante para o agregado graúdo, devendo-se empreender todos os esforços no sentido de minimizá-la.

Começaram a surgir na mesma década uma série de equipamentos de projeção por via úmida<sup>(35)(36)</sup>.

No começo da década de 70 surgiram os braços mecânicos (robôs) para aplicação de concreto projetado via úmida, principalmente<sup>(37)(38)</sup>. No entanto, até esse momento, não era possível encontrar um equipamento que fosse capaz de projetar o concreto por via úmida com agregado graúdo e aceleradores de pega de maneira satisfatória<sup>(39)</sup>. A maior causa deste desacerto residia no fato de se dispor apenas de aceleradores de pega em pó, que dificultavam intensamente a realização da dosagem precisa dos mesmos na via úmida. Isto foi decisivo para a consumação do domínio da via seca no concreto projetado até aquele momento.

Nessa mesma época ocorreu a primeira tentativa de viabilização de concreto projetado polímero<sup>(40)</sup>. No decorrer da década surgiu a possibilidade de aplicação de outros materiais no concreto projetado, tais como as fibras<sup>(41)</sup> e os aditivos aceleradores de pega à base de aluminatos<sup>(42)</sup>. Isto redundou numa maior preocupação com o equipamento de projeção, no sentido de se viabilizar a projeção com fibras e aditivos em pó ou líquidos com dosadores adequados<sup>(43)</sup><sup>(44)</sup>, o que se discute até os dias de hoje. Rogers<sup>(45)</sup> apresentou em 1977 o equipamento de projeção via seca com calha em "U" como "o equipamento de quarta geração" para o concreto projetado. Não se pode afirmar, no entanto, que seria ele uma grande novidade, pois foi patenteado em 1960. Por outro lado, a máquina de projeção via seca com rotor de câmaras começou a ganhar o espaço no mercado que redundaria no domínio quase que total (para a projeção via seca) na década de 80<sup>(46)</sup> quando foi apontada como uma "otimização de difícil superação"<sup>(12)</sup>. Tamanha foi a confiança depositada no equipamento, que a empresa Aliva a lançou no final da década de 80 uma versão para projeção por via úmida<sup>(47)</sup><sup>(48)</sup>, tornando-se assim a única máquina a realizar projeções com sucesso nos dois processos, seco e úmido.

Durante os anos 80 a microssílica teve seu emprego no concreto projetado passando do incipiente à larga escala<sup>(23)</sup>, principalmente em conjunto com fibras de aço. Isto foi estimulado, nesta última situação particularmente, pelo fato interessante de se ter uma redução na reflexão tanto para a via úmida<sup>(49)</sup> como para a via seca<sup>(50)</sup>.

Finalmente o ACI<sup>(9)</sup> aponta, em 1990, como áreas prioritárias para pesquisa e desenvolvimento as seguintes:

- a. Dosagem racional do concreto projetado;
- b. Projeto de otimização do bico;
- c. Aperfeiçoamento dos ensaios de campo;
- d. Qualidade dos materiais;

- e. Mecanização do equipamento;
- f. Avaliação do substrato e
- g. Automação do processo.

Nestes pontos denota-se a grande preocupação existente quanto à otimização do equipamento de projeção, a dosagem e o controle da qualidade, que inclusive estão sendo objeto de estudo na EPUSP<sup>(6)</sup>.

### 2.3.2. No Brasil

Na história do concreto projetado no Brasil pode-se constatar um permanente atraso tecnológico. Só em 1948 houve a primeira publicação técnica a respeito, na qual Molinari<sup>(51)</sup> introduz o processo "cement-gun" para a restauração de estruturas. Neste artigo o autor procurou descrever o processo de projeção de argamassas ("gunita") com a máquina de câmara dupla inventada por Akeley adaptado às condições nacionais. Assim, por exemplo, o traço adotado é o recomendado pelo *American Railway Engineering Association (A.R.E.A.)* (apud Molinari<sup>(51)</sup>), que consistia em "um saco de cimento de 42,5 kg para 85 litros de areia seca". Há neste artigo algumas recomendações interessantes sobre o controle de qualidade do material. A trabalhabilidade do material (coletado em um tacho sob o jato do 'cement-gun') deve apresentar no ensaio do *flow-table*, segundo o método MB-1, um índice de consistência de 180-200mm".

Mostra também uma boa visão da necessidade de controle do processo de projeção para se garantir a boa qualidade do material projetado. Isto fica claro quando o autor afirma que "a qualidade da gunita depende, em boa parte, da habilidade dos operários que a lançam".

A experiência brasileira de execução do concreto projetado

estava, normalmente associada com a realização de grandes obras<sup>(4)</sup>.

No entanto as informações obtidas com essa experiência não foram divulgadas ao meio técnico e quando o eram se fazia de maneira muito restrita. Prova disso é a grande carência de trabalhos nacionais publicados na década de 70.

Uma das exceções a esta regra coube a Eckschimidt<sup>(52)</sup> que em 1971 publicou o artigo "O concreto projetado visto por quem conhece". Neste trabalho o autor já apresenta os três tipos principais de máquinas de projeção via seca, quais sejam o de câmara dupla, o de rosca-sem-fim e o de rotor de câmaras. Além disso, são abordados de maneira clara alguns pontos importantes como o comprometimento das resistências finais do concreto quando da utilização de aditivos aceleradores de pega e endurecimento, quer sejam líquidos ou em pó; a necessidade de controle dos serviços para melhoria das propriedades do concreto projetado, principalmente a reflexão; o fato de se ter sempre uma reflexão mais rica em agregados graúdos que a mistura que entrou na máquina e, conseqüentemente, um maior consumo de cimento no concreto que efetivamente se fixou ao alvo de projeção. Este último aspecto passou "despercebido" até recentemente, pois os responsáveis pelo controle do fator a/c em obras de túneis não o levaram em conta nas suas determinações, como foi alertado por Prudêncio<sup>(53)</sup>.

Outras exceções, foram o artigo publicado por Ferreira<sup>(54)</sup> em 1972 intitulado "Concreto Projetado Jatocret", voltado para a recuperação de estruturas, e a realização do Primeiro Seminário DERSA - Rodovia dos Imigrantes em 1976. Neste seminário foram discutidos alguns dos problemas encontrados na execução dos onze túneis pelo processo do NATM, dentre os quais o comportamento do concreto projetado quando da ação de carregamentos inesperados onde se chegou a constatar trincas entre ele e a cambota e recalques de até 40cm<sup>(55)</sup>. Além disso é feita uma descrição do processo construtivo dos túneis<sup>(56)</sup>, sem no entanto tecer comentários com maiores detalhes sobre o concreto projetado, o qual foi apontado

como uma "nova tecnologia"<sup>(57)</sup>.

Papel importante, pelo menos a nível de publicações, teve o Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON), que possibilitou a publicação de vários trabalhos sobre o assunto. Numa destas publicações de 1982<sup>(58)</sup>, já se apontava a possibilidade concreta de empregar o concreto projetado como revestimento definitivo de túneis escavados em solo, o que demonstrava uma confiança crescente no material com relação à sua durabilidade.

Até o final da década de 80 a tecnologia que se dispunha no Brasil era, realmente, a da via seca, como atestou Cipriani<sup>(59)</sup>. No entanto já existiam preocupações quanto à normalização<sup>(60)</sup><sup>(61)</sup>. Além disso já se dispunha de equipamento de projeção nacional a algum tempo, fabricado pela Este Industrial e Comercial Ltda, muito semelhante ao fabricado internacionalmente pela Aliva (item 3.2.2.3.).

Nos últimos cinco anos, as grandes empreiteiras passaram a investir mais em concreto projetado. Uma das formas de investimento foi a importação de equipamentos de projeção por via úmida (robôs, bombas, dosadores) ou mesmo o desenvolvimento destes em conjunto com os fabricantes. Concomitantemente foram promovidos projetos de pesquisa internos ou externos, como foi o inserido num convênio entre a Companhia Brasileira de Projetos e Obras - CBPO e a Universidade de São Paulo ou, mais especificamente, com a Escola Politécnica. Isto foi motivado por alguns fatores como a grande quantidade de obras em andamento<sup>(62)</sup> e a elevação cada vez maior dos custos de desapropriação, o que tenderia a intensificar a situação devido à, cada vez mais fácil, viabilização econômica dos túneis<sup>(63)</sup><sup>(64)</sup>. Um outro aspecto interessante é que, ao contrário das barragens, os túneis poderiam trazer benefícios ao meio ambiente como ocorreu na construção da Rodovia Carvalho Pinto em Jacareí, São Paulo. Lá optou-se pela execução de túneis em lugar de cortes que destruiriam um trecho da mata atlântica, o que apresenta uma dificuldade a menos para a aprovação dos relatórios de impacto ambiental (RIMA).



A título de ilustração pode-se citar as seguintes obras com túneis em andamento naquela época na Grande São Paulo:

- a. Extensão Norte do Metrô;
- b. Extensão Leste do Metrô;
- c. Linha Paulista do Metrô;
- d. Túneis sob o Rio Pinheiros, avenida Presidente Juscelino Kubitschek e Parque do Ibirapuera da EMURB.

Com a elevação dos custos de desapropriação, esta situação tenderia a se intensificar devido à, cada vez mais fácil, viabilização econômica dos túneis<sup>(64)</sup>.

Fruto dessa grande atividade foram as primeiras testes realizados para viabilizar a projeção de concreto com adições de fibras e microssílica<sup>(65)</sup> e a execução, pela primeira vez no Brasil, do revestimento final de dois túneis com concreto projetado por via úmida em São Paulo<sup>(66)</sup>. No entanto, esta tentativa de recuperar o atraso tecnológico que marcou a história do concreto projetado no Brasil e "acompanhar de perto o nível tecnológico dos países desenvolvidos"<sup>(67)</sup> nem sempre foi seguido pelo aperfeiçoamento das especificações como se verá no próximo item.

#### **2.4. ESPECIFICAÇÕES**

Como já foi comentado anteriormente, para se definir concreto projetado deve-se, necessariamente, lançar mão da descrição do processo de projeção. Para se especificá-lo isto também acontece e é de importância fundamental. Assim, deve-se especificar também o processo de projeção que deverá ser utilizado, pois as propriedades do material e o processo de projeção são totalmente interdependentes. No entanto, neste item não será abordado o processo de projeção, que

será tema do próximo capítulo, ficando então restrito aos requisitos exigidos do material.

#### **2.4.1. Materiais constituintes**

Com exceção feita à granulometria, os materiais especificados para uso no concreto projetado têm suas propriedades controladas segundo a normalização vigente para o concreto convencional<sup>(5)(12)(67)(68)(69)</sup>. No entanto, como afirmam os suíços da Aliva<sup>(12)</sup>, "as opiniões sobre a curva granulométrica ideal não são unânimes, muito pelo contrário", pois o único ponto que têm em comum é a continuidade. Isto se deve ao fato das diversas condições que a "curva granulométrica ideal" deve atender, a começar pelo próprio equipamento de projeção a ser utilizado. Neste aspecto, a via seca, em relação á via úmida é "muito mais tolerante no que se refere à trabalhabilidade"<sup>(66)</sup> pelo fato de apresentar fluxo aerado. Assim, são de particular importância as recomendações do fabricante, quando se encontram disponíveis.

Outro importante fator, referente à granulometria, que é de grande importância para o concreto projetado é a dimensão máxima característica do agregado. Apesar dos catálogos de fabricantes de equipamentos de projeção por via seca admitirem a possibilidade de projeção de misturas com agregados de dimensão máxima característica de 25mm<sup>(32)(70)(71)</sup>, eles próprios admitem que a prática tem indicado que o equilíbrio técnico e econômico é conseguido com dimensões máximas abaixo de 16mm<sup>(12)</sup>. Isto se deve ao fato de grãos maiores implicarem num maior desgaste do equipamento (caso não seja seixo rolado) e numa maior reflexão<sup>(12)</sup>.

#### 2.4.2. Concreto projetado para túneis

O campo de aplicação do concreto projetado que possui um maior nível de detalhamento na sua especificação é a execução de túneis pelo processo NATM. Nele são exigidas propriedades variadas como elevadas resistências a baixas e maiores idades, estanqueidade e durabilidade que garanta uma vida útil de 100 anos<sup>(72)</sup>. No entanto, muitas informações permanecem num nível precário de conhecimento, principalmente no que se refere às resistências a baixa idade.

A resistência à compressão e, indiretamente, a deformabilidade do concreto projetado é um dos pontos mais importantes no que se refere à sua especificação. Isto ocorre porque se utiliza o concreto projetado como escoramento em túneis, o que corresponde à situação de avanço do mesmo, na frente de escavação, onde existe um dos maiores riscos de acidentes na construção civil, segundo Celestino<sup>(73)</sup>. Neste mesmo trabalho, ele alerta para o fato de que "não se dispõe de modelos práticos e confiáveis para o dimensionamento do suporte recém-lançado de concreto projetado". Isto implica na existência de dificuldades no estabelecimento dos requisitos de projeto e controle do material no que se refere à resistência à compressão. Normalmente, estes requisitos são estabelecidos a partir de curvas de evolução da resistência com o tempo, as quais foram elaboradas com base na experiência e na prática corrente estrangeira, como é o caso das curvas adotadas na Áustria<sup>(69)</sup> (Figura 2.1.). Outro exemplo desta curvas, de caráter mais simplificado, está apresentado na Figura 2.2.

Estas curvas da Figura 2.1 definem os valores mínimos a serem atingidos pela resistência do concreto no período de 6 minutos a 24 horas. A escolha das curvas é feita segundo a situação do maciço a ser escorado pelo material<sup>(69)</sup>. Assim sendo, a Curva J1 é indicada quando o concreto projetado precisa ser aplicado o mais rapidamente possível, em grossas

camadas (inclusive no teto), com infiltrações de água e na ocorrência de tensões devidas a atividades de escavação realizadas logo após o lançamento do material (Por exemplo: perfurações na rocha, explosões, etc.). Essa já é uma situação exigente do túnel, dependendo da geologia do maciço, o que não foi especificado pelos austríacos<sup>(69)</sup>. A Curva J2 é indicada quando se soma às condições anteriores o fato de existir o desenvolvimento rápido de pressões ativas do maciço no revestimento do túnel.

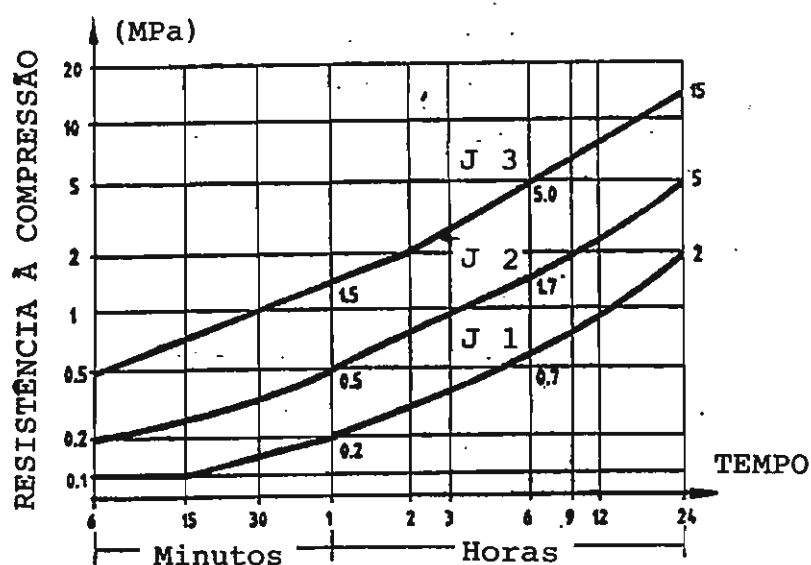


FIGURA 2.1: Requisitos austríacos para a evolução da resistência do concreto projetado a baixas idades.<sup>(69)</sup>

A escolha da faixa de utilização depende também do grau de utilização do concreto recém projetado. Isto é, como o concreto sofre carregamentos logo após o seu lançamento, quando as reações de hidratação estão simplesmente principiando, a sua deformação lenta é intensificada. Assim, mesmo sendo as deformações de fluência preponderantes no comportamento do material, são adotados modelos elásticos e elasto-plásticos de dimensionamento<sup>(73)</sup>. Para maior segurança, o que os projetistas procuram fazer é exigir um rápido desenvolvimento de resistências a baixa idade.

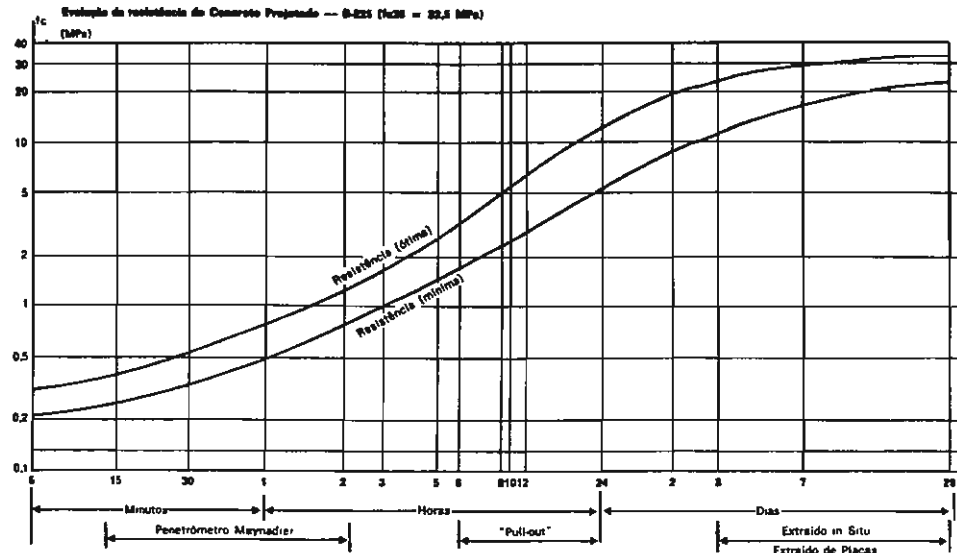


FIGURA 2.2: Evolução da resistência do concreto projetado com o tempo<sup>(4)</sup>.

Como as altas resistências a baixa idade, obtidas com aditivos aceleradores, implicam numa perda de desempenho a maiores idades, a adoção da curva J3 como referência mínima só é indicada em casos excepcionais<sup>(69)</sup>.

O controle das resistências do concreto desde as baixas idades, no entanto, não é usual nas obras brasileiras<sup>(73)</sup>. Isto, no entanto, caminha para uma resolução através da utilização de equipamentos como a Agulha de Meynadier e o Penetrômetro de Energia Constante<sup>(74)</sup> que farão parte do grupo de textos normativos sugeridos à ABNT, destinados ao concreto projetado. Estes equipamentos permitem avaliar a resistência do concreto desde os primeiros instantes depois da projeção até o momento em que é possível se efetuar a extração de testemunhos<sup>(74)</sup>. Como não se tinha essa metodologia disponível, as especificações brasileiras fixavam a idade mínima de 8 ou 10 horas para a determinação da resistência do concreto quando, normalmente, já era possível a extração.

Para a execução dos Túneis da Ligação Ferroviária Belo Horizonte-São Paulo, ocorrida no final da década de 70, a especificação da resistência do concreto projetado a baixas idades tinha como valores mínimos 5 MPa a 10 horas e 10 MPa a 24 horas<sup>(5)</sup>. Posteriormente, optou-se por especificar resistências características, como ocorreu nas obras da extensão norte do Metrô de São Paulo<sup>(68)</sup> onde se tinha 2,5 MPa a 10 horas e 5 MPa a 3 dias. Mais recentemente, a tendência de optar pela especificação de resistências médias da ordem de 5,5 MPa a 10 horas e 10 MPa a 24 horas<sup>(75)</sup> (muito próximo do que fazem os ingleses<sup>(76)</sup> com 4 MPa a 10 horas e 10 MPa a 24 horas) limitando-se a variação da mesma parece se consolidar como também vem acontecendo com os requisitos de resistência para maiores idades, conforme descrito a seguir.

Normalmente, os procedimentos empregados no dimensionamento do suporte de túneis se limitam à verificação das condições de longo prazo do seu comportamento estrutural (onde já ocorreu uma estabilização), apesar do menor risco de acidentes. Além disso, já foram realizadas, com certo sucesso, várias tentativas de instrumentação, para determinação de tensões em suporte de túneis nesta situação, o que confere maior segurança no conhecimento do comportamento do concreto em conjunto com o maciço, no que se refere à sua deformabilidade e solicitação<sup>(73)</sup>.

No entanto, ainda hoje não se chegou a um consenso sobre que resistência se especificar para o material a maiores idades, isto é, se a média ou a característica. Ainda hoje o Metrô de São Paulo especifica a resistência característica<sup>(77)</sup>. Mas já em 1980 foi adotada na obra da Ligação Ferroviária Belo Horizonte-São Paulo, o critério de aceitação de um valor médio e de uma variabilidade máxima, o que se justificaria pela "natureza dos fenômenos em jogo", que permitia afirmar que "o colapso da estrutura não é causado por rupturas pontuais no seu sistema de revestimento"<sup>(5)</sup>. Desta forma também entendem os austríacos<sup>(69)</sup>, que recomendam a especificação de resistências médias em função

dos critérios de dimensionamento e da resistência à baixa idade adotada, como o apresentado na Tabela 2.1. A resistência, neste caso, pode ser referida a 28, 56 ou 91 dias de idade. Da mesma forma que para os requisitos de resistência à baixa idade, não são dados os critérios que justificam a adoção destes valores.

TABELA 2.1: Classes de resistência do concreto projetado<sup>(69)</sup>.

CLASSE	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO MÉDIA MÍNIMA (MPa)	OBSERVAÇÕES
SC 12	12	
SC 16	16	
SC 19	19	Com requisitos J1 ou J2 para baixas idades, geralmente obtida a 28 dias
SC 22	22	Com requisitos J1 ou J2 para baixas idades, obtida a 28 dias ou mais
SC 25	25	
SC 28	28	Com requisitos J1 ou J2 para baixas idades, geralmente obtida a 91 dias
SC 30 SC 40	30 40	Sem exigências para as baixas idades (ex.:reparos de concreto armado)

A permeabilidade e/ou a porosidade do concreto projetado podem ser alguns dos principais fatores determinantes da sua durabilidade pois estão correlacionadas com as características de lixiviação, resistência ao ataque de cloretos ou sulfatos, corrosão das armaduras, etc.<sup>(78)</sup>. Como os ensaios de permeabilidade são mais complexos e caros para serem executados, opta-se, normalmente, por controlar a absorção do material. Dessa forma, as especificações

nacionais procuram limitar a absorção por imersão do concreto na faixa dos 8%, seja para via seca ou para via úmida<sup>(66)(68)(75)</sup>. Isto ocorre devido ao fato de, normalmente, se obter valores na faixa de 5 a 8% de absorção por imersão e fervura a 28 dias de idade<sup>(79)</sup> com o concreto projetado via seca tradicional bem executado<sup>(68)(80)</sup>. No entanto este valor de referência não é unânime pois Ryan<sup>(14)</sup>, apesar de indicar que a absorção por imersão simples (ligeiramente inferior à imersão com fervura) normal varia entre 6 e 7%, define como parâmetro, que não deve ser excedido, os 10%.

Outra especificação convencional é aquela que restringe o tipo de cimento àqueles com adição de escória de alto forno, pozolanas ou microssílica, ou ainda de baixo teor de aluminato tricálcico quando se depara com solos agressivos<sup>(58)</sup>. Uma das classificações de agressividade do solo ou, melhor dizendo, da água presente no solo que pode servir de base para a determinação do tipo de cimento a ser utilizado, é aquela fornecida pela CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental na norma CETESB/L 1.007 de 1988<sup>(81)</sup>

Assim, para uma agressividade do meio aquoso definida como fraca, já é aconselhável a utilização de cimentos especiais e, para o caso de agressividade muito forte, deve-se contar obrigatoriamente com dispositivos especiais de proteção que isolem o material do meio<sup>(82)</sup>.

Uma das restrições que normalmente se faz ao concreto projetado é a qualidade de seu acabamento. Por isso, em alguns casos onde "são exigidos acabamentos de elevado padrão estético", acaba-se por especificar o concreto moldado convencional utilizando-se de fôrmas metálicas deslizantes, como ocorreu nas obras das estações da linha Paulista do Metrô de São Paulo<sup>(66)</sup>. No entanto, como os fatores estéticos mudam com o passar do tempo com certa facilidade, já se pode esperar que a tendência seja optar (em benefício da economia) pela especificação do concreto projetado para o revestimento final, como ocorreu no Metrô



de Estocolmo em 1978 (Celestino apud Armelin et alli<sup>(66)</sup>) e no Túnel do Anel Viário da Cidade de Campinas em São Paulo<sup>(66)</sup>.

#### 2.4.3. Outras aplicações

Para outras aplicações, que não seja o revestimento de túneis, julga-se como melhor guia de especificações o proposto pelo *American Concrete Institute* - ACI através de seu comitê número 506<sup>(67)</sup>. Segundo o próprio documento, "esta especificação pode não ser aplicável ao concreto projetado usado para o suporte estrutural subterrâneo" mas não apresenta restrições a qualquer outra aplicação<sup>(67)</sup>.

Nesse documento são apresentadas três faixas granulométricas ideais para agregados em função da dimensão máxima do mesmo, qual seja da ordem de 9,5mm ou 12,5mm ou 19mm, conforme o apresentado na Tabela 2.2. Entretanto, não é especificado nenhum critério para a escolha, como poderia ser, por exemplo, aquele recomendado pelo fabricante do equipamento de projeção.

A especificação da resistência à compressão do concreto projetado é feita, por parte do ACI<sup>(67)</sup>, nos mesmos moldes do concreto convencional, isto é, sem haver preocupação de definir uma evolução para ela, tendo a ressalva de associá-la a cada ponto da estrutura. Os ingleses, pelo contrário, recomendam a avaliação da resistência à compressão com corpos de prova cilíndricos extraídos de placas com cerca de 48 horas de idade e ensaiados a 3 dias, 7 dias e 28 dias de idade. O controle é feito por resistência média e "a diferença entre as resistências deve ser menor que 20% do valor da média"<sup>(76)</sup>.

A não especificação de resistências a baixas idades se deve ao fato dela ser necessária à utilizações restritas como, por exemplo, o revestimento de túneis (escoramento primário)

ou quando da utilização sistemática de aditivos aceleradores.

Há que se ressaltar o fato de que em nenhuma parte da especificação se faz referência à permeabilidade do material. Isto se deve ao fato do ACI estar trabalhando num projeto específico sobre durabilidade do concreto projetado, além de outra sobre sua aplicação no revestimento de túneis<sup>(83)</sup>.

TABELA 2.2: Faixas granulométricas ideais em função da dimensão máxima do agregado<sup>(67)</sup>.

ABERTURA DA MALHA DA PENEIRA (mm)	MASSA PASSANTE POR CADA PENEIRA (%)		
	GRADUAÇÃO N <sup>o</sup> 1	GRADUAÇÃO N <sup>o</sup> 2	GRADUAÇÃO N <sup>o</sup> 3
19,00	-	-	100
12,50	-	100	80-95
9,50	100	90-100	70-90
4,80	95-100	70-85	50-70
2,40	80-100	50-70	35-55
1,20	50-85	35-55	20-40
0,60	25-60	20-35	10-30
0,30	10-30	8-20	5-17
0,15	2-10	2-10	2-10

#### 2.4.4. Normalização<sup>(83)</sup>

A normalização do concreto projetado apresenta certas particularidades, ligadas à peculiaridade do material, que produzem dificuldades para a rápida chegada ao entendimento, quais seja:

- grande variedade de aplicações;
- diferentes processos de projeção (via seca e via úmida);

-não existe consenso sobre a adequação, repetibilidade e reprodutibilidade da metodologia específica de ensaios;

-a qualidade do material é definida, principalmente, por fatores ligados à mão-de-obra e os procedimentos executivos empregados, além dos relativos aos materiais componentes e dos equipamentos de projeção empregados e

-a inexistência de uma metodologia nacional uniforme de ensaios, o que impossibilita a comparação de resultados.

Com isto em vista e em face das necessidades do meio técnico, diversas entidades têm dado maior atenção à normalização do concreto projetado, tanto no Brasil como no exterior.

#### 2.4.4.1. No exterior

##### a. Alemanha

Já foram produzidos documentos específicos sobre o concreto projetado pelas três entidades encarregadas de produzir documentação normativa: Instituto Alemão de Normas (DIN), Instituto Alemão do Concreto (DBV) e o Departamento Central da Ferrovia Nacional (BZA). Cabe ressaltar aqui a experiência bem sucedida da norma DIN 18.551 Spritzbeton (Concreto Projetado) aplicável a todos os serviços do concreto projetado e, em especial, ao revestimento de túneis e à manutenção de construções de concreto armado. Ela possui um apêndice denominado "Recomendações para o reforço e reparo de estruturas de concreto armado por concreto projetado" que regula especialmente esta aplicação. Sua publicação trouxe, segundo Ruffert<sup>(84)</sup> um aumento tanto na qualidade como no campo de uso do concreto projetado na Alemanha.

#### b. Áustria

A *Austrian Concrete Society* instalou um comitê para elaborar recomendações específicas para o concreto projetado e a primeira parte do seu *Guideline on Shotcrete*, referente às aplicações, já foi publicada<sup>(69)</sup>. A segunda parte, que abordará os métodos de ensaio, está em fase de preparação.

#### c. Canadá

Não existem grupos formalmente organizados ou comitês de normalização para a elaboração de normas para concreto projetado no Canadá. No entanto, consideram-se aplicáveis as recomendações do Comitê 506 do ACI e as normas do *American Society for Testing and Materials* (ASTM), específicas para concreto projetado, pois grande parte dos pesquisadores envolvidos com o tema participa de comitês nessas entidades. Várias pesquisas custeadas pelo governo e por empresas privadas estão em andamento no Canadá e seus resultados são aplicados na melhoria da qualidade das recomendações e normas norte-americanas. Entre os temas destas pesquisas destacam-se<sup>(85)</sup>:

-suprimento de mistura seca ensacada para concreto projetado;

-suprimento de fibras de aço e polipropileno para fins de concreto projetado;

-suprimento de aceleradores e

-usuários do concreto projetado como os responsáveis por estradas de ferro e de rodagem e companhias de mineração.

#### d. França

Estabeleceu-se em 1972 um grupo que elaborou o documento "Recomendações para Aplicação e sobre a Tecnologia de

concreto Projetado em Estruturas Subterrâneas", e atualmente prepara outro sobre o emprego do concreto projetado com fibras.

Em 1977 a *Association Française du Béton* publicou o seu *Guide du Béton Projete*<sup>(86)</sup> voltada para aplicações gerais do concreto projetado e, em 1985, a *Association Française pour la Construction* (AFPC) em conjunto com o *Syndicat National du Béton Armé et des Techniques Industrialisées* (SNBATI) e *Syndicat National des Entrepreneurs Spécialistes de Structures* (STRRES) publicaram uma coleção sobre as técnicas de reparo e reforço das estruturas de concreto, onde o fascículo 3 é dedicado ao reparo por concreto projetado<sup>(22)</sup>.

#### e. Noruega

As primeiras recomendações foram publicadas em 1971 pelo Comitê do Concreto Projetado norueguês. Mais tarde foi publicado um guia de aplicação e, em 1986, a norma NS 3420 sobre o mesmo tema. Desde 1990 o comitê conta com o suporte da *Norwegian Rock Blasting Association* para a normalização prioritária do concreto projetado com fibras.

#### f. Espanha

Na Espanha, a *Asociación Española de Normalización y Certificación* (AENOR) está atualmente com um comitê de estudos sobre concreto projetado especificamente. Já foram elaborados alguns projetos de norma, tais como:

-Proyecto de Norma UNE 83.601 Hormigón y Morteros Proyectados. *Classificación y definiciones;*

-Proyecto de Norma UNE 83.602 Hormigón y Morteros Proyectados. *Preparación de la muestra para obtención de probetas testigo;*

-Proyecto de Norma UNE 83.603 Hormigón y Morteros

*Proyectados. Determinación de la resistència a la penetración in situ por medio del penetrómetro;*

*-Proyecto de Norma UNE 83.605 Hormigón y Morteros Proyectados. Obtención, preparación y ensayos a compresión o tracción de probetas testigo e*

*-Proyecto de Norma UNE 83.606 Hormigón y Morteros Proyectados. Obtención, preparación y ensayos a flexotracción de probetas testigo.*

#### g. Japão

Devido à grande necessidade de conhecimento e controle do concreto projetado para túneis (os japoneses totalizaram dois milhões de metros cúbicos projetados em 1989), estão sendo realizadas várias pesquisas que deram origem a guias, recomendações e normas. Várias organizações têm trabalhado no tema, tais como a *Japan Tunneling Association (JTA)*, a *Japan Society of Civil Engineers (JSCE)*, a *Japan National Railway*, a *Japan Highway Public corporation (JHPC)*, a *Public Works Research Institute*, a *Railway Technical Research Institute* e o *Inhouse Research Centre of General Contractors*.

#### h. Estados Unidos

A ASTM formou um novo comitê em 1990 para trabalhar, especificamente, na normalização do concreto projetado, o C09.03.20. Os temas de trabalho principais deste comitê são o concreto projetado convencional, o concreto projetado com fibras e a avaliação do concreto projetado *in-loco* (baseada em ensaios de campo) e, o que muito se relaciona com este tema, a análise do concreto projetado recém-lançado.

A relação de normas sobre concreto projetado publicadas pela ASTM é a seguinte:

-ASTM C1102-88: *Standard Test Method for Time Setting of Portland-Cement Pastes Containing Accelerating Admixtures for Shotcrete by the Use of Gillmore Needles;*

-ASTM C1116-89: *Standard Specification for Fiber-Reinforced Concrete and Shotcrete;*

-ASTM C1117-89: *Standard Test Method for Time Setting of Shotcrete Mixtures by Penetration Resistance;*

-ASTM C1140-89: *Standard Practice for Preparing and Testing Specimens for Shotcrete Test Panels;*

-ASTM C1141-89: *Standard Specification for Admixtures for Shotcrete;*

Além destas normas também são empregadas para o concreto projetado as seguintes:

-ASTM C642: *Specific Gravity Absorption and Voids in Hardened Concrete;*

-ASTM C1018: *Flexural Toughness of Fiber Reinforced Concrete*, usada no caso específico do concreto projetado com fibras e

-ASTM C666: *Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing* de grande importância para aquelas regiões sujeitas ao efeito de gelo e degelo.

O Comitê 506 do ACI tem elaborado novas recomendações e, periodicamente, revisado as existentes:

-*Guide to Shotcrete*<sup>(9)</sup>;

-*Specifications for Materials, Proportioning, and Application of Shotcrete*<sup>(67)</sup>;

-*State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Shotcrete*<sup>(87)</sup> e

-*Guide to Certification of Shotcrete Nozzlemen*<sup>(88)</sup>.

Estas recomendações serviram de referência para as

especificações brasileiras, principalmente no início de suas atividades como se verá a seguir.

#### 2.4.4.2. No Brasil

Ainda não há nenhuma norma específica, consensual, sobre concreto projetado publicada no Brasil, apesar do esforço de vários profissionais neste sentido desde o começo da década de 80. Nesta época foram elaborados alguns textos base como a "Determinação do tempo de pega de combinações de pasta de cimento portland e aditivos aceleradores de pega"<sup>(61)</sup> destinada à verificação da compatibilidade entre cimentos e aditivos aceleradores, e a "Determinação do índice de reflexão médio de argamassas e concretos projetados em painéis"<sup>(60)</sup> e as "Especificações para Argamassa e Concreto Projetados"<sup>(89)</sup> apresentados pelo engenheiro Selmo Kuperman, cujo estudo se deparou com a dificuldade de enfrentar a rápida evolução do assunto, o que impossibilitou sua conclusão.

Percebeu-se, com o passar do tempo, que havia uma grande necessidade de ensaios confiáveis específicos para concreto projetado, o que possibilitaria o estabelecimento de parâmetros de qualidade do material. Para que isso fosse possível, seria necessária uma fase de estudos laboratoriais que foi desenvolvida com o auxílio de entidades como a Companhia do Metropolitano de São Paulo (Metrô), a Companhia de Saneamento Básico de São Paulo (SABESP), as Centrais Elétricas de São Paulo (CESP) e a Escola Politécnica (EPUSP), além de laboratórios particulares.

Em 1986 foram reiniciados os trabalhos da comissão de estudo 18:306 no CB 18 - Comitê Brasileiro de Cimento, Concreto e Agregados na ABNT visando a elaboração de normas sobre concreto projetado. Os objetivos foram os seguintes:

-abranger tanto o processo de via seca como o de via úmida;



-definir numericamente os requisitos que o concreto projetado deveria atender segundo sua aplicação, conforme observações obtidas em campo e na literatura existente;

-estabelecer métodos de ensaios confiáveis quanto à repetibilidade e reprodutibilidade de resultados a partir de verificação exaustiva em laboratório e

-elaborar textos referentes à aplicação do concreto projetado e à qualificação do mangoteiro.

Com a evolução advinda do desenvolvimento tecnológico e das próprias observações e constatações feitas no período subsequente, houve uma série de alterações e a ampliação da lista de documentos a serem publicados. Atualmente a comissão de estudos definiu uma lista de normas prioritárias sobre o concreto projetado a ser publicado:

A. Concreto Projetado - Especificações técnicas (Especificação). Projeto CE 18:306.01-001.

B. Concreto Projetado - Determinação da resistência à compressão a baixas idades - Agulha de Meynadier (Método de ensaio). Projeto CE 18:306.02-001.

C. Concreto Projetado - Determinação da índice de reflexão em placas (Método de ensaio). Projeto CE 18:306.02-002.

D. Concreto Projetado - Determinação dos tempos de pega em pastas de cimento Portland, com ou sem a utilização de aditivos aceleradores de pega (Método de ensaio). Projeto CE 18:306.02-003.

E. Concreto Projetado - Determinação da relação água/cimento (Método de ensaio). Projeto CE 18:306.02-004.

F. Concreto Projetado - Reconstituição de misturas recém projetadas (Método de ensaio). Projeto CE 18:306.02-005.

G. Concreto Projetado - Determinação do índice de reflexão por medição direta (Método de ensaio). Projeto CE 18:306.02-006.

H. Concreto Projetado - Determinação da consistência de misturas de recém projetadas (Método de ensaio). Projeto CE 18:306.02-007.

I. Concreto Projetado - Moldagem de placas (Método de ensaio). Projeto CE 18:306.02-008.

J. Concreto Projetado - Determinação do teor incorporado de fibras (Método de ensaio). Projeto CE 18:306.02-009.

K. Concreto Projetado - Comportamento pós-fissuração do concreto projetado com fibras (Método de ensaio). Projeto CE 18:306.02-010.

L. Concreto Projetado - Determinação da resistência à compressão a baixas idades - Penetrômetro de Energia Constante P.E.C. (Método de ensaio). Projeto CE 18:306.02-011.

M. Concreto Projetado - Aplicação do concreto projetado por via seca (Procedimento). Projeto CE 18:306.03-001.

N. Concreto Projetado - Qualificação de Mangoteiro - Via Seca (Procedimento). Projeto CE 18:306.03-002.

O. Concreto Projetado - Aplicação do concreto projetado por via úmida (Procedimento). Projeto CE 18:306.03-003.

P. Concreto Projetado - Qualificação de Mangoteiro - Via Úmida (Procedimento). Projeto CE 18:306.03-004.

Dentre estes textos já foram aprovados a nível de comissão o D, o F, o G, o M e o N. Os textos A e C já foram totalmente elaborados e estão em discussão na comissão necessitando apenas de revisão. Os textos B, E, H, I, J e K tem seus textos-base prontos e estão aguardando estudo por parte da comissão. Já os textos O e P necessitam ser elaborados na íntegra.

Outros temas que poderão vir a ser incorporados à esta lista são os referentes aos aditivos para uso em concreto projetado e a segurança no trabalho com este material.

**ANTONIO DOMINGUES DE FIGUEIREDO**

**CONCRETO PROJETADO:  
FATORES INTERVENIENTES NO  
CONTROLE DA QUALIDADE  
DO PROCESSO**

Dissertação apresentada à Escola  
Politécnica da Universidade de São  
Paulo para obtenção do título de  
Mestre em Engenharia.

**São Paulo  
1992**

**ANTONIO DOMINGUES DE FIGUEIREDO**

**CONCRETO PROJETADO:  
FATORES INTERVENIENTES NO  
CONTROLE DA QUALIDADE  
DO PROCESSO**

Dissertação apresentada à Escola  
Politécnica da Universidade de São  
Paulo para obtenção do título de  
Mestre em Engenharia.

Área de Concentração:  
Engenharia de Construção Civil

Orientador:  
Paulo Roberto do Lago Helene

São Paulo  
1992

**À Ivone, Thaís e Gabriel**

## AGRADECIMENTOS

Tenho muito a agradecer:

Em primeiro lugar, ao meu amigo e orientador Paulo Helene que, além da simples tarefa de me orientar, tanto me incentivou a executar bem este trabalho e, mais do que isso, depositou em mim uma confiança que só os amigos são capazes.

Aos meus colegas do Projeto de Pesquisa EPUSP/CBPO/IPT-01 "Concreto Projetado para Túneis", Luiz Roberto Prudêncio Jr., Hugo Sogayar Armelin e Maristela Gomes da Silva que dividiram comigo alegrias, desorientações, descobertas, riscos de vida e, principalmente, uma grande amizade formada num trabalho comum que, sem eles, não teria a mínima condição de ter chegado ao nível de realização que atingiu.

Ao IPT, em especial ao amigo Francisco de Assis Souza Dantas que além de apresentar em todo o momento de trabalho comum um espírito positivo inabalável e uma laboriosidade invejável, sempre encontrou um momento para aquela conversa que tantas dúvidas tirava. Ao Djalma Nascimento, técnico dedicado, com preocupação contínua em colaborar no trabalho e pelo esmero na realização de tantos ensaios.

À Companhia Brasileira de Projetos e Obras (CBPO), que simplesmente tornou possível a realização deste trabalho arcando com os elevados custos e a pesada infra-estrutura necessária ao trabalho com o concreto projetado. Em especial ao Pedro Boscov, que pelo seu elevado zelo profissional tanto colaborou no sentido da conjugação de esforços entre a universidade e a empresa privada. Ao Elias Raguzzani Gonçalves e ao Cilênio Silva da Central de Equipamentos da CBPO, que viabilizaram todas as modificações por nós solicitadas no equipamento de projeção. Aos engenheiros Norberto Silva e Geraldo Caracini Filho e ao mestre Messias Ribeiro da Silva da Obra da Extensão Norte do Metrô de São Paulo, que forneceram todo o apoio necessário à manutenção do laboratório de campo e o acesso aos resultados obtidos na obra.

Ao Josué Januário Barbosa, mangoteiro responsável pela moldagem de quase todas as placas de concreto projetado usadas neste trabalho, que acabou assumindo como sua a pesquisa; e ao José Abreu Silva o "Maranhão", que com seu bom humor e dedicação, sempre colaborou no duro trabalho da projeção. Ambos afastados do serviço por motivo de acidente no momento de fechamento deste trabalho, o qual espero que de alguma forma contribua para amenizá-lo de alguma maneira.

Gostaria de agradecer também às secretárias Maria Conceição Firmino de Macedo Santos e Engracia Maria Bartuciotti, que tanto aliviaram o meu trabalho no penoso campo das atividades administrativas e burocráticas, tornando possível uma maior dedicação ao trabalho da pesquisa.

**SUMÁRIO**

CAPÍTULO I: INTRODUÇÃO .....	1
1.1. OBJETIVO .....	1
1.2. JUSTIFICATIVA .....	1
1.3. ENFOQUE DA PESQUISA .....	3
1.4. METODOLOGIA ADOTADA .....	3
1.5. CONTEÚDO DA DISSERTAÇÃO .....	4
CAPÍTULO II: O CONCRETO PROJETADO .....	7
2.1. DEFINIÇÃO DO CONCRETO PROJETADO .....	7
2.2. APLICAÇÕES DO CONCRETO PROJETADO .....	8
2.2.1. Revestimentos .....	9
2.2.2. Obras subterrâneas .....	10
2.2.3. Contenção de taludes .....	11
2.2.4. Reparos e reforços estruturais .....	12
2.2.5. Impermeabilizações .....	13
2.2.6. Elementos auto-portantes .....	15
2.2.7. Formas livres .....	16
2.3. HISTÓRICO E EVOLUÇÃO .....	16
2.3.1. No exterior .....	16
2.3.2. No Brasil .....	20
2.4. ESPECIFICAÇÕES .....	23
2.4.1. Materiais constituintes .....	24
2.4.2. Concreto projetado para túneis .....	25
2.4.3. Outras aplicações .....	31
2.4.4. Normalização .....	32
2.4.4.1. No exterior .....	33
2.4.4.2. No Brasil .....	38
2.5. CONCRETO PROJETADO ESPECIAL .....	41
2.5.1. Concreto projetado com fibras .....	41
2.5.2. Concreto projetado com microssílica .....	44
2.5.3. Concreto projetado com fibras de aço e microssílica .....	46
2.5.4. Concreto projetado com o uso de polímeros .....	47



CAPÍTULO III: O PROCESSO DE PROJEÇÃO .....	50
3.1. PROCESSOS DE PROJEÇÃO DISPONÍVEIS .....	50
3.1.1. Via seca .....	50
3.1.2. Via úmida .....	52
3.2. EQUIPAMENTOS DE PROJEÇÃO POR VIA SECA .....	57
3.2.1. Produção da mistura seca .....	57
3.2.2. Máquinas de projeção .....	58
3.2.2.1. Máquinas com câmara pressurizada .....	58
3.2.2.2. Máquinas com rosca-sem-fim .....	61
3.2.2.3. Máquinas com rotor .....	61
3.2.3. Sistema de alimentação .....	64
3.2.3.1. Sistema convencional .....	65
3.2.3.2. Alimentação contínua .....	66
3.2.3.3. Alimentação direta .....	67
3.2.3.4. <i>Pre-bagging</i> .....	68
3.2.4. Dosadores de aditivo .....	69
3.2.4.1. Dispositivos vibratórios .....	69
3.2.4.2. Rolo dosador .....	69
3.2.4.3. Dosador com rosca-sem-fim .....	70
3.2.4.4. Dosadores de aditivos líquidos .....	71
3.2.5. Compressor de ar .....	72
3.2.6. Braço mecânico (robô) .....	73
3.2.6.1. Sistema básico .....	74
3.2.6.2. Vantagens do braço mecânico .....	76
3.2.6.3. Desvantagens do braço mecânico .....	78
3.3. OPERAÇÃO DO PROCESSO .....	79
3.3.1. Equipe de projeção .....	80
3.3.1.1. Encarregado de projeção .....	80
3.3.1.2. Mangoteiro .....	81
3.3.1.3. Outros membros .....	82
3.3.2. Operação da máquina de projeção .....	82
3.3.3. Cuidados com as mangueiras .....	85
3.3.4. Umidificação da mistura .....	85
3.4. PERSPECTIVAS FUTURAS .....	88

CAPÍTULO IV: PROPRIEDADES DO CONCRETO PROJETADO .....	91
4.1. IMPORTÂNCIA E FORMA DE CONTROLE .....	91
4.2. REFLEXÃO .....	94
4.2.1. Definições .....	94
4.2.2. Dinâmica da reflexão .....	95
4.2.2.1. Influência da espessura da camada .....	97
4.2.2.2. Influência da granulometria da mistura .....	97
4.2.2.3. Influência do teor de umidade .....	98
4.2.2.4. Influência do substrato .....	99
4.2.2.5. Variação do traço em função da reflexão .....	99
4.2.3. Efeito do processo de projeção .....	101
4.2.3.1. Tipo do processo .....	101
4.2.3.2. Velocidade de projeção .....	101
4.2.3.3. Inclinação do jato .....	102
4.2.3.4. Distância de projeção .....	103
4.2.4. Oclusão da reflexão .....	104
4.2.5. Controle da reflexão .....	104
4.3. DESPLACAMENTO .....	107
4.3.1. Causas dos deslocamentos .....	108
4.3.2. Controle do deslocamento através da consistência .....	108
4.4. POEIRA E NÉVOA .....	109
4.4.1. Causas da produção de poeira .....	109
4.4.2. Causas da produção de névoa .....	110
4.4.3. Controle da poeira e da névoa .....	110
4.5. HOMOGENEIDADE .....	110
4.5.1. Defeitos típicos .....	111
4.5.1.1. Efeito de sombra .....	111
4.5.1.2. Laminação .....	112
4.5.1.3. Imperfeições superficiais .....	114
4.5.2. Variação das propriedades .....	114
4.5.3. Controle da homogeneidade .....	115
4.5.3.1. Controle visual .....	116
4.5.3.2. Controle da pega e endurecimento .....	117
4.5.3.3. Controle da resistência à compressão .....	119
4.6. ADERÊNCIA .....	120
4.6.1. Causas da falta de aderência .....	120
4.6.2. Controle da aderência .....	121
4.7. DURABILIDADE E PERMEABILIDADE .....	122
4.7.1. Concreto projetado como material estrutural durável .....	122
4.7.2. Características que interferem na durabilidade ..	123
4.7.2.1. Consumo de cimento .....	123
4.7.2.2. Porosidade e permeabilidade .....	123
4.7.2.3. Possíveis efeitos do aditivo acelerador de pega ..	125
4.7.3. Alternativas para aumentar a durabilidade .....	126
4.7.4. A qualidade do produto .....	127

CAPÍTULO V: ASPECTOS DA INFLUÊNCIA DO PROCESSO DE PROJEÇÃO NAS PROPRIEDADES DO CONCRETO PROJETADO .....	128
5.1. METODOLOGIA UTILIZADA .....	128
5.2. UMIDIFICAÇÃO DO CONCRETO PROJETADO .....	130
5.2.1. Erros do enfoque tradicional .....	130
5.2.2. Propriedades afetadas pelo teor de umidade .....	132
5.2.2.1. Resistência à compressão .....	132
5.2.2.2. Compactação .....	134
5.2.2.3. Consistência .....	135
5.2.3. Controle da umidificação .....	136
5.3. ADITIVOS ACELERADORES DE PEGA E ENDURECIMENTO .....	137
5.3.1. Tipos e forma de atuação .....	137
5.3.2. Propriedades afetadas pelo teor de aditivo .....	139
5.3.2.1. Pega e resistências iniciais .....	139
5.3.2.2. Resistência à compressão .....	143
5.3.2.3. Compactação .....	146
5.3.2.4. Controle do teor de aditivos .....	149
5.3.3. Efeito da pré-hidratação .....	151
5.4. VELOCIDADE DE PROJEÇÃO .....	153
5.4.1. Importância e forma de controle .....	153
5.4.2. Propriedades afetadas pela velocidade de projeção .....	154
5.4.2.1. Compactação .....	154
5.4.2.2. Resistência à compressão .....	157
5.4.2.3. Reflexão .....	158
5.4.3. O controle da pressão de ar comprimido .....	158
5.5. DIREÇÃO DE PROJEÇÃO .....	159
5.5.1. Importância da técnica de projeção .....	159
5.5.2. Propriedades afetadas pela direção de projeção ..	160
5.5.2.1. Reflexão .....	160
5.5.2.2. Traço .....	163
5.5.2.3. Compactação .....	166
5.5.2.4. Pega e resistências iniciais .....	167
5.5.2.5. Resistência à compressão .....	168
5.5.3. Influência do aditivo à base de aluminato .....	169
5.5.3.1. Compactação .....	170
5.5.3.2. Pega e resistências iniciais .....	171
5.5.3.3. Resistência à compressão .....	172
5.5.3.4. Permeabilidade .....	173
5.5.4. Controle do concreto segundo a direção de projeção .....	174
5.6. AVALIAÇÃO DO CONCRETO PROJETADO ATRAVÉS DE RESULTADOS DE CONTROLE DE OBRAS DE TÚNEIS .....	176
5.6.1. Caracterização das amostragens .....	176
5.6.2. Resultados obtidos nas amostragens .....	178
5.6.3. Análise dos resultados .....	180
5.6.3.1. Perspectiva histórica .....	180
5.6.3.2. Influência da injeção de água sob pressão .....	181
5.6.3.3. Influência da marca do aditivo acelerador .....	183
5.6.3.4. Influência da mecanização do processo .....	183

CAPÍTULO VI: RECOMENDAÇÕES PARA O CONTROLE DO PROCESSO DE PROJEÇÃO DO CONCRETO .....	185
6.1. INTRODUÇÃO .....	185
6.2. CUIDADOS ANTERIORES À PROJEÇÃO .....	186
6.2.1. Formação e qualificação da mão-de-obra .....	186
6.2.1.1. Palestras e aulas práticas .....	187
6.2.1.2. Roteiro para qualificação do mangoteiro .....	188
6.2.1.3. Roteiro para qualificação do encarregado .....	190
6.2.2. Equipamentos .....	192
6.2.2.1. Betoneira .....	192
6.2.2.2. Alimentadora contínua .....	193
6.2.2.3. Dosador de aditivo .....	193
6.2.2.4. Bomba de água .....	194
6.2.2.5. Máquina de Projeção .....	194
6.2.2.6. Compressor de ar .....	195
6.2.2.7. Sistema de pré-umidificação e bicos .....	195
6.2.3. Dosagem .....	196
6.2.4. Materiais .....	197
6.2.4.1. Cimento .....	198
6.2.4.2. Agregados miúdos .....	198
6.2.4.3. Agregados graúdos .....	199
6.2.4.4. Aditivos aceleradores de pega .....	199
6.2.5. Preparo da superfície .....	200
6.3. CUIDADOS DURANTE A PROJEÇÃO .....	201
6.3.1. Confeção da mistura seca .....	201
6.3.1.1. Cuidados gerais .....	202
6.3.1.2. Controle da mistura seca .....	202
6.3.2. Verificação das condições dos equipamentos .....	203
6.3.3. Início da projeção .....	204
6.3.3.1. Seqüência de início de operações .....	204
6.3.3.2. Controle da consistência .....	205
6.3.3.3. Controle da pressão de ar comprimido .....	205
6.3.4. Técnica de projeção .....	205
6.3.4.1. Direcionamento do jato .....	205
6.3.4.2. Distância de projeção .....	206
6.3.4.3. Projeção da camada inicial .....	207
6.3.4.4. Projeção das demais camadas .....	208
6.3.4.5. Preenchimento de espaços delimitados por cantos .....	208
6.3.4.6. Projeção sobre armaduras .....	209
6.3.5. Encerramento da projeção .....	210
6.3.6. Segurança e higiene no trabalho .....	210
6.3.7. Cura .....	211
6.4. CONTROLE DO PROCESSO APÓS A PROJEÇÃO .....	212
6.4.1. Controle do concreto em baixas idades .....	212
6.4.1.1. Índices físicos do concreto recém projetado ...	212
6.4.1.2. Resistência a baixas idades .....	215
6.4.2. Controle do concreto em idades avançadas .....	216
6.4.3. Controle das falhas de produção .....	217
6.4.3.1. Defeitos localizados .....	217
6.4.3.2. Defeitos generalizados .....	217
6.4.3.2. Desplacamentos .....	218
6.5. SÍNTESE .....	218

CAPÍTULO VII: COMENTÁRIOS FINAIS .....	222
ANEXOS .....	225
ANEXO 1: CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS EMPREGADOS NO TRABALHO .....	226
ANEXO 2: ESTUDO SOBRE A INFLUÊNCIA DO TEOR DE UMIDADE (EQUIPAMENTO CONVENCIONAL) .....	228
ANEXO 3: ESTUDO SOBRE A INFLUÊNCIA DO TEOR DE UMIDADE (EQUIPAMENTO COM INJEÇÃO DE ÁGUA SOB PRESSÃO) .	231
ANEXO 4: ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO TEOR DE ADITIVO NAS PROPRIEDADES DO CONCRETO PROJETADO .....	234
ANEXO 5: ESTUDO DO EFEITO DA DOSAGEM MANUAL DE ADITIVO .	241
ANEXO 6: ESTUDO DO EFEITO DA PRÉ-HIDRATAÇÃO .....	245
ANEXO 7: ESTUDO DO EFEITO DA VELOCIDADE DE PROJEÇÃO ....	249
ANEXO 8: ESTUDO DA VARAÇÃO DE TRAÇO SEGUNDO A DIREÇÃO DE PROJEÇÃO (RECONSTITUIÇÃO) .....	251
ANEXO 9: ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA DIREÇÃO DE PROJEÇÃO NO CONCRETO COM ADITIVO À BASE DE CARBONATO .....	253
ANEXO 10: ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA DIREÇÃO DE PROJEÇÃO NO CONCRETO PROJETADO COM ADITIVO À BASE DE ALUMINATO .....	255
ANEXO 11: RESULTADOS DO ACOMPANHAMENTO DA OBRA DA FERROVIA DO AÇO .....	258
ANEXO 12: RESULTADOS DO ACOMPANHAMENTO DA OBRA DA EXTENSÃO NORTE DO METRÔ DE SÃO PAULO .....	259
ANEXO 13: TESTES DE HIPÓTESE PARA OS RESULTADOS DOS ANEXOS 11 E 12 .....	264
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	274

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1: Requisitos austríacos para a evolução da resistência do concreto projetado a baixas idades .....	26
FIGURA 2.2: Evolução da resistência do concreto projetado com o tempo .....	27
FIGURA 2.3: Esquema de bico de projeção de concreto polímero .....	48
FIGURA 3.1: Diagrama do processo de projeção por via seca	51
FIGURA 3.2: Esquema do sistema de pré-umidificação .....	52
FIGURA 3.3: Diagrama do processo de projeção por via Úmida .....	52
FIGURA 3.4: Tipos de fluxo de concreto no mangote .....	53
FIGURA 3.5: Máquina de projeção via seca de câmara-dupla.	59
FIGURA 3.6: Esquema de funcionamento da máquina de projeção de câmara-dupla .....	59
FIGURA 3.7: Detalhe de funcionamento da máquina de projeção de câmara-dupla (base da câmara inferior) .....	60
FIGURA 3.8: Detalhe de funcionamento da máquina de projeção de câmara-simples (base da câmara) .....	60
FIGURA 3.9: Esquema de funcionamento da máquina de projeção do tipo rosca-sem-fim .....	61
FIGURA 3.10: Esquema de funcionamento da máquina de projeção de rotor tipo calha em "U" .....	62
FIGURA 3.11: Esquema de funcionamento da máquina de projeção com rotor de câmaras .....	63
FIGURA 3.12: Entrada de água na projeção por via seca ...	64
FIGURA 3.13: Exemplo de transporte da mistura seca até o equipamento de projeção num túnel .....	65
FIGURA 3.14: Esquema de lançamento manual da mistura seca e de aditivo acelerador de pega na máquina de projeção ....	66
FIGURA 3.15: Esquema de alimentadora contínua .....	67
FIGURA 3.16: Esquema de alimentação contínua por conduto.	68
FIGURA 3.17: Esquema de dosador de aditivo em pó com rolo dosador .....	70
FIGURA 3.18: Esquema de dosador de aditivo em pó com rosca-sem-fim .....	71
FIGURA 3.19: Braço mecânico para projeção de concreto e detalhe do bico .....	75
FIGURA 3.20: Controle remoto eletrônico dotado de <i>joy-stick</i> para operação de robô e operador .....	76
FIGURA 3.21: Arranjo para a projeção imediata de concreto projetado via seca logo após a escavação .....	77
FIGURA 3.22: Sinais do mangoteiro .....	81
FIGURA 3.23: Detalhe de montagem do conjunto rotor de câmaras, discos de fricção e discos de borracha .....	84
FIGURA 3.24: Detalhe de bico de projeção via seca convencional .....	86
FIGURA 3.25: Esquema da porção umidificada da mistura seca pelo bico convencional (corte transversal) .....	86
FIGURA 3.26: Detalhe de bico de projeção via seca afunilado .....	87
FIGURA 3.27: Bicos de projeção especiais .....	87
FIGURA 3.28: Sistema de pré-umidificação simples .....	88
FIGURA 3.29: Esquema do sistema de pré-umidificação com injeção de água sob pressão otimizado .....	89
FIGURA 4.1: Variação qualitativa da reflexão ao longo do tempo .....	96
FIGURA 4.2: Dinâmica da formação da camada de amortecimento do concreto projetado .....	96

FIGURA 4.3: Efeito da relação água/cimento na reflexão do concreto projetado por via seca .....	98
FIGURA 4.4: Influência do ângulo de projeção na reflexão .....	102
FIGURA 4.5: Avaliação qualitativa da reflexão em função do ângulo de projeção .....	102
FIGURA 4.6: Quantificação da reflexão em função da distância de projeção segundo Längerle e Kobler .....	103
FIGURA 4.7: Esquema de posicionamento de fôrma e lonas para determinação da reflexão em placas .....	107
FIGURA 4.8: Efeito de sombra .....	112
FIGURA 4.9: Esquema da laminação do concreto projetado .	113
FIGURA 4.10: Penetrômetro de Meynadier .....	118
FIGURA 4.11: Penetrômetro de Energia Constante .....	118
FIGURA 5.1: Resistência do concreto em função da relação água/cimento .....	131
FIGURA 5.2: Relação entre a umidade e a consistência do concreto projetado .....	137
FIGURA 5.3: Resistências iniciais para aditivo à base de silicato .....	140
FIGURA 5.4: Resistências iniciais para aditivo á base de carbonato .....	141
FIGURA 5.5: Resistências iniciais para aditivo á base de aluminato .....	142
FIGURA 5.6: Correlação entre as resistências à compressão aos 7 e aos 28 dias e o teor de aditivo à base de silicato .....	144
FIGURA 5.7: Correlação entre as resistências à compressão aos 7, aos 28 e aos 91 dias e o teor de aditivo à base de carbonato .....	145
FIGURA 5.8: Influência do teor de aditivo a base de aluminato no volume de vazios permeáveis do concreto projetado .....	147
FIGURA 5.9: Influência do teor de aditivo a base de silicato no volume de vazios permeáveis do concreto projetado ...	147
FIGURA 5.10: Resultados obtidos na análise da evolução da resistência inicial em placas moldadas em obra .....	150
FIGURA 5.11: Bico largo utilizado na segunda série de ensaios .....	155
FIGURA 5.12: Influência da pressão de ar comprimido na compactação do concreto projetado com bico afunilado ...	156
FIGURA 5.13: Influência da pressão de ar comprimido na compactação do concreto projetado com bico largo .....	156
FIGURA 5.14: Dificuldades do mangoteiro em realizar a projeção sobre o teto .....	161
FIGURA 5.15: Dinâmica da reincorporação do material refletido .....	162
FIGURA 5.16: Esquema utilizado para a projeção em diversos ângulos .....	163
FIGURA 5.17: Correlação entre o ângulo de projeção e a perda total de agregados .....	165
FIGURA 5.18: Resistências iniciais para as três direções de projeção obtidas com o uso de aditivos à base de carbonato .....	168
FIGURA 5.19: Relação entre a resistência à compressão aos 7 e aos 28 dias e a direção de projeção .....	169
FIGURA 5.20: Resistências iniciais para as três direções de projeção obtidas com o uso de aditivos à base de aluminato .....	172

FIGURA 6.1: Esquema de pré-umidificação com afunilamento do bico .....	197
FIGURA 6.2: Movimento circular do bico de projeção .....	206
FIGURA 6.3: Direcionamento do jato de concreto contra o alvo de projeção segundo sua altura e sua inclinação .....	207
FIGURA 6.4: Seqüência de preenchimento de vão entre cambotas ou placas .....	209



## LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1: Classes de resistência do concreto projetado .....	29
TABELA 2.2: Faixas granulométricas ideais em função da dimensão máxima do agregado .....	32
TABELA 3.1: Fatores ligados à projeção por via seca e Úmida .....	55
TABELA 3.2: Coeficientes de variação da resistência à compressão obtidos para via seca e via úmida em obras de grande consumo de material .....	57
TABELA 3.3: Resumo das características das máquinas de projeção CP-6 da ESTE e ALIVA 260 .....	63
TABELA 3.4: Capacidade do compressor para os equipamentos de projeção por via seca .....	74
TABELA 3.5: Vida útil das peças mais sujeitas a desgaste na CP-6 .....	84
TABELA 4.1: Valores estimados para os traços de mistura seca, reflexão e concreto projetado para um índice de reflexão de 25% .....	100
TABELA 4.2: Variação típica do traço do concreto projetado .....	100
TABELA 5.1: Influência do umidade na resistência à compressão axial do concreto projetado com umidificação convencional .....	133
TABELA 5.2: Influência do teor de umidade na resistência à compressão axial do concreto projetado com pré-umidificação a alta pressão .....	133
TABELA 5.3: Influência do teor de umidade (H) na compactação do concreto projetado com umidificação convencional ....	134
TABELA 5.4: Influência do teor de umidade (H) na compactação do concreto projetado com pré-umidificação a alta pressão .....	135
TABELA 5.5: Valores obtidos para a resistência à compressão para diversos teores de aditivo à base de aluminato ....	145
TABELA 5.6: Influência do teor de aditivo à base de carbonato na compactação do concreto projetado .....	148
TABELA 5.7: Resistência à compressão axial do concreto projetado executado em obra .....	150
TABELA 5.8: Valores obtidos do volume de vazios permeáveis do concreto projetado em obra .....	151
TABELA 5.9: Efeito da pré-hidratação na resistência à compressão axial do concreto projetado executado com cimento ARI .....	152
TABELA 5.10: Efeito da pré-hidratação na resistência à compressão axial do concreto projetado executado com cimento CPE .....	153
TABELA 5.11: Valores obtidos de resistência à compressão para as diversas pressões de ar comprimido .....	157
TABELA 5.12: Resultados obtidos para a reflexão em função da pressão de ar comprimido do tipo de bico utilizados no estudo .....	158
TABELA 5.13: Valores esperados para a reflexão em função do ângulo que o jato faz com a horizontal .....	162
TABELA 5.14: Resultados obtidos para a reconstituição de traço dos concretos que ficaram incorporados à parede segundo o ângulo de projeção .....	164
TABELA 5.15: Análise da compactação do concreto projetado com aditivos à base de carbonatos segundo o ângulo de projeção .....	166

TABELA 5.16: Análise da compactação do concreto projetado com aditivos à base de aluminato segundo o ângulo de projeção .....	171
TABELA 5.17: Influência do ângulo de projeção na resistência à compressão axial do concreto projetado com aditivo à base de aluminato .....	173
TABELA 5.18: Resultados obtidos para o coeficiente de permeabilidade do concreto projetado .....	174
TABELA 5.19: Caracterização das amostragens obtidas no acompanhamento de obras .....	176
TABELA 5.20: Resultados de resistência à compressão aos 28 dias de idade obtidos para cada uma das amostragens ....	179
TABELA 5.21: Resultados de resistência à compressão às 10 horas de idade obtidos na sexta à nona amostragem .....	179
TABELA 6.1: Limites admissíveis para avaliação do aproveitamento do mangoteiro .....	189
TABELA 6.2: Frequência de amostragem e realização dos ensaios no concreto projetado via seca .....	214
TABELA 6.3: Síntese das recomendações para o controle do processo de projeção .....	219

## RESUMO

Concreto projetado é aquele pneumáticamente transportado e projetado a alta velocidade, sobre uma superfície, sendo auto-compactado. Assim, denota-se que suas propriedades são dependentes do processo de projeção utilizado.

Desta forma, para se estudar o material, é importante ter-se o conhecimento do seu processo de produção (se por via seca ou úmida, equipamentos e mão-de-obra utilizados, etc.) e das propriedades específicas do concreto projetado (como a reflexão, o deslocamento e a liberação de poeira ou névoa) e as respectivas formas de controle.

Foi executado o estudo experimental do concreto projetado via seca, onde foi possível caracterizar algumas diferenças de comportamento em relação ao concreto convencional. Entre elas está o fato de que a maior compactação e resistência mecânica é obtida com o teor ótimo da mistura e não com a menor relação água/cimento. Constatou-se o fato da projeção do concreto no teto fornecer um material de melhor qualidade que aquele projetado na parede.

Finalmente, para a obtenção de um material boa qualidade, é fundamental o controle rigoroso do teor de aditivo acelerador, a utilização de bicos afunilados, pressão de ar comprimido adequada, pré-umidificação com injeção de água sob pressão e seguir as recomendações para o controle da qualidade do processo de projeção como um todo.

**ABSTRACT**

Shotcrete is concrete pneumatically conveyed and projected at high speed onto a surface, compacting itself. Thus its properties depend on the shooting process.

It is important to know the shooting process (wet or dry-mix process, equipments and working crew, etc.), the specific properties of shotcrete (rebound, sloughing and dust generation) and respective means of control.

An experimental study was made using dry-mix shotcrete, where it was possible to point out some differences of the plain concrete analysis. One of these is the high compaction and strength achieved with the optimum water/dry materials ratio and not the minimum water/cement ratio. Shotcrete, gunned in overhead, generates a better material compared to the vertical walls.

Finally, to obtain a good quality material, it's very important to make a rigorous control of the accelerator admixture content. Also, it is recommended to use a funnel-shaped nozzle, adequate compressed air pressure, hydromix with high water pressure and to follow the recommendations on all shotcreting process quality control.

## **CAPÍTULO I: INTRODUÇÃO**

### **1.1. OBJETIVO**

Este trabalho tem por objetivo a análise teórico-experimental de fatores ligados ao processo de projeção do concreto que intervêm na qualidade final do material e, conseqüentemente, devem receber atenção no momento de se executar o controle da qualidade do mesmo.

### **1.2. JUSTIFICATIVA**

O concreto projetado é uma forma alternativa de aplicação do concreto, cuja importância pode ser avaliada pelo grande volume produzido atualmente e a grande perspectiva de utilização futura. Apesar disto, as informações disponíveis sobre o assunto a nível nacional são muito escassas. Num levantamento bibliográfico realizado obteve-se poucos trabalhos específicos sobre concreto projetado publicados no Brasil até 1989.

Nos Estados Unidos, na década de 70 foram promovidos dois simpósios pelo *American Concrete Institute* (ACI), destinados à sua aplicação em obras subterrâneas, um em 1973<sup>(1)</sup> com 29 trabalhos publicados e outro em 1976<sup>(2)</sup> com 40 trabalhos publicados, o que representa um número maior que o da somatória de todos os trabalhos publicados sobre o tema no Brasil até 1992, que foram vinte e oito. Vários outros trabalhos foram publicados posteriormente em revistas e periódicos americanos colocando-se à disposição do público técnico norte americano e europeu uma série de normas e recomendações sobre a utilização do concreto projetado. A nível nacional ainda não existe nenhuma norma publicada.

A grande preocupação dos americanos era eliminar a grande quantidade de dúvidas que preocupava o meio técnico desde a década de 60. Reading<sup>(3)</sup>, na época, apontou como principais problemas "a grande variedade de opiniões e escasses de dados confiáveis sobre o concreto projetado - suas propriedades e desempenho - e sobre o equipamento e métodos de aplicação".

Essa grande diversidade de opiniões, proveniente de uma grande variedade de resultados, advém do fato de nem sempre se ter executado uma correta avaliação do material.

Palermo<sup>(4)</sup> relaciona a experiência brasileira de execução do concreto projetado com a realização de grandes obras como a contenção de taludes e os túneis da Rodovia dos Imigrantes; o revestimento definitivo do túnel sete do sistema Cantareira de abastecimento de água da região metropolitana de São Paulo, com 5.885m de extensão em rocha; os túneis em rocha e em solo, com 70km de extensão no total, executados pela Engefer na Ferrovia do Aço e os túneis metroviários em solo no prolongamento Norte da Companhia do Metropolitano de São Paulo.

Apesar do imenso volume de concreto projetado executado nestas obras o controle de qualidade foi, praticamente, inexistente. Prova disto residiu no fato dos construtores da Ferrovia do Aço necessitarem mudar o critério de aprovação de resistência característica para resistência média, para que o material fosse aprovado<sup>(5)</sup>. Isto atesta o fato dos executores não dominarem a tecnologia de projeção, uma vez que não conseguiam atender ao especificado.

Esta dissertação visa diminuir a carência que o setor técnico brasileiro possui no tema e fornecer informações sobre a influência do processo de projeção nas propriedades do concreto projetado. Conseqüentemente, procurou-se desenvolver também, ao final do trabalho uma análise de alguns dos aspectos do controle da qualidade do processo de projeção em função dos resultados obtidos tanto na parte experimental quanto no levantamento de informações junto à

bibliografia internacional.

Concomitantemente a este trabalho outros estão sendo desenvolvidos e, como este, tiveram origem no projeto de pesquisa EPUSP/CBPO/IPT-01 "Concreto projetado para túneis". Estes outros trabalhos abordam temas específicos do material concreto projetado, como a utilização de fibras e microssílica. Um outro tema importante, que guarda uma certa complementariedade a este, é a dosagem do material concreto projetado.

### **1.3. ENFOQUE DA PESQUISA**

A pesquisa tem seu enfoque dirigido ao estudo do concreto projetado pelo processo de via seca com máquina de projeção dotada de rotor de câmaras. Este é o processo mais empregado no Brasil até os dias de hoje. Só ao final da década de 80 e início da de 90 foram realizadas as primeiras utilizações da via úmida em larga escala, sendo o seu domínio restrito a algumas grandes construtoras.

Apesar do grande número de possibilidades de utilização do concreto projetado, este estudo direcionou-se para o uso do material no revestimento de túneis, onde são consumidos os maiores volumes.

### **1.4. METODOLOGIA ADOTADA**

Este trabalho principiou por uma extensa revisão bibliográfica, a qual possibilitou o levantamento das informações necessárias à caracterização do material e do processo de projeção, como também serviu de base para a elaboração das atividades experimentais.

A metodologia de ensaios utilizada, no que se refere especificamente ao concreto projetado, foi desenvolvida dentro do próprio projeto de pesquisa EPUSP/CBPO/IPT-01<sup>(6)</sup>. Uma vez que ao longo de todo o projeto de pesquisa se lançou mão destes ensaios, procurou-se utilizá-los de forma a viabilizar uma análise mais precisa dos fenômenos ligados ao concreto projetado. A maioria dos métodos de ensaio desenvolvidos no âmbito do projeto EPUSP/CBPO/IPT-01 estão sendo estudados para fins de normalização pela Comissão de Estudos CE 18:306 do CB 18 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

Os ensaios foram realizados em três situações, basicamente. A primeira seria em laboratório, utilizando-se dos recursos laboratoriais de locais onde se poderia dispor de condições ambientais uniformes. A segunda situação seria aquela definida como em laboratório de campo, isto é, foram utilizados os mesmos materiais, mão-de-obra e equipamentos empregados na execução de túneis só que em locais reservados à execução de ensaios dentro do canteiro de obras. Nesta situação era possível ter um melhor controle das variáveis inerentes ao processo. A terceira situação foi o próprio acompanhamento de obra, isto é, foram realizados ensaios no concreto projetado aplicado na execução dos túneis da Extensão Norte da Linha Norte-Sul do Metrô de São Paulo. Além disso, foram analisados os resultados do controle rotineiro da obra. Isto tinha o duplo objetivo de se verificar a existência de disparidades entre os resultados obtidos no laboratório de campo com os do próprio túnel e analisar a influência das melhorias implantadas nesta obra nas propriedades do material.

#### **1.5. CONTEÚDO DA DISSERTAÇÃO**

A revisão bibliográfica do assunto compõe os capítulos II, III e IV. No Capítulo II, intitulado "O Concreto Projetado",



aborda-se a definição do concreto projetado, suas aplicações, seu histórico e evolução no Brasil e exterior, suas especificações e a utilização de fibras, microfílica e polímeros, isto é, dos concretos projetados especiais, que podem ser considerados como a tendência mais forte de utilização do material no futuro.

O Capítulo III descreve o processo de projeção. Neste capítulo descrevem-se os dois processos básicos disponíveis de projeção, ou seja, o de via seca e o de via úmida, detalhando-se mais o primeiro, e relacionando-se os principais equipamentos utilizados.

A partir dos conceitos básicos discutidos nos capítulos II e III faz-se, no Capítulo IV, um apanhado das principais características do material concreto projetado, procurando enfocar com maior detalhe os aspectos que o diferenciam do concreto moldado pela forma convencional, tais como a reflexão, os deslocamentos, a liberação de poeira, e outros. A principal preocupação é estabelecer os requisitos específicos de avaliação do concreto projetado, os quais diferem do concreto convencional, e assim evitar incorrer nos erros comuns.

No Capítulo V encontra-se a parte experimental do trabalho. Nele aborda-se a influência de aspectos do processo de projeção ligados aos materiais constituintes (umidificação e aditivo acelerador) e ao método de projeção (equipamento e velocidade e direção de projeção) nas propriedades do concreto projetado. Além disso, a partir da análise dos efeitos do método de projeção no concreto, pode-se ter uma idéia da influência da mão-de-obra no mesmo.

No Capítulo VI são feitas algumas recomendações para a execução do controle da qualidade do processo de projeção, cujo principal objetivo é fornecer alguns parâmetros de ação, uma vez que, atualmente, executa-se apenas um controle de produto acabado (quando isto ocorre). Estas recomendações abordam os cuidados a serem tomados antes, durante e após o serviço de projeção propriamente dito. Nos cuidados

anteriores á projeção estão incluídos os aspectos ligados à formação e qualificação da mão-de-obra ou mais especificamente ao treinamento de pessoal, à seleção de equipamentos, ao recebimento e armazenamento do material. Dentre os cuidados a serem tomados durante o serviço de projeção estão os cuidados na mistura, as regras básicas para a operação de projeção do concreto e para a segurança e higiene neste tipo de trabalho. Por último são analisados aspectos dos cuidados a serem tomados após a execução da projeção do material. Na verdade, nesta última etapa procura-se indicar algumas alternativas que podem levar à resolução dos problemas típicos do concreto projetado (a reflexão, o deslocamento, a heterogeneidade, a laminação). Para isso, foram descritos os possíveis procedimentos de correção a serem adotados dentro de um plano de ação corretiva.

Finalmente, no capítulo VII encontram-se as considerações finais sobre o trabalho.

## CAPÍTULO II: O CONCRETO PROJETADO

### 2.1. DEFINIÇÃO DO CONCRETO PROJETADO

Como é descrito a seguir, pode-se encontrar na literatura uma série de definições para concreto projetado. Todas estas definições têm como ponto em comum, o fato de serem uma descrição do processo de projeção.

Um exemplo disto é o *Gunite Contractors Association*<sup>(8)</sup> que define gunitite como "uma mistura de cimento Portland e areia secos, perfeitamente miscigenados entre si, que passam por uma máquina de projeção sendo transportados por ar comprimido através de um tubo flexível, hidratados no bico de projeção no final deste tubo e depositado pela pressão de ar no local onde finalmente repousará". A definição de concreto projetado segundo essa mesma fonte seria "uma combinação proporcionada de cimento Portland, agregados e água que são misturados por métodos mecânicos e bombeados em estado plástico até o bico, onde adiciona-se ar para expelir o material" compactando-o pela força do jato de ar. Destas definições conclui-se que o gunitite é uma argamassa projetada por via seca, pois não possui agregados graúdos, e o concreto projetado deverá ser necessariamente executado em via úmida.

O "*American Concrete Institute (ACI) Committee 506*" no seu "*Guide to Shotcrete*"<sup>(9)</sup> define concreto projetado como "argamassa ou concreto pneumaticamente projetado a alta velocidade sobre uma superfície". Neste caso tem-se uma definição mais sucinta e abrangente, pois insere a possibilidade de utilizar ou não agregados graúdos e optar pelo processo de projeção, se via seca ou úmida.

Hills<sup>(10)</sup>, pesquisador inglês, define concreto projetado como sendo "uma mistura de cimento, agregado e água

projetados a alta velocidade a partir de um bico até um local onde produzirá uma massa densa e homogênea". Esta versão foi complementada pelo também inglês Webb<sup>(11)</sup> que salientou o papel da corrente de ar para garantir a alta velocidade de projeção.

Os suíços<sup>(12)</sup>, definiram concreto projetado como sendo aquele que é "transportado através de uma tubulação fechada sob pressão, em cuja saída se projeta sobre uma superfície, compactando-se simultaneamente".

Nestas definições observa-se a nítida preocupação de valorizar a alta velocidade de projeção como um meio para se garantir a auto-compactação do concreto projetado. Esta característica, juntamente com o fato de não necessitar fôrmas, apenas de um anteparo é suficiente, ajudou na difusão do emprego deste material.

No Brasil a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) através da Comissão de Estudos CE 18:306<sup>(13)</sup> fez uma boa definição contemplando todos estes aspectos: "o concreto projetado é um concreto com dimensão máxima do agregado superior a 4,8 mm, transportado através de uma tubulação e projetado, sob pressão, a elevada velocidade, sobre uma superfície, sendo compactado simultaneamente".

O que fica claro em todas estas definições de concreto projetado é a sua total interdependência com o processo de projeção, o que constitui o enfoque principal deste trabalho.

## **2.2. APLICAÇÕES DO CONCRETO PROJETADO**

Segundo a bibliografia consultada<sup>(8)(9)(12)(14)</sup>, pode-se relacionar uma série de 40 aplicações diferentes para o concreto projetado, o que denota a grande versatilidade deste material. As diferentes aplicações podem ser agrupadas

nos seguintes grandes temas: revestimentos, obras subterrâneas, contenção de taludes, reparos e reforços estruturais, impermeabilizações, elementos auto-portantes e formas livres.

### 2.2.1. Revestimentos

Neste tipo de aplicação do concreto projetado encontram-se as obras de revestimento de fachadas ou estruturas de concreto convencional (para protegê-las do intemperismo) e de estruturas metálicas, para protegê-las do fogo. O concreto projetado pode ser utilizado em conjunto com impermeabilizações, tanto para regularização do substrato como para proteção das mesmas.

Duas grandes aplicações do concreto projetado como revestimento estão na construção de túneis pelo método NATM (*New Austrian Tunnelling Method*)<sup>(15)</sup> e no revestimento refratário<sup>(14)</sup>, notadamente de fornos da indústria metalúrgica e cimenteira.

No caso dos túneis, além do papel estrutural analisado mais adiante, o concreto projetado deverá proteger a obra do túnel contra a penetração de água e agentes agressivos do solo. Os túneis executados em presença de água podem apresentar uma série de problemas<sup>(15)</sup>, o que se encontra mais detalhado no item 4.7.1.1.

Neste caso, portanto, o concreto projetado deve ter baixa permeabilidade e ser homogêneo para garantir uma boa durabilidade para a obra subterrânea. Uma outra característica das obras de túneis é o elevado grau de insalubridade provocado pela grande liberação de poeira durante a projeção<sup>(16)</sup>, o que faz com que o controle desta poeira seja de importância fundamental.

O concreto projetado refratário consiste basicamente<sup>(14)</sup>

numa mistura de cimento Portland comum ou cimento aluminoso e agregados refratários como, por exemplo, tijolos refratários moídos. As funções dos revestimentos refratários são: prevenir o superaquecimento da estrutura externa (aço, concreto ou alvenaria), agir como revestimento protetor da estrutura externa (prevenir corrosão), minimizar as perdas de calor do fluxo de gases e impedir que a temperatura interna da chaminé desça até o ponto de orvalho do ácido dos resíduos gasosos.

### 2.2.2. Obras subterrâneas

Na construção de túneis o concreto projetado deve, além da função de revestimento anteriormente comentada, desempenhar uma função estrutural adequada. Quando o maciço é rochoso esta função estrutural pode acontecer devido aos seguintes fatores<sup>(15)</sup>:

- a. O impacto obtido com a projeção do concreto induz ao preenchimento de juntas, fissuras, junções e irregularidades da superfície do substrato rochoso, proporcionando certa ligação entre os blocos de rocha;
- b. O concreto projetado impede a percolação de água pelas juntas da rocha e, desse modo, impede a lixiviação dos finos das juntas e a deterioração do maciço rochoso pelo contato com o ar e a água;
- c. O concreto projetado por sua própria resistência e a aderência à rocha impede a queda de blocos soltos;
- d. Camadas de concreto projetado de 15cm ou mais proporcionam um arranjo estrutural comparado a anéis fechados ou cascas de concreto em arco.

Jones<sup>(15)</sup> realça a importância da resistência ao cisalhamento e a aderência ao substrato como pontos fundamentais para evitar o desprendimento de blocos de rocha

do teto do túnel. Para melhorar a resistência ao cisalhamento pode-se lançar mão da adição de fibras e, para melhorar a aderência, utiliza-se a microssílica, a qual também melhora as propriedades mecânicas.

No Brasil, além das obras em rocha, executa-se uma grande quantidade de túneis pelo método NATM em solos como nas obras do Metrô de São Paulo<sup>(17)</sup> que, além do risco de desprendimento de blocos soltos (comuns em solos argilosos fraturados), apresentam maiores deformações<sup>(18)</sup>, exigindo um maior ganho de resistência nas primeiras idades, normalmente conseguido com o uso de aditivos. De qualquer forma, como aponta McClure<sup>(19)</sup> o concreto projetado "é um elemento efetivo de suporte" em obras subterrâneas e "não só o é para rochas fraturadas, mas também em solos e áreas bastante molhadas".

### **2.2.3. Contenção de taludes**

O concreto projetado utilizado para a contenção de taludes tem um papel semelhante ao das obras subterrâneas<sup>(12)</sup>. Ocorrem, porém, certas diferenças significativas pelo fato dele estar exposto ao intemperismo, notadamente as variações de temperatura. Sofre a ação do vento e insolação direta, que proporciona uma secagem prematura com conseqüente risco de retração e fissuramento intenso. Devido a estes fatores exige-se que o concreto projetado nestas condições apresente a maior compacidade possível e que seja executado numa espessura adequada e com a armadura necessária. Normalmente, não se faz necessária a utilização de aditivos aceleradores de pega ou endurecimento mas, quase sempre, exige a utilização de procedimentos de cura adequados.

Neste emprego específico fica realçado o que Kaden<sup>(20)</sup> chamou de consideração ambiental para o concreto projetado: Ele analisa a necessidade do projetista americano obedecer à rígida legislação que controla o impacto ambiental das obras

civis. Seja qual for a situação da obra, "o impacto ambiental pode ser reduzido pelo estabelecimento de alguns obstáculos naturais à visão" (como plantas trepadeiras<sup>(12)</sup>), e o uso de "cores em tons que mimetizem o concreto projetado com os arredores". O concreto projetado colorido pode ser conseguido com a adição de 2% a 8% de óxido de ferro<sup>(21)</sup>, o que está disponível no mercado brasileiro em vários tons. Essa possibilidade de variar a tonalidade da cor, abre espaço para a utilização do concreto projetado colorido em meios urbanos, reduzindo a poluição visual.

#### 2.2.4. Reparos e reforços estruturais

Os franceses<sup>(22)</sup> têm como possíveis aplicações para o concreto projetado no campo da recuperação de estruturas os seguintes serviços: preenchimento de cavidades, rejuntamento de alvenaria, execução de um revestimento superficial de proteção, aumento da seção resistente de concreto e execução de elementos portantes suplementares. É um dos principais campos de aplicação do concreto projetado, principalmente dos que são chamados pelo ACI<sup>(9)</sup> como concretos projetados especiais, onde se incluem aqueles destinados às aplicações sujeitas à deterioração química e à corrosão. As propriedades especiais são conseguidas às custas de adições como microssílica e fibras ou de aditivos como os silicatos de sódio e potássio, que trabalham como aceleradores de pega.

A utilização de microssílica no concreto projetado para a recuperação de estruturas tem se mostrado vantajosa no caso de obras marítimas. Assim relata Morgan<sup>(23)</sup> ao descrever a recuperação do Píer B-C do *Canadá Place Trade & Convention Centre* em Vancouver B.C. de 60 anos de idade, ocorrida em 1983. Isto porque, a microssílica teria um efeito positivo tanto nas propriedades ligadas à aplicabilidade do material quanto à sua durabilidade<sup>(23)(24)</sup>.



A utilização do concreto projetado armado com tela no reforço de vigas, muito empregado nas recuperações de estruturas de concreto, foi estudada a nível teórico e experimental por Lub e Van Wanroij<sup>(25)</sup>. Eles estudaram três outros métodos de reforço de vigas para comparação: colagem de chapas de aço, instalação de uma flange pré-moldada e revestimento com concreto projetado. "A vantagem dos dois primeiros métodos é o pequeno aumento nas dimensões da viga. As desvantagens são: a separação parcial das chapas de aço coladas, o fato de serem sensíveis a ataques físicos e químicos, a exigência de mão-de-obra especializada durante a execução e não serem a prova de fogo". Já o uso da flange tem as desvantagens de exigir "chumbadores ou outros conectores de aço para prevenir a separação entre ela e a superfície do concreto antigo e a necessidade de fôrmas". Conclui que o reforço de vigas com concreto projetado armado com tela é de aplicação prática com boa durabilidade estimada com economia de fôrmas.

No Brasil foram realizadas várias obras de reparo e reforço de estruturas de concreto armado com o auxílio do concreto projetado, tendo-se alguns exemplos citados no item 2.3.2. No entanto, raras são as experiências documentadas a respeito.

#### **2.2.5. Impermeabilizações**

Um concreto projetado de boa qualidade é muito pouco permeável<sup>(22)</sup>. Por essa razão, ele é utilizado intensamente para impermeabilizações de obras hidráulicas e de cavidades subterrâneas<sup>(12)</sup>. Normalmente, o que compromete o desempenho do concreto projetado é o aparecimento de fissuras devidas à retração, à variação térmica, ao carregamento e recalques ou mesmo as falhas de execução do mesmo. Para evitar este tipo de problema pode-se começar pela substituição do concreto por um revestimento flexível, ou se lançar mão de uma

armadura apropriada. Outro cuidado apontado para a execução, seria o de evitar o contato do concreto com a água antes de plenamente endurecido para evitar a lixiviação dos finos.

A exigência de impermeabilidade do concreto projetado é evidente na execução de reservatórios. Dykmans<sup>(27)</sup> apresentou, em 1966, o que chamou de "técnicas especiais de aplicação" para a execução dos mesmos, onde se destaca a cura. A cura tem por objetivos garantir a hidratação apropriada do cimento e prevenir a fissuração devida à retração. Para que ela tenha sucesso não basta uma cura simples (umedecimento da superfície durante uma semana) mas sim lançar mão de uma cobertura contínua de água (no caso dos pisos) ou de membranas de cura. Outra recomendação importante seria garantir a boa qualidade da execução reservando-se este serviço àquelas companhias com experiência comprovada.

Os fatores que proporcionam o desempenho satisfatório do concreto projetado na execução de reservatórios são os seguintes, segundo Schupack e Poston<sup>(28)</sup>:

- a. Proporcionamento e mistura adequada dos materiais constituintes;
- b. Preparação adequada das superfícies para garantir a boa aderência;
- c. Ausência de bolsões de areia produzidos pelo aprisionamento do material da reflexão;
- d. Garantia do cobrimento adequado da armadura;
- e. Fazer as considerações adequadas durante o projeto para minimizar a fissuração;
- f. Revestimento adequado da armadura ativa cujo o espaçamento deve ser tal que garanta o pleno envolvimento de cada fio e permita, também, a boa aderência entre o concreto projetado fresco e o antigo.

Isto foi comprovado pelos autores citados após analisarem

cerca de cem reservatórios de concreto projetado protendido. Alguns deles tinham mais de trinta anos e, pelo seu estado, comprovaram que o concreto projetado é um material durável nesta aplicação. Os principais problemas de deterioração ocorreram nas coberturas dos reservatórios, mais sujeitos ao intemperismo e com maior dificuldade de aplicação, o que fez com que suas características variassem com maior intensidade.

#### **2.2.6. Elementos auto-portantes**

Uma das utilizações de concreto projetado como elemento auto-portante está na execução de edificações. Um exemplo disto é o sistema patenteado de construção de casas de Turner<sup>(29)</sup>, que utiliza fôrmas infláveis como anteparo para a projeção.

A aplicação construtiva do concreto projetado é muito flexível, indo das volumosas barragens às finas estruturas em casca<sup>(30)</sup>. Nesta última situação, pode-se executar a estrutura posicionando uma tela metálica e projetando-se sobre ela. Após o endurecimento desta primeira camada, executa-se a segunda pelo lado oposto de modo a formar uma estrutura tipo sanduíche<sup>(12)</sup>. É muito importante nestes casos o controle de execução da obra para que se garanta o cobrimento da armadura. Além disso, a mão-de-obra tem papel preponderante na garantia da boa compactação do material, sem apresentar falhas que proporcionem uma movimentação danosa à estrutura<sup>(30)</sup>. Neste caso, como a estrutura estará exposta à insolação direta, devendo-se tomar cuidado com os riscos de retração e fissuração.

### 2.2.7. Formas livres

Devido à sua versatilidade na criação de elementos sem formas geometricamente rígidas, o concreto projetado se adequa muito bem à execução de simulações de terreno natural em zoológicos imitando rochas<sup>(18)(23)</sup> ou para a execução de esculturas. Alguns<sup>(8)</sup> apontam esta última utilização como a motivadora para o surgimento do concreto projetado ainda no século passado.

## 2.3. HISTÓRICO E EVOLUÇÃO

### 2.3.1. No exterior

O inventor do processo de projeção de uma argamassa, o que posteriormente redundou na projeção do concreto, foi o Dr. Carl Ethan Akeley, curador do *Field Museum of Natural Science* de Chicago nos EUA. Ele desenvolveu o processo por volta de 1895, com o objetivo provável de aplicar argamassa na construção de réplicas de animais pré-históricos<sup>(8)</sup>. Isto ocorreu pelo fato do sistema de moldagem convencional não possibilitar a execução de réplicas com boa resolução para as formas volumosas da musculatura dos grandes animais. O equipamento inicialmente utilizado consistia numa câmara simples pressurizada por ar comprimido. O ar comprimido forçava a saída do material da câmara por um bocal e conduzia-o por uma mangueira conectada a este até um bico de projeção onde era umidificada. Este equipamento foi aperfeiçoado com a colocação de uma segunda câmara pressurizada sobre a primeira, o que permitia a alimentação desta sem interromper a projeção. Além disso foi adaptado um rotor de câmaras dotado de um agitador na câmara inferior, o que possibilitou a projeção contínua do material. Este

equipamento, patenteado em 1911, é utilizado até os dias de hoje, principalmente nos serviços de recuperação de estruturas<sup>(12)</sup>.

Existe uma segunda versão para a real motivação da invenção do processo de projeção<sup>(12)</sup>, que seria a necessidade de revestimento da fachada do *Field Columbia Museum* de Chicago nos EUA. De qualquer forma, isto de fato ocorreu por volta de 1907, tornando-se a primeira aplicação prática do método em construção civil. Já em 1911 o processo era utilizado no revestimento de estruturas metálicas como proteção contra incêndio.

O rápido desenvolvimento da utilização do processo se deve em grande parte à atividade da *Cement-Gun Company*, fundada em Allentown, Pensilvânia, EUA, que lhe deu o nome de *gunite*. Ainda em 1911, utilizou o *gunite* para consolidar os taludes de *Culebra-Cut*, atualmente *Gaillard-Cut*, na linha divisora de águas do canal do Panamá. Assim, foram surgindo algumas "marcas concorrentes"<sup>(9)</sup> como *Guncrete*, *Pneucrete*, *Blastcrete*, *Blocrete*, *Jetcrete* para descrever o processo que se difundia pelo mundo. Em 1921, um colaborador da Allentown fundou a *Torkret GmbH* na Alemanha, ajudando a difundir a utilização do concreto projetado por toda a Europa<sup>(12)</sup>. No começo da década de trinta a *American Railway Engineering Association* apresentou o termo genérico *shotcrete* que, em 1951 foi adotado pelo *American Concrete Institute*, ganhando aceitação universal nos Estados Unidos. Da mesma forma, na Inglaterra, o concreto projetado foi denominado *sprayed concrete*, na Alemanha *Spritzbeton*, na França *béton projeté* e na Espanha *hormigón proyectado*.

A máquina de duas câmaras tinha capacidade de projetar uma mistura de cimento e agregados com diâmetro máximo inferior a 10mm<sup>(12)</sup> pelo processo de via seca. A projeção de misturas com agregados de maior diâmetro só foi possível a partir de 1950, aproximadamente, com a invenção da máquina de projeção com rosca-sem-fim por parte do mecânico suíço Georg Senn. Isto possibilitou a utilização do concreto projetado em obras subterrâneas onde ele assumiu sua moderna concepção.

No entanto, este tipo de equipamento não é mais utilizado, tendo sido substituída pela máquina de projeção com rotor de câmaras. A concepção deste último ocorreu nos Estados Unidos depois da Segunda Guerra Mundial, a partir de uma patente holandesa de 1929.

Uma máquina de rotor de câmaras foi comprada pela *Meynadier & Cie SA* de Zurique que chegou a um modelo melhorado em 1957, denominado *Meyco GM57*, cujo princípio foi adotado por outros fabricantes, inclusive brasileiros<sup>(32)</sup>. Na década de 50 também ocorreu a invenção do processo de projeção por via úmida em conjunto com a alimentação contínua<sup>(9)</sup>.

As décadas de 60 e, principalmente a de 70, foram marcadas por uma grande preocupação, por parte dos americanos, quanto à divulgação de informações sobre o concreto projetado<sup>(1)(2)(3)</sup>. Na década de 60 o uso da máquina de projeção de câmara dupla ou simples ainda era apontada como a típica da via-seca<sup>(33)</sup> e ainda se discutia a aplicação de concreto projetado com agregados graúdos<sup>(34)</sup> em túneis. Nessa discussão já era apresentado o equipamento de projeção *ALIVA BS-12*, com rosca-sem-fim, e a reflexão já era apontada como a consideração mais importante para o agregado graúdo, devendo-se empreender todos os esforços no sentido de minimizá-la.

Começaram a surgir na mesma década uma série de equipamentos de projeção por via úmida<sup>(35)(36)</sup>.

No começo da década de 70 surgiram os braços mecânicos (robôs) para aplicação de concreto projetado via úmida, principalmente<sup>(37)(38)</sup>. No entanto, até esse momento, não era possível encontrar um equipamento que fosse capaz de projetar o concreto por via úmida com agregado graúdo e aceleradores de pega de maneira satisfatória<sup>(39)</sup>. A maior causa deste desacerto residia no fato de se dispor apenas de aceleradores de pega em pó, que dificultavam intensamente a realização da dosagem precisa dos mesmos na via úmida. Isto foi decisivo para a consumação do domínio da via seca no concreto projetado até aquele momento.

Nessa mesma época ocorreu a primeira tentativa de viabilização de concreto projetado polímero<sup>(40)</sup>. No decorrer da década surgiu a possibilidade de aplicação de outros materiais no concreto projetado, tais como as fibras<sup>(41)</sup> e os aditivos aceleradores de pega à base de aluminatos<sup>(42)</sup>. Isto redundou numa maior preocupação com o equipamento de projeção, no sentido de se viabilizar a projeção com fibras e aditivos em pó ou líquidos com dosadores adequados<sup>(43)(44)</sup>, o que se discute até os dias de hoje. Rogers<sup>(45)</sup> apresentou em 1977 o equipamento de projeção via seca com calha em "U" como "o equipamento de quarta geração" para o concreto projetado. Não se pode afirmar, no entanto, que seria ele uma grande novidade, pois foi patenteado em 1960. Por outro lado, a máquina de projeção via seca com rotor de câmaras começou a ganhar o espaço no mercado que redundaria no domínio quase que total (para a projeção via seca) na década de 80<sup>(46)</sup> quando foi apontada como uma "otimização de difícil superação"<sup>(12)</sup>. Tanta foi a confiança depositada no equipamento, que a empresa Aliva a lançou no final da década de 80 uma versão para projeção por via úmida<sup>(47)(48)</sup>, tornando-se assim a única máquina a realizar projeções com sucesso nos dois processos, seco e úmido.

Durante os anos 80 a microssílica teve seu emprego no concreto projetado passando do incipiente à larga escala<sup>(23)</sup>, principalmente em conjunto com fibras de aço. Isto foi estimulado, nesta última situação particularmente, pelo fato interessante de se ter uma redução na reflexão tanto para a via úmida<sup>(49)</sup> como para a via seca<sup>(50)</sup>.

Finalmente o ACI<sup>(9)</sup> aponta, em 1990, como áreas prioritárias para pesquisa e desenvolvimento as seguintes:

- a. Dosagem racional do concreto projetado;
- b. Projeto de otimização do bico;
- c. Aperfeiçoamento dos ensaios de campo;
- d. Qualidade dos materiais;

e. Mecanização do equipamento;

f. Avaliação do substrato e

g. Automação do processo.

Nestes pontos denota-se a grande preocupação existente quanto à otimização do equipamento de projeção, a dosagem e o controle da qualidade, que inclusive estão sendo objeto de estudo na EPUSP<sup>(6)</sup>.

### 2.3.2. No Brasil

Na história do concreto projetado no Brasil pode-se constatar um permanente atraso tecnológico. Só em 1948 houve a primeira publicação técnica a respeito, na qual Molinari<sup>(51)</sup> introduz o processo "cement-gun" para a restauração de estruturas. Neste artigo o autor procurou descrever o processo de projeção de argamassas ("gunita") com a máquina de câmara dupla inventada por Akeley adaptado às condições nacionais. Assim, por exemplo, o traço adotado é o recomendado pelo *American Railway Engineering Association (A.R.E.A.)* (apud Molinari<sup>(51)</sup>), que consistia em "um saco de cimento de 42,5 kg para 85 litros de areia seca". Há neste artigo algumas recomendações interessantes sobre o controle de qualidade do material. A trabalhabilidade do material (coletado em um tacho sob o jato do 'cement-gun') deve apresentar no ensaio do *flow-table*, segundo o método MB-1, um índice de consistência de 180-200mm".

Mostra também uma boa visão da necessidade de controle do processo de projeção para se garantir a boa qualidade do material projetado. Isto fica claro quando o autor afirma que "a qualidade da gunita depende, em boa parte, da habilidade dos operários que a lançam".

A experiência brasileira de execução do concreto projetado



estava, normalmente associada com a realização de grandes obras<sup>(4)</sup>.

No entanto as informações obtidas com essa experiência não foram divulgadas ao meio técnico e quando o eram se fazia de maneira muito restrita. Prova disso é a grande carência de trabalhos nacionais publicados na década de 70.

Uma das exceções a esta regra coube a Eckschimidt<sup>(52)</sup> que em 1971 publicou o artigo "O concreto projetado visto por quem conhece". Neste trabalho o autor já apresenta os três tipos principais de máquinas de projeção via seca, quais sejam o de câmara dupla, o de rosca-sem-fim e o de rotor de câmaras. Além disso, são abordados de maneira clara alguns pontos importantes como o comprometimento das resistências finais do concreto quando da utilização de aditivos aceleradores de pega e endurecimento, quer sejam líquidos ou em pó; a necessidade de controle dos serviços para melhoria das propriedades do concreto projetado, principalmente a reflexão; o fato de se ter sempre uma reflexão mais rica em agregados graúdos que a mistura que entrou na máquina e, conseqüentemente, um maior consumo de cimento no concreto que efetivamente se fixou ao alvo de projeção. Este último aspecto passou "despercebido" até recentemente, pois os responsáveis pelo controle do fator a/c em obras de túneis não o levaram em conta nas suas determinações, como foi alertado por Prudêncio<sup>(53)</sup>.

Outras exceções, foram o artigo publicado por Ferreira<sup>(54)</sup> em 1972 intitulado "Concreto Projetado Jatocret", voltado para a recuperação de estruturas, e a realização do Primeiro Seminário DERSA - Rodovia dos Imigrantes em 1976. Neste seminário foram discutidos alguns dos problemas encontrados na execução dos onze túneis pelo processo do NATM, dentre os quais o comportamento do concreto projetado quando da ação de carregamentos inesperados onde se chegou a constatar trincas entre ele e a cambota e recalques de até 40cm<sup>(55)</sup>. Além disso é feita uma descrição do processo construtivo dos túneis<sup>(56)</sup>, sem no entanto tecer comentários com maiores detalhes sobre o concreto projetado, o qual foi apontado

como uma "nova tecnologia"<sup>(57)</sup>.

Papel importante, pelo menos a nível de publicações, teve o Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON), que possibilitou a publicação de vários trabalhos sobre o assunto. Numa destas publicações de 1982<sup>(58)</sup>, já se apontava a possibilidade concreta de empregar o concreto projetado como revestimento definitivo de túneis escavados em solo, o que demonstrava uma confiança crescente no material com relação à sua durabilidade.

Até o final da década de 80 a tecnologia que se dispunha no Brasil era, realmente, a da via seca, como atestou Cipriani<sup>(59)</sup>. No entanto já existiam preocupações quanto à normalização<sup>(60)</sup><sup>(61)</sup>. Além disso já se dispunha de equipamento de projeção nacional a algum tempo, fabricado pela Este Industrial e Comercial Ltda, muito semelhante ao fabricado internacionalmente pela Aliva (item 3.2.2.3.).

Nos últimos cinco anos, as grandes empreiteiras passaram a investir mais em concreto projetado. Uma das formas de investimento foi a importação de equipamentos de projeção por via úmida (robôs, bombas, dosadores) ou mesmo o desenvolvimento destes em conjunto com os fabricantes. Concomitantemente foram promovidos projetos de pesquisa internos ou externos, como foi o inserido num convênio entre a Companhia Brasileira de Projetos e Obras - CBPO e a Universidade de São Paulo ou, mais especificamente, com a Escola Politécnica. Isto foi motivado por alguns fatores como a grande quantidade de obras em andamento<sup>(62)</sup> e a elevação cada vez maior dos custos de desapropriação, o que tenderia a intensificar a situação devido à, cada vez mais fácil, viabilização econômica dos túneis<sup>(63)</sup><sup>(64)</sup>. Um outro aspecto interessante é que, ao contrário das barragens, os túneis poderiam trazer benefícios ao meio ambiente como ocorreu na construção da Rodovia Carvalho Pinto em Jacareí, São Paulo. Lá optou-se pela execução de túneis em lugar de cortes que destruiriam um trecho da mata atlântica, o que apresenta uma dificuldade a menos para a aprovação dos relatórios de impacto ambiental (RIMA).

A título de ilustração pode-se citar as seguintes obras com túneis em andamento naquela época na Grande São Paulo:

- a. Extensão Norte do Metrô;
- b. Extensão Leste do Metrô;
- c. Linha Paulista do Metrô;
- d. Túneis sob o Rio Pinheiros, avenida Presidente Juscelino Kubitschek e Parque do Ibirapuera da EMURB.

Com a elevação dos custos de desapropriação, esta situação tenderia a se intensificar devido à, cada vez mais fácil, viabilização econômica dos túneis<sup>(64)</sup>.

Fruto dessa grande atividade foram as primeiras testes realizados para viabilizar a projeção de concreto com adições de fibras e microssílica<sup>(65)</sup> e a execução, pela primeira vez no Brasil, do revestimento final de dois túneis com concreto projetado por via úmida em São Paulo<sup>(66)</sup>. No entanto, esta tentativa de recuperar o atraso tecnológico que marcou a história do concreto projetado no Brasil e "acompanhar de perto o nível tecnológico dos países desenvolvidos"<sup>(67)</sup> nem sempre foi seguido pelo aperfeiçoamento das especificações como se verá no próximo item.

#### 2.4. ESPECIFICAÇÕES

Como já foi comentado anteriormente, para se definir concreto projetado deve-se, necessariamente, lançar mão da descrição do processo de projeção. Para se especificá-lo isto também acontece e é de importância fundamental. Assim, deve-se especificar também o processo de projeção que deverá ser utilizado, pois as propriedades do material e o processo de projeção são totalmente interdependentes. No entanto, neste item não será abordado o processo de projeção, que

será tema do próximo capítulo, ficando então restrito aos requisitos exigidos do material.

#### **2.4.1. Materiais constituintes**

Com exceção feita à granulometria, os materiais especificados para uso no concreto projetado têm suas propriedades controladas segundo a normalização vigente para o concreto convencional<sup>(5)(12)(67)(68)(69)</sup>. No entanto, como afirmam os suíços da Aliva<sup>(12)</sup>, "as opiniões sobre a curva granulométrica ideal não são unânimes, muito pelo contrário", pois o único ponto que têm em comum é a continuidade. Isto se deve ao fato das diversas condições que a "curva granulométrica ideal" deve atender, a começar pelo próprio equipamento de projeção a ser utilizado. Neste aspecto, a via seca, em relação à via úmida é "muito mais tolerante no que se refere à trabalhabilidade"<sup>(66)</sup> pelo fato de apresentar fluxo aerado. Assim, são de particular importância as recomendações do fabricante, quando se encontram disponíveis.

Outro importante fator, referente à granulometria, que é de grande importância para o concreto projetado é a dimensão máxima característica do agregado. Apesar dos catálogos de fabricantes de equipamentos de projeção por via seca admitirem a possibilidade de projeção de misturas com agregados de dimensão máxima característica de 25mm<sup>(32)(70)(71)</sup>, eles próprios admitem que a prática tem indicado que o equilíbrio técnico e econômico é conseguido com dimensões máximas abaixo de 16mm<sup>(12)</sup>. Isto se deve ao fato de grãos maiores implicarem num maior desgaste do equipamento (caso não seja seixo rolado) e numa maior reflexão<sup>(12)</sup>.

#### 2.4.2. Concreto projetado para túneis

O campo de aplicação do concreto projetado que possui um maior nível de detalhamento na sua especificação é a execução de túneis pelo processo NATM. Nele são exigidas propriedades variadas como elevadas resistências a baixas e maiores idades, estanqueidade e durabilidade que garanta uma vida útil de 100 anos<sup>(72)</sup>. No entanto, muitas informações permanecem num nível precário de conhecimento, principalmente no que se refere às resistências a baixa idade.

A resistência à compressão e, indiretamente, a deformabilidade do concreto projetado é um dos pontos mais importantes no que se refere à sua especificação. Isto ocorre porque se utiliza o concreto projetado como escoramento em túneis, o que corresponde à situação de avanço do mesmo, na frente de escavação, onde existe um dos maiores riscos de acidentes na construção civil, segundo Celestino<sup>(73)</sup>. Neste mesmo trabalho, ele alerta para o fato de que "não se dispõe de modelos práticos e confiáveis para o dimensionamento do suporte recém-lançado de concreto projetado". Isto implica na existência de dificuldades no estabelecimento dos requisitos de projeto e controle do material no que se refere à resistência à compressão. Normalmente, estes requisitos são estabelecidos a partir de curvas de evolução da resistência com o tempo, as quais foram elaboradas com base na experiência e na prática corrente estrangeira, como é o caso das curvas adotadas na Áustria<sup>(69)</sup> (Figura 2.1.). Outro exemplo desta curvas, de caráter mais simplificado, está apresentado na Figura 2.2.

Estas curvas da Figura 2.1 definem os valores mínimos a serem atingidos pela resistência do concreto no período de 6 minutos a 24 horas. A escolha das curvas é feita segundo a situação do maciço a ser escorado pelo material<sup>(69)</sup>. Assim sendo, a Curva J1 é indicada quando o concreto projetado precisa ser aplicado o mais rapidamente possível, em grossas

camadas (inclusive no teto), com infiltrações de água e na ocorrência de tensões devidas a atividades de escavação realizadas logo após o lançamento do material (Por exemplo: perfurações na rocha, explosões, etc.). Essa já é uma situação exigente do túnel, dependendo da geologia do maciço, o que não foi especificado pelos austríacos<sup>(69)</sup>. A Curva J2 é indicada quando se soma às condições anteriores o fato de existir o desenvolvimento rápido de pressões ativas do maciço no revestimento do túnel.

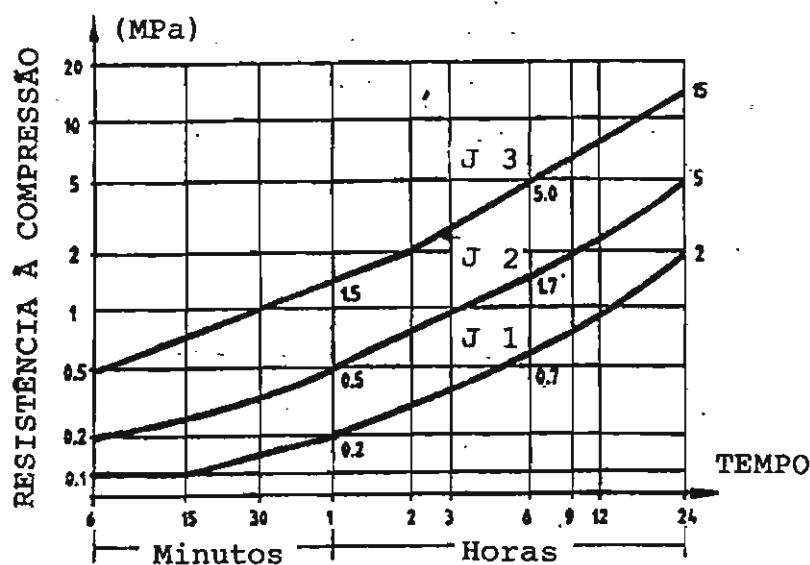


FIGURA 2.1: Requisitos austríacos para a evolução da resistência do concreto projetado a baixas idades.<sup>(69)</sup>

A escolha da faixa de utilização depende também do grau de utilização do concreto recém projetado. Isto é, como o concreto sofre carregamentos logo após o seu lançamento, quando as reações de hidratação estão simplesmente principiando, a sua deformação lenta é intensificada. Assim, mesmo sendo as deformações de fluência preponderantes no comportamento do material, são adotados modelos elásticos e elasto-plásticos de dimensionamento<sup>(73)</sup>. Para maior segurança, o que os projetistas procuram fazer é exigir um rápido desenvolvimento de resistências a baixa idade.

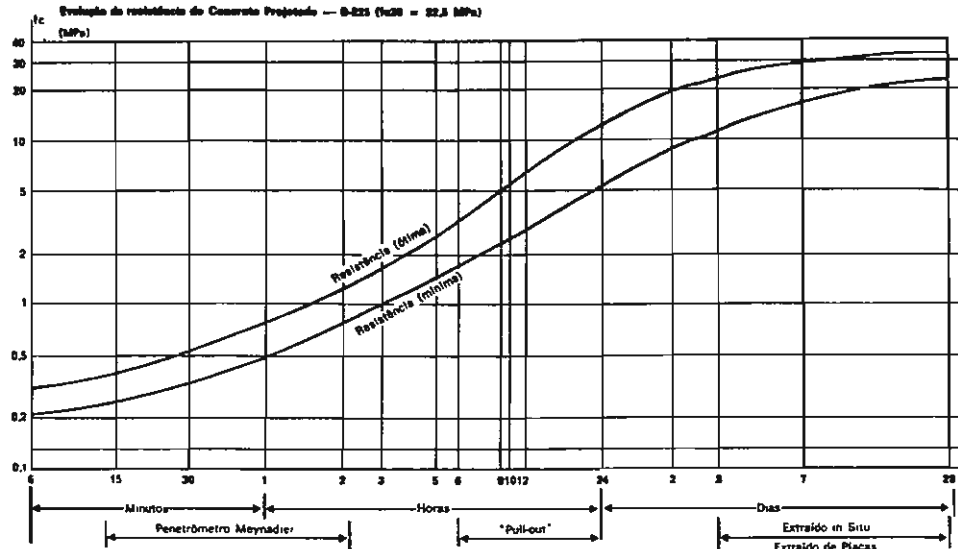


FIGURA 2.2: Evolução da resistência do concreto projetado com o tempo<sup>(4)</sup>.

Como as altas resistências a baixa idade, obtidas com aditivos aceleradores, implicam numa perda de desempenho a maiores idades, a adoção da curva J3 como referência mínima só é indicada em casos excepcionais<sup>(69)</sup>.

O controle das resistências do concreto desde as baixas idades, no entanto, não é usual nas obras brasileiras<sup>(73)</sup>. Isto, no entanto, caminha para uma resolução através da utilização de equipamentos como a Agulha de Meynadier e o Penetrômetro de Energia Constante<sup>(74)</sup> que farão parte do grupo de textos normativos sugeridos à ABNT, destinados ao concreto projetado. Estes equipamentos permitem avaliar a resistência do concreto desde os primeiros instantes depois da projeção até o momento em que é possível se efetuar a extração de testemunhos<sup>(74)</sup>. Como não se tinha essa metodologia disponível, as especificações brasileiras fixavam a idade mínima de 8 ou 10 horas para a determinação da resistência do concreto quando, normalmente, já era possível a extração.

Para a execução dos Túneis da Ligação Ferroviária Belo Horizonte-São Paulo, ocorrida no final da década de 70, a especificação da resistência do concreto projetado a baixas idades tinha como valores mínimos 5 MPa a 10 horas e 10 MPa a 24 horas<sup>(5)</sup>. Posteriormente, optou-se por especificar resistências características, como ocorreu nas obras da extensão norte do Metrô de São Paulo<sup>(68)</sup> onde se tinha 2,5 MPa a 10 horas e 5 MPa a 3 dias. Mais recentemente, a tendência de optar pela especificação de resistências médias da ordem de 5,5 MPa a 10 horas e 10 MPa a 24 horas<sup>(75)</sup> (muito próximo do que fazem os ingleses<sup>(76)</sup> com 4 MPa a 10 horas e 10 MPa a 24 horas) limitando-se a variação da mesma parece se consolidar como também vem acontecendo com os requisitos de resistência para maiores idades, conforme descrito a seguir.

Normalmente, os procedimentos empregados no dimensionamento do suporte de túneis se limitam à verificação das condições de longo prazo do seu comportamento estrutural (onde já ocorreu uma estabilização), apesar do menor risco de acidentes. Além disso, já foram realizadas, com certo sucesso, várias tentativas de instrumentação, para determinação de tensões em suporte de túneis nesta situação, o que confere maior segurança no conhecimento do comportamento do concreto em conjunto com o maciço, no que se refere à sua deformabilidade e solicitação<sup>(73)</sup>.

No entanto, ainda hoje não se chegou a um consenso sobre que resistência se especificar para o material a maiores idades, isto é, se a média ou a característica. Ainda hoje o Metrô de São Paulo especifica a resistência característica<sup>(77)</sup>. Mas já em 1980 foi adotada na obra da Ligação Ferroviária Belo Horizonte-São Paulo, o critério de aceitação de um valor médio e de uma variabilidade máxima, o que se justificaria pela "natureza dos fenômenos em jogo", que permitia afirmar que "o colapso da estrutura não é causado por rupturas pontuais no seu sistema de revestimento"<sup>(5)</sup>. Desta forma também entendem os austríacos<sup>(69)</sup>, que recomendam a especificação de resistências médias em função



dos critérios de dimensionamento e da resistência à baixa idade adotada, como o apresentado na Tabela 2.1. A resistência, neste caso, pode ser referida a 28, 56 ou 91 dias de idade. Da mesma forma que para os requisitos de resistência à baixa idade, não são dados os critérios que justificam a adoção destes valores.

TABELA 2.1: Classes de resistência do concreto projetado<sup>(69)</sup>.

CLASSE	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO MÉDIA MÍNIMA (MPa)	OBSERVAÇÕES
SC 12	12	
SC 16	16	
SC 19	19	Com requisitos J1 ou J2 para baixas idades, geralmente obtida a 28 dias
SC 22	22	Com requisitos J1 ou J2 para baixas idades, obtida a 28 dias ou mais
SC 25	25	
SC 28	28	Com requisitos J1 ou J2 para baixas idades, geralmente obtida a 91 dias
SC 30	30	Sem exigências para as baixas idades (ex.:reparos de concreto armado)
SC 40	40	

A permeabilidade e/ou a porosidade do concreto projetado podem ser alguns dos principais fatores determinantes da sua durabilidade pois estão correlacionadas com as características de lixiviação, resistência ao ataque de cloretos ou sulfatos, corrosão das armaduras, etc.<sup>(78)</sup>. Como os ensaios de permeabilidade são mais complexos e caros para serem executados, opta-se, normalmente, por controlar a absorção do material. Dessa forma, as especificações

nacionais procuram limitar a absorção por imersão do concreto na faixa dos 8%, seja para via seca ou para via úmida<sup>(66)(68)(75)</sup>. Isto ocorre devido ao fato de, normalmente, se obter valores na faixa de 5 a 8% de absorção por imersão e fervura a 28 dias de idade<sup>(79)</sup> com o concreto projetado via seca tradicional bem executado<sup>(68)(80)</sup>. No entanto este valor de referência não é unânime pois Ryan<sup>(14)</sup>, apesar de indicar que a absorção por imersão simples (ligeiramente inferior à imersão com fervura) normal varia entre 6 e 7%, define como parâmetro, que não deve ser excedido, os 10%.

Outra especificação convencional é aquela que restringe o tipo de cimento àqueles com adição de escória de alto forno, pozolanas ou microssílica, ou ainda de baixo teor de aluminato tricálcico quando se depara com solos agressivos<sup>(58)</sup>. Uma das classificações de agressividade do solo ou, melhor dizendo, da água presente no solo que pode servir de base para a determinação do tipo de cimento a ser utilizado, é aquela fornecida pela CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental na norma CETESB/L 1.007 de 1988<sup>(81)</sup>

Assim, para uma agressividade do meio aquoso definida como fraca, já é aconselhável a utilização de cimentos especiais e, para o caso de agressividade muito forte, deve-se contar obrigatoriamente com dispositivos especiais de proteção que isolem o material do meio<sup>(82)</sup>.

Uma das restrições que normalmente se faz ao concreto projetado é a qualidade de seu acabamento. Por isso, em alguns casos onde "são exigidos acabamentos de elevado padrão estético", acaba-se por especificar o concreto moldado convencional utilizando-se de fôrmas metálicas deslizantes, como ocorreu nas obras das estações da linha Paulista do Metrô de São Paulo<sup>(66)</sup>. No entanto, como os fatores estéticos mudam com o passar do tempo com certa facilidade, já se pode esperar que a tendência seja optar (em benefício da economia) pela especificação do concreto projetado para o revestimento final, como ocorreu no Metrô

de Estocolmo em 1978 (Celestino apud Armelin et alli<sup>(66)</sup>) e no Túnel do Anel Viário da Cidade de Campinas em São Paulo<sup>(66)</sup>.

#### 2.4.3. Outras aplicações

Para outras aplicações, que não seja o revestimento de túneis, julga-se como melhor guia de especificações o proposto pelo *American Concrete Institute* - ACI através de seu comitê número 506<sup>(67)</sup>. Segundo o próprio documento, "esta especificação pode não ser aplicável ao concreto projetado usado para o suporte estrutural subterrâneo" mas não apresenta restrições a qualquer outra aplicação<sup>(67)</sup>.

Nesse documento são apresentadas três faixas granulométricas ideais para agregados em função da dimensão máxima do mesmo, qual seja da ordem de 9,5mm ou 12,5mm ou 19mm, conforme o apresentado na Tabela 2.2. Entretanto, não é especificado nenhum critério para a escolha, como poderia ser, por exemplo, aquele recomendado pelo fabricante do equipamento de projeção.

A especificação da resistência à compressão do concreto projetado é feita, por parte do ACI<sup>(67)</sup>, nos mesmos moldes do concreto convencional, isto é, sem haver preocupação de definir uma evolução para ela, tendo a ressalva de associá-la a cada ponto da estrutura. Os ingleses, pelo contrário, recomendam a avaliação da resistência à compressão com corpos de prova cilíndricos extraídos de placas com cerca de 48 horas de idade e ensaiados a 3 dias, 7 dias e 28 dias de idade. O controle é feito por resistência média e "a diferença entre as resistências deve ser menor que 20% do valor da média"<sup>(76)</sup>.

A não especificação de resistências a baixas idades se deve ao fato dela ser necessária à utilizações restritas como, por exemplo, o revestimento de túneis (escoramento primário)

ou quando da utilização sistemática de aditivos aceleradores.

Há que se ressaltar o fato de que em nenhuma parte da especificação se faz referência à permeabilidade do material. Isto se deve ao fato do ACI estar trabalhando num projeto específico sobre durabilidade do concreto projetado, além de outra sobre sua aplicação no revestimento de túneis<sup>(83)</sup>.

TABELA 2.2: Faixas granulométricas ideais em função da dimensão máxima do agregado<sup>(67)</sup>.

ABERTURA DA MALHA DA PENEIRA (mm)	MASSA PASSANTE POR CADA PENEIRA (%)		
	GRADUAÇÃO N <sup>o</sup> 1	GRADUAÇÃO N <sup>o</sup> 2	GRADUAÇÃO N <sup>o</sup> 3
19,00	-	-	100
12,50	-	100	80-95
9,50	100	90-100	70-90
4,80	95-100	70-85	50-70
2,40	80-100	50-70	35-55
1,20	50-85	35-55	20-40
0,60	25-60	20-35	10-30
0,30	10-30	8-20	5-17
0,15	2-10	2-10	2-10

#### 2.4.4. Normalização<sup>(83)</sup>

A normalização do concreto projetado apresenta certas particularidades, ligadas à peculiaridade do material, que produzem dificuldades para a rápida chegada ao entendimento, quais seja:

-grande variedade de aplicações;

-diferentes processos de projeção (via seca e via úmida);

-não existe consenso sobre a adequação, repetibilidade e reprodutibilidade da metodologia específica de ensaios;

-a qualidade do material é definida, principalmente, por fatores ligados à mão-de-obra e os procedimentos executivos empregados, além dos relativos aos materiais componentes e dos equipamentos de projeção empregados e

-a inexistência de uma metodologia nacional uniforme de ensaios, o que impossibilita a comparação de resultados.

Com isto em vista e em face das necessidades do meio técnico, diversas entidades têm dado maior atenção à normalização do concreto projetado, tanto no Brasil como no exterior.

#### 2.4.4.1. No exterior

##### a. Alemanha

Já foram produzidos documentos específicos sobre o concreto projetado pelas três entidades encarregadas de produzir documentação normativa: Instituto Alemão de Normas (DIN), Instituto Alemão do Concreto (DBV) e o Departamento Central da Ferrovia Nacional (BZA). Cabe ressaltar aqui a experiência bem sucedida da norma DIN 18.551 Spritzbeton (Concreto Projetado) aplicável a todos os serviços do concreto projetado e, em especial, ao revestimento de túneis e à manutenção de construções de concreto armado. Ela possui um apêndice denominado "Recomendações para o reforço e reparo de estruturas de concreto armado por concreto projetado" que regula especialmente esta aplicação. Sua publicação trouxe, segundo Ruffert<sup>(84)</sup> um aumento tanto na qualidade como no campo de uso do concreto projetado na Alemanha.

#### b. Áustria

A *Austrian Concrete Society* instalou um comitê para elaborar recomendações específicas para o concreto projetado e a primeira parte do seu *Guideline on Shotcrete*, referente às aplicações, já foi publicada<sup>(69)</sup>. A segunda parte, que abordará os métodos de ensaio, está em fase de preparação.

#### c. Canadá

Não existem grupos formalmente organizados ou comitês de normalização para a elaboração de normas para concreto projetado no Canadá. No entanto, consideram-se aplicáveis as recomendações do Comitê 506 do ACI e as normas do *American Society for Testing and Materials (ASTM)*, específicas para concreto projetado, pois grande parte dos pesquisadores envolvidos com o tema participa de comitês nessas entidades. Várias pesquisas custeadas pelo governo e por empresas privadas estão em andamento no Canadá e seus resultados são aplicados na melhoria da qualidade das recomendações e normas norte-americanas. Entre os temas destas pesquisas destacam-se<sup>(85)</sup>:

- suprimento de mistura seca ensacada para concreto projetado;
- suprimento de fibras de aço e polipropileno para fins de concreto projetado;
- suprimento de aceleradores e
- usuários do concreto projetado como os responsáveis por estradas de ferro e de rodagem e companhias de mineração.

#### d. França

Estabeleceu-se em 1972 um grupo que elaborou o documento "Recomendações para Aplicação e sobre a Tecnologia de

concreto Projetado em Estruturas Subterrâneas", e atualmente prepara outro sobre o emprego do concreto projetado com fibras.

Em 1977 a *Association Française du Béton* publicou o seu *Guide du Béton Projete*<sup>(86)</sup> voltada para aplicações gerais do concreto projetado e, em 1985, a *Association Française pour la Construction* (AFPC) em conjunto com o *Syndicat National du Béton Armé et des Techniques Industrialisées* (SNBATI) e *Syndicat National des Entrepreneurs Spécialistes de Structures* (STRRES) publicaram uma coleção sobre as técnicas de reparo e reforço das estruturas de concreto, onde o fascículo 3 é dedicado ao reparo por concreto projetado<sup>(22)</sup>.

#### e. Noruega

As primeiras recomendações foram publicadas em 1971 pelo Comitê do Concreto Projetado norueguês. Mais tarde foi publicado um guia de aplicação e, em 1986, a norma NS 3420 sobre o mesmo tema. Desde 1990 o comitê conta com o suporte da *Norwegian Rock Blasting Association* para a normalização prioritária do concreto projetado com fibras.

#### f. Espanha

Na Espanha, a *Asociación Española de Normalización y Certificación* (AENOR) está atualmente com um comitê de estudos sobre concreto projetado especificamente. Já foram elaborados alguns projetos de norma, tais como:

-Proyecto de Norma UNE 83.601 Hormigón y Morteros Proyectados. *Classificación y definiciones;*

-Proyecto de Norma UNE 83.602 Hormigón y Morteros Proyectados. *Preparación de la muestra para obtención de probetas testigo;*

-Proyecto de Norma UNE 83.603 Hormigón y Morteros

*Proyectados. Determinación de la resistència a la penetración in situ por medio del penetrómetro;*

*-Proyecto de Norma UNE 83.605 Hormigón y Morteros Proyectados. Obtención, preparación y ensayos a compresión o tracción de probetas testigo e*

*-Proyecto de Norma UNE 83.606 Hormigón y Morteros Proyectados. Obtención, preparación y ensayos a flexotracción de probetas testigo.*

#### g. Japão

Devido à grande necessidade de conhecimento e controle do concreto projetado para túneis (os japoneses totalizaram dois milhões de metros cúbicos projetados em 1989), estão sendo realizadas várias pesquisas que deram origem a guias, recomendações e normas. Várias organizações têm trabalhado no tema, tais como a *Japan Tunneling Association (JTA)*, a *Japan Society of Civil Engineers (JSCE)*, a *Japan National Railway*, a *Japan Highway Public corporation (JHPC)*, a *Public Works Research Institute*, a *Railway Technical Research Institute* e o *Inhouse Research Centre of General Contractors*.

#### h. Estados Unidos

A ASTM formou um novo comitê em 1990 para trabalhar, especificamente, na normalização do concreto projetado, o C09.03.20. Os temas de trabalho principais deste comitê são o concreto projetado convencional, o concreto projetado com fibras e a avaliação do concreto projetado *in-loco* (baseada em ensaios de campo) e, o que muito se relaciona com este tema, a análise do concreto projetado recém-lançado.

A relação de normas sobre concreto projetado publicadas pela ASTM é a seguinte:



-ASTM C1102-88: *Standard Test Method for Time Setting of Portland-Cement Pastes Containing Accelerating Admixtures for Shotcrete by the Use of Gillmore Needles;*

-ASTM C1116-89: *Standard Specification for Fiber-Reinforced Concrete and Shotcrete;*

-ASTM C1117-89: *Standard Test Method for Time Setting of Shotcrete Mixtures by Penetration Resistance;*

-ASTM C1140-89: *Standard Practice for Preparing and Testing Specimens for Shotcrete Test Panels;*

-ASTM C1141-89: *Standard Specification for Admixtures for Shotcrete;*

Além destas normas também são empregadas para o concreto projetado as seguintes:

-ASTM C642: *Specific Gravity Absorption and Voids in Hardened Concrete;*

-ASTM C1018: *Flexural Toughness of Fiber Reinforced Concrete*, usada no caso específico do concreto projetado com fibras e

-ASTM C666: *Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing* de grande importância para aquelas regiões sujeitas ao efeito de gelo e degelo.

O Comitê 506 do ACI tem elaborado novas recomendações e, periodicamente, revisado as existentes:

-*Guide to Shotcrete*<sup>(9)</sup>;

-*Specifications for Materials, Proportioning, and Application of Shotcrete*<sup>(67)</sup>;

-*State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Shotcrete*<sup>(87)</sup> e

-*Guide to Certification of Shotcrete Nozzlemen*<sup>(88)</sup>.

Estas recomendações serviram de referência para as

especificações brasileiras, principalmente no início de suas atividades como se verá a seguir.

#### 2.4.4.2. No Brasil

Ainda não há nenhuma norma específica, consensual, sobre concreto projetado publicada no Brasil, apesar do esforço de vários profissionais neste sentido desde o começo da década de 80. Nesta época foram elaborados alguns textos base como a "Determinação do tempo de pega de combinações de pasta de cimento portland e aditivos aceleradores de pega"<sup>(61)</sup> destinada à verificação da compatibilidade entre cimentos e aditivos aceleradores, e a "Determinação do índice de reflexão médio de argamassas e concretos projetados em painéis"<sup>(60)</sup> e as "Especificações para Argamassa e Concreto Projetados"<sup>(89)</sup> apresentados pelo engenheiro Selmo Kuperman, cujo estudo se deparou com a dificuldade de enfrentar a rápida evolução do assunto, o que impossibilitou sua conclusão.

Percebeu-se, com o passar do tempo, que havia uma grande necessidade de ensaios confiáveis específicos para concreto projetado, o que possibilitaria o estabelecimento de parâmetros de qualidade do material. Para que isso fosse possível, seria necessária uma fase de estudos laboratoriais que foi desenvolvida com o auxílio de entidades como a Companhia do Metropolitano de São Paulo (Metrô), a Companhia de Saneamento Básico de São Paulo (SABESP), as Centrais Elétricas de São Paulo (CESP) e a Escola Politécnica (EPUSP), além de laboratórios particulares.

Em 1986 foram reiniciados os trabalhos da comissão de estudo 18:306 no CB 18 - Comitê Brasileiro de Cimento, Concreto e Agregados na ABNT visando a elaboração de normas sobre concreto projetado. Os objetivos foram os seguintes:

-abranger tanto o processo de via seca como o de via úmida;

-definir numericamente os requisitos que o concreto projetado deveria atender segundo sua aplicação, conforme observações obtidas em campo e na literatura existente;

-estabelecer métodos de ensaios confiáveis quanto à repetibilidade e reprodutibilidade de resultados a partir de verificação exaustiva em laboratório e

-elaborar textos referentes à aplicação do concreto projetado e à qualificação do mangoteiro.

Com a evolução advinda do desenvolvimento tecnológico e das próprias observações e constatações feitas no período subsequente, houve uma série de alterações e a ampliação da lista de documentos a serem publicados. Atualmente a comissão de estudos definiu uma lista de normas prioritárias sobre o concreto projetado a ser publicado:

A. Concreto Projetado - Especificações técnicas (Especificação). Projeto CE 18:306.01-001.

B. Concreto Projetado - Determinação da resistência à compressão a baixas idades - Agulha de Meynadier (Método de ensaio). Projeto CE 18:306.02-001.

C. Concreto Projetado - Determinação da índice de reflexão em placas (Método de ensaio). Projeto CE 18:306.02-002.

D. Concreto Projetado - Determinação dos tempos de pega em pastas de cimento Portland, com ou sem a utilização de aditivos aceleradores de pega (Método de ensaio). Projeto CE 18:306.02-003.

E. Concreto Projetado - Determinação da relação água/cimento (Método de ensaio). Projeto CE 18:306.02-004.

F. Concreto Projetado - Reconstituição de misturas recém projetadas (Método de ensaio). Projeto CE 18:306.02-005.

G. Concreto Projetado - Determinação do índice de reflexão por medição direta (Método de ensaio). Projeto CE 18:306.02-006.

H. Concreto Projetado - Determinação da consistência de misturas de recém projetadas (Método de ensaio). Projeto CE 18:306.02-007.

I. Concreto Projetado - Moldagem de placas (Método de ensaio). Projeto CE 18:306.02-008.

J. Concreto Projetado - Determinação do teor incorporado de fibras (Método de ensaio). Projeto CE 18:306.02-009.

K. Concreto Projetado - Comportamento pós-fissuração do concreto projetado com fibras (Método de ensaio). Projeto CE 18:306.02-010.

L. Concreto Projetado - Determinação da resistência à compressão a baixas idades - Penetrômetro de Energia Constante P.E.C. (Método de ensaio). Projeto CE 18:306.02-011.

M. Concreto Projetado - Aplicação do concreto projetado por via seca (Procedimento). Projeto CE 18:306.03-001.

N. Concreto Projetado - Qualificação de Mangoteiro - Via Seca (Procedimento). Projeto CE 18:306.03-002.

O. Concreto Projetado - Aplicação do concreto projetado por via úmida (Procedimento). Projeto CE 18:306.03-003.

P. Concreto Projetado - Qualificação de Mangoteiro - Via Úmida (Procedimento). Projeto CE 18:306.03-004.

Dentre estes textos já foram aprovados a nível de comissão o D, o F, o G, o M e o N. Os textos A e C já foram totalmente elaborados e estão em discussão na comissão necessitando apenas de revisão. Os textos B, E, H, I, J e K tem seus textos-base prontos e estão aguardando estudo por parte da comissão. Já os textos O e P necessitam ser elaborados na íntegra.

Outros temas que poderão vir a ser incorporados à esta lista são os referentes aos aditivos para uso em concreto projetado e a segurança no trabalho com este material.

Finalmente, um ponto que aparece com especial relevo é a normalização do concreto projetado com fibras. Este tema é objeto de estudo para a normalização no Canadá, Noruega, Japão, Espanha, Estados Unidos e Brasil, o que atesta a sua grande importância como se encontra comentado a seguir.

## **2.5. CONCRETO PROJETADO ESPECIAL**

O concreto projetado especial é aquele que tem suas propriedades modificadas através do uso de materiais não convencionais como as fibras, a microssílica e os polímeros. Podem ser utilizados em separado ou em conjunto de acordo com as necessidades.

### **2.5.1. Concreto projetado com fibras**

Segundo o ACI<sup>(87)</sup>, o concreto projetado com fibras consiste numa "argamassa ou concreto contendo fibras descontínuas e discretas que são pneumaticamente projetadas a alta velocidade sobre uma superfície". Essas fibras podem ser de vidro, de material sintético (basicamente polipropileno) e de aço.

A utilização de fibras de aço no concreto projetado é um dos assuntos que mais têm sido estudados, uma vez que seu emprego cresce continuamente em vários países. Dentre estes países se destaca o Japão, onde são utilizadas cerca de três mil toneladas de fibras metálicas por ano, sendo metade deste total destinado ao revestimento de túneis (Kobayashi apud Armelin<sup>(90)</sup>). Isto se deve ao fato do concreto projetado convencional ser frágil como o concreto moldado não armado e, por esta razão, necessita de uma armadura que aumente sua ductilidade, resistência à fissuração e ao impacto<sup>(91)</sup>. Nos túneis, a necessidade de armadura é,

tradicionalmente, suprida pelo emprego de telas metálicas, cuja instalação trabalhosa demanda longo tempo. Assim, com a utilização de fibras em seu lugar, se pouparia este tempo no ciclo de escavação abreviando-o<sup>(90)</sup>. Por esta razão, vários pesquisadores como Morgan e Mowat<sup>(92)</sup>, Opshal<sup>(93)</sup>, Redford e Alexander<sup>(94)</sup>. Kirsten e Cabrum (apud Redford e Alexander<sup>(94)</sup>), Morgan et alii<sup>(95)</sup> e a própria Bekaert S.A.<sup>(91)</sup> (grande fabricantes de fibras) fizeram estudos comparando o desempenho do concreto projetado reforçado com fibras com o reforçado com telas metálicas.

Nestes estudos constatou-se que o desempenho do concreto projetado com fibras de aço igual ou até superior ao reforçado com tela. No entanto, em países onde o custo da fibra é muito elevado como na África do Sul, onde só é obtida por importação, ainda se tem grandes restrições quanto à sua viabilização econômica, chegando-se até a propor dispositivos magnéticos para coletas e reciclagem das fibras de aço intensamente refletidas durante a projeção<sup>(93)</sup>. Este detalhe é de particular importância, como ressalta Armelin<sup>(90)</sup>, pois "o teor de fibras efetivamente incorporado ao alvo de projeção será diferente daquele para o qual se dosa o material na betoneira".

Assim deve-se dar particular atenção à técnica de projeção de modo a se garantir o teor incorporado de fibras no concreto especificado no projeto, com um mínimo de perdas. Estes teores podem chegar até 2% em volume em relação à mistura total<sup>(87)</sup> mas, normalmente, o recomendado gira em torno de 1%.<sup>(69)</sup>.

Para a projeção do concreto com fibras, pode ser utilizado "o mesmo equipamento de mistura e projeção usado para o concreto projetado convencional" tanto por via seca como por via úmida<sup>(87)</sup>. No entanto, o desgaste deste equipamento se torna mais intenso, o que motivou o desenvolvimento de equipamentos complexos, onde o carreamento das fibras ocorre por dutos independentes da mistura do concreto<sup>(87)</sup>. Normalmente a solução mais indicada e adotada consiste na utilização do equipamento convencional, com algumas

modificações que tenham como objetivo a sua proteção (como a instalação de uma tela na entrada da máquina de projeção por via seca<sup>(87)</sup>) ou facilitar o fluxo do material, como a remoção de obstáculos tais como curvas acentuadas e a própria tela, no caso da via úmida<sup>(95)</sup>. Isto ocorre porque na projeção do concreto com fibras metálicas por via seca tem-se um maior risco de entupimentos causados por empelotamentos dentro da betoneira que, dependendo do formato da fibra, pode exigir a utilização de aparatos especiais para sua adição ou não<sup>(90)</sup>.

Outra causa de entupimentos pode ser o comprimento excessivo da fibra, por isso existem recomendações que o limitam à cerca de 50mm, que pode ser considerado grande, uma vez que o comprimento preferido é de 25mm. Comprimentos menores que 25mm podem facilitar sobremaneira a aplicação com baixa reflexão, "mas as propriedades do concreto projetado, particularmente a resistência ao cisalhamento e à pós-fissuração, são menores"<sup>(87)</sup>.

O critério de mistura sem empelotamentos, ao lado da disponibilidade do material no mercado, pode conduzir à escolha da fibra a ser utilizada<sup>(96)</sup>.

As fibras sintéticas ou plásticas normalmente utilizadas em concreto projetado são as de polipropileno, não havendo informações disponíveis sobre o uso de outras fibras sintéticas<sup>(87)</sup>. Mesmo as fibras de polipropileno tem seu uso pouco documentado e desenvolvido, quando se compara à fibra de aço. Isto se deve ao fato de que, mesmo tendo "uma reflexão menor que o normalmente verificado" e não exigir equipamento ou cuidados diferenciados do concreto projetado convencional<sup>(87)</sup> a fibra de polipropileno nem sempre proporcionou mudanças significativas nas propriedades de concreto endurecido<sup>(96)</sup>. No estudo apresentado por Armelin e Hamassaki<sup>(96)</sup> não foram encontradas diferenças no comportamento pós-fissuração do concreto projetado com fibras de polipropileno e do convencional e, além disso, a adição das fibras dificultou a compactação do material, produzindo uma elevação nos valores de índices de vazios e

uma redução da resistência à compressão, coerentemente. Em contrapartida, Morgan et alii<sup>(95)</sup> têm opinião oposta, pois concluíram que com o uso de superplastificante (utilizaram o processo de projeção por via úmida) se tem bons resultados no comportamento pós-fissuração do concreto projetado reforçado com fibras de polipropileno. Esta diferença de opiniões pode ser atribuída ao fato de, além de terem usado processos diferentes (via seca e via úmida), usarem tipos de fibras bem distintas sendo uma do tipo fibrilar<sup>(95)</sup> e outra do tipo fita "semelhante às fitas magnéticas de gravação e reprodução sonora"<sup>(96)</sup>.

A fibra de vidro é aquela cuja aplicação no concreto projetado é a menos documentada e seu uso tem sido muito pequeno<sup>(87)</sup>. Ao contrário do que acontece no concreto projetado com fibras de aço e polipropileno a fibra de vidro é projetada em separado da argamassa úmida unindo-se a esta no alvo de projeção. Além disso ocorre um processo de compactação posterior à projeção, de modo a remover o ar aprisionado. Normalmente indicado para a produção de painéis pré-moldados de compósitos, pode ser utilizado, também, em serviços de recuperação estrutural onde se exija um revestimento de pequena espessura.

As fibras, de diâmetro variando entre 0,0005mm a 0,015mm, são cortadas a partir de fios, imediatamente antes da projeção, num comprimento que varia de 38 a 51mm. Elas são produzidas com vidro de zircônio de alta resistência ao meio alcalino do cimento, sendo que as fibras normais (para reforço de plástico) não podem ser utilizadas no concreto projetado.

### **2.5.2. Concreto projetado com microssílica**

A microssílica é um sub-produto da fabricação do ferro-silício ou silício metálico, que é coletada em filtros eletrostáticos e contém proporções muito altas de dióxido de



silício ( $\text{SiO}_2$ ) amorfo em forma de pó finíssimo<sup>(91)</sup>. Isto confere ao material um efeito duplo sobre as argamassas e concretos de cimento portland atuando tanto como pozolana como *filler*<sup>(97)</sup>.

A sua ação pozolânica consiste na reação com o hidróxido de cálcio solúvel, liberado nas reações de hidratação do cimento, produzindo silicatos de cálcio hidratado, tornado a micro-estrutura do concreto mais rica em material resistente. Este efeito pozolânico é facilitado pela grande área específica da microssílica ( $20.000 \text{ m}^2/\text{kg}$ ) que é muito maior que a da cinza volante (400 a  $700 \text{ m}^2/\text{kg}$ ) e do cimento portland normal ( $300 \text{ a } 400 \text{ m}^2/\text{kg}$ )<sup>(91)</sup>.

A maior finura da microssílica em relação à do cimento, produz também um efeito de *micro-filler* devido à sua fácil penetração nos espaços vazios deixados pelos grãos de cimento o que, segundo Silva<sup>(98)</sup>, "favorece também uma distribuição mais homogênea dos produtos de hidratação do cimento".

Estas propriedades da microssílica trazem uma série de vantagens para o concreto projetado. Morgan<sup>(23)</sup> apontou uma série de benefícios trazidos pela sua adição em teores de 8 a 15% em substituição ao cimento. No estado fresco, constatou-se que o concreto projetado apresentou grande resistência à lavagem de finos por ação da água de maré, grande adesão e coesão, o que diminuiu as perdas por reflexão e deslocamento e, conseqüentemente, ampliou a espessura de aplicação. Em testes para a execução de túneis da *Canadian Pacific Railway*, atingiu-se uma espessura de camada projetada por via seca no teto de 400mm numa única passada, dispensando o uso de aditivos aceleradores de pega, sem deslocamentos. Além disso, o concreto projetado com microssílica apresentou grande facilidade de aplicação em presença de umidade. Como isto só era possível com a utilização de aditivos aceleradores, a microssílica se apresenta como excelente alternativa para a redução ou mesmo eliminação dos mesmos. Isto é particularmente interessante pois, ao contrário dos aditivos aceleradores de pega, a

microssílica traz benefícios às propriedades do concreto projetado endurecido como o aumento da resistência à compressão e a redução da permeabilidade.

No entanto, devido à elevada finura da microssílica, estas propriedades do concreto projetado via seca só são conseguidas quando se consegue distribuí-la uniformemente no material, o que não é fácil<sup>(91)</sup>. Quando se faz a mistura de maneira convencional, isto é, quando a microssílica em pó é adicionada à betoneira, produz-se uma grande quantidade de pó durante a projeção. Esse comportamento se deve à dificuldade de umidificação de um material de tão elevada área específica apenas pela passagem por um anel umidificador. Isto prejudica intensamente o desempenho da adição no concreto, além de por em risco a saúde dos operários. Por isso é recomendada<sup>(91)</sup> a utilização de uma nata de microssílica pré-misturada (microssílica dispersa em água em proporções iguais em peso) adicionada à mistura seca no bico.

Uma alternativa prática, apresentada também por Morgan<sup>(23)</sup> é o chamado *pre-bagging*, que consiste na pré-mistura de todos os materiais completamente secos, fornecidos em embalagens plásticas.

### **2.5.3. Concreto projetado com fibras de aço e microssílica**

Vários trabalhos já foram publicados sobre o uso conjunto de fibras de aço e microssílica no concreto projetado, tanto para via seca<sup>(99)(100)</sup> como para via úmida<sup>(49)(93)</sup>. Isto se deve a uma certa complementariedade da ação das duas adições.

Com a adição de microssílica tem-se um aumento da resistência mecânica do material e, em contrapartida, um comportamento mais frágil bem caracterizado. Assim, uma solução para reverter esta desvantagem seria a adição de

fibras de aço de alta resistência<sup>(91)</sup>.

Um dos problemas principais do concreto projetado com fibras é a sua intensa reflexão. Assim, como a adição de microssílica aumenta a coesão e a aderência entre ambas tem-se por um lado, um maior teor de fibras incorporado à estrutura devido à redução da reflexão. Além disso, tem-se a melhora do desempenho mecânico do conjunto fibra matriz o que, segundo Burge<sup>(99)</sup>, possibilitou um ganho na resistência à compressão e à flexão.

#### 2.5.4. Concreto projetado com o uso de polímeros

Além das fibras e da microssílica, abordadas nos itens anteriores, há um outro tipo de material que se destaca como de grande perspectiva de aplicação no concreto projetado são os polímeros. Prova disto reside no fato de ter sido indicada como atividade prioritária de pesquisa e desenvolvimento no Japão<sup>(101)</sup>. Lá procura-se desenvolver um sistema de projeção de concreto usando acrilato de magnésio para túneis. Isto se deve ao seu rápido endurecimento, chegando-se a obter tempos de pega de um segundo ou até menos. No entanto, muito pouco se tem feito e publicado neste sentido no ocidente. Uma das raras exceções é o trabalho de Grahan<sup>(40)</sup> que estudou um sistema de projeção complicado, apresentado na Figura 2.3.

O sistema tinha por objetivo projetar concreto usando polímero como único aglomerante. Dadas as dificuldades do processo desenvolvido em laboratório o estudo não prosseguiu. Um dos problemas levantados era o risco de incêndio proveniente da liberação de produtos químicos voláteis que se tornaria grave em túneis. Além disso como apontou Bates<sup>(102)</sup> estes produtos como os monômeros estireno e metilmetacrilato além de combustíveis são tóxicos exigindo no caso de túneis, ventilação e proteção individual extrema o que não deu ao *Bureau of Mines* do *Bureau of Reclamation*

uma visão muito otimista quanto à possibilidade de utilização do processo. Em vista disso no seu estudo de concretos polímeros Bates optou pela utilização de epóxi e poliéster que apesar dos bons resultados foram abandonados em função dos riscos de incêndio.

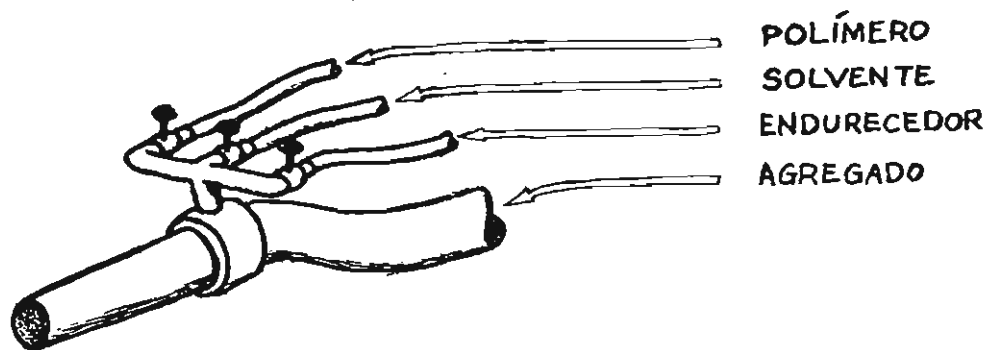


FIGURA 2.3: Esquema de bico de projeção de concreto polímero<sup>(40)</sup>.

Uma boa alternativa seria a utilização de polímeros dissolvidos na água e injetados no bico produzindo o concreto projetado modificado onde tanto o cimento como o polímero teriam função aglomerante. Krantz<sup>(78)</sup>, relatou a utilização de um aditivo polimérico ao concreto projetado via seca com fibras, tanto de aço como de polipropileno. O aditivo polimérico utilizado foi uma emulsão de estireno-butadieno, composta por 47% de polímero e 53% de água em peso, sendo que o polímero em si continha 64% de estireno e 36% de butadieno. O sistema, no entanto, foi abandonado por problemas operacionais não completamente solucionados durante os testes. Outro problema apresentado foi "o elevado custo do material pode impedir o seu uso em aplicações gerais", restringindo seu uso às aplicações onde ocorrer o contato com águas altamente sulfatadas<sup>(78)</sup>.

A terceira opção seria o concreto impregnado com um monômero de baixa viscosidade que endurece no local<sup>(103)</sup>. Em ambos os casos ter-se-á um aumento da resistência à compressão, tração, flexão, desgaste e durabilidade o que indica a sua potencialidade para utilização em túneis coletores de esgoto por exemplo. No primeiro caso há a possibilidade de se reduzir os níveis de reflexão. Infelizmente as informações sobre a sua utilização são raras e não documentadas, salvo exceções por parte de fabricantes como a TEX-CRETE INC<sup>(104)</sup> e a DOW CHEMICAL U.S.A.<sup>(105)</sup>. Recentemente<sup>(106)</sup>, foi anunciada a entrada no mercado nacional de uma argamassa monocomponente modificada como polímeros para a projeção por via seca com a utilização de microssílica.

### **CAPÍTULO III: O PROCESSO DE PROJEÇÃO**

Como alerta o ACI<sup>(9)</sup>, "o sucesso da aplicação do concreto projetado requer um equipamento com operação e manutenção apropriada". Além disso, a escolha deste equipamento define o processo de projeção e deve ser feita com muito cuidado, através da análise das especificações, proporções e características da obra ou, melhor dizendo, das obras que serão executadas, pois se trata de um equipamento caro. É comum ocorrer o processo contrário: definir que tipo de obras se poderá executar em função do equipamento que se tem disponível ou, adequar a execução de certo tipo de obra em função do mesmo. Portanto, é fundamental o conhecimento do processo de projeção, para que se possa tirar o máximo proveito do equipamento, o qual será estudado neste capítulo.

#### **3.1. PROCESSOS DE PROJEÇÃO DISPONÍVEIS**

O processo de projeção pode ser classificado segundo o tipo de equipamento utilizado. Ele define em que condições se irá trabalhar com o material, bem como as propriedades que ele irá apresentar. Assim, com os equipamentos disponíveis atualmente são possíveis dois tipos básicos de processos de projeção: o via seca (*dry mix*) e o via úmida (*wet mix*).

##### **3.1.1. Via seca**

O processo de projeção por via seca é assim chamados pelo fato do concreto ser levado à máquina de projeção seco. Neles uma mistura de agregados e cimento é conduzida por ar

comprimido através de um mangote até o bico de projeção, onde é então adicionada a água (Figura 3.1.). Existe uma grande possibilidade de variação deste esquema básico, que aparece em linha cheia no diagrama da Figura 3.1. As variações, apresentadas na figura através de linhas tracejadas, se concentram nas diferentes possibilidades de adição de aditivos aceleradores ou da água no processo.

Existe uma terceira denominação de processo de projeção no Brasil chamada via semi-úmida<sup>(59)</sup>. Na verdade, este processo consiste num caso especial da via seca, pois se utiliza o mesmo equipamento modificando-se apenas o local de entrada de água na mistura. Na chamada via semi-úmida além da entrada de água no bico se dispõe de outra que ocorre a alguns metros antes do bico no mangote através de um anel pré-umidificador, como se pode ver na Figura 3.2. Desta forma, neste trabalho dar-se-á preferência pela utilização do termo pré-umidificação para designar este procedimento, mantendo como classificação básica apenas o processo de projeção por via seca e úmida para estudo.

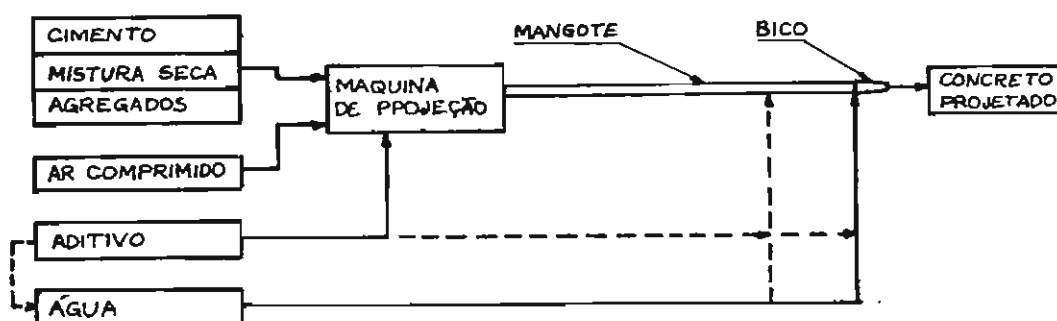


FIGURA 3.1: Diagrama do processo de projeção por via seca.

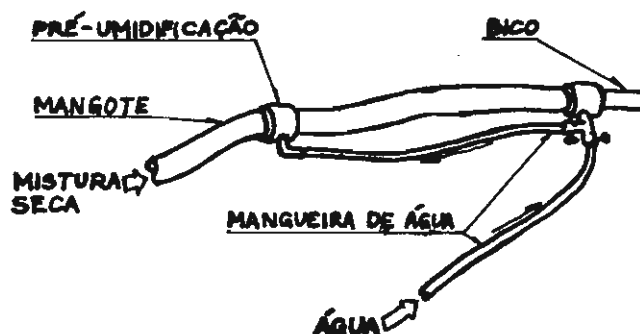


FIGURA 3.2: Esquema do sistema de pré-umidificação.

### 3.1.2. Via úmida

No caso dos equipamentos de projeção por via úmida, o concreto chega à bomba com toda a água necessária já misturada, sendo o ar comprimido utilizado para acelerar a projeção no bico e, em alguns casos, para pressurização de câmaras da bomba de concreto ou mesmo para transporte da mistura úmida pelo mangote. Na Figura 3.3. se encontra um diagrama do esquema básico do processo de projeção por via úmida (em linha cheia) e algumas variantes do mesmo (em linha tracejada).

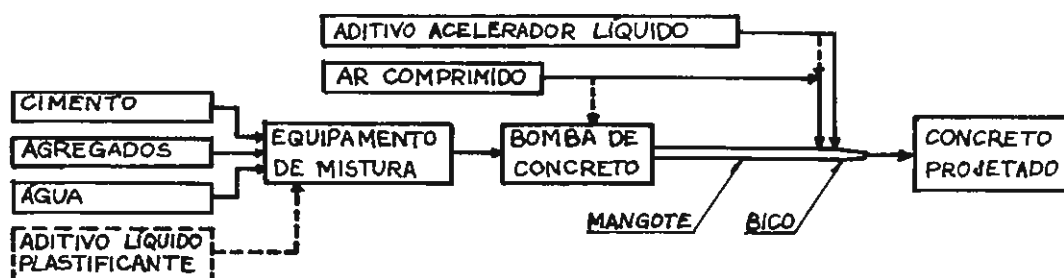


FIGURA 3.3: Diagrama do processo de projeção por via úmida.



Um aspecto importante, que ajuda a compreender as diferenças entre os dois processos básicos, são os diferentes tipos de fluxo de concreto dentro do mangote que eles proporcionam. São três os tipos de fluxo de concreto no mangote: o aerado, o denso e o descontínuo (Figura 3.4.)<sup>(107)</sup>. O fluxo aerado é típico da via seca e dos equipamentos reversíveis (Aliva 280<sup>(48)</sup> e Aliva 285<sup>(47)</sup>), enquanto os fluxos denso e descontínuo são específicos da via úmida.

O fluxo aerado da via seca possibilita uma maior velocidade de projeção, o que confere ao concreto projetado uma maior capacidade de compactação. Por outro lado, proporciona maior reflexão e liberação de poeira (no caso específico da via seca). "Devido a alguns fatores como rendimento variável e homogeneização do aditivo acelerador ineficiente, a alta pressão no bico e alto consumo de ar comprimido, o sistema de fluxo aerado na via úmida não tem maior utilização ou, se não tanto, esta é muito limitada<sup>(91)</sup>".

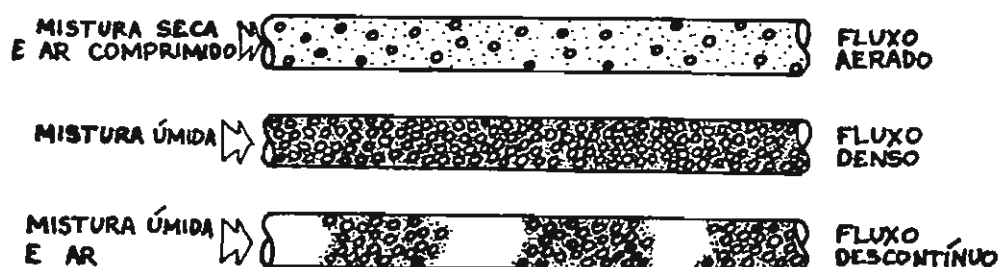


FIGURA 3.4: Tipos de fluxo de concreto no mangote<sup>(107)</sup>.

Antes de qualquer outro comentário, vale ressaltar, que a comparação feita não tem a finalidade de colaborar na

descoberta de qual é o melhor processo de projeção, mas sim prover alguns dos subsídios que permitam escolher o método mais adequado para determinada aplicação, se seco ou úmido ou a conjunção de ambos<sup>(66)</sup>. Assim, ao invés de uma relação de vantagens e desvantagens de cada um dos processos, optou-se por apresentar comentários sobre vários fatores inerentes a ambos, o que se encontra apresentado na Tabela 3.1.

De qualquer forma, cabe lembrar que o processo de projeção por via seca é o mais largamente empregado em todo o mundo. Um dos principais fatores para que isto ocorra reside no fato de seu custo ser no mínimo um terço do concreto projetado por via úmida<sup>(91)</sup>.

Um aspecto interessante a ser observado é a dificuldade de se fazer projeções de emergência com o concreto projetado via úmida, pois ele "não pode ser facilmente misturado, transportado ao local de aplicação e rapidamente aplicado à área com problemas"<sup>(91)</sup>.

Devido à menor velocidade de projeção tem-se uma maior dificuldade em se obter maiores resistências associada a uma menor compactação do material, no caso da via úmida. No entanto, como apontou Armelin et alii<sup>(66)</sup> "a homogeneidade de produção no processo via úmida, associada aos valores constantes da relação a/c e da dosagem de aditivo permite uma menor oscilação em todos os parâmetros de qualidade" em relação ao processo de via seca cuja qualidade fica submetida à capacitação nem sempre adequada da mão-de-obra. Para melhor visualização destas diferenças são apresentados na Tabela 3.2. alguns valores de coeficientes de variação da resistência à compressão (sempre maiores para a via seca) obtidos para o controle de grandes volumes de concreto projetado aplicados em obras de túneis.

Um outro aspecto interessante reside no fato de que a tendência atual de execução de túneis indica a utilização de equipamentos de elevada produção, tais como a escavação com fresadoras, que exigem como suporte logístico equipamentos de concreto projetado de elevada produção<sup>(66)</sup>. Associando-se

a isto a possibilidade de obtenção de elevadas resistências à baixas idades (4 MPa a 8 horas), tem-se uma grande possibilidade de utilização da via úmida em revestimento primário de túneis num futuro próximo (área anteriormente restrita ao processo de via seca).

TABELA 3.1: Fatores ligados à projeção por via seca e úmida(91).

FATOR	VIA SECA	VIA ÚMIDA
1.EQUIPAMENTO	.menor investimento total .manutenção simples e pouco freqüente .fácil operação <sup>(57)</sup>	.menos equipamentos no local de trabalho .menor desgaste de bico, mangueiras e bomba para a mesma produção .consumo de ar até 60% menor
2.MISTURA	.na obra ou na usina .possibilidade de utilização de misturas pré-dosadas .desempenho alterado pela umidade da areia	.na usina e apurada .a umidade da areia não interfere no processo
3.PRODUÇÃO E ALCANCE	.raramente ultrapassa os 5m <sup>3</sup> /h no campo .pode transportar material a maiores distâncias	.2-10m <sup>3</sup> /h na projeção manual .até 20m <sup>3</sup> /h na projeção mecanizada-robô
4.REFLEXÃO	.15-40% para paredes verticais .20-50% para o teto .ocorre formação de bolsões de material refletido .variação do traço na estrutura por perda intensa de agregado	.baixa reflexão que pode ser menor que 10% .não ocorre formação de bolsões de material refletido .pequena perda de agregado
5.QUALIDADE	.alta resistência devido ao baixo fator a/c .menor homogeneidade do material .depende da experiência da mão-de-obra	.maior dificuldade para obter grandes resistências (alto fator a/c) .maior homogeneidade na qualidade

TABELA 3.1: Fatores ligados à projeção por via seca e úmida<sup>(91)</sup>. (Continuação).

FATOR	VIA SECA	VIA ÚMIDA
6. VELOCIDADE DE IMPACTO	<ul style="list-style-type: none"> <li>. maior com melhor aderção e facilidade de aplicação no teto</li> <li>. maior facilidade de compactação do material</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>. geralmente adequada para emprego em túneis e minas</li> <li>. material menos compacto, geralmente</li> </ul>
7. ADITIVOS	<ul style="list-style-type: none"> <li>. em pó adicionados na betoneira ou antes da cuba de alimentação</li> <li>. líquidos adicionados junto ao bico de projeção</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>. utiliza-se apenas os aditivos líquidos</li> </ul>
8. POEIRA E NÉVOA	<ul style="list-style-type: none"> <li>. grande produção de poeira<sup>(59)</sup></li> <li>. dificuldade de visualização do trabalho</li> <li>. formação de ambiente insalubre em túneis (exige ventilação)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>. muito pouca formação de poeira</li> <li>. melhor visibilidade</li> <li>. pode produzir névoa de aditivo líquido de alta alcalinidade e tóxica exigindo ventilação</li> </ul>
9. VERSATILIDADE	<ul style="list-style-type: none"> <li>. pode ser utilizada para jateamento de areia, projeção de argamassa e materiais refratários e recobrimentos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>. pode ser utilizada como sistema de bombeamento convencional de concreto</li> </ul>
10. FLEXIBILIDADE	<ul style="list-style-type: none"> <li>. facilidade de interrupção com pouca ou nenhuma perda de material</li> <li>. ajustável às condições da superfície (em presença de água)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>. exige planejamento cuidadoso para minimizar perdas por interrupção do trabalho</li> <li>. apresenta dificuldade de operação em superfície molhada (exige maiores teores de aditivos aceleradores)</li> </ul>

TABELA 3.2: Coeficientes de variação da resistência à compressão obtidos para via seca e via úmida em obras de grande consumo de material<sup>(66)</sup>.

PROCESSO	OBRA	VOLUME (m <sup>3</sup> )	COEFICIENTE DE VARIAÇÃO	
			AOS 7 DIAS (n)	AOS 28 DIAS (n)
VIA SECA	METRÔ PAULISTA	510	19% (48)	15% (48)
VIA ÚMIDA		340	11% (35)	13% (70)
	ANEL VIÁRIO CAMPINAS	500	13% (38)	11% (21)

### 3.2. EQUIPAMENTOS DE PROJEÇÃO POR VIA SECA

Entende-se aqui como equipamento de projeção aquele composto pela máquina de projeção e todos os acessórios necessários para a condução do processo. Chama-se máquina de projeção a "bomba" de concreto projetado propriamente dita, seja por via seca ou úmida.

#### 3.2.1. Produção da mistura seca

A mistura dos agregados com o cimento, constituindo a chamada mistura seca, é realizada com os mesmos equipamentos do concreto convencional. Geralmente se utiliza as betoneiras de eixo horizontal ou inclinado, devendo ser verificada se a sua capacidade é compatível com a demanda da frente de serviço. No caso de grandes produções ou nas situações em que se deseja uma simplificação do processo, podem ser utilizados caminhões betoneira.

### 3.2.2. Máquinas de projeção

As máquinas de projeção por via seca podem ser classificadas em três tipos, de acordo com o seu funcionamento, quais sejam as de câmaras pressurizadas, as de rosca-sem-fim e as de rotor.

#### 3.2.2.1. Máquinas com câmara pressurizada

O primeiro equipamento concebido para a projeção de uma argamassa, desenvolvido por Carl Akeley no início do século, consistia numa máquina dotada de duas câmaras pressurizadas e, por isso, denominada de câmara-dupla (Figura 3.5.)<sup>(9)(14)</sup>. O seu funcionamento consiste basicamente no enchimento da câmara superior com a mistura seca, como mostra o esquema da Figura 3.6.a. Em seguida, esta câmara é fechada e pressurizada, para que se possa abrir a câmara inferior (sempre pressurizada) para onde o material desce (Figura 3.6.b.) Na parte inferior desta câmara existe uma roda que carrega o material até um bico de ar comprimido que o impulsiona para o mangote, conforme está esquematicamente representado na Figura 3.7.

A máquina de projeção de câmara dupla é uma idéia antiga e foi uma das primeiras a serem utilizados no Brasil, como descreveu Molinari<sup>(51)</sup>. No entanto ela continua a ser utilizada até os dias de hoje em aplicações onde não se exija grandes produções como a recuperação de estruturas e o revestimento de fornos com material refratário<sup>(51)(54)(108)</sup>.

O mesmo ocorre com as máquinas denominados de câmara-simples. O funcionamento destas máquinas é idêntico ao da câmara inferior da de câmara-dupla e, portanto, marcadamente descontínuo. A saída do material, na base da câmara, pode ter um dispositivo semelhante ao da câmara-dupla apresentado

na Figura 3.6. ou outro do tipo apresentado na Figura 3.8. onde o material desce basicamente por gravidade, sem o auxílio de ar comprimido, tendo apenas um agitador rotativo para evitar o travamento do material por coesão. De qualquer forma a utilização destas máquinas exige alguns cuidados, além da experiência do operador, como os apontou Ryan<sup>(14)</sup>.

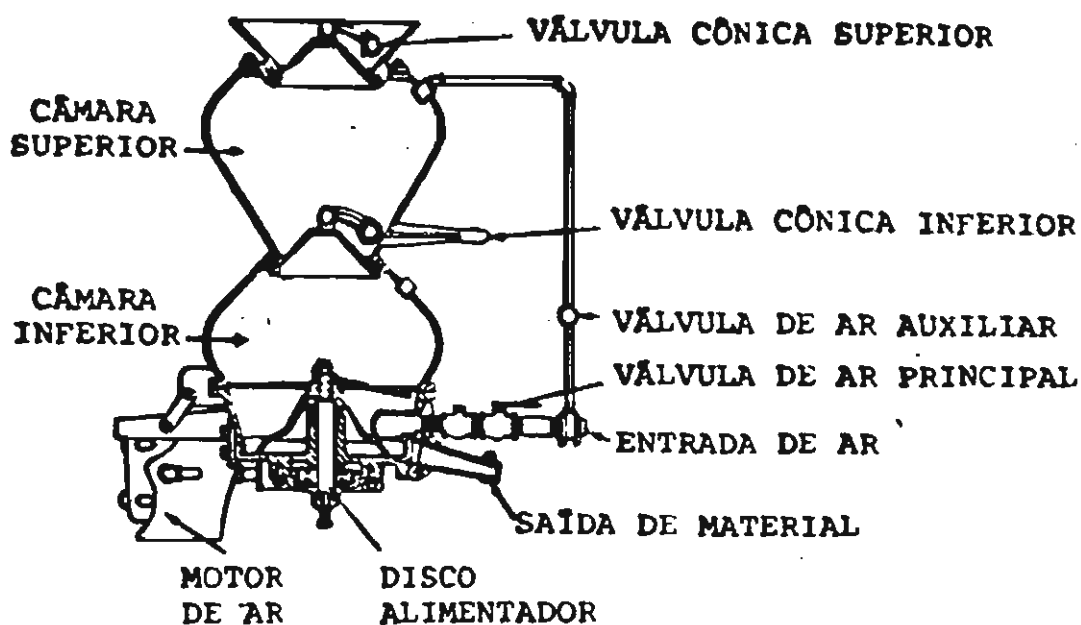


FIGURA 3.5: Máquina de projeção via seca de câmara-dupla<sup>(9)</sup>.

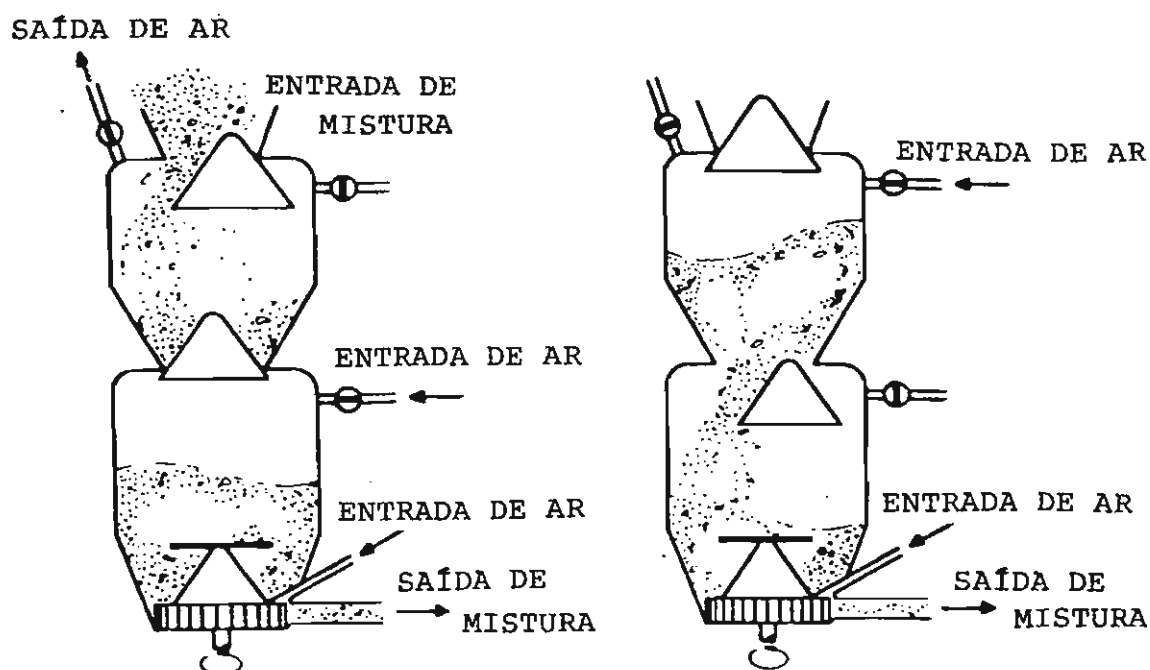


FIGURA 3.6: Esquema de funcionamento da máquina de projeção de câmara-dupla<sup>(14)</sup>.

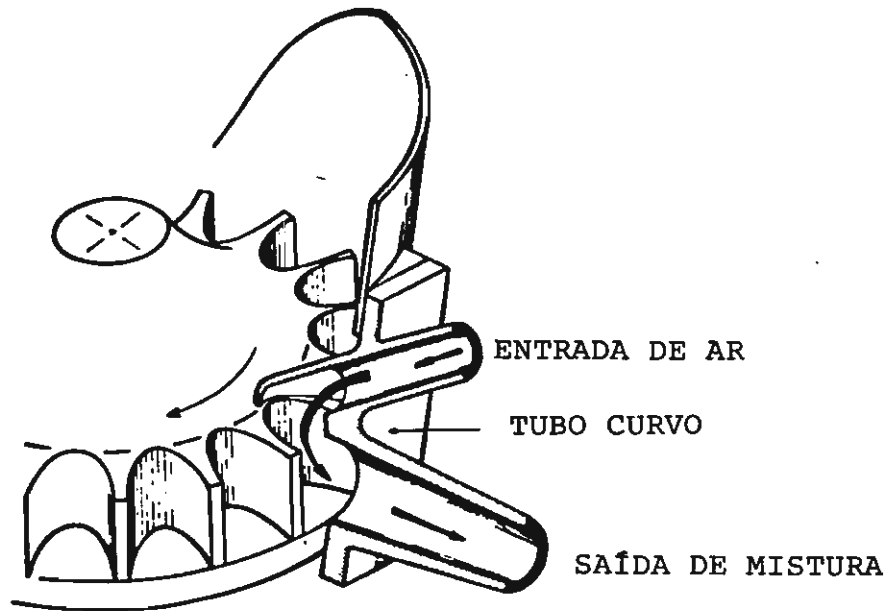


FIGURA 3.7: Detalhe de funcionamento da máquina de projeção de câmara-dupla (base da câmara inferior) (14).

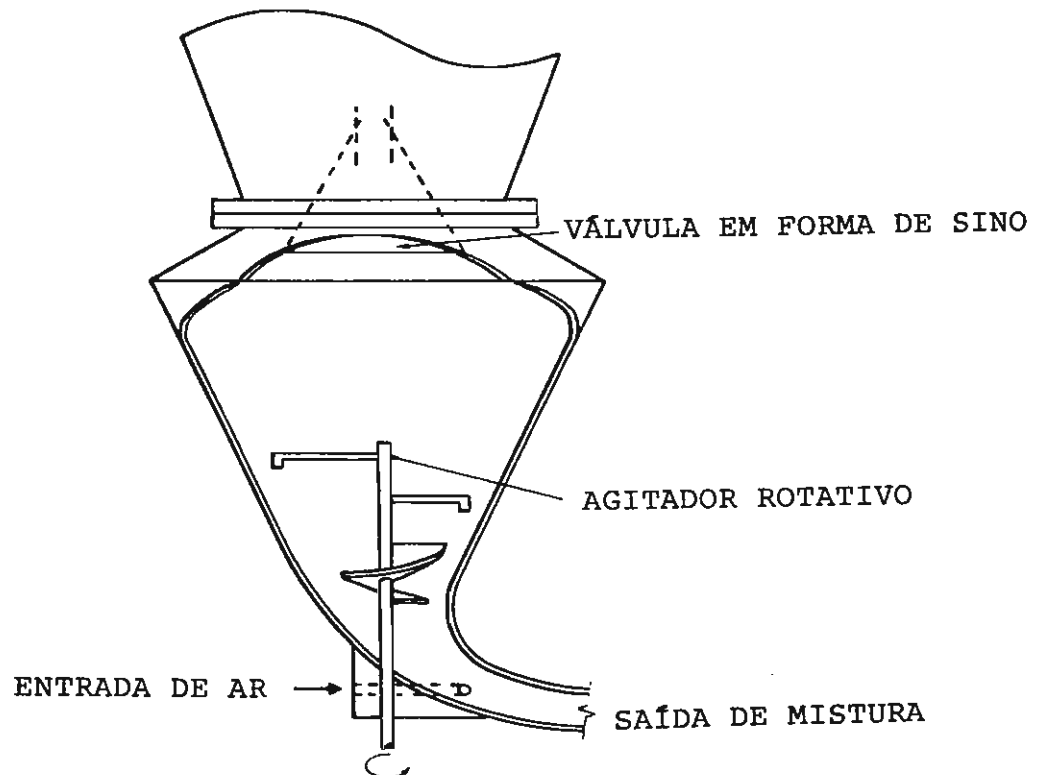


FIGURA 3.8: Detalhe de funcionamento da máquina de projeção de câmara-simples (base da câmara) (14).



### 3.2.2.2. Máquinas com rosca-sem-fim

O segundo máquina de projeção por via seca consistia numa cuba que possui, em seu centro, uma rosca-sem-fim, o que lhe deu o nome<sup>(12)</sup>. O material era lançado nesta cuba e elevado pela rosca-sem-fim até uma saída, posicionada na parte superior da máquina, onde recebia o jato de ar comprimido que o ia conduzir pelo mangote. Um esquema do seu funcionamento se encontra apresentado na Figura 3.9. Este equipamento, apesar de ser apontado por bibliografia recente<sup>(12)</sup><sup>(59)</sup> encontra-se em desuso.

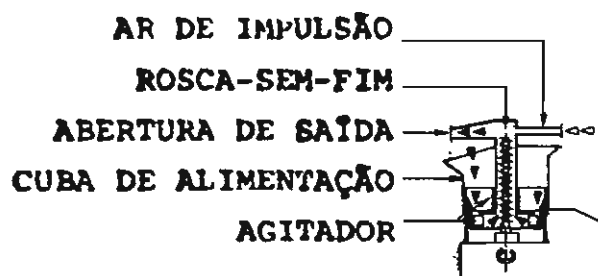


FIGURA 3.9: Esquema de funcionamento da máquina de projeção do tipo rosca-sem-fim<sup>(12)</sup>.

### 3.2.2.3. Máquinas com rotor

Um dos tipos de máquinas a rotor, pouco utilizada atualmente, é o apresentado na Figura 3.10. que utiliza uma calha rotatória em forma de "U"<sup>(9)</sup>. Esta calha é preenchida pelo material da cuba de alimentação (dotada de agitador rotativo para evitar o travamento do material por coesão),

que desce até ela por gravidade. A saída deste material para o mangote é feita com o auxílio de um jato de ar comprimido, de maneira semelhante ao da máquina de câmara-dupla com roda metálica.

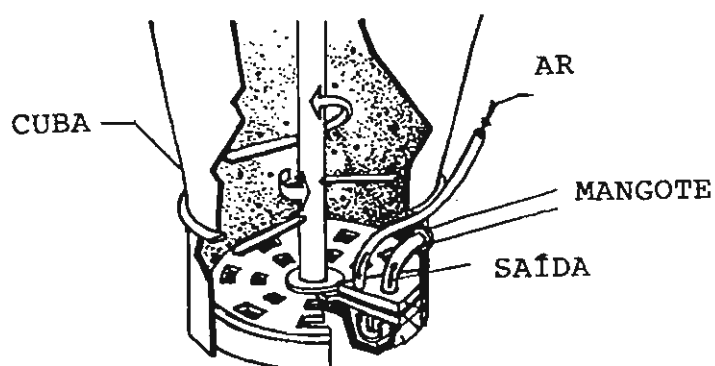


FIGURA 3.10: Esquema de funcionamento da máquina de projeção de rotor tipo calha em "U" (45).

A máquina de projeção via seca que é utilizada na quase totalidade das obras de túneis e em grande parte das obras de recuperação de estruturas e de revestimentos em geral é a de rotor de câmaras, a qual se encontra esquematicamente representada na Figura 3.11. Esta é a única máquina de projeção de concreto via seca fabricada no Brasil pela ESTE Industrial e Comercial Ltda<sup>(32)</sup>, cujo modelo CP-6 é muito semelhante ao fabricado pela Aliva (denominado Aliva 260<sup>(70)</sup>), como apontou Cipriani<sup>(59)</sup> (Tabela 3.3.). Com isto em vista e como esta máquina, a CP-6 da ESTE, foi a utilizada na parte experimental deste trabalho, este equipamento será aqui detalhado em maior profundidade.

TABELA 3.3: Resumo das características das máquinas de projeção CP-6 da ESTE e ALIVA 260<sup>(59)</sup>.

ESPECIFICAÇÃO	ALIVA 260	CP-6
Largura	0,90m	0,85m
Comprimento	1,40m	1,60m
Altura	1,50m	1,50m
Peso	1000kg	700kg
Motor elétrico	10HP	10HP
Granulometria máxima	16-25mm	16-32mm
Produção nominal	4-6m <sup>3</sup> /h	6m <sup>3</sup> /h
Ar comprimido		
Volume	200-600pcm	200-600pcm
Pressão	4-6atm	4-6atm
Transporte horizontal	300m	300m
Recalque	100m	100m
Diâmetro do mangote	50-60mm	50-60mm

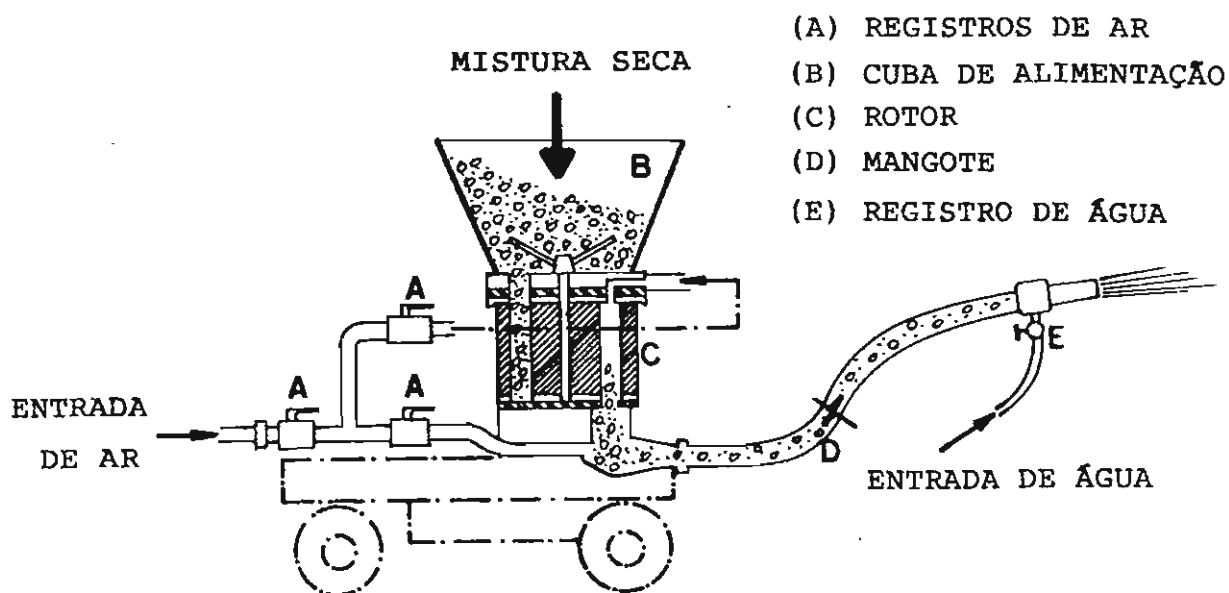


FIGURA 3.11: Esquema de funcionamento da máquina de projeção com rotor de câmaras.

Neste tipo de máquina, a mistura seca é lançada na cuba alimentadora onde é mantida em movimento pelos braços rotativos de um agitador (Figura 3.11.) Da cuba alimentadora a mistura vai, por gravidade, para as câmaras do rotor. No rotor a mistura faz um giro de 180°, chegando ao lado oposto da entrada, onde é impulsionada por uma corrente de ar

comprimido, descendo para o interior da tubulação. Um outro jato de ar comprimido carrega a mistura através do mangote até o bico de projeção, no qual é então adicionada a água, como ocorre para todos os equipamentos de projeção por via seca. A entrada de água é regulada por um registro manuseado pelo operador da projeção, denominado mangoteiro, posicionado junto ao bico de projeção ao final do mangote como apresentado na Figura 3.12.

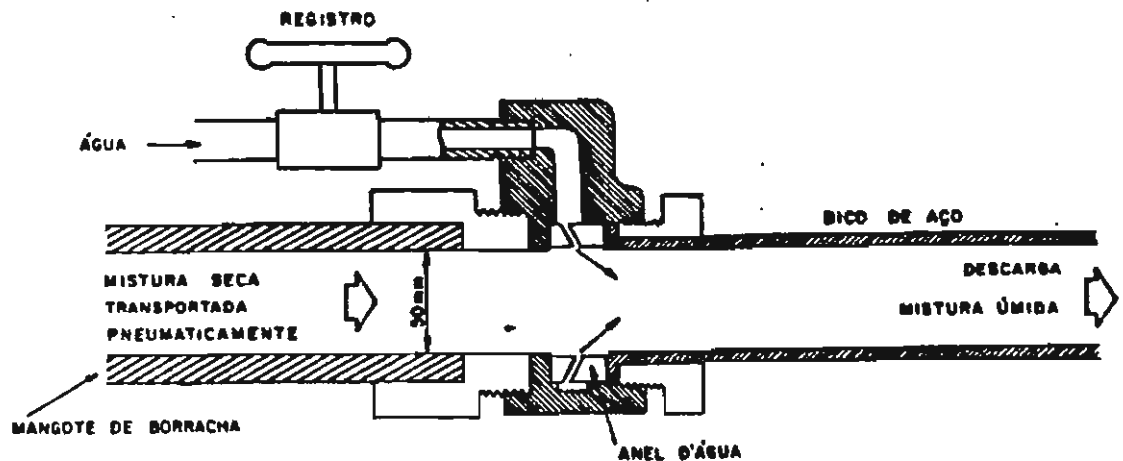


FIGURA 3.12: Entrada de água na projeção por via seca.

### 3.2.3. Sistema de alimentação

A alimentação da máquina de projeção com a mistura seca pode ser feita de diversas formas, dependendo do equipamento disponível para isto e mesmo do lay-out da obra. O que é importante notar é que este sistema deve proporcionar uma alimentação o mais contínua possível, para que se evite problemas de interrupção das atividades do trabalho.

### 3.2.3.1. Sistema convencional

Um dos sistemas mais utilizados, e também menos recomendado, é o que se encontra esquematizado nas Figura 3.13. e 3.14. Nele a mistura seca, proveniente da betoneira, é lançada por um duto até uma pá-carregadeira, que é um equipamento normalmente disponível nas obras de túneis. Posteriormente, a pá-carregadeira transporta a mistura seca até uma pequena baía próxima da máquina de projeção. Da baía a mistura é lançada manualmente na cuba da máquina de projeção com o auxílio de pás e um operário fica encarregado de lançar o aditivo acelerador de pega, através de um caneco (Figura 3.14.).

Obviamente, que este sistema traz consigo a falta de homogeneidade da mistura, principalmente no que se refere à proporção do aditivo acelerador de pega em relação ao cimento.

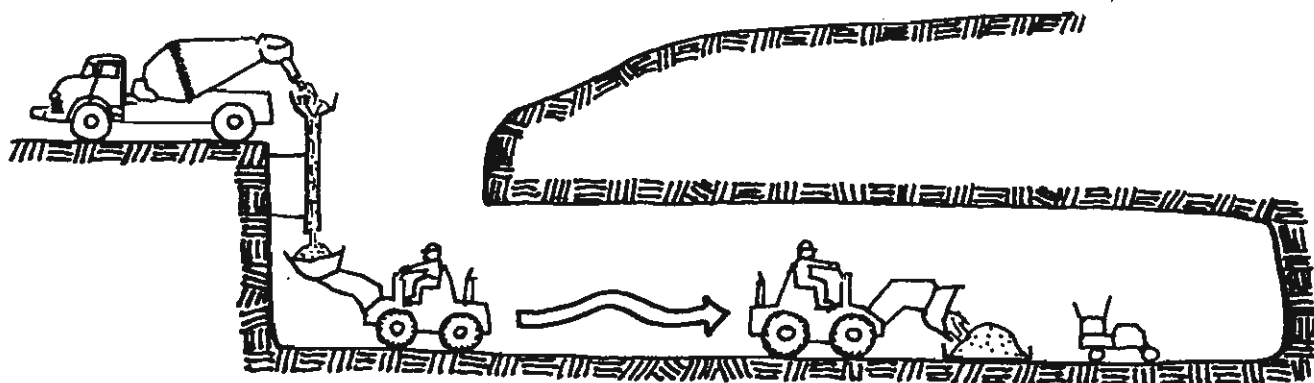


FIGURA 3.13: Exemplo de transporte da mistura seca até o equipamento de projeção num túnel.



FIGURA 3.14: Esquema de lançamento manual da mistura seca e de aditivo acelerador de pega na máquina de projeção.

#### 3.2.3.2. Alimentação contínua

Uma alternativa seria a utilização de alimentadoras contínuas, cuja justificativa básica seria a garantia de um fluxo constante de mistura seca, o que possibilita uma dosagem controlada de aditivo, quando utilizado em pó. Além disso, se obtém uma maior produtividade, poupando os operários de um trabalho extenuante, com redução das perdas de material.

As alimentadoras contínuas podem ter um sistema de carregamento do material provido de esteira rolante ou de rosca-sem-fim (Figura 3.15.). No primeiro caso, tem-se a possibilidade de garantir o teor de aditivo acelerador em pó, caso seja utilizado, através de um dosador (item 3.2.4.). No entanto, apenas com a sua utilização, não se consegue a homogeneidade da mistura aditivada. Por outro lado, se o dosador de aditivos em pó for posicionado na entrada de uma alimentadora do tipo rosca-sem-fim, terá todo o trajeto para diminuir a heterogeneidade da mistura.

O ACI<sup>(9)</sup> recomenda que no momento da escolha do equipamento de mistura e alimentação deve-se levar em conta a natureza dos materiais especificados, os requisitos de produção, o tipo de máquina de projeção a ser usada e o tamanho e tipo de aplicação do concreto projetado. Isto implica que a vazão de mistura seca na correia ou rosca-sem-fim deve ser no mínimo igual à produtividade dos equipamentos por ela servidos. Para facilitar esta operação é recomendável que, qualquer que seja o tipo de alimentadora, esta deve ter um reservatório com capacidade tal que garanta o fornecimento da mistura. No entanto, não se deve permitir que o material permaneça neste reservatório por muito tempo, o que pode provocar perdas por pré-hidratação.

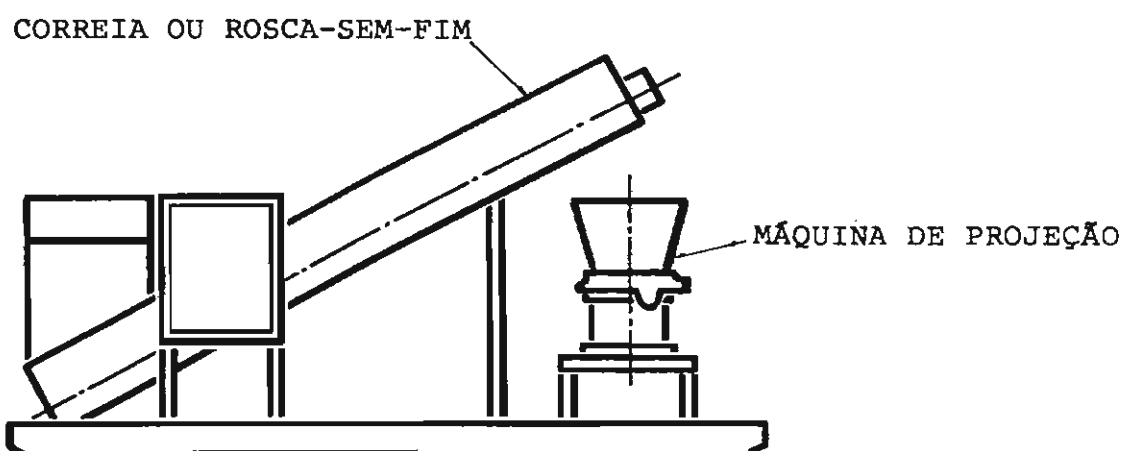


FIGURA 3.15: Esquema de alimentadora contínua.

### 3.2.3.3. Alimentação direta

Outro tipo de alimentação contínua, que pode ser executada quando o *lay-out* da obra assim o permite, é a alimentação direta da betoneira à máquina de projeção através de dutos (Figura 3.16.). Além de prática, este sistema garante o teor e a homogeneidade da mistura do aditivo acelerador de pega

em pó, uma vez que sua dosagem pode ser feita diretamente na betoneira.

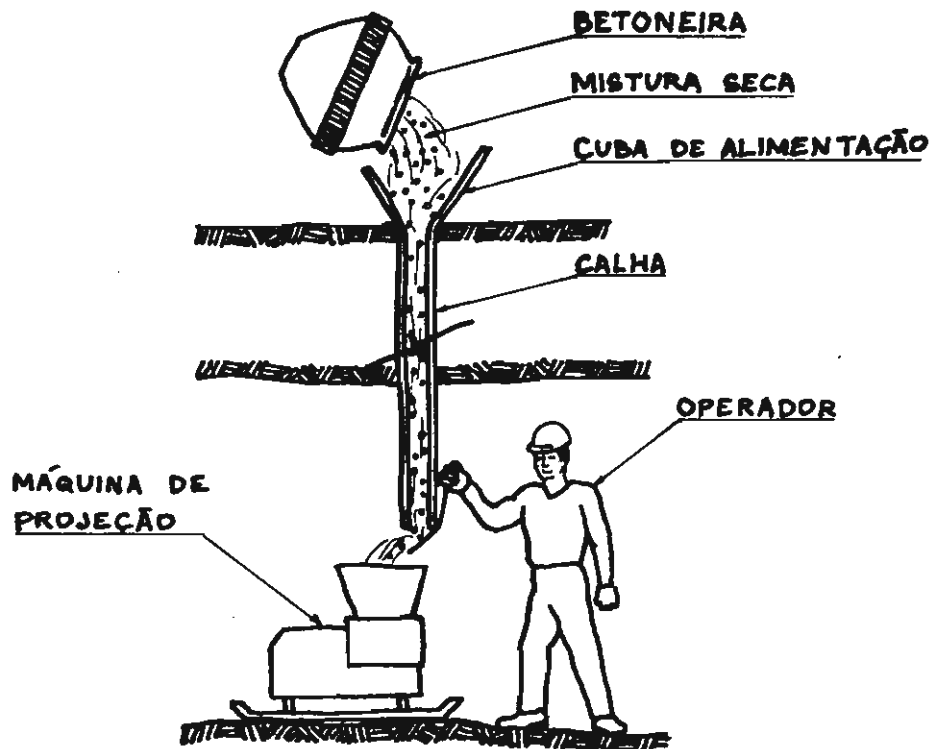


FIGURA 3.16: Esquema de alimentação contínua por conduto.

#### 3.2.3.4. Pre-bagging

Outro sistema que poderia ser utilizado seria o chamado *pre-bagging*, já empregado no Canadá<sup>(23)</sup>, que possibilita o emprego de microssílica e aditivo de maneira mais eficiente. Este sistema, consiste no fornecimento da mistura totalmente seca em sacos de 30kg ou em embalagens plásticas de 1600kg. Como o processo de mistura é industrial, evita-se o problema da umidade quase sempre presente nos agregados estocados em obra responsável pelo fenômeno da pré-hidratação, que seria agravado pela presença de aditivos.



### 3.2.4. Dosadores de aditivo

Este equipamento é de grande importância na produção de concretos projetados com boa uniformidade. Compõe-se basicamente de um reservatório e um dispositivo de lançamento do aditivo na esteira ou rosca-sem-fim da alimentadora, o qual pode ser de vários tipos.

#### 3.2.4.1. Dispositivos vibratórios

Um destes dosadores é aquele dotado de calha vibratória que transporta o material do reservatório até a esteira num processo contínuo. A amplitude de vibração pode ser controlada e desta forma pode-se controlar o teor de aditivo dosado à mistura seca.

#### 3.2.4.2. Rolo dosador

Outro sistema, que só pode ser utilizado quando acoplado a uma alimentadora de esteiras, é aquele dotado de um rolo dosador. Neste caso o reservatório de aditivo se apóia sobre um rolo dentado, o qual tem sua velocidade de giro definida por duas rodas que se apóiam sobre a esteira, como se pode observar no esquema apresentado na Figura 3.17. O seu funcionamento é mais simples que o anterior e está diretamente associado ao movimento da esteira, facilitando o controle de parada do equipamento.

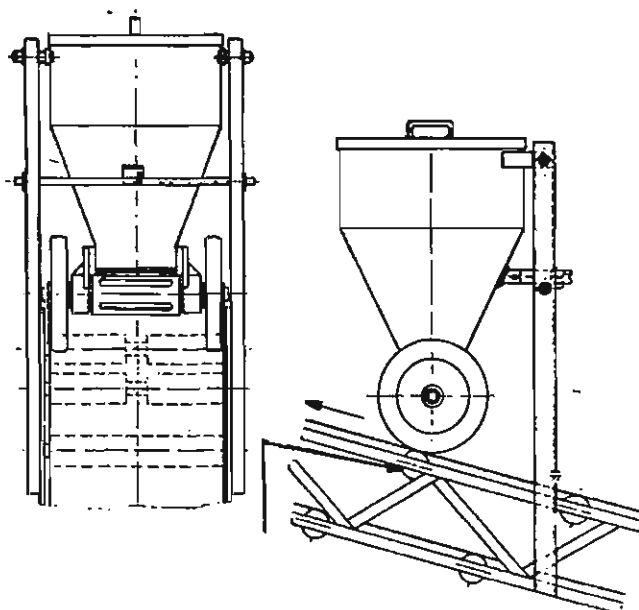


FIGURA 3.17: Esquema de dosador de aditivo em pó com rolo dosador (109).

#### 3.2.4.3. Dosador com rosca-sem-fim

Um terceiro tipo de dosador de aditivos em pó consiste num equipamento dotado de um dispositivo do tipo rosca-sem-fim, situado na base de um reservatório que carrega o material até a esteira da alimentadora contínua. Como no caso do dispositivo vibratório, a sua velocidade de dosagem não está vinculada diretamente à velocidade da esteira, o que exige maiores cuidados na sua regulagem e no momento de interromper a operação. Uma visão esquemática deste dispositivo pode ser observada na Figura 3.18.

O grande problema associado aos dosadores de aditivo em pó é a higroscopicidade do material, que lhe pode conferir grande coesão devido à absorção de água, impedindo a sua movimentação. Isto poderia ser resolvido pela própria vibração, pelo uso de ar comprimido, pelo emprego de agitadores como o apresentado na Figura 3.18. ou ainda pelo emprego de aditivos líquidos.

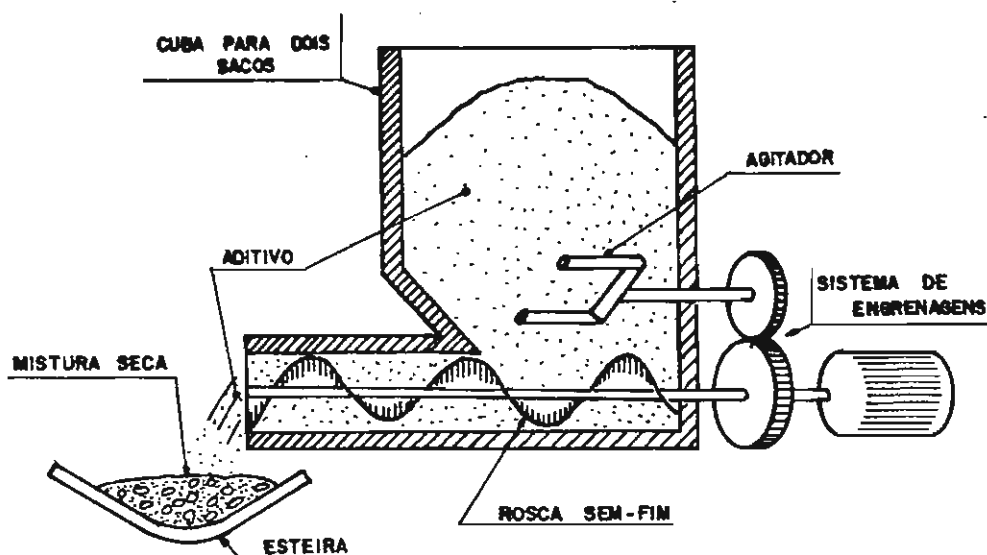


FIGURA 3.18: Esquema de dosador de aditivo em pó com rosca-sem-fim.

#### 3.2.4.4. Dosadores de aditivos líquidos

Segundo o ACI<sup>(9)</sup>, os aditivos líquidos poderiam proporcionar uma melhor homogeneização com uma dosagem mais facilmente controlada pela calibração de uma bomba dosadora. Estas bombas dosadoras podem ser dotadas de uma série de dispositivos para o recalque como pistões, câmaras pressurizadas, rotores, rosca-sem-fim, etc. sendo algumas concebidas especificamente para este fim e, outras, adaptadas.

O dosador de aditivos líquidos consiste numa bomba dotada de reservatório que envia o aditivo para a mangueira de água. A vazão de aditivo deve ser controlada por um registro e medida através de um medidor de vazão ou de um manômetro com curva a pressão vs. vazão determinada para permitir a dosagem precisa do mesmo.

Um sistema alternativo que pode ser utilizado é aquele em que se emprega reservatórios de água com o aditivo diluído.

Neste caso, se bombeia esta mistura e o teor é controlado por medidor de vazão ou manômetro e pelo consumo (verificado diretamente no reservatório). Deve-se ter cuidado de ajustar a diluição em função da umidade do agregado.

### 3.2.5. Compressor de ar

O ar comprimido é um dos principais responsáveis pela garantia da velocidade de projeção do concreto, através do seu fornecimento com a pressão e a vazão adequada. Por isso, é muito importante se dispor de um compressor com capacidade e em condições adequadas para atender a demanda exigida pela máquina de projeção. O ACI<sup>(9)</sup> tem uma recomendação para a vazão de ar máxima em função do diâmetro do mangote para uma pressão 700 kPa, o que está apresentado na Tabela 3.4.

Estes valores de pressões, devem receber certos ajustes de acordo com a idade do compressor, a altitude, o comprimento do mangote, a altura de recalque, o tipo de equipamento, a massa do material a ser transportado e o número de singularidades (dobras, cotovelos, reduções, junções, etc.). Para o caso do comprimento do mangote e altura de recalque, o ACI<sup>(9)</sup> indica a seguinte regra básica: adotar uma pressão mínima de 275 kPa para 30 m de comprimento de mangote e aumentar 35 kPa a cada 15 m de mangote e/ou 8 m de altura de recalque. Deve-se também verificar as condições do fabricante e exigir que o compressor seja capaz de fornecer a vazão de ar na pressão correta sem variações e o mais isento possível de óleo e umidade<sup>(14)</sup>. Para obtenção destas características é recomendável a utilização de um reservatório posicionado entre o compressor e a máquina de projeção<sup>(12)</sup>.

TABELA 3.4: Capacidade do compressor para os equipamentos de projeção por via seca<sup>(9)</sup>.

Diâmetro interno do mangote (mm)	Capacidade do compressor (m <sup>3</sup> /min. a 700kPa)
25	10,0
32	12,5
38	17,0
51	21,0
64	28,0

### 3.2.6. Braço mecânico (robô)

Chama-se robô ao equipamento destinado à movimentação do bico de projeção dotado de um braço mecânico, que se movimenta hidráulicamente, e é operado por controle remoto<sup>(37)</sup>. O primeiro equipamento de controle remoto do bico de projeção foi desenvolvido na Suécia em 1960 durante a construção da usina hidroelétrica de Höljes<sup>(110)</sup>.

Como aponta o ACI<sup>(9)</sup>, sua utilização tem crescido constantemente, principalmente nas obras onde haja grandes superfícies a serem revestidas com o concreto projetado. São casos típicos os túneis de grande seção e o revestimento de taludes onde se exigiria o uso de andaimes<sup>(12)</sup> e grandes produções.

Este fato ocorreu porque, até um certo tempo atrás (década de 60 na Europa e Estados Unidos e década de 80 no Brasil) a operação de projeção do concreto era totalmente manual<sup>(37)(66)(91)</sup>. "O concreto projetado nem sempre possuía a melhor qualidade, pois o cobrimento não era uniforme,

particularmente sobre superfícies irregulares e o trabalho era árduo para os mangoteiros"<sup>(91)</sup>. Eles deveriam, necessariamente, trabalhar com equipamento de proteção individual contra a poeira liberada na projeção e as britas refletidas da parede, e lutar constantemente com a alta pressão característica do transporte da mistura pelo mangote. Isto restringia, não só a qualidade de material, dependente do cuidado com que a mão-de-obra realiza seu trabalho, como também a capacidade de produção do concreto projetado a valores menores que os 10 m<sup>3</sup>/h exigidos para se obter avanços mais rápidos nos túneis<sup>(91)</sup>. Deve-se ressaltar que, nas obras de túneis, estes operários trabalham na faixa de maior risco de desmoronamentos e quedas de blocos de rocha fraturada<sup>(73)</sup>.

Esses problemas impulsionaram o desenvolvimento deste equipamento ao longo do tempo<sup>(44)</sup> e, desde a década de 70, pode-se contar com sistemas hidráulicos mais sofisticados que permitem uma operação mais fácil e o acoplamento do equipamento a qualquer sistema de transporte para seus deslocamentos, dando-lhe maior desenvoltura. Isto pode ser feito sobre um caminhão, sobre uma vagonete deslocada sobre trilhos<sup>(38)</sup> ou mesmo sobre o corpo de uma pá-carregadeira, o que lhe dá grande mobilidade, como foi a opção da Companhia Brasileira de Projetos e Obras (CBPO) e da Putzmeister que desenvolveram e construíram o primeiro braço mecânico para projeção de concreto no Brasil, o qual foi utilizado com sucesso no revestimento secundário do túnel do Anel Viário da Cidade de Campinas em São Paulo, no ano de 1991.

#### 3.2.6.1. Sistema básico

Este equipamento deve ser dotado de grande variedade de movimentos para permitir uma projeção com versatilidade o mais próximo possível da que caracteriza a projeção manual. Um exemplo deste equipamento se encontra apresentado na

Figura 3.19, onde se pode observar os dispositivos que possibilitam uma grande movimentação do bico, normalmente dotado de movimento circular automático. Para agilizar a operação do braço, são utilizados controles remotos eletrônicos dotados de *joy-sticks* que exigem um tempo de treinamento maior do operador para dominar com destreza todos os comandos (Figura 3.20). Este equipamento pode ser dotado de alças que lhe permitem ser carregado pelo operador para qualquer parte próxima da área de trabalho, o que possibilita a este procura sempre o melhor ângulo de visão da projeção<sup>(111)</sup> (Figura 3.20).

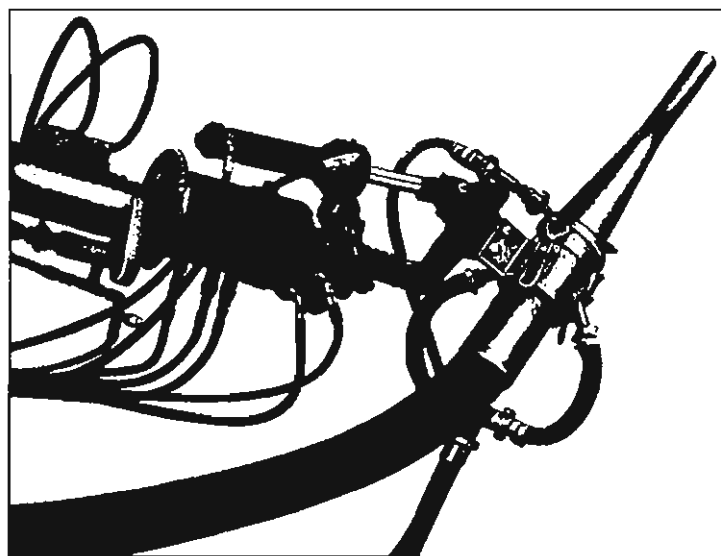
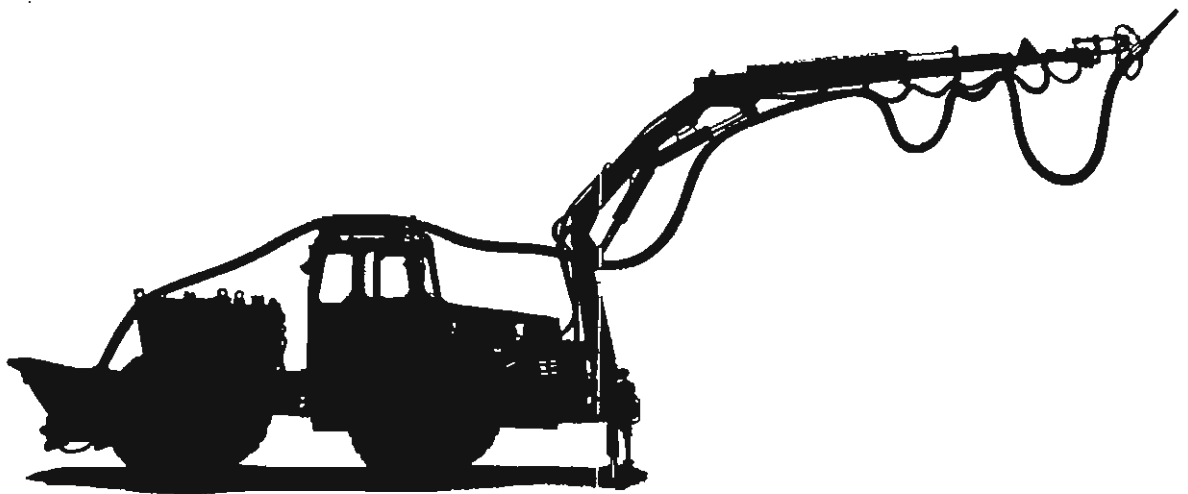


FIGURA 3.19: Braço mecânico para projeção de concreto e detalhe do bico<sup>(112)</sup>.

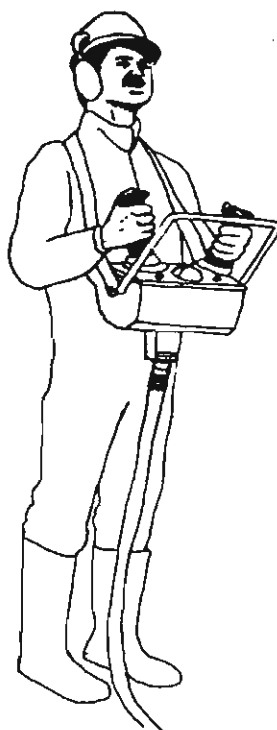


FIGURA 3.20: Controle remoto eletrônico dotado de *joy-stick* para operação de robô e operador<sup>(112)</sup>.

Já foram apontadas soluções ainda mais sofisticadas como a descrita por Monaghan et alii<sup>(113)</sup>, que utilizaram um robô operado por controle remoto monitorado por sistema de vídeo. O equipamento foi desenvolvido para executar o revestimento em concreto projetado de poços com diâmetro aproximado de 2,70m a 3,60m e mais de 300m de profundidade.

#### 3.2.6.2. Vantagens do braço mecânico

Como vantagens do uso de braços mecânicos para a execução do serviço de projeção, pode-se citar:

- a. Um robô permite a projeção do concreto em túneis logo após a escavação, por sobre o monte de material escavado,



como está apresentado na Figura 3.21. tornando mais ágil o processo. Isto é de particular importância no caso dos solos em que não se permite a remoção do material escavado sem o risco de desmoronamentos, pois possibilita a aplicação imediata do material com o operador trabalhando sob o revestimento endurecido<sup>(37)</sup>.

b. Em grandes túneis, pode-se escavar e projetar ao mesmo tempo com o auxílio do robô, eliminando a distinção entre fases e diminuindo o ciclo de escavação<sup>(44)</sup>. Além disso, o tempo total de projeção do concreto pode ser reduzido, diminuindo o período total de construção de 10% a 15%<sup>(91)</sup>.

c. Pode-se reduzir também os custos totais com equipamentos em geral pois, reduzindo-se o tempo de projeção de concreto, reduz-se, também, o período de utilização dos mesmos<sup>(91)</sup>.

d. Uma das principais vantagens, no caso de túneis, é o acesso rápido e fácil às "capelas" formadas por desmoronamentos, onde o revestimento deve ser executado o mais rapidamente possível para se evitar novos colapsos<sup>(44)</sup>.

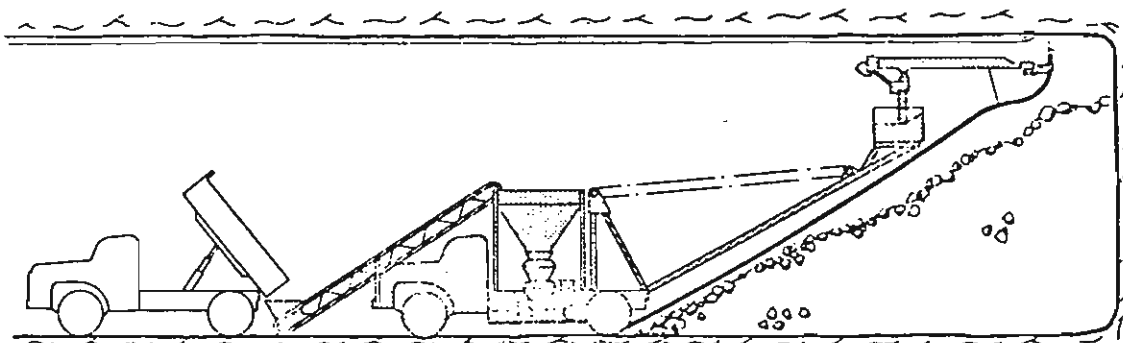


FIGURA 3.21: Arranjo para a projeção imediata de concreto projetado via seca logo após a escavação<sup>(37)</sup>.

e. No caso de obras onde há a necessidade de se aplicar o material em superfícies de grande altura os braços mecânicos eliminam a necessidade de andaimes e aceleram a execução do serviço<sup>(12)</sup>.

f. Possibilita-se a utilização de equipamentos com grande capacidade de produção, isto é, com mais de  $10\text{m}^3/\text{hora}$ <sup>(91)</sup>.

g. Permite-se a utilização de mangotes com diâmetros maiores, o que diminui os riscos de entupimentos.

h. Como o operador tem melhores condições para manter um posicionamento ideal do bico de projeção, reduz-se a reflexão, o que possibilita uma maior velocidade de execução da estrutura com menor quantidade de perdas.

Do ponto de vista do operador as vantagens são as seguintes:

a. Mais segurança no trabalho rotineiro e de reparos pois o operário trabalha a uma maior distância da zona com maior risco de desabamento<sup>(44)</sup>.

b. Não executa esforço físico como o mangoteiro, que precisa segurar e direcionar o pesado bico de projeção<sup>(44)</sup>.

c. O operador controla o serviço de projeção fora da "ducha" de material refletido e, como podem ser instaladas fortes lâmpadas no braço mecânico, tem melhores condições de visualização do trabalho em ambientes escuros, como é o caso típico dos túneis<sup>(44)</sup>.

d. Pode projetar perpendicularmente à superfície do teto sem medo de ser atingido por deslocamentos.

e. Como o operador tem todos os controles em suas mãos, pode-se dispensar facilmente o auxiliar, normalmente usado na projeção manual, o que normalmente trazia consigo problemas quando se necessitava de rápida comunicação.

### 3.2.6.3. Desvantagens do braço mecânico

Como grande e principal desvantagem deste tipo de equipamento está o seu custo elevado. Além disso, é dotado de sistemas sofisticados cuja manutenção e reparo não é feita de maneira trivial. Sua utilização é restringida pelas dimensões da obra, as quais não podem ser nem muito grandes,

de tal forma que ultrapassem o alcance do equipamento, nem muito pequenas, que lhe restrinjam a movimentação.

Deve-se salientar a importância de ser um equipamento ergonômico de tal modo que facilite o trabalho do operador. Caso contrário ele irá procurar uma posição mais confortável, a qual nem sempre oferece boas condições de visualização do serviço.

### 3.3. OPERAÇÃO DO PROCESSO

O conhecimento da operação do processo de projeção é fundamental para a obtenção de um concreto projetado de boa qualidade. Desta forma se fará um resumo dos principais aspectos ligados à ela que concorrem para a boa qualidade do material, os quais serão utilizados nos próximos capítulos.

Na projeção por via seca, a primeira pergunta que se deve fazer e que é de importância vital para o bom andamento do trabalho é quem executará o serviço? Assim é fundamental saber como a equipe de trabalho deve se organizar e, principalmente, como está qualificada. A experiência profissional e a formação da mão-de-obra é um requisito que Molinari já chamava a atenção em 1948<sup>(51)</sup>, e vem sendo realçada ao longo do tempo. Isto se deve ao fato do mangoteiro ser o responsável pelo controle da umidificação do material, o que em outras palavras significa dizer que ele é o principal fator determinante das propriedades do material e da variação destas.

Além dos cuidados na sua qualificação, o mangoteiro deverá receber em suas mãos um fluxo constante de mistura seca (cimento mais agregados) para que a dosagem de água, que é fornecida sempre numa vazão constante, ocorra de maneira simples e adequada, garantindo a homogeneidade do material na estrutura. Crom<sup>(110)</sup> aponta como condições para que se obtenha o desejado fluxo constante de material na via seca o

fato de se possuir equipamento e material adequado e uma equipe bem treinada. Além destes, devem ser tomados alguns cuidados na aplicação para que o material que ficar na estrutura esteja homogêneo e isento de falhas. A seguir se passará a discutir alguns dos aspectos mais relevantes relacionados com estas condições.

### 3.3.1. Equipe de projeção<sup>(9)</sup>

A equipe de projeção é apontada pelo ACI<sup>(9)</sup> como o elemento mais importante para que se obtenha uma aplicação de concreto projetado bem sucedida. Uma equipe básica de projeção é composta por um encarregado, um mangoteiro, um assistente de mangoteiro, um operador de máquina de projeção, um operador de betoneira, ajudantes e um encarregado de acabamento, quando este serviço é necessário. Estas funções devem ser preenchidas de acordo com as necessidades específicas do trabalho, podendo caber mais de uma função a uma única pessoa ou ser atribuída a um grupo de pessoas, obviamente.

#### 3.3.1.1. Encarregado de projeção

O encarregado de projeção tem a função de planejar e organizar o trabalho da equipe, manter as condições de segurança e monitorar os procedimentos de controle de qualidade. Ele é o responsável pelas condições de funcionamento e manutenção do equipamento, como a regulagem do dosador de aditivos por exemplo, e pela motivação e fiscalização do trabalho de toda a equipe. Por isso ele é normalmente um mangoteiro veterano, capaz de desempenhar qualquer tarefa dentro da equipe.

### 3.3.1.2. Mangoteiro

O mangoteiro tem um papel chave em todo o processo. Ele é o responsável pela aplicação do material e, além de controlar a quantidade de água adicionada ao material, garante que o fluxo de ar está ocorrendo de maneira uniforme e na vazão e pressão adequadas para a boa compactação. É o primeiro a perceber a ocorrência de problemas e, portanto, encarregado de transmitir ao restante do grupo as informações e pedidos necessários à manutenção das boas condições de operação.

Isso traz à tona o problema da comunicação, normalmente executada por gestos, que em certas condições pode se tornar difícil, principalmente quando o material é transportado a grandes distâncias e as condições de visualização se tornam mais difíceis. Ryan<sup>(14)</sup> apontou uma série de gestos que podem ser utilizados pelo mangoteiro para expressar informações importantes, as quais se encontram representadas na Figura 3.22.

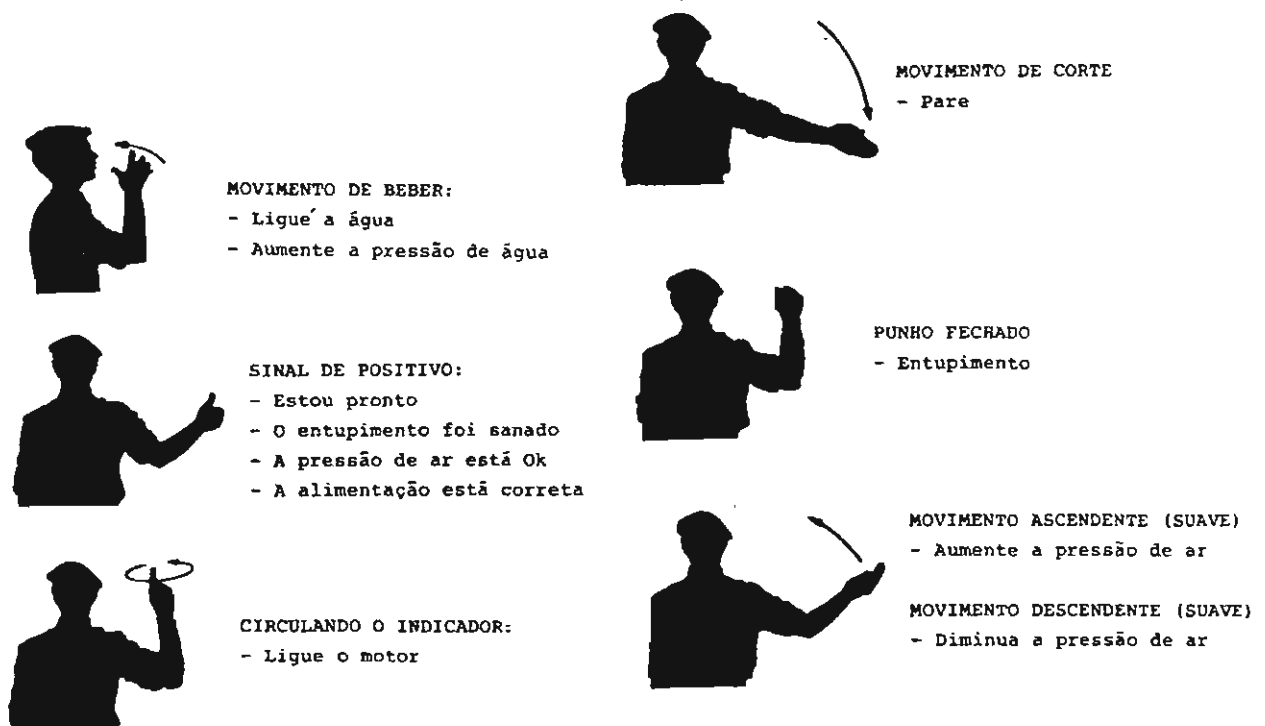


FIGURA 3.22: Sinais do mangoteiro<sup>(14)</sup>.

O mangoteiro tem, acima de tudo, a responsabilidade de conhecer e executar a aplicação adequadamente, evitando problemas como a laminação, a reflexão excessiva, o efeito de sombra, a oclusão da reflexão, os deslocamentos e as imperfeições superficiais.

### 3.3.1.3. Outros membros

As funções dos outros membros da equipe são básicas. O assistente de mangoteiro ajuda o mangoteiro nos seus deslocamentos, auxiliando na movimentação do mangote e transmite suas informações aos demais. O operador de máquina de projeção tem a função de garantir o bom funcionamento da mesma e fornecer um fluxo constante de mistura seca homogênea ao mangoteiro. O operador de betoneira é o responsável pela correta mistura dos materiais constituintes da mistura seca (cimento e agregados). Os ajudantes movimentam o equipamento, mangueiras, andaimes e materiais, além de serem responsáveis pela limpeza das áreas de trabalho, remoção da reflexão e proporcionar o suporte geral necessário para o trabalho. Finalmente, o encarregado de acabamento prepara a superfície raspando-a e alisando-a conforme o especificado.

### 3.3.2. Operação da máquina de projeção

No caso da máquina de projeção via seca de rotor de câmaras, o primeiro item que chama a atenção, no que se refere ao fornecimento de um fluxo constante de mistura seca para o mangoteiro, é o correto preenchimento da cuba de alimentação. Como as câmaras do rotor são preenchidas por gravidade, é necessário que a cuba de alimentação permaneça

totalmente preenchida, quando da utilização do equipamento. Para isso, recomenda-se sempre a utilização de uma alimentadora contínua como o apresentado no item 3.2.3.2. e o controle da umidade excessiva da mistura seca deve ser rigoroso para se evitar que o material fique retido na cuba alimentadora por coesão. Caso isto não ocorra, haverá um preenchimento irregular das câmaras do rotor variando, conseqüentemente, o fluxo de material no mangote.

Outro ponto importante é o controle da entrada de ar comprimido que é feita na máquina de projeção, através de dois registros como o indicado na Figura 3.11. Um destes registros controla a vazão de ar que vai para a parte superior da câmara do rotor e impulsiona o material no sentido descendente, com o objetivo de garantir o esvaziamento completo da câmara. O outro registro controla a entrada de ar para o cotovelo posicionado abaixo da câmara do rotor e tem a finalidade de carrear o material pelo mangote até o bico de projeção auxiliado, naturalmente, pelo fluxo anterior (Figura 3.11.). Para que isto ocorra de maneira eficiente, é necessário que o ar comprimido seja enviado com uma pressão e vazão adequadas e, além disso, que o equipamento receba a manutenção adequada. Isto porque o rotor é montado com dois discos de aço, também conhecidos como discos de fricção, presos a ele que ao girarem em conjunto friccionam dois discos de borracha posicionados na base da cuba e na parte superior da máquina, que se desgastam intensamente (Figura 3.23. e Tabela 3.5.). Com este desgaste surgem falhas de contato entre os discos de fricção e os de borracha, que possibilitam o escape do ar comprimido. Como conseqüência disto tem-se, além da grande liberação de poeira em torno da máquina de projeção, o risco de não se proceder ao esvaziamento completo da câmara e, conseqüentemente, variação do fluxo do material no mangote.

Além da insalubridade gerada pela maior liberação de poeira e da possibilidade de produção de um material heterogêneo, a omissão na execução de um programa de manutenção adequado pode gerar, também, paralisações desnecessárias do trabalho.

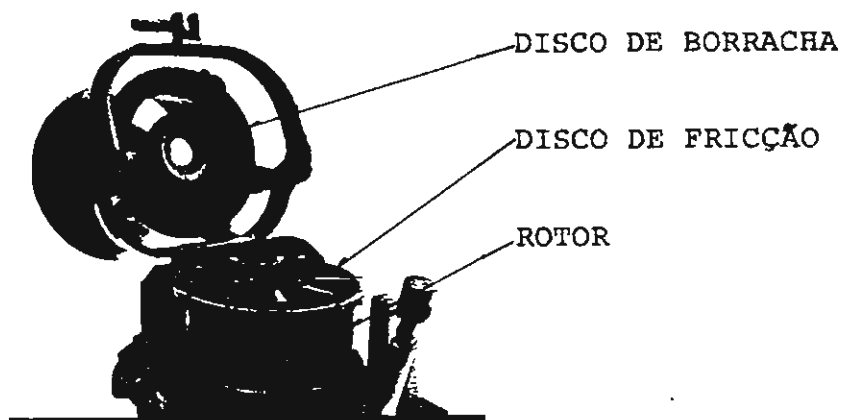


FIGURA 3.23: Detalhe de montagem do conjunto rotor de câmaras, discos de fricção e discos de borracha.

TABELA 3.5: Vida útil das peças mais sujeitas a desgaste na CP-6(32).

PEÇA	VOLUME DE MATERIAL PROJETADO (m <sup>3</sup> )
Disco de borracha superior	60 a 80
Disco de borracha inferior	80 a 100
Disco de fricção superior	120
Disco de fricção inferior	150
Agitador rotativo da cuba	500 a 600
Bocal de saída	500 a 750



### 3.3.3. Cuidados com as mangueiras

As mangueiras e o mangote devem receber grande atenção na manutenção pois estão sempre sujeitas a entupimentos e rupturas e a um desgaste intenso. Assim o ACI<sup>(9)</sup> recomenda a utilização de mangueiras cuja capacidade mínima seja igual ao dobro da carga de serviço. É interessante que se tenha correntes ou cabos de segurança nas junções do mangote para evitar que ele escape com movimentos violentos quando da ocorrência de entupimentos que podem gerar graves acidentes. Além disso é interessante que se gire o mangote de 90° em 90°, pois sua parte inferior sofre sempre um desgaste mais acentuado.

Para maior garantia do andamento do trabalho é sempre conveniente que se possua equipamento de reserva (máquinas e mangueiras), principalmente nas obras de túneis onde a aplicação do material deve ser feita respeitando curtos prazos de tempo (item 2.2.2.).

### 3.3.4. Umidificação da mistura

Na via seca convencional, a adição de água à mistura seca é feita no bico de projeção. Para que esta adição da água à mistura ocorra de maneira homogênea, utiliza-se o que se convencionou chamar de um anel umidificador (Figura 3.24), que o faz através de vários orifícios distribuídos radialmente. No entanto, esta água, normalmente dotada de baixa pressão, não é capaz de penetrar integralmente no fluxo da mistura seca deixando o seu interior não umidificado conforme está apresentado nas Figuras 3.24. e 3.25.<sup>(91)</sup> Isto gera graves problemas como a grande liberação de poeira e a não uniformidade do material, que o mangoteiro busca compensar com uma grande movimentação do bico de projeção, como apontam algumas

recomendações<sup>(9)</sup> (89) (114), aumentando o seu desgaste físico.

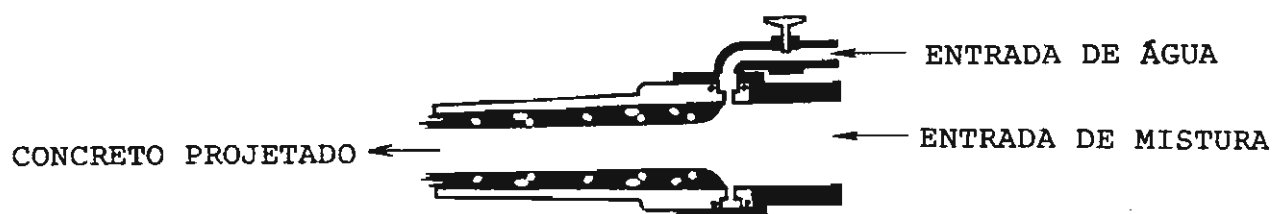


FIGURA 3.24: Detalhe de bico de projeção via seca convencional.

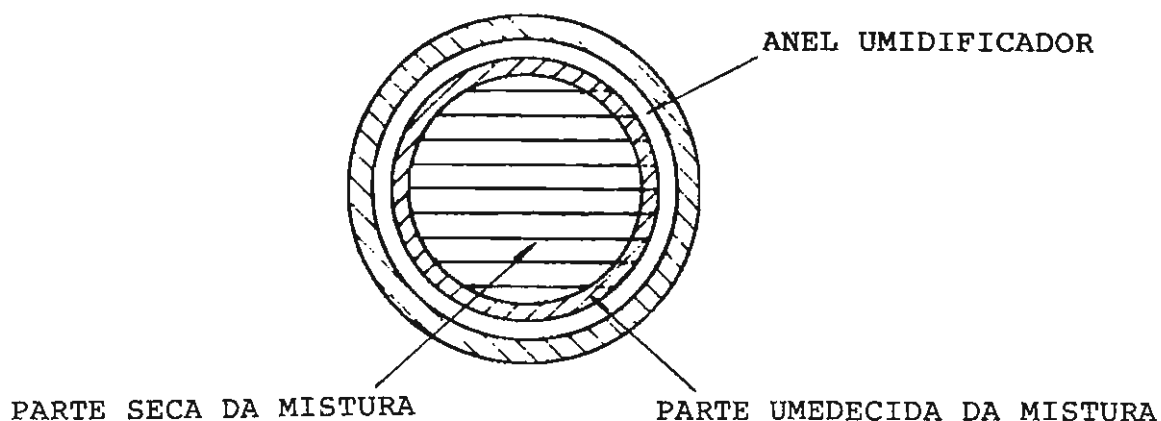


FIGURA 3.25: Esquema da porção umidificada da mistura seca pelo bico convencional (corte transversal)<sup>(91)</sup>.

Além da boa umidificação o bico de projeção deve proporcionar um cone, de projeção de concreto com a maior concentração possível e com velocidade de projeção adequada, pois ela determina as propriedades finais do concreto projetado<sup>(9)</sup> através de uma boa compactação com mínima reflexão. Para se alcançar este objetivo utiliza-se alguns expedientes como o simples afinilamento do bico (Figura

3.26.), isto é, fazer com que o diâmetro da saída do bico seja menor que o do mangote, ou a utilização de bicos especiais como os que a Allentown<sup>(115)</sup> possui em catálogo (Figura 3.27.).

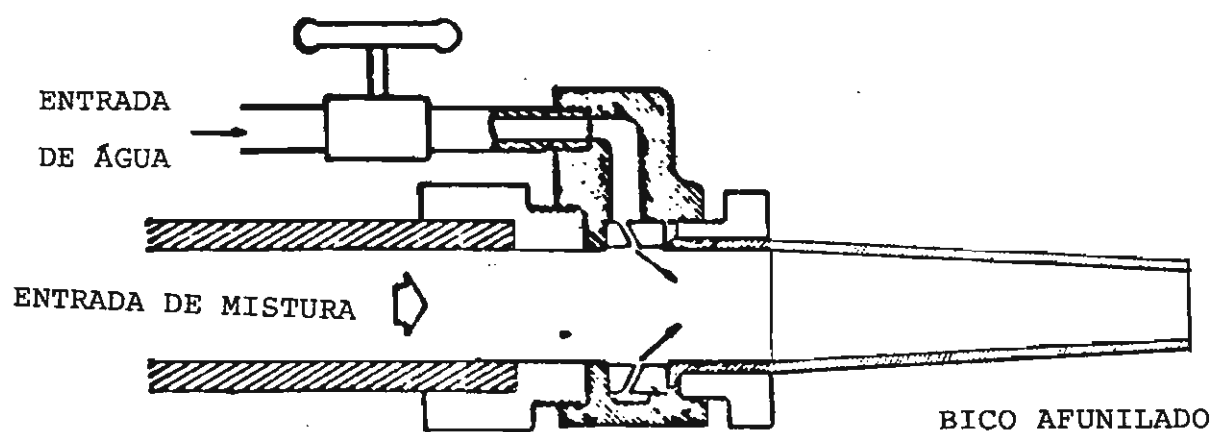


FIGURA 3.26: Detalhe de bico de projeção via seca afunilado.

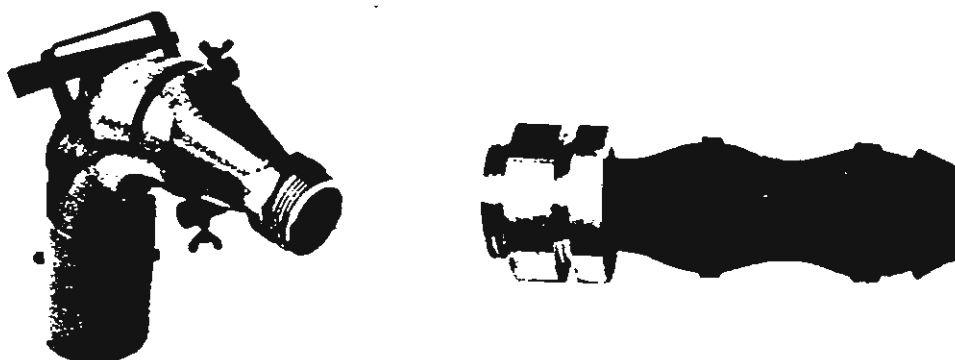


FIGURA 3.27: Bicos de projeção especiais<sup>(115)</sup>.

Um outro expediente utilizado para a eliminação da poeira na via seca é a utilização da pré-umidificação (via semi-úmida). Ela consiste basicamente em proporcionar uma entrada de água através de um anel umidificador a alguns metros do bico de projeção. Isto pode ser feito através de uma entrada de água simples (Figura 3.28.) ou de uma entrada dupla com a regulagem da vazão no bico (Figura 3.2.). A pré-umidificação simples tem como vantagem o alívio de peso para o mangoteiro que, por outro lado, tem a possibilidade de regulagem rápida da vazão de água na de dupla entrada.

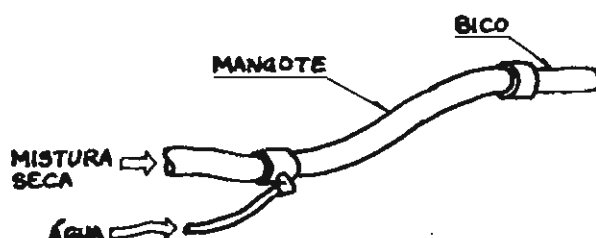


FIGURA 3.28: Sistema de pré-umidificação simples<sup>(9)</sup>.

#### 3.4. PERSPECTIVAS FUTURAS

Dentre as sete áreas ligadas à projeção do concreto indicadas pelo ACI<sup>(9)</sup> em 1990 para futuras pesquisas e desenvolvimento, três estavam ligadas ao processo de projeção ou aos equipamentos, quais sejam o projeto do bico de projeção, a mecanização do equipamento e a automação do processo.

O bico de projeção via seca apresenta como principais pontos a serem otimizados a concentração do jato e a umidificação perfeitamente homogênea do material. O que se apresenta hoje como um sistema otimizado seria a utilização da pré-

umidificação com entrada de água sob elevada pressão com um bico ligeiramente afunilado (para concentração do jato) e leve, caso não esteja na ponta de um braço mecânico. A injeção de água a elevadas pressões passa pela solução do problema da abertura dos orifícios, que não podem ser grandes pois gerariam umidificações excessivas, nem muito pequenos, o que geraria o risco de freqüentes entupimentos por partículas suspensas na água ou até mesmo pela sua corrosão.

A solução para o problema foi a utilização de um orifício único<sup>(7)</sup> de diâmetro da ordem de 1,5 mm. Como durante a sua utilização na obra, este equipamento apresentava elevado desgaste, foi desenvolvida uma alternativa dotada de bico pulverizador no projeto de pesquisa EPUSP/CBPO/IPT-01 (Figura 3.29.). Esta alternativa apresentava o mesmo desempenho da anterior, com a vantagem de ter uma durabilidade bem superior.

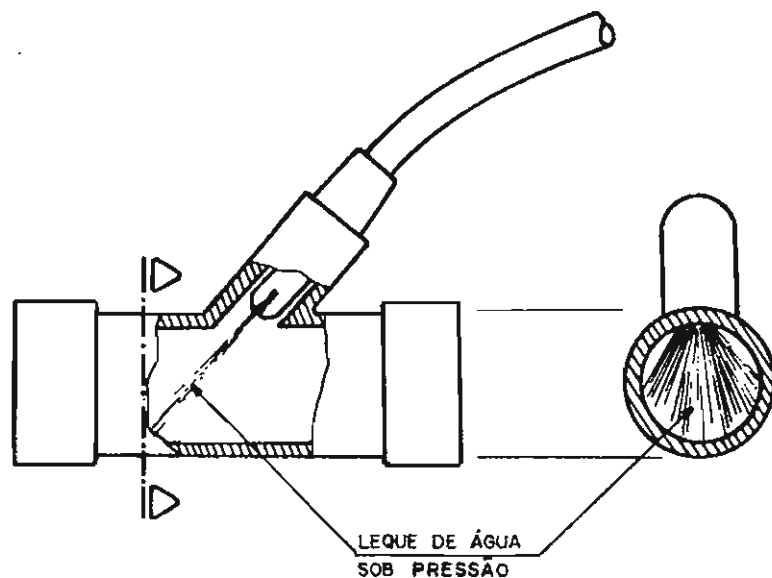


FIGURA 3.29: Esquema do sistema de pré-umidificação com injeção de água sob pressão otimizado.

No caso da via seca, a mecanização do equipamento viria de encontro com a necessidade de se eliminar a prática comum de alimentação manual do equipamento descrita anteriormente, em benefício da utilização de alimentadoras contínuas com dosadores de aditivo em pó ou líquidos ou mesmo do *pre-bagging*.

Na via úmida, caracterizada pelas grandes produções, é essencial a mecanização da projeção para o bom funcionamento do sistema como um todo, ou seja a utilização dos braços mecânicos ou robôs. Além dessa necessidade, o grande volume de concreto produzido exige que o material seja misturado em usina e fornecido na obra por caminhão betoneira. Assim, da mistura dos materiais na usina até a projeção com o braço mecânico, passando pela bomba de concreto o processo de projeção via úmida exige uma máxima mecanização para ser aproveitado de maneira otimizada com as suas grandes produções. Obviamente todo este aparato pode ser aplicado na projeção por via seca, o que dificilmente ocorre, devido ao fato da via seca ser mais utilizada no avanço da escavação do túnel (execução do revestimento primário) onde existe uma grande movimentação de terra que dificulta a operação conjunta de grandes equipamentos (escavadeiras, fresas, caminhões, vagonetes, etc.) num espaço restrito.

A automação do processo caminha lado a lado com a mecanização. A primeira não ocorre sem a segunda e é particularmente importante nas obras de serviços repetitivos como na execução de túneis. No momento em que se empregam equipamentos de escavação cada vez mais sofisticados e produtivos<sup>(116)</sup>, observa-se a necessidade da automação do processo como um todo no intuito de se diminuir a diferença das velocidades de escavação do NATM e do *Shield*. Assim, os investimentos que se fizerem neste sentido devem, obrigatoriamente, procurar reduzir ou até eliminar as tarefas que aumentem o tempo de ciclo, como a alimentação da máquina de projeção, a colocação de cambotas e telas, que podem ser substituídas pela utilização de fibras.

## CAPÍTULO IV: PROPRIEDADES DO CONCRETO PROJETADO

### 4.1. IMPORTÂNCIA E FORMA DE CONTROLE

Uma das grandes críticas, que sempre se fez, ao concreto projetado era defini-lo como um material de grande variabilidade quanto às suas propriedades. Lorman<sup>(31)</sup> afirmou que em várias pesquisas, executadas entre 1911 e 1965, as propriedades físicas do concreto projetado variaram do pobre ao excelente. Informações deste tipo, como afirmou Glassgold<sup>(117)</sup>, geram dúvidas quanto à confiabilidade do material "questionando sua viabilidade a longo prazo". Mason e Lorig, no capítulo VII (sobre o concreto projetado) do trabalho publicado por Rose<sup>(118)</sup>, creditaram ao fato de, "devido à sua própria maneira de lançamento e o uso comum de aditivos aceleradores, o problema de execução de corpos de prova é único e separado daqueles correlacionados com o concreto moldado convencional". Isto faz com que o próprio "controle de qualidade do concreto projetado fornecer resultados insatisfatórios", quando executado sem os devidos cuidados.

Além da dúvida sobre as possibilidades do concreto projetado apresentar um desempenho adequado ou por que o concreto projetado apresenta tamanha variabilidade, o próprio Glassgold<sup>(117)</sup> formulou uma série de questões sobre a adequação dos métodos empregados para análise desse desempenho. Como exemplo dessas questões pode-se perguntar se "os trabalhos que apresentaram estes resultados tão variados foram baseados em testes válidos, apropriadamente executados e avaliados? Se as matérias primas utilizadas eram de boa qualidade? Se o concreto foi projetado apropriadamente? E se, dado o grande número de variáveis envolvidas, nós podemos comparar concretos projetados executados em áreas e regiões diferentes?"

Algumas das razões para a existências de tantas dúvidas estão apontadas a seguir<sup>(118)</sup>:

- a. Os componentes básicos do concreto convencional, quais sejam os agregados e o cimento, podem não ter o potencial de produzir um concreto projetado de alta qualidade;
- b. Cimento e aditivos aceleradores de pega podem não fornecer o desempenho desejado quando utilizados nas condições da obra, e quando conseguem, pode-se obter uma redução inaceitável da resistência do material a maiores idades;
- c. A amostragem do concreto projetado, normalmente relacionada com a extração de testemunhos, é um problema muito diferente da moldagem de corpos-de-prova cilíndricos padronizados para o concreto moldado convencional. Muitos dos problemas de qualidade do concreto projetado são devidos a uma técnica pobre de amostragem ou má interpretação dos resultados e
- d. O equipamento e a mão-de-obra podem não estar preparados para produzir um concreto projetado de boa qualidade.

Com relação aos materiais componentes, as incertezas são originadas pela inexistência de metodologia de dosagem racional do concreto projetado<sup>(6)</sup>.

O próprio Glassgold<sup>(117)</sup> aponta algumas respostas para as questões relativas ao processo, as quais dão uma boa orientação sobre a forma de avaliação do concreto projetado. O primeiro ponto a ser levantado são as dificuldades que se têm para se identificar causas e efeitos sem uma documentação adequada. A maioria dos textos publicados, apresentando casos históricos normalmente, e não fornecem um "suporte efetivo, completo ou até mesmo substancial para se poder avaliar adequadamente suas conclusões". Para que isso não aconteça, é necessário que, nos relatos, sejam descritos o equipamento e o suporte utilizado para a projeção do concreto e sejam dados detalhes completos sobre o ambiente e a forma de execução<sup>(117)</sup>. Caso contrário corre-se o risco de



não se ter satisfeitos os requisitos e critérios de desempenho exigidos do material e, o que é pior, não saber a que imputar o fato e, como é comum, creditar ao próprio material (incluindo aí o processo) toda a culpa.

Além da caracterização do processo de projeção utilizado, deve-se indicar a forma como foram obtidas as propriedades do material, uma vez que no Brasil ainda não existem ensaios normalizados para tal.

O segundo ponto reside no fato de que o controle sobre o material concreto projetado também deveria ser executado sem perder de vista este enfoque global, isto é, deveria abordar todos os aspectos envolvidos no processo de projeção, desde a dosagem até o uso. Procurando exemplificar, a dosagem do concreto projetado deve levar em conta o processo de produção que será empregado para que seja possível selecionar adequadamente os materiais constituintes e estabelecer um proporcionamento adequado<sup>(6)</sup>, da mesma forma que quando se analisa a durabilidade de uma estrutura em concreto projetado ao longo de sua vida útil deve-se levar em conta todos os detalhes da sua execução, inclusive o equipamento utilizado, como foi feito por Simondi et alii<sup>(58)</sup> em seu trabalho.

Nisto reside a razão principal deste capítulo, qual seja, caracterizar e determinar para cada propriedade do material os fatores que tenham influência sobre a mesma, ressaltando aqueles ligados ao processo de projeção. Além disso, procurar-se-á fornecer indicações sobre a forma de controle que pode ser empregada para a análise de cada propriedade.

## 4.2. REFLEXÃO

Diferentemente do concreto moldado convencional, o concreto projetado está obrigatoriamente associado a uma grande quantidade de perdas. Este fato é inerente ao próprio processo de projeção. Como o concreto projetado é lançado a alta velocidade é de se esperar que parte do material não fique aderido à superfície, caindo então ao chão. Como este fenômeno é essencialmente dinâmico e é influenciado por uma série de fatores é necessário que se tenha uma série de cuidados para que seja evitada uma grande elevação nos custos. Para isso é necessário o bom entendimento do fenômeno.

Além da clara elevação dos custos dos materiais pela elevação do consumo, a reflexão produz uma outra série de perdas não tão óbvias e algumas até intangíveis<sup>(119)</sup>. Entre estas pode-se destacar o aumento do tempo destinado à projeção do material, o que pode representar um aumento no ciclo de escavação de um túnel por exemplo.

Com uma maior reflexão torna-se maior a demanda de mão-de-obra para o manuseio e para a mistura dos materiais, reduzindo assim a eficiência de toda a equipe. Outro importante fator de custos é a remoção do entulho formado pela reflexão.

### 4.2.1. Definições

Denomina-se reflexão o fenômeno que ocorre durante a projeção do concreto, onde parte do material é refletido não ficando incorporado ao alvo de projeção, caindo ao chão conseqüentemente.

Para se representar a reflexão utiliza-se basicamente o índice de reflexão, que é uma proporção média, dada em

porcentagem, que relaciona a quantidade total em massa de material que foi projetado e em relação ao que foi refletido, a saber:

$$IR = (MR/MT) \times 100, \text{ onde}$$

IR = índice de reflexão

MR = massa do material refletido

MT = massa do material projetado

#### 4.2.2. Dinâmica da reflexão

A reflexão é um processo dinâmico que Parker et alii<sup>(119)</sup> dividiu em duas fases. A primeira fase corresponde à formação de um colchão de amortecimento para o concreto projetado. Este colchão consiste, basicamente, numa fina camada de pasta e argamassa. Quando se inicia a projeção a reflexão é muito intensa pois só a pasta de cimento é capaz de se aderir à superfície do alvo de projeção. À medida que esta camada tem sua espessura aumentada, passasse progressivamente a incorporar agregados de dimensões maiores até que seja possível incorporar o agregado graúdo. A partir deste momento se dá início à segunda fase onde a intensidade da reflexão torna-se constante com níveis bem inferiores à primeira fase. Esta dinâmica se encontra qualitativamente ilustrada na Figura 4.1.

Este comportamento tem uma explicação muito simples: como inicialmente não há forma de dissipar a energia cinética dos grãos dos agregados os mesmo sofrem um choque elástico com o alvo de projeção, retornando com grande velocidade no sentido contrário. À medida que vai se formando uma camada de pasta e, posteriormente, argamassa o choque dos agregados com o alvo de projeção passa a ser anelástico, pela

deformação plástica sofrida pela camada de amortecimento, o que possibilita a incorporação de agregados de diâmetros cada vez maiores. Este fenômeno está ilustrado na Figura 4.2.

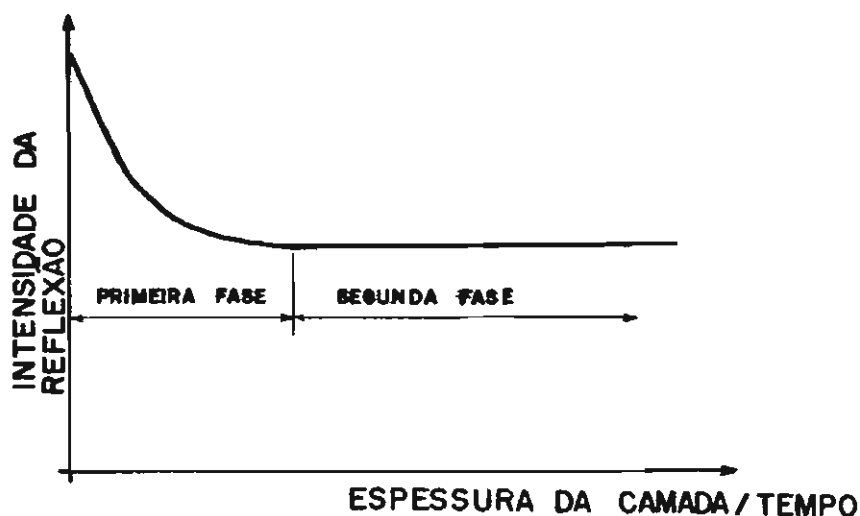


FIGURA 4.1: Variação qualitativa da reflexão em função da espessura projetada.

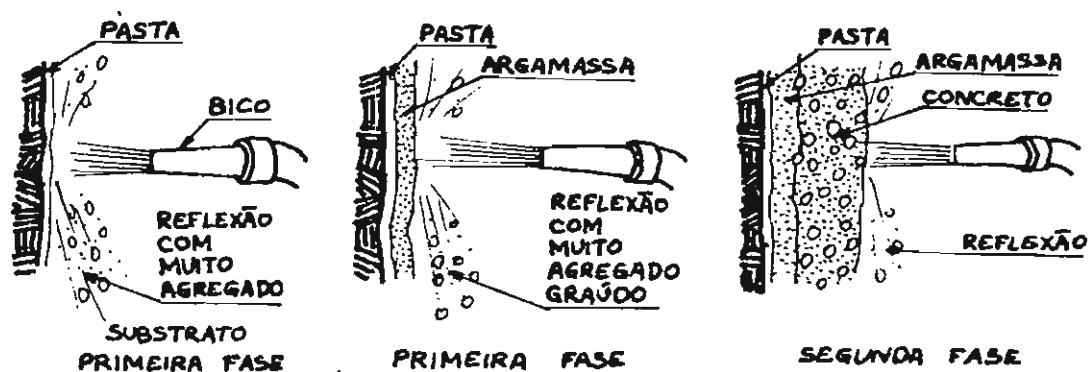


FIGURA 4.2: Dinâmica da formação da camada de amortecimento do concreto projetado.

#### 4.2.2.1. Influência da espessura da camada

A dinâmica da reflexão traz uma série de implicações para o entendimento do concreto projetado em si. Num primeiro aspecto entende-se facilmente que a reflexão média total é tanto menor quanto maior for a espessura de concreto projetado numa só passada.

Quando há a necessidade de executar uma grossa camada de concreto projetado, o problema pode se agravar. Isto porque nem sempre é possível se executá-la numa única e contínua operação de projeção devido a ocorrência de deslocamentos. Assim, é normal se esperar pelo endurecimento de uma camada para que se execute a outra. No entanto, quanto se vai executar uma camada sobre a outra já endurecida volta-se à situação da primeira fase e, conseqüentemente, temos uma maior reflexão. Desta forma, tanto a reflexão como a heterogeneidade do material será maior quanto maior for o número de passadas utilizadas para se obter uma mesma espessura de camada.

#### 4.2.2.2. Influência da granulometria da mistura

Quanto maior for a quantidade e a dimensão do agregado maior será a reflexão. Isto ocorre basicamente por dois motivos: o primeiro porque quanto maior for o agregado maior será a camada necessária para o seu amortecimento, o que aumenta a duração da primeira fase e, conseqüentemente, a reflexão. Além disso, maior será a probabilidade de ocorrer choques elásticos com outros agregados.

Da mesma forma, quanto maior for o consumo de cimento ou, mais precisamente, o teor de finos da mistura que alimenta a máquina de projeção tanto menor será a reflexão<sup>(12)</sup>.

É por isso que se indica a utilização de microssílica como

reduz a reflexão, pois, além de aumentar a coesão, dada sua grande finura, aumenta o teor total de finos da mistura<sup>(23)</sup>.

#### 4.2.2.3. Influência do teor de umidade

Quanto maior for a quantidade de água da mistura menor será a reflexão<sup>(120)</sup>, o que pode ser representado pela relação água/cimento conforme o apresentado na Figura 4.3. Isto porque, maior será a plasticidade da mistura projetada e, conseqüentemente, maior será a capacidade que o colchão de amortecimento terá de tornar o impacto anelástico. É óbvio que a quantidade de água não pode exceder a certos valores que fluidifiquem a mistura, o que faz com que a mesma perca a sua coesão impedindo, desta forma, que ela permaneça aderida à parede.

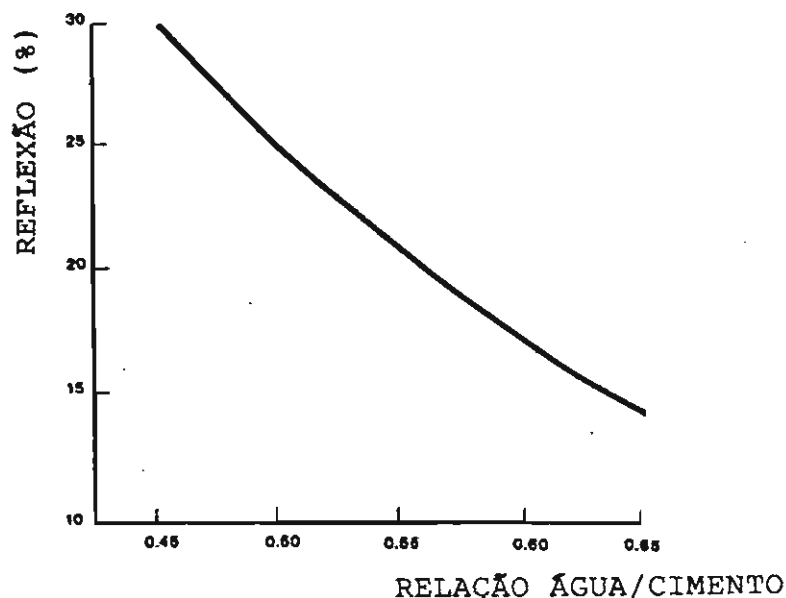


FIGURA 4.3: Efeito da relação água/cimento na reflexão do concreto projetado por via seca<sup>(120)</sup>.

#### 4.2.2.4. Influência do substrato

A reflexão é também afetada pelo substrato onde se está projetando o concreto. Quanto mais irregular for este substrato, maior será a superfície necessária para se recobrir com a camada de amortecimento e, conseqüentemente, a primeira fase terá uma maior duração aumentando assim a reflexão. O mesmo acontece quando temos superfícies mais rígidas que demandam uma espessura maior da camada de amortecimento. Por outro lado, quando se projetar sobre telas que vibrem e, desta forma, desprendem os grãos fracamente aderidos tem-se uma maior reflexão também (90).

#### 4.2.2.5. Variação do traço em função da reflexão

A variação do proporcionamento dos materiais constituintes do concreto projetado que ficou na parede, tanto em relação tanto às suas próprias camadas quanto à mistura que entrou na máquina de projeção, se deve ao material refletido ser constituído majoritariamente por agregado graúdo<sup>(12)</sup>, principalmente na primeira fase. Desta forma, o material que ficou retido no alvo de projeção é mais rico em finos (incluindo aí o cimento) do que a mistura seca com que se alimentou a máquina de projeção. A Aliva<sup>(12)</sup>, numa tentativa de orientar a estimativa de gastos com materiais constituintes do concreto projetado, estabeleceu uma relação de traços para um índice de reflexão de 25%, a qual se encontra descrita na Tabela 4.1.

Não se pode deixar escapar o detalhe de que quanto maior for a reflexão tanto maior será a variação do traço do concreto no alvo de projeção, fato que orientou a formulação do texto base da norma para determinação do índice de reflexão por reconstituição de traço por parte de Prudêncio<sup>(121)</sup> a ser estudado pela comissão de concreto projetado da ABNT.

Para melhor ilustrar este aspecto, tem-se o fato de o próprio ACI indicar em seu *Guide to Shotcrete*<sup>(9)</sup> uma correlação entre o traço da mistura que alimentou a máquina de projeção e aquela que ficou efetivamente incorporada à estrutura (Tabela 4.2.). O grande problema destes dados, que é um erro muito comum no que se refere ao concreto projetado, reside no fato do ACI negligenciar a relação que estes valores tem com o próprio índice de reflexão, restringindo-se a informar apenas que se trata de uma "reflexão média" sem quantificá-la.

TABELA 4.1: Valores estimados para os traços de mistura seca, reflexão e concreto projetado para um índice de reflexão de 25%(12).

MATERIAL	CIMENTO (kg)	AGREGADOS (kg)	ÁGUA (kg)	TRAÇO EM PESO
MISTURA SECA (1000 l)	280	1168	47	1 : 4,17
CONCRETO PROJETADO (555 l)	252	876	116	1 : 3,48 a/c=0,46
REFLEXÃO (~250 l)	28	292	29	1 : 10,43

TABELA 4.2: Variação típica do traço do concreto projetado<sup>(9)</sup>.

TRAÇO DA MISTURA LANÇADA À MÁQUINA DE PROJEÇÃO	TRAÇO DO CONCRETO PROJETADO QUE FOI INCORPORADO À ESTRUTURA
1 : 3,0	1 : 2,0
1 : 3,5	1 : 2,8
1 : 4,0	1 : 3,25
1 : 4,5	1 : 3,6
1 : 5,0	1 : 3,8
1 : 6,0	1 : 4,1



### 4.2.3. Efeito do processo de projeção

#### 4.2.3.1. Tipo de processo

A maior reflexão obtida na utilização da via seca tem sido apontado como "uma das grandes vantagens da via úmida, que é a pequena reflexão"<sup>(91)</sup>. Isto ocorre devido a dois fatores básicos, quais sejam, a maior coesão do material projetado por via úmida, que já vem total e homogeneamente umidificado, e a menor velocidade de projeção, em relação à via seca.

Quanto mais homogeneamente a mistura de concreto a ser projetado estiver, maior será a sua coesão, no que se refere às partículas menores, principalmente. Assim, como na via seca a umidificação ocorre pouco antes do material ser projetado, percebe-se que a umidificação homogênea da mistura é difícil de se obter.

#### 4.2.3.2. Velocidade de projeção

Lorman<sup>(31)</sup>, em 1968, já havia apontado que a "reflexão aumenta com grandes pressões no mangote e, conseqüentemente, grandes velocidades de projeção". Isto ocorre pela maior energia que deverá ser dissipada para que o material permaneça aderido ao alvo de projeção. Além da pressão de ar comprimido, a velocidade de projeção pode ser alterada pelo tipo de bico utilizado, como apontou Parker et alii em seu estudo<sup>(119)</sup>, uma vez que são interdependentes. Isto é, quanto menor o diâmetro do bico, maior a velocidade de projeção.

#### 4.2.3.3. Inclinação do jato

Outro fator importante a incidir sobre a reflexão é o ângulo que o jato de concreto faz com a superfície de projeção<sup>(9)</sup> (14) (21). Há um consenso na literatura em afirmar que quanto mais próximo o ângulo de incidência estiver dos  $90^\circ$  em relação ao alvo de projeção menor será a reflexão (Figura 4.4.). Längerle<sup>(21)</sup> chegou a esboçar uma quantificação para o efeito do ângulo de projeção na reflexão, o que se encontra apresentado na Figura 4.5.

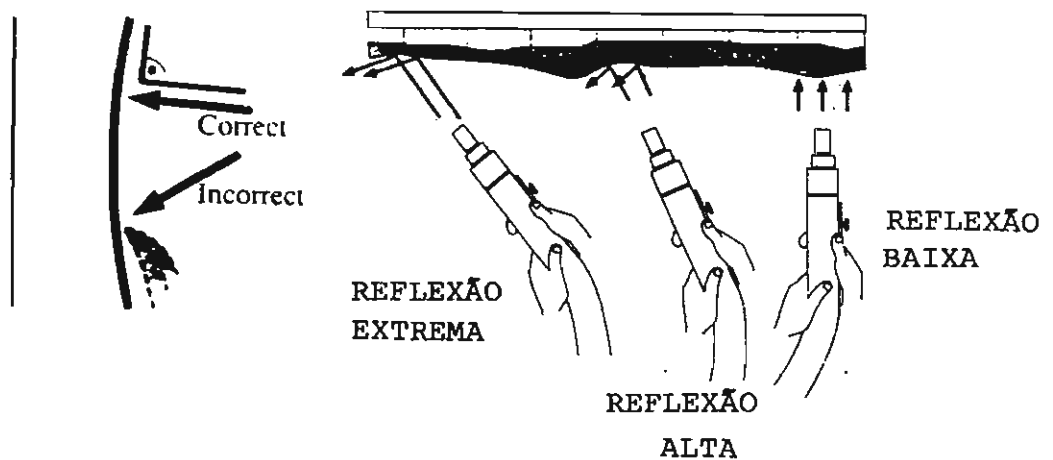


FIGURA 4.4: Influência do ângulo de projeção na reflexão<sup>(91)</sup>.

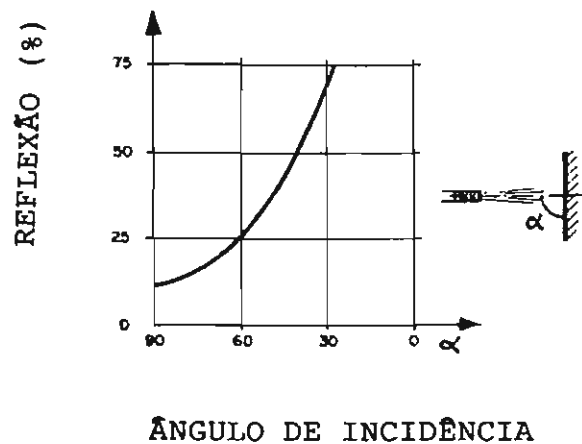


FIGURA 4.5: Avaliação quantitativa da reflexão em função do ângulo de projeção<sup>(21)</sup>.

#### 4.2.3.4. Distância de projeção

Correlacionado com a velocidade e a inclinação do jato está também o fato de haver uma distância ideal para a projeção no sentido de minimizar a reflexão<sup>(21)(34)</sup>. Nos gráficos da Figura 4.6. se encontram algumas tentativas de quantificação da reflexão em função da distância de projeção. "A distância do bico em relação à superfície de trabalho, normalmente entre os 0,60m e 1,80m, deve ser procurada de modo a se obter os melhores resultados para os requisitos exigidos: maior grau de compactação para a menor reflexão possível"<sup>(91)</sup>. A distância ótima de projeção é influenciada pelos seguintes fatores<sup>(91)</sup>:

- a. dimensão do agregado utilizado;
- b. curva granulométrica;
- c. requisitos de acabamento da superfície do concreto projetado e
- d. pressão do ar comprimido e velocidade de projeção.

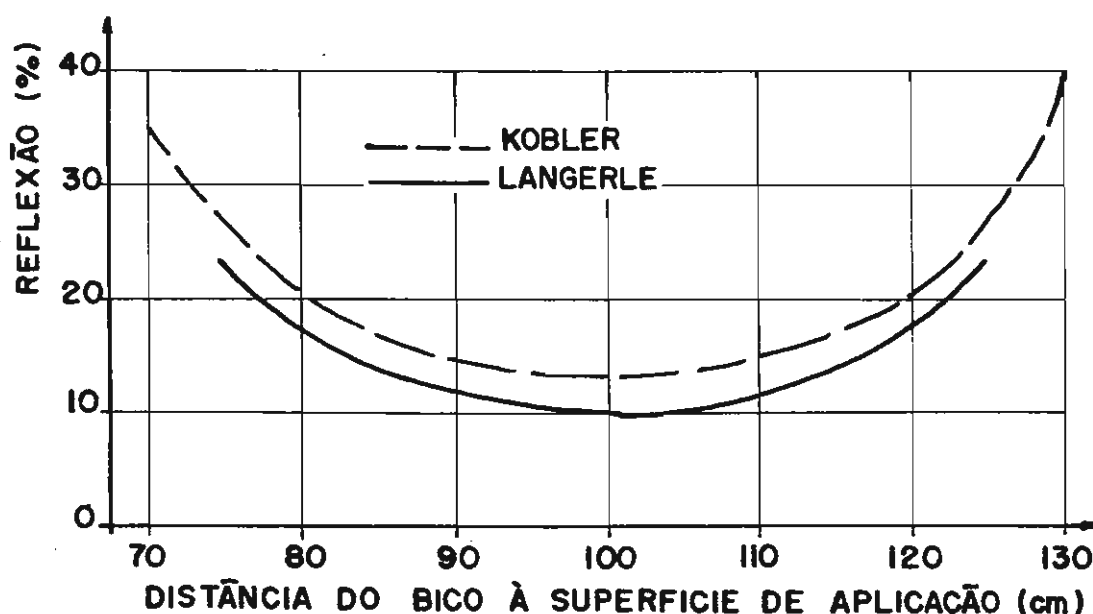


FIGURA 4.6: Quantificação da reflexão em função da distância de projeção segundo Längerle<sup>(21)</sup> e Kobler<sup>(34)</sup>.

Com estes fatores em vista, justifica-se o fato do uso de braços mecânicos poder proporcionar um menor nível de reflexão, pois são bem melhores as condições que o operador tem de manter um posicionamento adequado do bico.

#### **4.2.4. Oclusão da reflexão**

Uma das primeiras causas da heterogeneidade do concreto projetado está correlacionada com o efeito de oclusão da reflexão. Este é um fenômeno localizado, que pode produzir regiões de baixa resistência e alta permeabilidade, devido à alta quantidade de agregado que ali se concentra.

A oclusão da reflexão consiste num efeito colateral da reflexão. Trata-se da parcela do material refletido que, ao invés de se precipitar ao chão, acaba se aderindo à armadura, à fôrma, às cambotas, aos cantos, etc. Este material forma uma camada de concreto projetado de baixa qualidade<sup>(9)</sup>(114), isto é, com pouco teor de finos e uma compactação muito reduzida, uma vez que não foi "projetada" com uma velocidade adequada. Estas falhas na camada estrutural devem ser removidas preferencialmente antes do seu endurecimento<sup>(9)</sup>. O seu controle deve ser feito visualmente pelo próprio mangoteiro ou operador de braço mecânico.

#### **4.2.5. Controle da reflexão**

Não deve se reaproveitar o material da reflexão na projeção. Kobler<sup>(34)</sup> relatou que em testes realizados com concretos projetados executados com reaproveitamento de reflexão indicaram uma perda de resistência da ordem de 20% a 30%.

Considerando o trabalho necessário para tal reaproveitamento, onde se inclui a coleta e a lavagem intensiva do material antes de ser reutilizado, e a perda de qualidade do mesmo, "as vantagens econômicas são negligenciáveis de fato"<sup>(34)</sup>. Outros motivos para não se reutilizar esse material são o perigo de contaminações, a incerteza quanto ao teor de cimento e seu nível de hidratação e a totalmente imprevisível variação da granulometria dos agregados<sup>(9)</sup>.

Existem algumas dificuldades no controle da reflexão que não se restringem apenas à grande quantidade de fatores que a influenciam. Um deles é a ausência de ensaios normalizados publicados no Brasil. Isto, no entanto, tem um horizonte muito promissor uma vez que já se conta, na ABNT, com um texto base<sup>(121)</sup> e dois projetos de norma<sup>(122)</sup><sup>(123)</sup>, definindo três métodos de ensaio para a determinação da reflexão.

O primeiro método, denominado determinação da reflexão por medição direta<sup>(122)</sup>, tem por metodologia a coleta e pesagem de todo o material refletido durante a projeção em determinado trecho representativo da obra. Desta forma seria possível determinar com grande precisão o índice de reflexão da obra. Este método foi utilizado inicialmente na obra do túnel pertencente ao anel viário da cidade de Campinas<sup>(66)</sup>.

A utilização do método é facilitada pela regularidade do piso onde se coletará a reflexão. Isto nem sempre acontece e, portanto, este método, apesar da grande precisão, não é indicado para o controle rotineiro da produção, mas sim para a análise de viabilidade e ajuste do processo de projeção como um todo. Este papel caberia aos outros dois métodos, quais sejam, a determinação da reflexão em placas de concreto projetado<sup>(123)</sup> e a determinação da reflexão por reconstituição de traço<sup>(121)</sup> que são menos precisos mas muito mais práticos.

A determinação da reflexão em placas<sup>(123)</sup> seria o método destinado a ser feito durante a execução da obra, em conjunto com a moldagem de placas para o controle da resistência à compressão. Ele não representa as condições reais da obra, pois o substrato é diferente e fixo, mas permite avaliar, comparativamente, o desempenho do processo ao longo da execução da obra. Assim, ele seria um instrumento interessante para checar se o processo de projeção como um todo está obedecendo àquilo que foi definido durante a execução da sua análise de viabilidade. Sua execução é simples e muito pouco dispendiosa, consistindo basicamente na coleta do material refletido da placa de concreto projetado, feito através de lonas convenientemente posicionadas (Figura 4.7.), durante a sua moldagem.

O método de determinação da reflexão por reconstituição de traço foi desenvolvido a partir do conceito descrito em 4.2.2.5., no qual o traço do concreto que ficou incorporado à estrutura e o da própria reflexão são alterados em função da intensidade desta última. Além disso, a concepção deste método só foi possível a partir da elaboração do projeto de norma do método de ensaio para reconstituição de traço para concretos recém projetados elaborado por Prudêncio<sup>(124)</sup>. Este é o método ideal para a avaliação rápida e simples da reflexão em locais onde há a dificuldade de se posicionar de maneira conveniente as lonas para a coleta do material da reflexão. Resta no entanto ressaltar a importância de se obter amostras representativas uma vez que este método é executado com uma pequena quantidade de material coletado da mistura que alimenta a máquina de projeção, da estrutura e da própria reflexão.

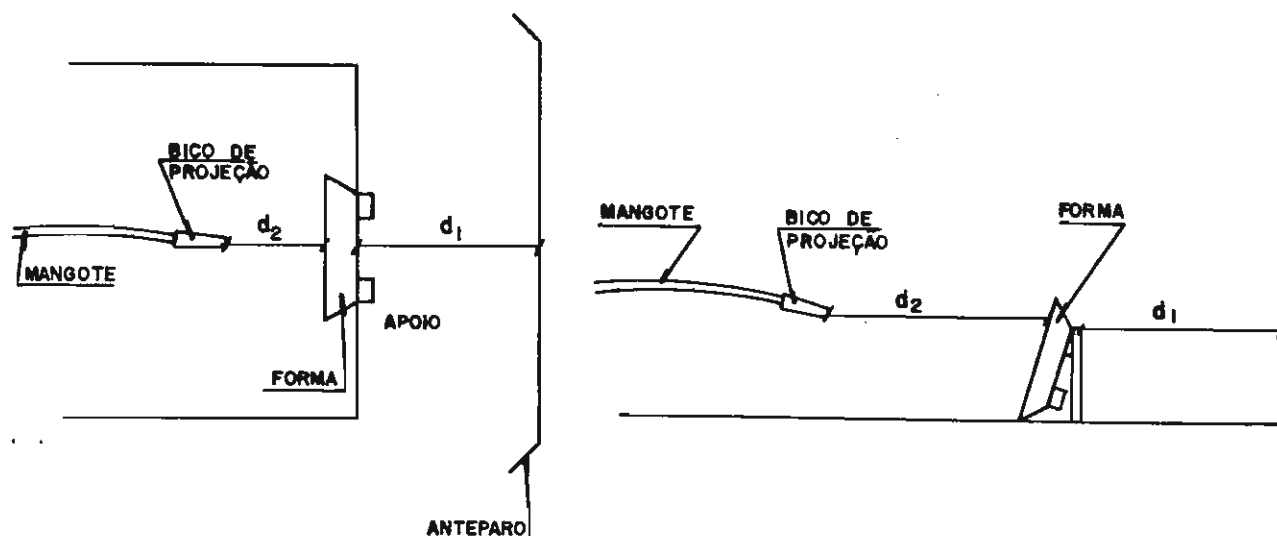


FIGURA 4.7: Esquema de posicionamento de fôrma e lonas para determinação da reflexão em placas<sup>(123)</sup>.

### 4.3. DESPLACAMENTO

Quando se utiliza o concreto projetado normal, isto é, composto apenas de cimento, agregados e água, dificilmente se consegue atingir uma espessura de camada de 50 a 75 mm, quando se projeta no teto, sem que ocorra o rompimento do material por falta de coesão<sup>(23)</sup>. A este fenômeno denomina-se deslocamento, o qual, da mesma maneira que a reflexão, representa uma grande possibilidade de perdas para quem executa o concreto projetado.

Normalmente, a espessura requerida para a camada de concreto projetado é superior a esses valores. Assim, para atingí-la, ou se recorre à execução da camada em várias passadas<sup>(114)</sup>, o que aumenta sobremaneira a reflexão, ou então a utilização de aditivos aceleradores de pega e/ou microssílica<sup>(23)</sup>.

#### **4.3.1. Causas dos deslocamentos**

A utilização dos aditivos e da microssílica tem como efeito principal o aumento da coesão do concreto projetado, para assim garantir a obtenção da espessura desejada. Então, verifica-se que a ocorrência do deslocamento se dá quando acontece uma falha na coesão do material. Isto pode advir por vários meios como os apontados por Crom<sup>(114)</sup>:

- a. Ocorrência de lentes de areia, que podem se originar pela oclusão do material de reflexão;
- b. Umedecimento exagerado de uma camada do concreto projetado por via seca, o que está associado a uma falha do mangoteiro ou a uma interrupção do fluxo de mistura seca por falha do equipamento;
- c. Execução de camadas com espessura excessiva devido, normalmente, a uma falha no controle de execução da mesma e
- d. Falha no fornecimento de aditivos aceleradores

Todos estes fatores produzem zonas ou mesmos camadas inteiras com coesão insuficiente, o que induz ao aparecimento do fissuramento interno da camada e, conseqüentemente, ao deslocamento<sup>(114)</sup>.

#### **4.3.2. Controle do deslocamento através da consistência**

O deslocamento produz, por um lado, um aumento no custo por incrementar o nível de perdas. Por outro, aumenta o risco de acidentes graves no serviço de projeção, pois há a possibilidade de queda sobre algum operário e, principalmente, o mangoteiro. Por isso, o seu controle não pode ser negligenciado.

O controle do deslocamento pode ser feito de maneira



indireta, avaliando-se a coesão do material. Isto pode ser feito através da determinação da consistência do concreto recém projetado, para assim verificar se a mesma está adequada para a obtenção da espessura requerida. A determinação da consistência do concreto projetado pode ser feito através do ensaio desenvolvido por Prudêncio<sup>(125)</sup> através da penetração da agulha de Proctor.

Um cuidado importante a ser tomado, é a verificação visual da ocorrência de possíveis falhas que venham a acarretar o deslocamento.

#### **4.4. POEIRA E NÉVOA**

##### **4.4.1. Causas da produção de poeira**

A liberação de poeira durante a projeção é um fenômeno típico da via seca onde a umidificação completa da mistura durante a sua passagem pelo anel umidificador é muito difícil de se obter. No entanto, o jato de concreto projetado não é a única fonte de produção de poeira. A própria alimentação da cuba da máquina de projeção, quer seja manual (Figura 3.14.) ou mecanizada (Figura 3.15.), gera uma grande quantidade de pó, até superior à produzida no bico<sup>(78)</sup>. No caso da alimentação manual, o problema é mais grave, não só pela maior liberação de pó, como também pela maior proximidade dos operários com a fonte de poeira.

Outro ponto de grande liberação de poeira é a própria máquina de projeção, principalmente se for o caso de uma a rotor<sup>(78)</sup> (Figura 3.11.). Isto adquire proporções graves no caso dos equipamentos que não receberam manutenção adequada e, com o desgaste de certas peças (discos de fricção e de borracha), podem produzir uma densa nuvem de poeira ao seu redor pelo jorro provocado pelo escapamento de ar comprimido pelas juntas mal vedadas.

#### **4.4.2. Causas da produção de névoa**

No caso da via seca com injeção de água a elevada pressão (item 3.4.), onde a umidificação das partículas de cimento e demais finos é mais eficiente, pode ocorrer um outro problema semelhante, que é a produção de uma névoa a partir do jato pulverizado de água. Este jato de água é expelido pelo bico pelo ar comprimido formando uma névoa que prejudica a visualização do serviço. No entanto, quando se utiliza o aditivo líquido diluído na água, o qual é normalmente à base de aluminatos ou silicatos de sódio ou potássio e tem elevado pH, pode-se provocar uma atmosfera altamente cáustica e, conseqüentemente, nociva à saúde dos operários.

#### **4.4.3. Controle da poeira e da névoa**

O controle da poeira ou da névoa pode ser feito através de equipamentos especiais como o Dupont modelo P-2500<sup>(78)</sup>, onde o principal objetivo é a determinação do teor de poeira respirável. Isto é fundamental em ambientes fechados, como é o caso dos túneis, onde pode haver uma concentração intensa do material em suspensão.

#### **4.5. HOMOGENEIDADE**

Tanto o concreto projetado como o moldado pela forma convencional pode apresentar falta de homogeneidade. No entanto, no caso do concreto projetado, isto pode ocorrer de uma maneira generalizada para o material com uma freqüência bem mais acentuada. Isto se deve ao próprio processo de projeção que normalmente possibilita a maior parte dos

defeitos do concreto "devido a uma execução descuidada" ocasionada por "falta de experiência ou mesmo indiferença"<sup>(12)</sup>. Os defeitos mais comuns, que ocorrem no concreto projetado, e que são causas da heterogeneidade do material são a já comentada oclusão de material refletido (item 4.2.4.), a laminação, o efeito de "sombra" e alterações na superfície do material.

A falta de homogeneidade pode se caracterizar também pela grande variação nas propriedades do material, como a resistência à compressão com elevado coeficiente de variação. Este fenômeno, que em parte pode estar associado à ocorrência de defeitos.

#### **4.5.1. Defeitos típicos**

##### **4.5.1.1. Efeito de sombra**

Uma das causas de heterogeneidade do material que, como a oclusão da reflexão, também produz defeitos localizados, é o chamado efeito de sombra, que se encontra representado na Figura 4.8. Este efeito está ligado à projeção sobre as armaduras, que pode produzir vazios por detrás das mesmas. A origem deste fenômeno está associada à projeção inadequada do concreto, onde não se obedece a uma distância adequada ou adiciona-se aditivo acelerador de pega em demasia<sup>(114)</sup>. Isto produz uma camada de concreto aderida à barra da armadura que, ao aumentar o seu diâmetro, prejudica o preenchimento do espaço posterior à mesma. Este efeito é tão mais intenso quanto maior for o diâmetro das barras de aço e é particularmente perigoso para a corrosão das armaduras por facilitar a entrada de agentes agressivos diretamente sobre o metal.

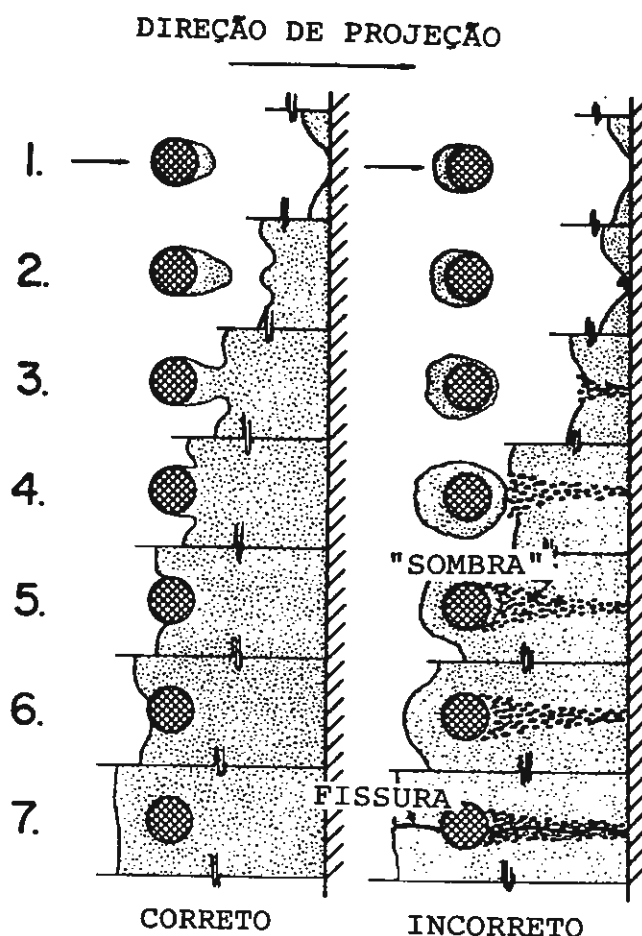


FIGURA 4.8: Efeito de sombra<sup>(114)</sup>.

#### 4.5.1.2. Laminação

O efeito conhecido por laminação consiste, basicamente, na formação de faixas alternadas de material de alta e de baixa densidade no sentido perpendicular ao da projeção, resultando num material anisotrópico e de durabilidade reduzida<sup>(127)</sup>. O fenômeno se encontra esquematicamente apresentado na Figura 4.9.

A ocorrência da laminação se deve, em parte, ao próprio jateamento do concreto sobre a superfície que acaba orientando o material em função das camadas que se depositam umas sobre as outras. Este fenômeno em particular pode ser verificado bem nitidamente quando da utilização de fibras no concreto projetado, as quais acabam por ter uma orientação

bidimensional preferencial, no sentido do plano perpendicular ao da projeção<sup>(128)</sup>. Outro fator que pode produzir este defeito é a projeção do concreto muito seco (isto explica o fato de sua ocorrência ser rara na via úmida<sup>(127)</sup>), o que dificulta a compactação do material e aumenta a reflexão. Assim, com esta maior tendência do material em apresentar variações de traço e compactação surgem as camadas heterogêneas. Segundo Ward e Hills<sup>(129)</sup>, o próprio processo de projeção via seca com máquina de rotor de câmaras pode produzir estas variações de traço através das variações de fluxo (por entupimento total ou parcial de algumas das câmaras) e de uma segregação do material no mangote, conduzindo assim à laminação.

A utilização de aditivos aceleradores à base de aluminato, por dificultarem a compactação do material, podem produzir uma certa laminação.

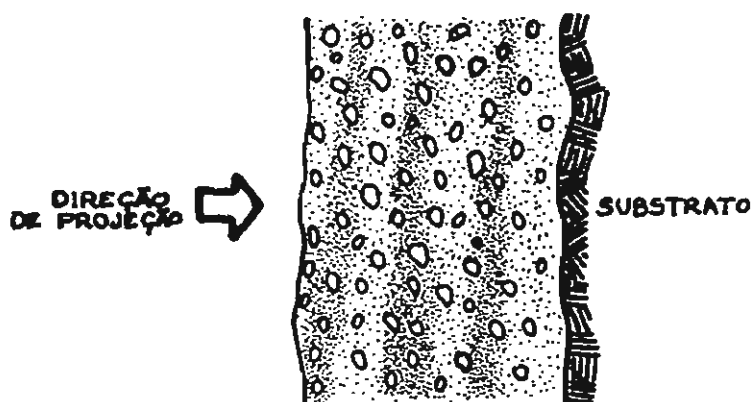


FIGURA 4.9: Esquema da laminação do concreto projetado.

Outro fator, apontado por Reading<sup>(130)</sup>, é a utilização de mão-de-obra pouco qualificada para a projeção ou mesmo uma supervisão inadequada. Além disso, a laminação também pode ser produzida pela mistura inadequada dos materiais secos, isto é, cimento e agregados, que, por não apresentarem as mesmas condições que o concreto convencional, podem exigir

mais tempo no equipamento de mistura para se obter uma boa homogeneidade. Neste caso específico, deve-se tomar cuidado com as misturas secas produzidas em usinas de concreto sem pré-misturador, onde o trabalho de homogeneização fica restrito ao caminhão betoneira. Em outro trabalho, Reading<sup>(131)</sup>, alertou para o fato de que a laminação, em conjunto com os bolsões de areia produzidos pela oclusão do material refletido, afetam negativamente a durabilidade do material.

#### 4.5.1.3. Imperfeições superficiais

As imperfeições superficiais do concreto projetado podem ocorrer por diversos fatores. Um deles é o uso excessivo ou inadequado de aditivos aceleradores de pega ou de outros produtos químicos que podem provocar grandes eflorescências<sup>(12)</sup>. O excesso de água pode produzir a "lavagem" dos finos quando ela escorre pela superfície do concreto, o que produz um aspecto muito rústico dado o afloramento dos agregados graúdos. A projeção inclinada do concreto pode produzir pequenas dunas na superfície. Além disso, o manejo inadequado do bico de projeção pode produzir variações na rugosidade e manchas<sup>(5)</sup>.

#### 4.5.2. Variação das propriedades

O que se entende aqui por variação das propriedades do concreto projetado não é a simples constatação de que ora ele apresenta um desempenho satisfatório ora não, como já foi comentado na introdução deste capítulo. Está se referindo aqui à produção de um material heterogêneo, o que se reflete numa variância elevada.

Mesmo sob este ponto de vista, o concreto projetado

apresenta, tradicionalmente, uma grande variabilidade. Uma prova disto é que o coeficiente de variação de 30 % especificado pelo Metrô<sup>(68)</sup> para a resistência à compressão do concreto projetado aos 28 dias de idade. Este valor foi definido "levando em consideração experiências anteriores com o material"<sup>(68)</sup>, sendo que, atualmente, com a injeção de água sob pressão, obtém-se valores abaixo dos 20 %.

Na construção da Ferrovia do Aço<sup>(5)</sup>, obteve-se os coeficientes de variação da resistência à compressão às 10 horas da ordem de 43,3%. Isto pode ser atribuído em parte pelas próprias dificuldades de controle das resistências às baixas idades. A comprovação deste fato de que o coeficiente de variação a 24 horas, 3 dias, 7 dias e 28 dias foram, respectivamente de até 26,8%, 20,1%, 15,8% e 21,7%.

Outra experiência importante foi aquela realizada por Simondi et alii<sup>(58)</sup> nos túneis da SABESP em São Paulo, onde também foi empregado o concreto projetado por via seca. Lá foram extraídos testemunhos da própria estrutura do túnel e o coeficiente de variação obtido, no caso do Túnel Ana Luísa, foi de até 22,35 e, no caso do Túnel Eliana, foi de até 22,7%.

#### **4.5.3. Controle da homogeneidade**

Os indicadores estatísticos, ao contrário da constatação dos defeitos, podem fornecer uma apreciação quantitativa da qualidade do material, o que facilita o seu controle. Cabe ressaltar, que estes indicadores não suprimem a necessidade do controle "qualitativo" da ocorrência de defeitos no material pois, dado o caráter pontual de alguns destes defeitos, se torna difícil a sua detecção por uma análise amostral.

Com isto em vista pode-se indicar três formas para o controle da uniformidade do material: o controle visual dos

defeitos pontuais e o controle da pega e endurecimento, os quais serão discutidos a seguir.

#### 4.5.3.1. Controle visual

O controle visual é essencial no concreto projetado por vários motivos. Primeiro pela grande possibilidade de se produzir defeitos pontuais. Outro motivo reside no fato de que a própria resistência à compressão é, normalmente, determinada através de corpos-de-prova preparados a partir de testemunhos extraídos de placas e não da estrutura. Assim, o controle visual também é importante para garantir que a placa seja moldada nas mesmas condições da estrutura para que seja representativa. Outro ponto importante reside no fato da projeção do concreto ser um fenômeno extremamente dinâmico, tornando possível cobrir certas falhas com outra camada de concreto projetado de maneira muito rápida. A correta supervisão do trabalho do mangoteiro é essencial para que se garanta a qualidade final do material.

O fato do controle visual do concreto projetado ser uma forma já tradicional de controle acaba sendo uma vantagem para o mesmo. No entanto, não se deve restringir o seu controle à inspeção visual, como ocorreu no início da década de 80, quando foi apontada como "a única forma encontrada para se avaliar a uniformidade do concreto projetado"<sup>(58)</sup>. Na época, esta inspeção possibilitou as seguintes verificações<sup>(58)</sup>:

- a. Detectar zonas onde ocorriam vazios, seja por desprendimento do material, seja por deficiências durante a projeção.
- b. Avaliar se as quantidades de água haviam ultrapassado as máximas recomendadas.
- c. Estimar, visualmente, o índice de reflexão e efetuar



correções na dosagem, se necessário.

Em outras palavras, todo controle de produção do material consistia na inspeção visual do concreto "imediatamente após a projeção".

#### 4.5.3.2. Controle da pega e endurecimento<sup>(74)</sup>

O controle da pega e endurecimento no concreto projetado é de particular importância quando da utilização de aditivos aceleradores. Pode ser também definido como controle da resistência a baixa idade, isto é, inferiores a 8 MPa, sendo empregados dois tipos de aparelho para o seu controle, quais sejam o Penetrômetro de Meynadier (PEM) e o Penetrômetro de Energia Constante (PEC).

O PEM é empregado para resistências inferiores a 1 MPa e o PEC é destinado a cobrir a faixa que vai de 1 MPa a 10 MPa. Ambos têm como princípio básico de funcionamento a correlação entre a penetração de uma agulha no concreto e sua resistência à compressão. O PEM é um equipamento operado manualmente, que fornece um índice para a penetração de 15 mm de uma agulha padronizada no concreto (Figura 4.10.). O PEC (Figura 4.11.) utiliza o disparo de uma mola para penetrar no concreto um pino padrão. O que é fixo aqui não é a profundidade de penetração mas a energia imposta para tal. Assim, neste caso a resistência do concreto projetado é obtida através de uma correlação com a profundidade de penetração. Em ambos os casos, os resultados da análise de seu emprego foram muito satisfatórios, mostrando a capacidade que os mesmos têm para substituir com vantagens a outros métodos como o *Pullout*<sup>(74)</sup>.

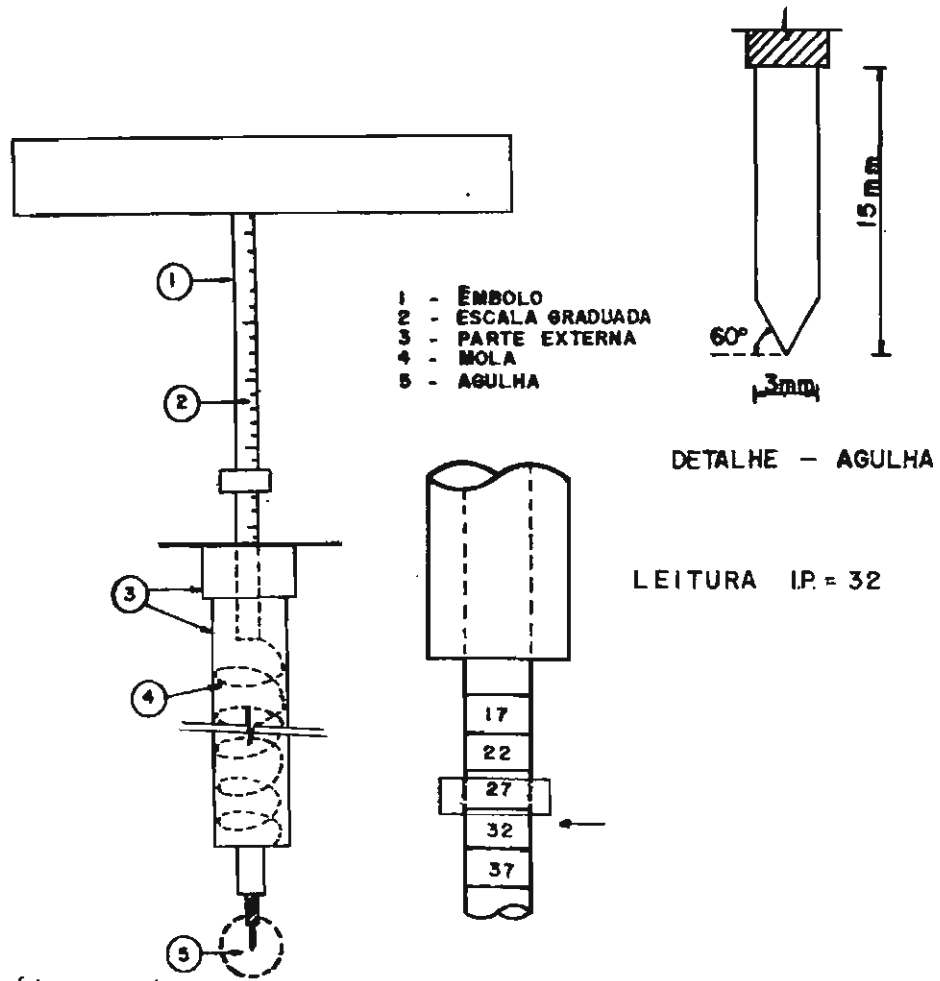


FIGURA 4.10: Penetrômetro de Meynadier<sup>(74)</sup>.

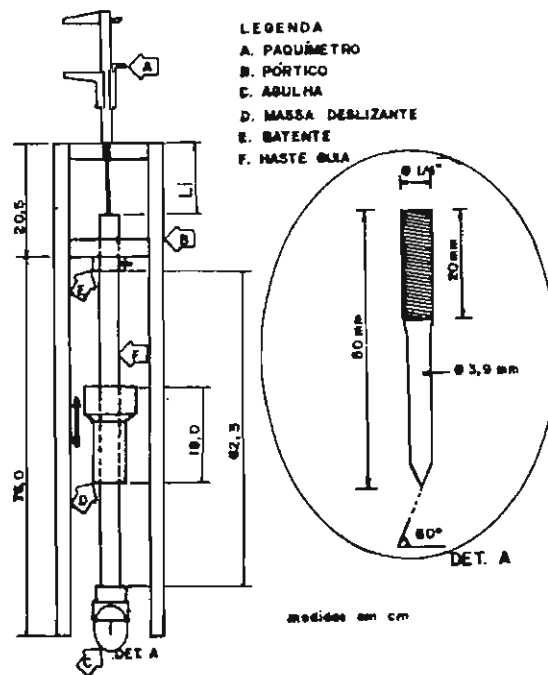


FIGURA 4.11: Penetrômetro de Energia Constante<sup>(74)</sup>.

Estes equipamentos podem ser utilizados também para a avaliação da uniformidade do material, uma vez que para a obtenção da resistência à compressão do material é feita uma série de penetrações, a qual pode ser analisada quanto à dispersão dos resultados. Dada a facilidade de manuseio, o Penetrômetro de Meynadier pode fornecer resultados sobre a uniformidade do material imediatamente após a projeção do concreto, o que poderia agilizar a avaliação da qualidade da homogeneização dos aditivos aceleradores de pega e endurecimento, por exemplo.

#### 4.5.3.3. Controle da resistência à compressão

O controle da resistência do concreto projetado para idades maiores que 24 horas é, normalmente, realizado através de corpos-de-prova preparados a partir de testemunhos cilíndricos extraídos (NBR 7680 da ABNT). Também já foram especificados corpos-de-prova cúbicos<sup>(5)</sup>, obtidos de testemunhos serrados em placas de concreto e, pelo fato de apresentarem grandes dificuldades de extração direta da estrutura, têm seu uso muito restrito atualmente.

A extração de testemunhos cilíndricos permite a avaliação da uniformidade do material não só pela análise da variação dos valores obtidos para a resistência, como também pela verificação da ocorrência de defeitos como a laminação ou lentes de areia ou ainda a ocorrência do efeito sombra, quando da extração de testemunho contendo uma barra da armadura.

#### **4.6. ADERÊNCIA**

A aderência é uma propriedade fundamental para o concreto projetado pois não é possível se executar nenhuma camada estrutural com o material se ele não permanecer aderido à superfície que é alvo da projeção. Assim, a falta de aderência é um problema sério, não só a nível de segurança estrutural, como a nível de custos e segurança operacional, pelo fato de produzir deslocamentos.

No caso de túneis, exige-se que o concreto projetado se mantenha aderido à superfície do maciço, de maneira a "preservar sua resistência natural e mantê-lo sem alterações o quanto for possível"<sup>(91)</sup>. Assim percebe-se que seu desempenho como material estrutural está fortemente ligado à aderência que o material tem com o substrato.

##### **4.6.1. Causas da falta de aderência**

A obtenção da aderência seria facilitada pelo próprio processo, uma vez que, com o jateamento do concreto contra a superfície, procede-se ao tamponamento dos poros e fissuras do mesmo com a pasta formada durante a chamada primeira fase da reflexão (item 4.2.2.). Esta camada de pasta de cimento atua, após o seu endurecimento, como uma ponte de aderência entre o substrato e a camada de concreto projetado. Com isto se entende melhor o porque de seu melhor desempenho quando jateado sobre suportes rugosos e resistentes como o próprio concreto quando rugoso e rochas<sup>(12)</sup>. Da mesma forma, se entende que a falta de aderência está associada a substratos fracos, ou muito lisos, ou contaminados com material solto ou parcialmente endurecido como o oriundo da reflexão, material pulverulento, graxas, tintas, desmoldantes ou umidade excessiva<sup>(12)(23)(114)</sup>.

Outra causa importante para a ocorrência de baixas resistências de aderência é a pequena resistência do material nas primeiras horas após a projeção. Nesta situação, o material pode apresentar fissuramento junto ao substrato devido ao próprio peso da camada e à sua grande deformabilidade, o que tornaria a aderência nula. Para contornar este problema, a solução normalmente empregada é a utilização de uma maior quantidade de aditivos aceleradores de pega. Algumas das alternativas para se melhorar a aderência do concreto projetado com o substrato seria, em primeiro lugar, a utilização de microssílica<sup>(23)</sup>, particularmente em áreas úmidas, e, em segundo lugar, a utilização de fibras que, diminuindo a fissuração por retração, aumentam a capacidade de aderência do material<sup>(91)</sup>.

#### 4.6.2. Controle da aderência

Uma das primeiras formas de controle, e também a mais efetiva, é o controle preventivo que consiste no preparo da superfície em que será aplicado o material<sup>(9)(12)(14)(114)</sup> (item 6.2.5.).

Apesar de o ACI<sup>(9)</sup> indicar que o concreto projetado apresenta boas características de aderência com concreto, alvenaria, rocha, aço e muitos outros materiais (chegando até a indicar valores para resistências quanto ao cisalhamento com o próprio concreto projetado medida pelo ensaio de "guilhotina" com a tensão aplicada na superfície de contato) é praticamente impossível medi-la quando se tem como substrato um solo friável, mole e úmido pois, neste caso, ela é sabidamente pobre<sup>(91)</sup>. Nestes casos, o critério de avaliação deste desempenho que se dispõe atualmente é o próprio sistema de execução do revestimento: se não houver deslocamento está aprovado.

Uma outra forma de se avaliar a aderência do concreto

projetado com um substrato de concreto mais antigo, é a extração testemunhos cilíndrico, de maneira que a superfície de aderência contenha o seu eixo, e posterior ruptura da mesma por compressão diametral. Este procedimento, utilizado por Palermo e Marques<sup>(80)</sup> em seu estudo, apresenta como grande desvantagem a restrição do seu uso a concretos projetados em placas.

#### **4.7. DURABILIDADE E PERMEABILIDADE**

##### **4.7.1. Concreto projetado como material estrutural durável**

Shideler e Litvin<sup>(30)</sup>, em 1964, discutindo o emprego do concreto projetado como material estrutural, afirmaram que as falhas ou a baixa durabilidade poderiam advir por três tipos de deficiências: limpeza inadequada do substrato; espessura insuficiente, particularmente cobrimento de armadura inadequado, e mistura e/ou aplicação inapropriada.

Constatações desses fatos foram apontados por Reading<sup>(130)</sup> em 1965, que relatou as boas condições de serviço em que permaneciam alguns desembarcadores construídos em concreto projetado em 1919, mesmo estando em contato com a água do mar. Cita também a execução de reparos em larga escala no estado de Michigan no final dos anos 30 que permaneciam em "excelentes condições mesmo em clima frio"<sup>(130)</sup>. Por outro lado, é realçado pelo autor que em outros casos o resultado foi inverso, pois o concreto projetado foi submetido a condições severas e não recebeu os cuidados necessários na mistura e aplicação.

A preocupação com a durabilidade do concreto projetado aplicado como material estrutural é particularmente interessante quando se cogita de sua utilização como revestimento definitivo de túneis. Ou seja, na substituição

do concreto convencional na execução do revestimento secundário. No trabalho de Simondi, Negro e Kuperman<sup>(58)</sup> relatou-se a execução de dois túneis da SABESP em solo e sua inspeção após quarenta meses, onde se constatou que "o concreto projetado, utilizado como revestimento definitivo, encontrava-se em bom estado de conservação, atendendo os requisitos de projeto".

#### **4.7.2. Características que interferem na durabilidade**

##### **4.7.2.1. Consumo de cimento**

"Um concreto compacto com um alto consumo de cimento é altamente resistente aos ataques químicos e físicos"<sup>(132)</sup>. Assim sendo, a primeira pergunta que se deve fazer na pré-avaliação da durabilidade do concreto projetado é se ele possui alto consumo de cimento. Isto ocorre realmente e em alguns casos de obras de túneis se utilizou o consumo de 500 kg de cimento por metro cúbico de concreto<sup>(5)</sup>. Na verdade, deve-se saber qual é o consumo real após a aplicação, uma vez que a reflexão, mais rica em agregados, altera o proporcionamento original dos materiais tornando o traço do concreto ainda mais rico.

A outra questão consiste em saber se é um material compacto ou não, cuja resposta envolve uma série de fatores.

##### **4.7.2.2. Porosidade e permeabilidade**

"A permeabilidade e a durabilidade do concreto projetado são tópicos que o engenheiro projetista, o executor e o proprietário devem estar igualmente preocupados"<sup>(133)</sup>.

Pelo fato do concreto projetado ser compactado durante a projeção, acaba apresentando valores de porosidade maiores que os do concreto convencional, o que faz com que os projetistas procurem limitar estes valores. No entanto, alguns autores já afirmaram que a durabilidade do concreto projetado está correlacionada diretamente com a sua permeabilidade<sup>(133)</sup>. Assim, deve-se questionar se a elevada porosidade do concreto projetado conduz a uma elevada permeabilidade.

Silva e Dantas<sup>(135)</sup> fizeram determinações do coeficiente de permeabilidade do concreto projetado a partir de testemunhos extraídos de placas, procurando avaliar a interferência das adições e o sentido de penetração da água em função da direção das camadas projetadas. Submeteram-se 12 corpos de diâmetro e altura de 100 mm, à passagem de água sob uma pressão de 21,0 MPa (obtida através da utilização de ar comprimido), durante 42 dias de modo a se obter o coeficiente de permeabilidade do material para a passagem de água em regime constante. O ensaio foi iniciado com o concreto apresentando 60 dias de idade. Comparando uma amostra referência (sem adições) e outras com inclusão de 4,0% e 8,0% de microssílica em massa substituindo parte do cimento. Seis corpos de prova, foram extraídos no sentido da projeção e a outra metade no sentido perpendicular, procurando colocar em evidência o efeito da laminação das camadas de projeção. Os resultados foram muito positivos: apenas três corpos de prova, correspondentes aos extraídos na direção perpendicular à projeção, apresentaram defeitos com caminho preferencial de penetração de água, mesmo à pressão atmosférica; os demais apresentaram valores de índice de permeabilidade, inferiores à  $10^{-11}$  cm/s.

Valores semelhantes foram obtidos por Dantas e Tango<sup>(26)</sup>, utilizando a mesma metodologia para análise de concreto projetado em diversos ângulos.

Nestes estudos não foi possível constatar correlação alguma entre o volume de vazios permeáveis e a permeabilidade do material<sup>(26) (135) (136)</sup>.



Em todas as pesquisas relatadas, os valores obtidos para a permeabilidade são muito baixos ( $3 \times 10^{-8}$  a  $3 \times 10^{-12}$  cm/s). Alguns autores afirmam que é menor que a permeabilidade do concreto projetado é menor que a permeabilidade do concreto convencional, apesar da maior porosidade, apontando como razões para tal o elevado consumo de cimento e a baixa relação a/c<sup>(138)</sup>. Em contra partida, estes valores podem ser ampliados drasticamente devido às fissuras oriundas da retração por secagem (onde os coeficientes de permeabilidade são da ordem de  $3 \times 10^{-1}$  a  $3 \times 10^{-4}$  cm/s) ou falhas construtivas<sup>(133)</sup>

De qualquer forma, é de grande importância para a durabilidade do concreto projetado que se obtenha o menor volume de vazios possível. Isto depende, em grande parte da correta umidificação do material, conforme está descrito no item 5.2.2.2., da utilização correta das técnicas de projeção<sup>(133)</sup><sup>(137)</sup>.

#### 4.7.2.3. Possíveis efeitos do aditivo acelerador de pega

Com a implementação do emprego da via úmida numa escala cada vez maior no Brasil<sup>(66)</sup>, surge uma preocupação a mais para o meio técnico. Sabe-se que os cimentos recomendados para a execução de túneis urbanos são aqueles resistentes aos sulfatos com limitações rigorosas quanto ao seu teor de  $C_3A$ <sup>(138)</sup>, devido à agressividade do solo. Por outro lado, emprega-se normalmente aditivos líquidos à base de aluminatos gerando uma certa preocupação quanto ao surgimento de compostos expansivos. Uma prova de que este risco é bem concreto é a existência de recomendações de fabricantes estrangeiros de emprego de aditivos especiais ditos resistentes aos sulfatos, o que é um sinal que os comuns não o são<sup>(139)</sup>. Outra prova seria o fato de alguns pesquisadores<sup>(140)</sup> terem indicado o estudo da resistência aos sulfatos em concretos projetados com aditivos

aceleradores como um importante aspecto a ser estudado.

Além de tudo isso, estes aditivos, bem como os à base de silicatos ou mesmo carbonatos (aditivos em pó) são fortemente alcalinos (compostos de sódio e potássio), o que gera um risco de ocorrência de reações álcali-agregado, cujos teores nos cimentos são também fortemente regulados. Apesar de tais suspeitas não se estudou adequadamente o assunto e mesmo os ensaios empregados na previsão de desempenho são muitas vezes criticados por serem de difícil correlação com a prática. Um exemplo disto é o ensaio de Koch e Steinegger<sup>(141)</sup> (avaliação da perda de resistência ao impacto ou à tração de corpos de prova submetidos ao ataque de soluções com altos teores de sulfatos), que utiliza corpos de prova demasiadamente pequenos, além de apresentarem dificuldades quanto à repetibilidade. Deve-se assim procurar desenvolver novos ensaios, ou mesmo adaptar os existentes, de modo a atender a esta lacuna.

#### **4.7.3. Alternativas para aumentar a durabilidade**

Soluções alternativas poderiam ser tomadas para se evitar problemas de durabilidade com o concreto projetado em que se utiliza aditivos aceleradores. Uma delas seria a utilização de microssílica (item 2.5.2.), outros tipos de materiais pozzolânicos, como as cinzas volantes, contanto que tenham elevada finura (acima de  $20.000 \text{ cm}^2/\text{g}$  - blaine), baixo teor de alumina ativa e alto teor de sílica ativa como a microssílica<sup>(142)</sup>.

Gebler<sup>(143)</sup> comprovou em seu estudo o melhor desempenho do concreto projetado contendo cimentos de pega regulada quanto à durabilidade. Esse cimento consistia num "cimento Portland modificado contendo principalmente alita e um flúor-aluminato de cálcio com um retardador apropriado", e seu uso possibilitou a obtenção de elevada resistência inicial sem redução significativa da resistência final.

Outra solução seria a limitação do teor total de  $Al_2O_3$  (proveniente tanto do  $C_3A$  do cimento como do aluminato de sódio ou potássio do aditivo) a valores inferiores aos exigidos pelas normas de cimento. Como estes valores são muito baixos (6,0 %<sup>(138)</sup>) a possibilidade de se ter problemas operacionais por velocidade de pega e endurecimento inadequada é grande.

Em meios muito agressivos deve-se cogitar a possibilidade de utilização de uma camada de sacrifício, de modo a minorar o ataque à camada estrutural e, conseqüentemente, aumentar a sua durabilidade<sup>(140)</sup>.

#### 4.7.4. A qualidade do produto<sup>(133)</sup>

Após se examinar vários aspectos da durabilidade do concreto projetado, pode-se afirmar que um produto de qualidade pode ser obtido a partir de materiais convencionais e uma equipe habilitada. O ponto crítico em todo o processo de projeção do concreto tem sido a mão-de-obra, que pode tornar este material de qualidade em potencial num outro cheio de falhas executivas. Como isso dá um caráter artesanal ao concreto projetado, o controle da qualidade associado ao processo de projeção, tornam-se um fator dos mais importantes para a obtenção do concreto projetado de qualidade. Para que estes aspectos se tornem realidade são imprescindíveis o conhecimento, a habilidade e a experiência.

Desta forma, no próximo capítulo, serão analisados alguns aspectos do processo de projeção que caracterizam o comportamento do concreto projetado.

**CAPÍTULO V: ASPECTOS DA INFLUÊNCIA DO PROCESSO DE  
PROJEÇÃO NAS PROPRIEDADES DO CONCRETO  
PROJETADO**

**5.1. METODOLOGIA UTILIZADA**

Este Capítulo constitui a parte experimental do trabalho da pesquisa. Sua execução foi possível graças ao projeto de pesquisa EPUSP/CBPO/IPT-01 "Concreto projetado para túneis" executado numa cooperação que envolveu a Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP), a Companhia Brasileira de Projetos e Obras (CBPO) e o Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT).

Os ensaios de avaliação das propriedades do concreto projetado foram realizados em três situações, basicamente. A primeira foi em laboratório convencional, isto é, utilizando-se dos recursos laboratoriais do IPT e da EPUSP, onde se poderia dispor de condições ambientais uniformes. A segunda seria aquilo que foi definido como laboratório de campo e a terceira na própria obra de túneis.

No laboratório de campo foram utilizados os recursos empregados na execução de obras de túneis, em locais reservados à realização de ensaios dentro do próprio canteiro de obras. A causa primária para a adoção desta situação reside no fato de que, para que seja possível estudar as propriedades do concreto projetado, é necessária a moldagem de placas. Isto implica que se disponha do equipamento e equipe de projeção completos, o que, para a via seca, corresponde a dizer uma máquina de projeção, um compressor com capacidade de projeção da ordem de 20 metros cúbicos por minuto, bomba de água, mangotes, mangueiras e uma betoneira<sup>(12)(14)</sup>.

Com a disponibilidade do laboratório de campo foi possível uma certa reprodução das condições de aplicação a que o material estaria sujeito nas obras com possibilidade de caracterizar e fixar as variáveis em jogo. Isto, como aponta Glassgold<sup>(117)</sup> é fundamental, pois, para que seja possível a comparação dos resultados, devem ser definidas as condições em que os mesmos foram executados (materiais, equipamentos e mão-de-obra). Isto se deve ao fato de, ao contrário do concreto moldado convencionalmente, o projetado tem suas propriedades definidas por essas condições. Assim, optou-se por realizar o estudo através da comparação de desempenho entre as placas moldadas, curadas e ensaiadas sob as mesmas condições, variando-se apenas um aspecto do processo (alvo da análise). Portanto, nos estudos aqui apresentados, apenas se faz comparação entre o concreto projetado das placas executadas para aquele determinado estudo. A importância deste critério torna-se mais evidente pelo fato do laboratório de campo ter sido montado ao ar livre, o que fez com que as condições de ensaio ficassem sujeitas às variações do clima.

No sentido de se complementar estes resultados realizou-se um acompanhamento de obras, isto é, foram realizados ensaios no concreto projetado aplicado na execução de túneis da Extensão Norte da Linha Norte-Sul do Metrô de São Paulo. Isto possibilitou uma análise comparativa entre o processo de projeção tradicional e uma série de inovações implantadas nesta obra em especial.

O equipamento utilizado em todos os experimentos e na execução do túnel foi do tipo via seca com rotor de câmaras, fabricado pela Este Industrial e Comercial Ltda.

A definição das condições de contorno, bem como da metodologia dos ensaios se encontra descrita ao longo dos itens deste capítulo que se seguem. A caracterização dos materiais empregados se encontra no Anexo 1.

## 5.2. A UMIDIFICAÇÃO DO CONCRETO PROJETADO

### 5.2.1. Erros do enfoque tradicional

A umidificação da mistura seca é tradicionalmente comandada pelo mangoteiro através de um registro posicionado junto ao bico de projeção (Figura 3.12.). Isto tem sido apontado como um grande ponto negativo do processo de projeção via seca em relação à via úmida e, em grande parte, causador da sua grande variabilidade<sup>(59)(66)(91)</sup>. Por outro lado, já se comprovou que a relação água/cimento do concreto projetado é limitado pelo próprio processo de projeção a valores entre 0,40 e 0,55<sup>(12)(91)</sup>. Abaixo destes valores aumenta intensamente a liberação de poeira e reflexão e, quando são superados, o concreto projetado tende a deslocar ou até a escorrer por falta de coesão.

Apesar disso, há uma tendência, que se observa em certas especificações para o concreto projetado<sup>(75)(77)</sup>, em se limitar o relação água/cimento. Além disso, como apontou Schutz<sup>(120)</sup> e Prudêncio<sup>(6)</sup>, o próprio mangoteiro apresenta uma tendência a utilizar muito pouca água no concreto projetado via seca. Essa preocupação tem origem em dois pontos principais. Primeiro nas informações antigas, como a apresentada por Stewart<sup>(144)</sup>, que fez seus estudo em argamassa projetada, onde a resistência à compressão era inversamente proporcional à quantidade de água da mistura. Depois, no conhecimento que o meio técnico possui do concreto convencional, onde a sua compactação, em princípio, é tão maior quanto menor for a relação água/cimento. No concreto projetado, entretanto, não se pode tomar isto como regra geral.

Como apontou Prudêncio<sup>(6)</sup>, a curva que relaciona a resistência à compressão do concreto projetado via seca com a relação água/cimento obedece o padrão dos concretos secos, onde se tem uma umidade ótima para a obtenção da maior

resistência à compressão (Figura 5.1.). Já o concreto projetado por via úmida pode ser classificado como um concreto plástico<sup>(6)</sup>.

Mesmo a determinação da relação água/cimento não era feita de maneira precisa até pouco tempo atrás, pois durante a sua determinação ignorava-se o fato da reflexão ter o efeito de alterar o traço do concreto que ficou incorporado na estrutura, o que acabava provocando uma superestimação de  $a/c$ <sup>(53)</sup>.

No concreto convencional, a relação água/cimento, pelas suas facilidades de manutenção acaba conduzindo as características de manuseio do concreto fresco, refletindo nas suas propriedades quando endurecido. No caso do concreto projetado via seca, a fixação e a obtenção deste índice é difícil. Assim sendo optou-se por trabalhar com o teor de umidade total do material que fica aderido à superfície de projeção (H). A determinação deste valor é feita por meio de coleta de amostra de concreto imediatamente após a projeção, a qual é seca e, por diferença de massas (úmida e seca), obtém-se o valor dado em porcentagem.

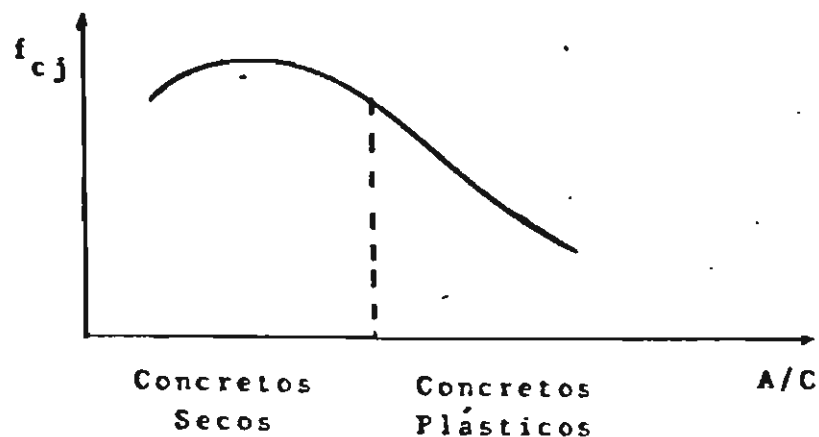


FIGURA 5.1: Resistência do concreto em função da relação água/cimento<sup>(6)</sup>.

## 5.2.2. Propriedades afetadas pelo teor de umidade

### 5.2.2.1. Resistência à compressão

Inicialmente, no estudo da influência do teor de umidade nas propriedades do concreto projetado via seca, foi utilizado um equipamento convencional do tipo CP-6 de rotor de câmaras com umidificação junto ao bico de projeção. Foram moldadas três placas, cuja caracterização se encontra no Anexo 2, variando-se o teor de umidade de 7,2% a 9,8%. Os resultados obtidos se encontram apresentados na Tabela 5.1. e lá se pode observar que as maiores resistências (medidas a 14 dias de idade em corpos de prova preparados a partir de testemunhos extraídos das placas) foram obtidas para um teor de umidade de 8,4%. Para valores abaixo e acima de 8,4%, notou-se uma sensível redução da resistência.

Pelo teste estatístico de hipótese A do Anexo 2, denota-se que há diferença significativa entre as amostras ao nível de 1 % de significância<sup>(145)</sup>.

Posteriormente, foram realizados estudos semelhantes com um equipamento dotado de pré-umidificação a 5 metros do bico de projeção, com entrada de água a alta pressão (em torno de 2 MPa) através de um bico pulverizador. A máquina de projeção era, também neste caso, uma CP-6. Foram moldadas, numa primeira etapa, três placas cuja caracterização se encontra no Anexo 3, e os resultados quanto à resistência à compressão se encontram apresentados na Tabela 5.2. Observa-se, neste caso, que a resistência à compressão foi tanto maior quanto mais umidificada estava a mistura, sendo que o teor de umidade ótimo obtido ficou em torno dos 9,5%. Isto ocorreu tanto para os valores de resistência à compressão aos 9 dias como aos 28 dias.



Pelos testes estatísticos de hipótese A e B do Anexo 3 denota-se que há diferença significativa entre as amostras a nível de 1 % de significância, tanto para as resistências a 9 dias como a 28 dias<sup>(145)</sup>.

TABELA 5.1: Influência do umidade na resistência à compressão axial do concreto projetado com umidificação convencional.

UMIDADE DO CONCRETO (H) (%)	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL MÉDIA AOS 14 DIAS (MPa) (NBR 5739 DA ABNT)	COEFICIENTE DE VARIAÇÃO (%)
7,2	16,9	10,4
8,4	23,9	2,4
9,8	12,4	16,1

TABELA 5.2: Influência do teor de umidade na resistência à compressão axial do concreto projetado com pré-umidificação a alta pressão.

UMIDADE DO CONCRETO - H (%)	RESISTÊNCIA MÉDIA À COMPRESSÃO AXIAL (MPa) (NBR 5739 DA ABNT)			
	9 DIAS	C. V.*	28 DIAS	C. V.*
8,0	16,1	5,2%	20,2	15,2%
8,5	26,0	14,0%	29,4	11,4%
9,5	34,7	4,2%	37,9	2,5%
9,6	31,2	2,0%	36,5	2,9%

\* Coeficiente de variação

Os valores obtidos vêm a confirmar o fato do concreto projetado por via seca ter um comportamento típico dos concretos secos e não dos concretos plásticos, como é o caso do concreto convencional. Além disso, a determinação do teor de umidade ótimo depende do equipamento e dos materiais utilizados, não sendo possível utilizar estes valores indiscriminadamente.

A explicação para este comportamento reside no fato de se ter uma maior compactação do material para a umidade ótima, como se encontra apresentado no próximo item.

#### 5.2.2.2. Compactação

Nos mesmos experimentos utilizando equipamento com umidificação convencional e pré-umidificação com injeção de água a alta pressão do item anterior, foram determinados os valores do volume de vazios permeáveis através do ensaio padronizado pela ASTM<sup>(79)</sup>. Os resultados, apresentados nas Tabelas 5.3. e 5.4., comprovam o fato de que se obtém uma maior compactação do material para os valores próximos da umidade ótima, justificando o comportamento apresentado no item anterior.

TABELA 5.3: Influência do teor de umidade (H) na compactação do concreto projetado com umidificação convencional.

H (%)	VOLUME DE VAZIOS PERMEÁVEIS (%)	COEFICIENTE DE VARIAÇÃO (%)
7,2	17,6	2,90
8,4	15,3	1,52
9,8	18,9	4,06

TABELA 5.4: Influência do teor de umidade (H) na compactação do concreto projetado com pré-umidificação a alta pressão.

H (%)	VOLUME DE VAZIOS PERMEÁVEIS (%)	COEFICIENTE DE VARIAÇÃO (%)
8,0	19,8	5,8
8,5	16,8	6,9
9,5	12,0	1,3
9,6	12,8	1,6

Pelos testes estatísticos de hipótese B do Anexo 2 e C do Anexo 3, denota-se que há diferença significativa entre as amostras a nível de 1 % de significância, tanto para o equipamento convencional como para o dotado de injeção de água a alta pressão<sup>(145)</sup>.

#### 5.2.2.3. Consistência

Uma das propriedades do concreto projetado mais afetadas pela intensidade de umidificação é a consistência do material. Pode-se observar pelo gráfico apresentado na Figura 5.2. que a consistência do concreto, medida pelo ensaio da agulha de Proctor<sup>(125)</sup>, é tanto maior quanto mais seco estiver o material, o que implica numa maior coesão do mesmo. Estes resultados foram obtidos através das placas caracterizadas no Anexo 3.

Essa relação justifica o motivo pelo qual o mangoteiro tende a reduzir a quantidade de água no momento da projeção no teto, o que se encontra melhor comentado no item 5.5.

Pela análise por regressão linear obteve-se a seguinte correlação entre a consistência e a umidade:

$$C = 477,10 - 45,74 * H$$

onde:

C = consistência em mm

H = fator água/materiais secos em porcentagem

O coeficiente de determinação obtido para esta correlação foi  $r^2 = 0,996$  denotando que a reta explica bem o fenômeno<sup>(145)</sup>.

### 5.2.3. O controle da umidificação

Fica claro, a partir dos resultados obtidos, que não se deve controlar a umidificação do concreto projetado via seca no sentido de se minimizar a relação água/cimento. Na verdade, deve-se procurar o teor ótimo de umidade, de modo a maximizar a compactação e, conseqüentemente, a resistência do material. A importância deste aspecto é ampliada pelo fato de se obter maiores facilidades de aplicação para maiores teores de umidade, pois se reduz a reflexão e a poeira. Por outro lado, devem ser tomados os devidos cuidados para se evitar o excesso de água que conduz ao deslocamento.

Outro importante cuidado a ser tomado é o correlacionado com a manutenção do equipamento de projeção, que deve estar sempre em condições de evitar grandes variações de fluxo de mistura seca, o que produziria um material heterogêneo.

O controle da umidificação do material pode ser feito de maneira eficaz através do controle da consistência do material pela agulha de Proctor<sup>(125)</sup>. Isto porque, a determinação da consistência através da penetração da agulha

de proctor, se dá de maneira mais rápida que a própria determinação de H.

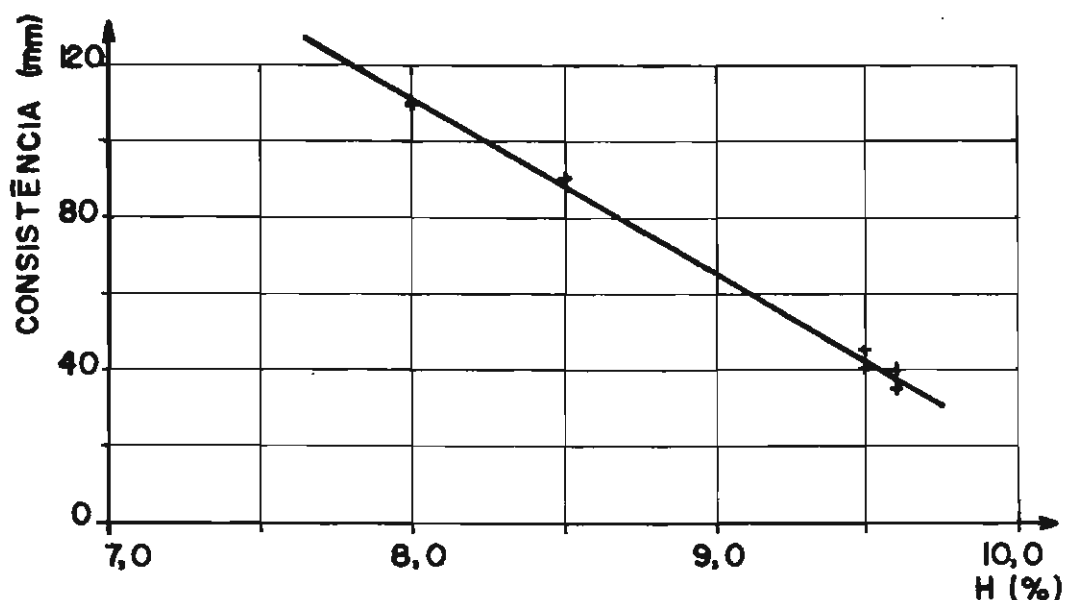


FIGURA 5.2: Relação entre a umidade e a consistência do concreto projetado.

### 5.3. ADITIVOS ACELERADORES DE PEGA E ENDURECIMENTO

#### 5.3.1. Tipos e forma de atuação

Os aditivos aceleradores de pega e endurecimento são normalmente utilizados no concreto projetado para atender a duas finalidades básicas. A primeira é proporcionar um rápido endurecimento, adequado às exigências do NATM (item 2.4.2.1.), e a segunda é garantir a execução de camadas espessas numa só passada (item 4.3.) (42) (146).

Os aditivos normalmente utilizados são compostos inorgânicos de silicatos, aluminatos e carbonatos de sódio ou potássio, podendo ser empregados de maneira isolada ou em

conjunto<sup>(42)</sup> (120) (146).

No Brasil é muito comum o emprego dos aditivos à base de carbonato de sódio fornecido em pó, o que implica na restrição do seu uso apenas ao concreto projetado via seca. Ele age, basicamente, em conjunto com o silicato tricálcico do cimento ( $C_3S$ ), acelerando o processo de precipitação de seus compostos hidratados e do hidróxido de cálcio. Desta forma, ele atua como um acelerador de endurecimento<sup>(42)</sup>.

Os aditivos líquidos encontrados no Brasil são compostos pelos silicatos de sódio e aluminatos de potássio. Este último tem como característica de ação, quando solubilizado, o fato de se combinar com o gesso presente no cimento, evitando a formação da etringita que iria inibir a hidratação do aluminato tricálcico ( $C_3A$ ). Isto permitirá ao  $C_3A$  ter pega instantânea, proporcionando o endurecimento rápido necessário a certas aplicações do concreto projetado<sup>(42)</sup>. Desta forma, pode-se definir o aluminato como um acelerador de pega propriamente dito.

Os aditivos à base de silicatos induzem o cimento a uma pega rápida por estimularem a precipitação dos silicatos de cálcio. Apesar de induzir a uma pega rápida, os silicatos terão um efeito extremamente nocivo a resistência final do concreto projetado, reduzindo-a intensamente, devido à sua interferência nas reações de hidratação não permitindo uma boa cristalização do material<sup>(42)</sup>.

Quanto aos aditivos aceleradores de pega de base orgânica, no Brasil, só se dispõe de notícias<sup>(23)</sup> (42). Eles teriam como grande vantagem o fato de não reduzirem a resistência final do concreto, como ocorre com os citados aditivos inorgânicos. Isto se deveria ao fato deles atuarem como solventes do hidróxido de cálcio e da etringita que normalmente se precipitam sobre os compostos do cimento o que lhes permitiria hidratar sem efeitos de retardo<sup>(42)</sup>.

### 5.3.2. Propriedades afetadas pelo teor de aditivo

#### 5.3.2.1. Pega e resistências iniciais

Para se avaliar a influência do teor de aditivo na pega e o endurecimento nas primeiras horas do concreto projetado foram moldadas uma série de placas que se encontram caracterizadas no Anexo 4. Para tal foi utilizado o equipamento de projeção via seca com pré-umidificação a alta pressão.

O aditivo acelerador em pó (a base de carbonato) era misturado na betoneira, juntamente com o restante dos materiais secos (cimento e agregados), e projetado imediatamente após a mistura. Os aditivos líquidos (a base de aluminatos e silicatos) eram diluídos na água a ser bombeada para a pré-umidificação. Os teores aqui fornecidos correspondem à proporção em massa em relação à quantidade de cimento. O aditivo acelerador em pó foi dosado em massa de acordo com o consumo de cimento de cada operação de mistura ("betonada") o que correspondia a um saco de cimento. O aditivo acelerador líquido foi dosado em massa em relação à água necessária para a umidificação do volume de concreto utilizado para a moldagem de cada placa (equivalente a um saco de cimento).

A avaliação da pega e das resistências iniciais foi feita através do Penetrômetro de Meynadier (PEM) e, posteriormente, pelo Penetrômetro de Energia Constante (PEC). O valor da resistência á compressão, em MPa, foi obtido, para o PEM, através da seguinte equação<sup>(74)</sup>:

$$P = 6,424 + 60,73 * R \quad (1)$$

Onde:

R = Resistência à compressão (MPa)

P = índice médio de penetração (escala do equipamento)

O uso do PEM foi restrito aos valores inferiores a 1 MPa. Para valores de resistência maiores que este e inferiores a 8 MPa, foi utilizado o PEC, cujos valores foram obtidos através da seguinte equação<sup>(74)</sup>:

$$P = 13,503 / R^{*0,39624} \quad (2)$$

Onde:

R = Resistência à compressão (MPa)

P = Profundidade de penetração (mm)

Os resultados relativos ao aditivo à base de silicato, carbonato e aluminato se encontra apresentado nos gráficos das Figuras 5.3., 5.4. e 5.5., respectivamente.

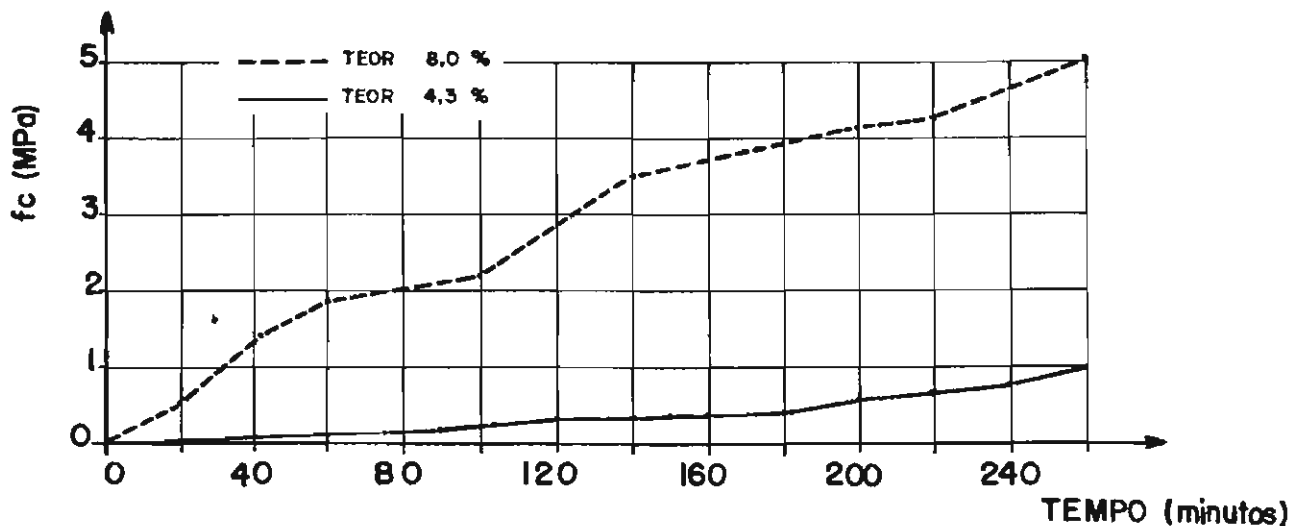


FIGURA 5.3: Resistências iniciais para aditivo à base de silicato.



Analisando-se os resultados apresentados na Figura 5.3., notou-se uma diferença marcante de desempenho de acordo com o teor de aditivo à base de silicato. Para o teor de 4,3 % não foi possível atingir 1 MPa até 4 horas e 20 minutos após a projeção, enquanto para o teor de 8 %, este valor foi atingido com apenas 40 minutos, isto é, num tempo 5,6 vezes menor. Em contrapartida, quando se atingiu as mesmas 4 horas e 20 minutos após a projeção, se obteve, para o teor de 8 %, valores de, aproximadamente, 5,1 MPa.

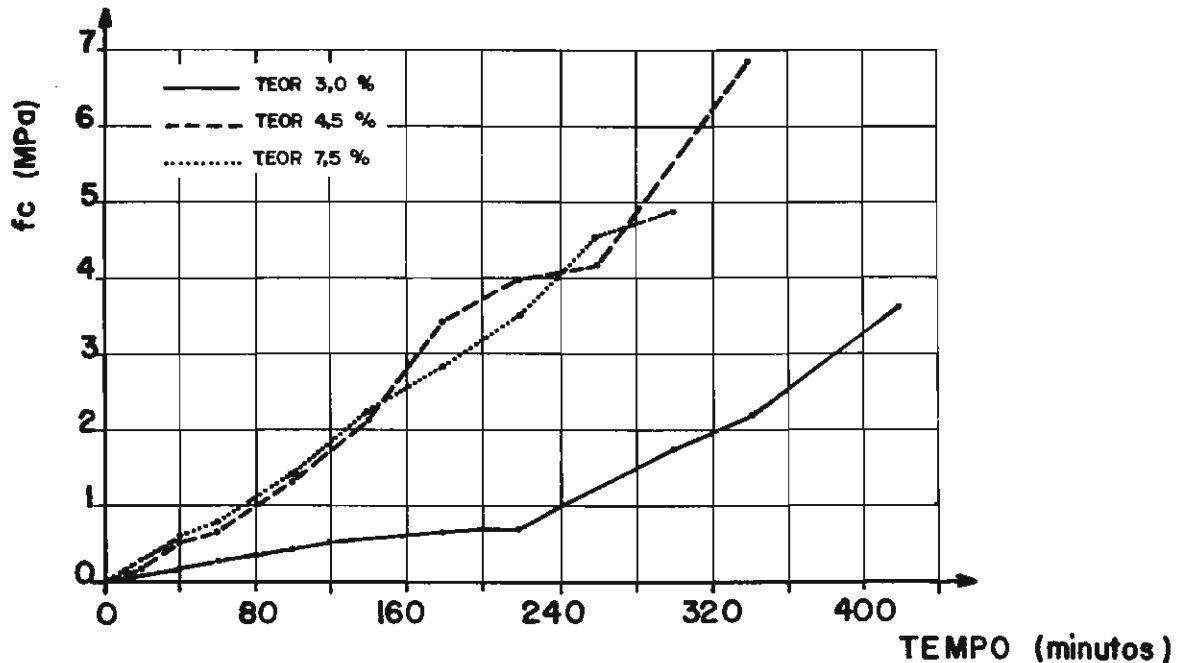


FIGURA 5.4: Resistências iniciais para aditivo à base de carbonato.

Para o caso dos aditivos à base de carbonatos, cujos resultados se encontram na Figura 5.4., observou-se que aumentando o teor de 3 % para 4,5 %, obtém-se um ganho razoável na velocidade de endurecimento. Nota-se que, a tensão de 1 MPa, para o teor de 3 %, foi obtida quando se tinha passado 4 horas após a projeção, enquanto que para o teor de 4,5 %, neste mesmo período, já se contava com, aproximadamente, 4,1 MPa. No entanto, para valores de 7,5 %, não se obteve nenhum ganho apreciável na velocidade de endurecimento, quando se compara com os valores obtidos para os 4,5 %.

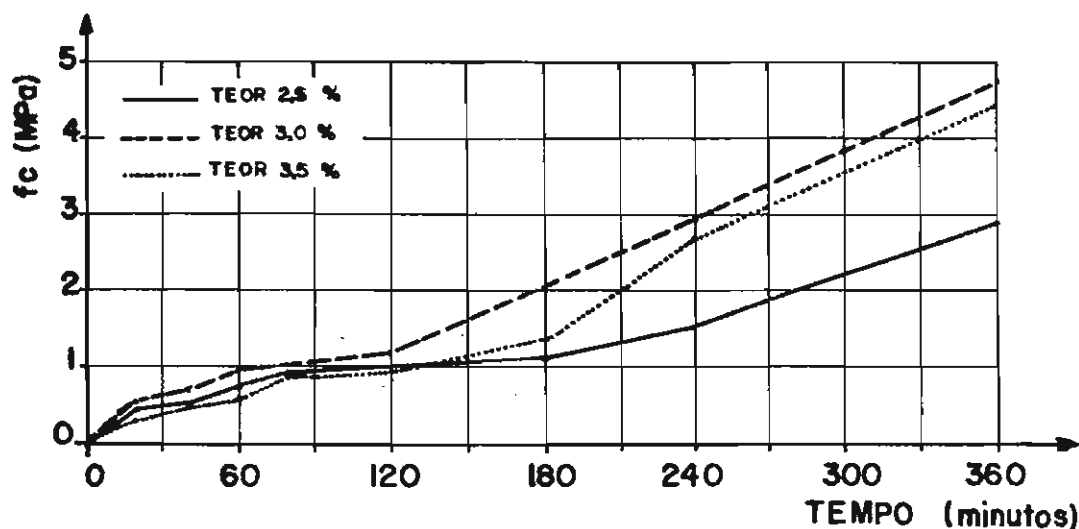


FIGURA 5.5: Resistências iniciais para aditivo à base de aluminato.

Os aditivos à base de aluminatos apresentaram um comportamento bem diverso. Ao contrário dos aditivos à base de silicatos e carbonatos os aluminatos mostraram que o aumento do teor de aditivo pode produzir uma queda no desempenho do material com relação à pega. Nota-se este fato verificando que o teor de 3,0 % apresentou desempenho superior ao de 2,5 % e 3,5 % até as primeiras 4 horas de idade, só sendo "alcançado" por este último quando se tinha passado 6 horas após a projeção. É interessante se notar que o teor de 2,5 % foi superior ao de 3,5 % até 1 hora e 20 minutos após a projeção, quando então foi superado.

Tais resultados são compatíveis com os obtidos por Bauder<sup>(146)</sup> e permitem concluir que os aditivos apresentam desempenho sensivelmente diferente segundo o teor aplicado do mesmo (em relação à massa de cimento). Percebe-se também que o aumento deste teor pode não implicar numa maior velocidade de endurecimento, como ocorreu com os aditivos à base de carbonatos e aluminatos. Por isso, deve-se ter em mente que o importante é se garantir, durante o processo de projeção, a homogeneidade do teor ótimo de aditivo, definido

na dosagem a partir de testes de compatibilidade<sup>(6)</sup> com o cimento.

#### 5.3.2.2. Resistência à compressão

Já é conhecido de longa data o efeito negativo dos aditivos aceleradores de pega e endurecimento nas resistências finais do concreto projetado<sup>(23)(39)(42)(43)(52)(146)</sup>. No entanto, ao contrário do que acontece com a pega e as resistências iniciais, a queda de resistência final é sempre mais intensa quanto maior for o teor de aditivo utilizado. Como se pode observar nas Figuras 5.6. e 5.7. existe uma correspondência entre o teor de aditivo aplicado, seja silicato ou carbonato, e a queda de resistência, tanto para os 7 dias como para os 28 dias de idade. No caso do aditivo à base de carbonato isto também se verificou aos 91 dias de idade.

Para o aditivo à base de silicato foram obtidas as seguintes correlações e coeficientes de determinação:

$$fc_7 = 33,13 - 1,51 * A \quad \text{com } r^2 = 0,931$$

$$fc_{28} = 47,45 - 2,49 * A \quad \text{com } r^2 = 0,952$$

onde:

$fc_7$  = resistência média à compressão axial aos 7 dias de idade.

$fc_{28}$  = resistência média à compressão axial aos 28 dias de idade.

A = teor de aditivo em porcentagem.

Para o aditivo à base de carbonato foram obtidas as seguintes correlações e coeficientes de determinação:

$$fc_7 = 25,57 - 0,94 * A \quad \text{com } r^2 = 0,893$$

$$fc_{28} = 32,95 - 0,94 * A \quad \text{com } r^2 = 0,900$$

$$fc_{91} = 40,10 - 1,16 * A \quad \text{com } r^2 = 0,966$$

onde:

$fc_7$  = resistência média à compressão axial aos 7 dias de idade.

$fc_{28}$  = resistência média à compressão axial aos 28 dias de idade.

$fc_{91}$  = resistência média à compressão axial aos 28 dias de idade.

A = teor de aditivo em porcentagem.

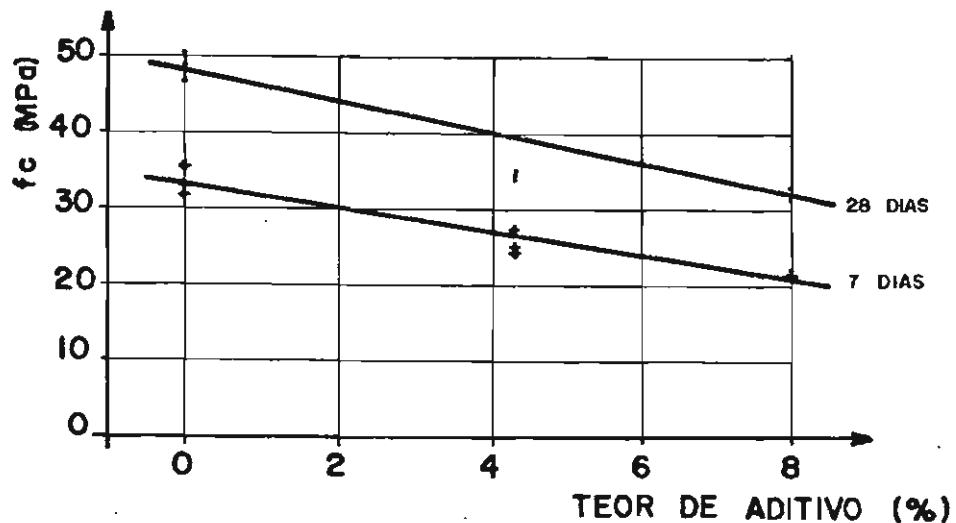


FIGURA 5.6: Correlação entre as resistências à compressão aos 7 e aos 28 dias e o teor de aditivo à base de silicato.

Com relação aos aditivos à base de aluminato não apresentaram uma correspondência entre o teor aplicado e a queda de resistência final, a qual permaneceu uniforme, tanto para os 7 dias (teste de hipótese A do Anexo 4), como para os 28 dias de idade (teste de hipótese B do Anexo 4), como o apresentado na Tabela 5.5.

Pode-se concluir, pela análise dos dados deste item e do anterior que, os teores excessivos de aditivos são sempre indesejados por não garantirem um melhor desempenho quanto à pega e endurecimento inicial e, seguramente, prejudicarem as resistências a maiores idades.

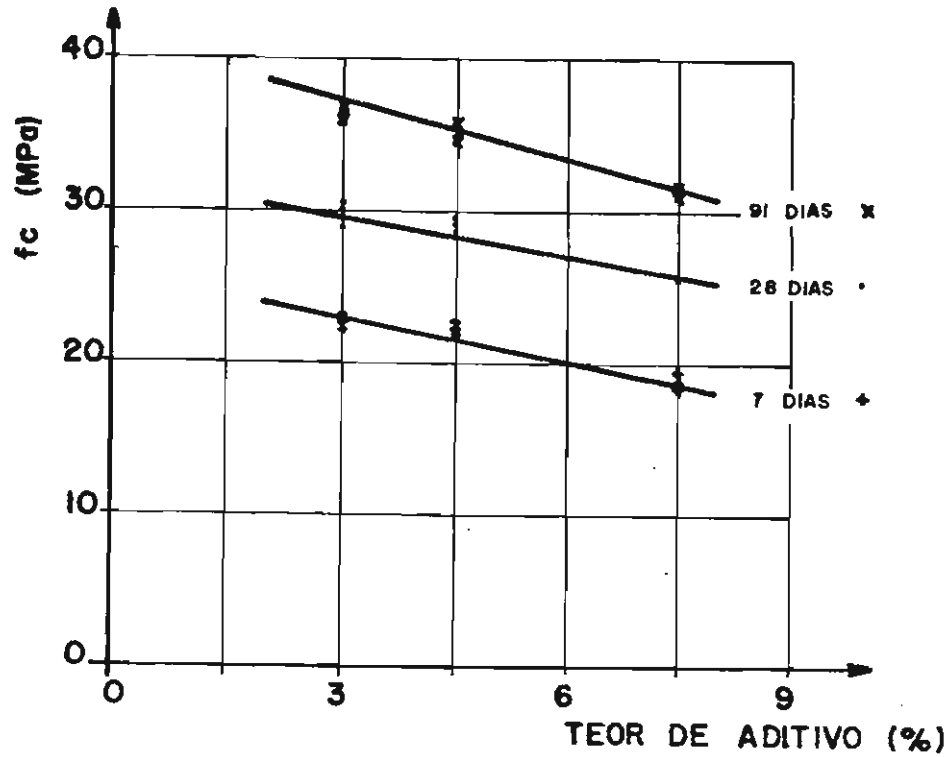


FIGURA 5.7: Correlação entre as resistências à compressão aos 7, aos 28 e aos 91 dias e o teor de aditivo à base de carbonato.

TABELA 5.5: Valores obtidos para a resistência à compressão axial do concreto projetado com diversos teores de aditivo à base de aluminato.

TEOR DE ADITIVO (%)	RESISTÊNCIA MÉDIA À COMPRESSÃO AXIAL (MPa) (NBR 5739 DA ABNT)			
	9 DIAS	C. V.*	28 DIAS	C. V.*
0,0	30,7	2,3%	42,4	2,3%
2,5	25,1	1,3%	33,1	1,4%
3,0	26,0	5,2%	32,2	10,6%
3,5	25,6	1,5%	33,3	7,1%

\* Coeficiente de variação

### 5.3.2.3. Compactação

Da mesma forma como ocorreu com o efeito do teor de umidade, notou-se uma correspondência entre a maior resistência à compressão e o menor volume de vazios permeáveis neste estudo.

Deve-se salientar que a principal dificuldade neste estudo foi a manutenção da consistência do material. Isto porque, com a variação no teor de aditivo, variava-se também a demanda de água, o que dificultava o trabalho do mangoteiro. Além deste, outro fator a ser considerado é a utilização de teores que o mangoteiro não estava habituado.

Assim, pode-se perceber pelos gráficos apresentados nas Figuras 5.8. e 5.9., que os aditivos aceleradores de pega, por essência, quais sejam os à base de aluminato e silicato, apresentam um crescimento do volume de vazios permeáveis para teores de aditivo mais elevados. Isto pode ser comprovado pelas correlações obtidas. No caso do aditivo à base de aluminato chegou-se à seguinte equação e coeficiente de determinação pela regressão linear:

$$\text{VVP} = 13,23 + 0,53 * A \quad \text{com } r^2 = 0,851$$

E, para o aditivo à base de silicato obteve-se:

$$\text{VVP} = 11,65 + 0,48 * A \quad \text{com } r^2 = 0,982$$

onde:

VVP = Volume de vazios permeáveis em porcentagem<sup>(79)</sup>

A = teor de aditivo em porcentagem

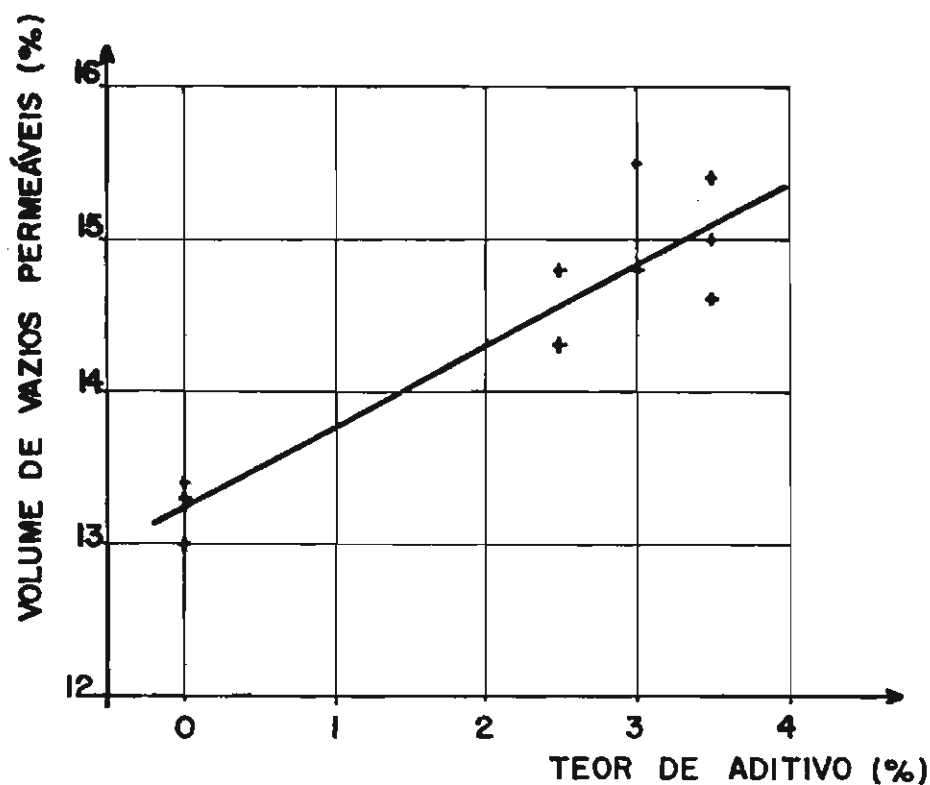


FIGURA 5.8: Influência do teor de aditivo à base de aluminato no volume de vazios permeáveis do concreto projetado.

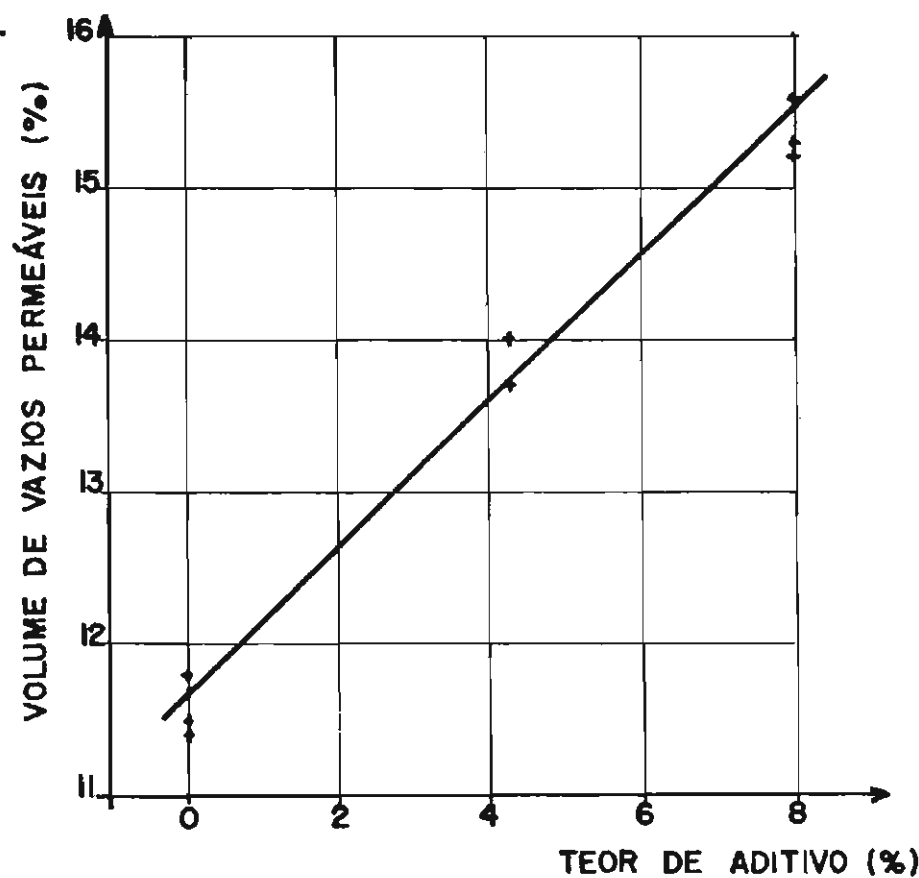


FIGURA 5.9: Influência do teor de aditivo à base de silicato no volume de vazios permeáveis do concreto projetado.

Isto pode significar uma maior dificuldade de compactação do material, pelo efeito instantâneo que estes materiais apresentam, pois as últimas camadas de concreto projetadas não conseguem compactar as inferiores, que já apresentam consistência elevada nesse momento. Este efeito se sobrepõe a interferência do aditivo nas reações de hidratação do material, prejudicando a sua hidratação e, como isto, tem-se um material mais poroso dotado de um gel com menor grau de cristalização.

Já os aditivos à base de carbonato, cujos resultados se encontram na Tabela 5.6., não apresentaram um efeito sensível no grau de compactação. Isto, provavelmente, se deve ao fato de ser, basicamente, um acelerador de endurecimento, ou, no mínimo, um acelerador de pega de baixo desempenho, quando comparado aos demais. Por isto, a queda de resistência a maiores idades se deveria fundamentalmente à ação prejudicial do material nas reações de hidratação do cimento.

TABELA 5.6: Influência do teor de aditivo à base de carbonato na compactação do concreto projetado.

TEOR DE ADITIVO (%)	VOLUME DE VAZIOS PERMEÁVEIS (%)	COEFICIENTE DE VARIAÇÃO (%)
3,0	15,3	0,62
4,5	14,9	1,59
7,5	15,9	0,30



#### 5.3.2.4. Controle do teor de aditivos

Como se pode observar pela análise dos resultados dos itens anteriores, o controle do teor de aditivos aceleradores é fundamental por três aspectos. Primeiro, eles são essenciais para se alcançar os requisitos de resistências a baixas idades. Também o são para se conseguir uma maior espessura de concreto projetado executada numa única etapa sem deslocamentos. Terceiro, os teores mais elevados de aditivos têm um efeito prejudicial nas propriedades do concreto projetado a longo prazo e, no caso dos aditivos à base de aluminatos e silicatos, na própria compactação do material. Além disso, podem apresentar maiores riscos para a durabilidade do material.

Portanto, não se admite a utilização dos canecos para a dosagem de aditivos aceleradores, onde não se conhece o teor efetivo de material empregado.

Para ilustrar este problema, foram executadas duas placa de concreto projetado, num intervalo de dez minutos, utilizando-se o sistema de alimentação descrito em 3.2.3.1., cujos resultados se encontram apresentados no Anexo 5. O equipamento utilizado consistia numa CP-6 com pré-umidificação simples, isto é, com água injetada a baixa pressão. Ao contrário dos outros estudos, este foi feito na própria obra e não no laboratório de campo, aproveitando-se de um intervalo no trabalho de projeção do concreto. Assim as condições de moldagem são as mesmas do concreto projetado usado na obra.

Na Figura 5.10. encontram-se os resultados da análise da resistência inicial das duas placas moldadas na obra, o que foi feito através do Penetrômetro de Meynadier. Observa-se uma nítida diferença de desempenho entre as duas placas que deveriam ser idênticas e, de fato, apresentaram valores de consistência pela agulha de Proctor muito próximos, em torno de 67 (Anexo 5). Isto se deve à inexistência de controle do

teor de aditivo acelerador empregado, o que produziu esta variação no comportamento do material.

Na Tabela 5.7. encontram-se os valores obtidos para a resistência à compressão aos 7, 28 e 91 dias com estas duas placas. Constata-se que a diferença de desempenho diminui à medida que avança a idade do material, chegando a valores equivalentes aos 91 dias.

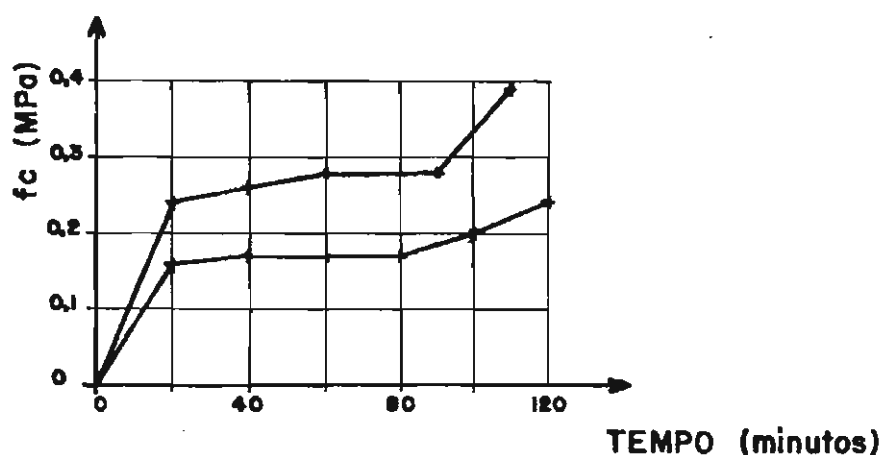


FIGURA 5.10: Resultados obtidos na análise da evolução da resistência inicial em placas moldadas em obra.

TABELA 5.7: Resistência à compressão axial do concreto projetado executado em obra.

PLACA	RESISTÊNCIA MÉDIA À COMPRESSÃO AXIAL (MPa) (NBR 5739 DA ABNT)					
	7 DIAS	C.V.*	9 DIAS	C.V.*	28 DIAS	C.V.*
86	21,1	4,5	30,7	6,1	36,4	14,3
87	26,1	6,3	33,4	0,7	37,2	14,4

\* Coeficiente de variação

Pelo teste de hipótese A do Anexo 5, demonstra-se que a resistência aos 7 dias da placa 87 é maior que a da placa 86

a nível de 5 % de significância<sup>(145)</sup>. Pelo teste B do referido Anexo, demonstra-se o mesmo para a resistência aos 28 dias a nível de 10 % de significância<sup>(145)</sup> e no teste de hipótese C não foi possível comprovar a ocorrência de diferença significativa entre as resistências aos 91 dias de idade.

A compactação do material apresentou-se sem grandes alterações com valores (Tabela 5.8.) que podem ser imputados como equivalentes (Teste de hipótese D do Anexo 5). Isto comprova o fato de que as diferenças obtidas entre os resultados das duas placas não foram devidas a diferenças na compactação do material.

No sentido de se evitar este tipo de problema pode-se lançar mão de três tipos de solução: o uso de dosadores, ou a alimentação direta com a do mistura do aditivo em betoneira pouco antes da aplicação, ou ainda o *pre-bagging*.

TABELA 5.8: Influência do teor de aditivo à base de carbonato na compactação do concreto projetado.

NÚMERO DA PLACA	VOLUME DE VAZIOS PERMEÁVEIS (%)	COEFICIENTE DE VARIAÇÃO (%)
86	15,6	2,97
87	16,0	2,65

### 5.3.3. O efeito da pré-hidratação

O fenômeno definido como pré-hidratação é aquele que se dá envolvendo o cimento, a umidade, que naturalmente se faz presente nos agregados, e os aditivos aceleradores de pega quando em contato antes da projeção. Anteriormente foi feita a análise deste problema levando-se em consideração apenas o

contato entre o cimento e a água dos agregados<sup>(42)</sup>(120), pois se considerava que o aditivo fosse lançado o mais tarde possível. Todavia, em algumas obras brasileiras, em que o arranjo físico do canteiro permitia, procedia-se à mistura do aditivo em pó na própria betoneira. Isto trazia a grande vantagem da garantia do teor utilizado e homogeneização do material e, por outro lado, o grande risco a pré-hidratação.

Com isto em vista foi feito um estudo onde se moldaram duas séries de três placas, cuja caracterização se encontra no Anexo 6. Em cada uma das séries se moldava uma placa imediatamente após a mistura, outra trinta minutos depois e a terceira uma hora depois. Manteve-se para as duas séries o mesmo tipo de aditivo, variando-se o cimento. Na primeira série foi utilizado um cimento ARI e na segunda um CPE. Os resultados dos ensaios de resistência à compressão axial se encontram apresentados nas Tabelas 5.9. e 5.10.

TABELA 5.9: Efeito da pré-hidratação na resistência à compressão axial do concreto projetado executado com cimento ARI.

TEMPO DE ESPERA (min)	VOLUME DE VAZIOS PERMEÁVEIS (%) C.V.*		RESISTÊNCIA MÉDIA À COMPRESSÃO AXIAL (MPa) (NBR 5739 DA ABNT)			
			7 DIAS	C.V.*	28 DIAS	C.V.*
0	15,6	1,3%	23,8	19,6%	29,0	8,2%
30	23,2	4,3%	11,8	16,2%	17,5	21,1%
60	15,6	1,3%	22,3	9,5%	29,2	7,5%

\* Coeficiente de variação

Em ambos os casos houve uma perda de resistência para as misturas que não foram projetadas imediatamente após a projeção (testes de hipótese A a E do Anexo 6). O tempo de espera equivalente a 30 minutos apresentou o pior desempenho, isto é, apresentou a maior perda de resistência e de compactação para o material para os dois cimentos.

TABELA 5.10: Efeito da pré-hidratação na resistência à compressão axial do concreto projetado executado com cimento CPE.

TEMPO DE ESPERA (min)	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL MÉDIA (MPa) (NBR 5739 DA ABNT)		VOLUME DE VAZIOS PERMEÁVEIS (%)	
	91 DIAS	C.V.*	84 DIAS	C.V.*
0	26,9	5,8%	16,3	3,1%
30	15,1	12,2%	23,4	3,7%
60	22,2	13,3%	18,2	3,3%

\* Coeficiente de variação

#### 5.4. A VELOCIDADE DE PROJEÇÃO

##### 5.4.1. Importância e forma de controle

A própria definição de concreto projetado indica que o material é compactado devido à sua alta velocidade de projeção. Isto, como apontou Glassgold<sup>(117)</sup>, tem grande importância, pois "a qualidade do concreto projetado aplicado, incluindo aí sua durabilidade, é diretamente proporcional à velocidade de projeção". Além disso, o autor chega a questionar se a via úmida de fluxo denso é capaz de conferir as características de velocidade exigidas para o concreto projetado, uma vez que sua velocidade de projeção é reduzida em relação à da via seca. Este detalhe explica em parte o fato da via seca produzir, até os dias de hoje, concretos de melhor qualidade<sup>(6)</sup>.

No entanto, nessas definições não há nenhuma explicitação quantitativa sobre o que seria considerado como "alta

velocidade". A razão para esta situação reside no fato da velocidade de projeção ser um dos fatores de maior dificuldade de controle. A primeira tentativa de que se tem conhecimento foi feita por Stewart<sup>(144)</sup> em 1933. Segundo o autor "a velocidade no bico era lida junto à máquina de projeção por meio de um simples manômetro e uma escala convenientemente calibrada".

Ward e Hills<sup>(129)</sup>, em 1976, indicaram que a velocidade de projeção pudesse ser determinada utilizando-se "fotografias de alta velocidade". Com este processo eles chegaram a valores da ordem de 15 a 35 m/s, para a via seca, o que está bem abaixo dos 90 a 150 m/s obtidos por Stewart<sup>(144)</sup>. Pouco antes, em 1973, Parker<sup>(147)</sup>, através de um sistema semelhante havia chegado a valores da ordem de 30 a 60 m/s. De qualquer forma, estes métodos são de difícil aplicação na prática.

Por esse motivo, no estudo realizado para este trabalho, optou-se por analisar o efeito da velocidade de projeção de forma indireta, através do controle da pressão de ar comprimido medida junto à máquina de projeção. É importante ressaltar que este fator só tem relevância para a definição das propriedades do concreto projetado à medida que ele define a vazão de ar comprimido e, conseqüentemente, a velocidade de projeção para um dado equipamento específico.

#### **5.4.2. Propriedades afetadas pela velocidade de projeção**

##### **5.4.2.1. Compactação**

Para a análise do efeito da velocidade de projeção nas propriedades do concreto projetado foram executadas duas séries de ensaio compostas por três placas cada uma, cuja caracterização se encontra no Anexo 7. Na primeira, usando

equipamento convencional com bico afunilado (Figura 3.26) e na segunda um bico não convencional, que se encontra detalhado na Figura 5.11. Este segundo bico apresentava uma seção transversal bem superior em área e, conseqüentemente, uma menor velocidade de projeção, em relação ao bico afunilado, para uma mesma pressão de ar.

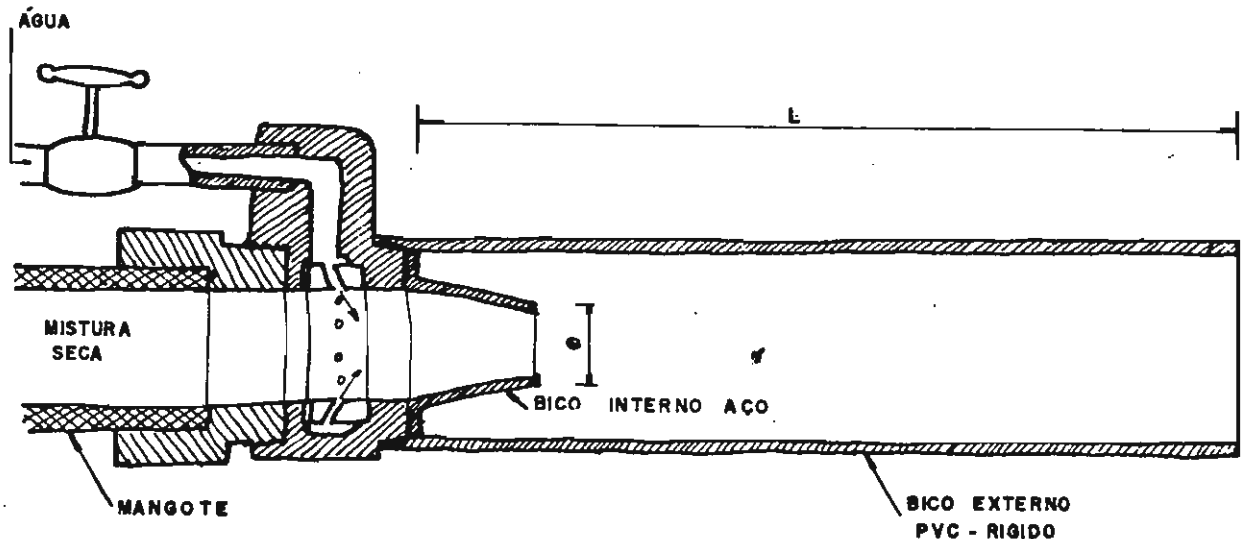


FIGURA 5.11: Bico largo utilizado na segunda série de ensaios.

Observa-se pelos resultados da Figura 5.12. e 5.13. que a maiores pressões obteve-se um menor volume de vazios permeáveis, o que indicou uma maior compactação. Pela análise por regressão linear obteve-se os seguintes resultados para o bico afunilado:

$$\text{VVP} = 25,70 - 26,27 \cdot P \text{ com } r^2 = 0,846$$

e, para o bico largo:

$$\text{VVP} = 23,13 - 12,41 \cdot P \text{ com } r^2 = 0,776$$

onde

VVP = volume de vazios permeáveis em porcentagem e

P = pressão de ar comprimido em MPa.

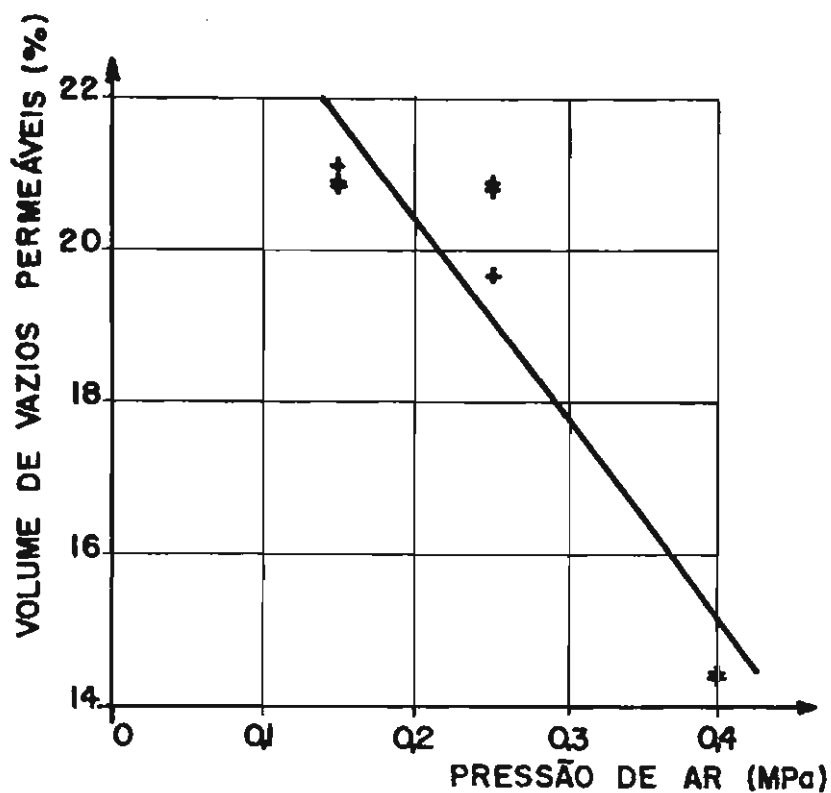


FIGURA 5.12: Influência da pressão de ar comprimido na compactação do concreto projetado com bico afunilado.

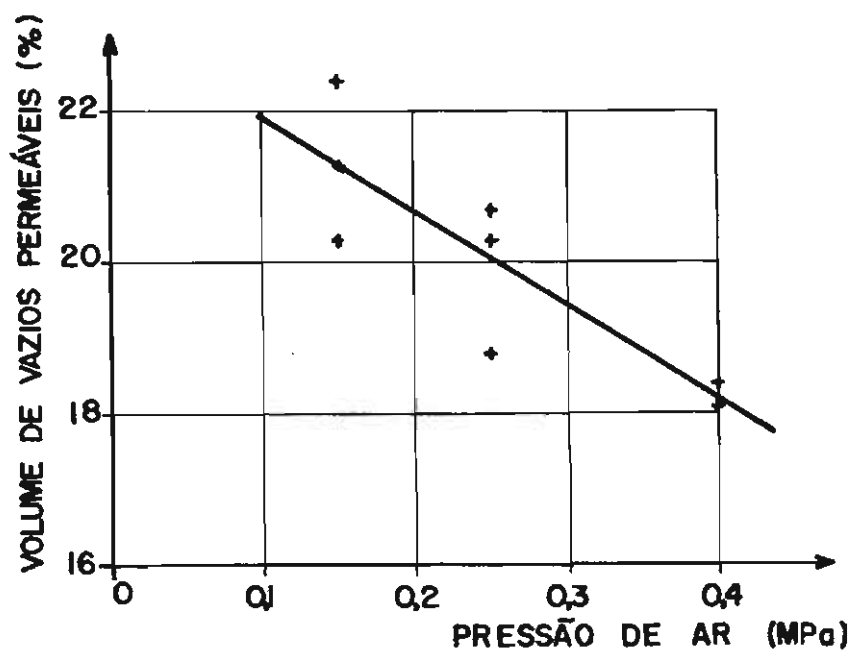


FIGURA 5.13: Influência da pressão de ar comprimido na compactação do concreto projetado com bico largo.



Além disso, o bico afunilado, que proporcionava uma maior velocidade de projeção, apresentou um desempenho superior ao bico de grande diâmetro, fornecendo um menor volume de vazios permeáveis qualquer que fosse a pressão de ar utilizada.

#### 5.4.2.2. Resistência à compressão

Como consequência direta da maior compactação obtida para maiores velocidades de projeção, obteve-se maiores resistências (Tabela 5.11.). Assim, como se pode observar pelos resultados da Tabela 5.11. às maiores pressões de ar comprimido corresponderam os maiores valores para a resistência à compressão, tanto para o bico afunilado como para o bico largo (testes de hipótese A e B do Anexo 7). E, da mesma forma que a compactação, o bico afunilado e sua maior velocidade de projeção apresentaram valores superiores de resistência à compressão em todas as pressões utilizadas.

TABELA 5.11: Valores obtidos de resistência à compressão para as diversas pressões de ar comprimido.

PRESSÃO DE AR COMPRIMIDO (MPa)	RESISTÊNCIA MÉDIA À COMPRESSÃO AXIAL (MPa) (NBR 5739 DA ABNT)			
	BICO AFUNILADO		BICO LARGO	
	14 DIAS	C.V.*	7 DIAS	C.V.*
0,15	19,2	12,6%	13,1	30,7%
0,25	21,7	14,0%	19,5	13,6%
0,40	33,2	11,2%	20,3	11,7%

\* Coeficiente de variação

#### 5.4.2.3. Reflexão

Nem todas as propriedades do concreto projetado são melhoradas com o aumento da velocidade de projeção. Uma das que são pioradas é a reflexão, mesmo que os resultados não tenham apresentado este comportamento de forma clara, como se pode observar pelos resultados apresentados na Tabela 5.12. Isto ocorreu em parte pelo fato do ensaio de determinação da reflexão em placas<sup>(123)</sup> estar em fase de desenvolvimento por ocasião da realização dos testes e, por isso, ter se utilizado uma lona muito pequena, o que fez com que uma parte do material refletido caísse fora da área coberta por ela. Apesar disto, pode-se notar uma tendência do bico largo apresentar valores inferiores de reflexão em relação ao bico afunilado.

TABELA 5.12: Resultados obtidos para a reflexão em função da pressão de ar comprimido do tipo de bico utilizados no estudo.

PRESSÃO DE AR COMPRIMIDO (MPa)	REFLEXÃO (%) (123)	
	AFUNILADO	LARGO
0,15	21,6	8,3
0,25	20,8	21,6
0,40	33,7	19,4

#### 5.4.3. O controle da pressão de ar comprimido

Pela análise dos resultados obtidos pode-se dizer que o controle da pressão de ar comprimido pode servir de subsídio

para o controle da velocidade de projeção de um determinado equipamento. Isto pode ser feito, da mesma forma como foi realizado durante o estudo, isto é, através dos manômetros de que são dotadas as máquinas de projeção.

Cabe lembrar que os níveis de pressão de ar utilizados foram relativamente baixos, o que proporcionavam uma certa facilidade de manuseio para o mangoteiro. Esta tendência poderá não se manter indefinidamente para maiores níveis de pressão de ar comprimido, como apontaram os resultados obtidos por Stewart<sup>(144)</sup>, onde se constatou uma velocidade de projeção ótima para obtenção da maior resistência à compressão. Além da reflexão e da facilidade de manuseio, outra propriedade que é alterada negativamente pela maior pressão de ar comprimido é a liberação de poeira, o que, infelizmente, não foi possível mensurar.

Assim, deve-se garantir que a pressão de ar comprimido utilizada corresponda à velocidade de projeção que forneça o atendimento às especificações do material, não se permitindo valores exagerados que irão corresponder a um maior volume de perdas por reflexão e a piores condições de trabalho para os operários.

## **5.5. A DIREÇÃO DE PROJEÇÃO**

### **5.5.1. A importância da técnica de projeção**

O meio técnico ligado ao concreto projetado tem de longa data o conhecimento de que as propriedades do material são influenciadas pela técnica de projeção, principalmente na via seca onde a mão-de-obra tem um papel decisivo<sup>(51)</sup>.

Um dos aspectos da técnica de projeção do concreto que tem grande importância para a garantia das propriedades do material é o correto manuseio do jato do concreto. Prova

disto reside no fato do próprio ACI<sup>(88)</sup> e a ABNT<sup>(147)</sup> possuírem recomendações sobre o tema.

As recomendações do ACI, que serviram de base para as nacionais, foram, por sua vez, baseadas no trabalho de Crom<sup>(33)</sup>(114). Este autor alertou para o fato de que o jato de concreto deve ser mantido sempre no sentido normal à superfície de projeção, qualquer que seja a posição da mesma, de modo a garantir um menor nível de reflexão. Não se exclui aqui a situação em que a superfície de projeção se encontra sobre a cabeça do mangoteiro, como ocorre nos tetos de túneis e na parte inferior das lajes a serem revestidas com o concreto projetado<sup>(12)</sup>. No entanto, é justamente nesta situação onde o mangoteiro encontra as piores condições de trabalho:

- a. Exige-se maior esforço físico para manusear o bico de projeção;
- b. Trabalha exatamente em baixo da "ducha" de material refletido e dentro da nuvem de poeira liberada e
- c. Corre grande risco de ser atingido por placas de concreto desprendidas (desplacamento).

Isto traz uma série de implicações, como se verá nos próximos itens, a começar pela maior intensidade na reflexão.

### **5.5.2. Propriedades afetadas pela direção de projeção**

#### **5.5.2.1. Reflexão**

Pelo fato da projeção no teto ser aquela que implica no maior nível de dificuldades e risco para o mangoteiro, este naturalmente acaba não sendo a regra da projeção normal à

superfície, adotando uma posição mais confortável, qual seja a projeção a  $45^{\circ}$ , como mostra a Figura 5.14. Nesta situação o mangoteiro fica a uma maior distância da região de risco de deslocamento, tem o manuseio do bico facilitado e, além disso, faz com que a queda de material refletido e a maior parte da poeira liberada se dê no sentido oposto ao da sua posição.

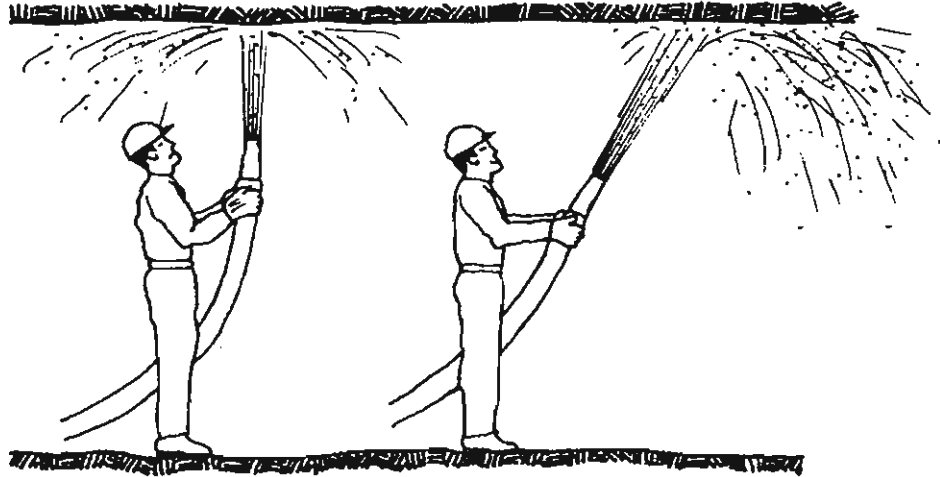


FIGURA 5.14: Dificuldades do mangoteiro em realizar a projeção sobre o teto.

Esta situação traz como implicação direta o aumento da reflexão do concreto projetado à medida que nos aproximamos do teto.

Outro ponto que deve intervir é o fato jato de concreto ter maior dificuldade de incorporar o material quando dirigido para o teto. No caso da projeção na parede, parte do material que é refletido para cima é reincorporado à camada de concreto pelo jato posterior ao descer junto da mesma, o que é impossível no teto (Figura 5.15.).

A relação direta entre a intensidade da reflexão e o ângulo de projeção em relação à horizontal já foi apontada por diversos autores como Lorman<sup>(31)</sup> e Hoffmeyer<sup>(35)</sup>, isto tanto para a via seca como para a via úmida, respectivamente. Alguns autores, chegaram a uma tentativa de quantificação

destes valores como os apresentados na Tabela 5.13.

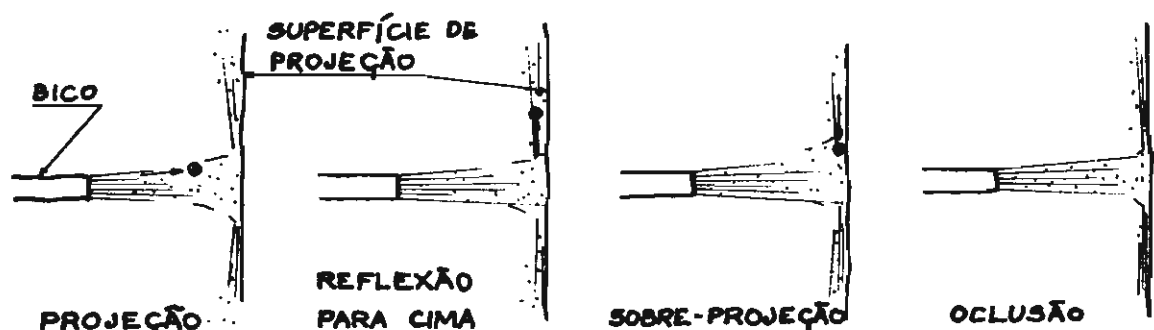


FIGURA 5.15: Dinâmica de reincorporação de material refletido.

O que, no entanto, passou negligenciado por estes autores é que o concreto projetado tem seu traço alterado em função do nível de reflexão. Conseqüentemente, outras propriedades do material serão alteradas. No sentido de se analisar o efeito que a direção de projeção tem nestas outras propriedades do material foi feito um estudo de campo cujos resultados se encontram descritos a seguir.

TABELA 5.13: Valores esperados para a reflexão em função do ângulo que o jato faz com a horizontal.

ÂNGULO DE PROJECÇÃO EM RELAÇÃO À HORIZONTAL	REFLEXÃO (%)			
	AUTOR			
	KOBLER <sup>(34)</sup>	RYAN <sup>(14)</sup>	ACI <sup>(9)</sup>	
	via seca	via seca	via seca	via úmida
0°	10 a 12	15 a 30	15 a 25	5 a 10
30°	17,5 a 21,5	-	-	-
90°	20 a 25	25 a 50	25 a 50	10 a 20

### 5.5.2.2. Traço

Numa análise inicial do efeito da direção de projeção nas propriedades do concreto projetado foi feita um estudo da variação do traço. Para tal foi executado um anteparo que permitia a projeção em três ângulos segundo a horizontal ( $90^\circ$ ,  $45^\circ$  e  $0^\circ$ ), conforme o apresentado na Figura 5.16.

Foram elaborados três traços diferentes, caracterizados no Anexo 8, que foram projetados segundo as três direções, para então se proceder a reconstituição<sup>(124)</sup> daqueles que permaneceram aderidos à parede. Como não havia necessidade de se obter grandes espessuras de camada não foi utilizado o aditivo acelerador de pega para se facilitar a operação do ensaio de reconstituição. Os resultados obtidos se encontram apresentados na Tabela 5.14.

Nessa mesma Tabela 5.14. se encontram apresentados os valores das perdas de agregados em relação ao traço original, isto é, aquele que entrou na máquina de projeção. Percebe-se uma certa correspondência entre o valor da perda de agregados totais em relação ao ângulo de projeção.

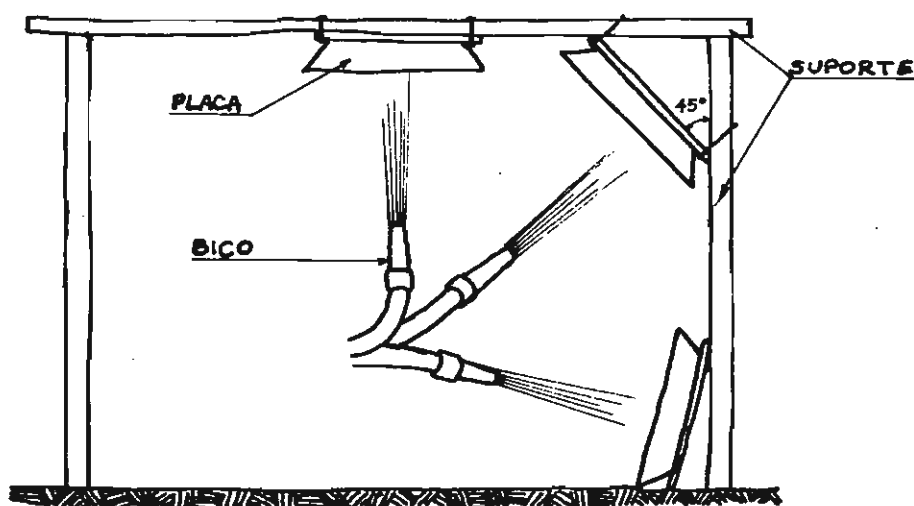


FIGURA 5.16: Esquema utilizado para a projeção em diversos ângulos.

TABELA 5.14: Resultados obtidos para a reconstituição de traço dos concretos que ficaram incorporados à parede segundo o ângulo de projeção.

TRAÇO DE ENTRADA NA MÁQUINA DE PROJEÇÃO	ÂNGULO DE PROJEÇÃO COM A HORIZONTAL		
	0°	45°	90°
	TRAÇO INCORPORADO <sup>(124)</sup> (PROPORÇÃO EM MASSA)		
1 : 3,0 1:1,64:1,36 (0%)	1 : 2,44 a/c = 0,28 (18,67%)*	1 : 2,08 a/c = 0,29 (30,67%)*	1 : 1,73 a/c = 0,22 (42,33%)*
1 : 4,33 1:2,51:1,82 (0%)	- - -	1 : 2,95 a/c = 0,34 (31,87%)*	1 : 2,58 a/c = 0,32 (40,42%)*
1 : 5,0 1:2,96:2,04 (0%)	1 : 3,67 a/c = 0,47 (26,60%)*	1 : 3,31 a/c = 0,48 (33,80%)*	1 : 2,85 a/c = 0,47 (43,00%)*

\* OBS: Os valores entre parênteses correspondem a perda de agregados em relação ao traço de entrada.

Pela análise por regressão linear obteve-se a seguinte correlação entre a perda total de agregados e a direção de projeção

$$PA = 22,56 + 0,2145*\phi$$

onde

PA = perda de agregado em porcentagem e

$\phi$  = ângulo de projeção com relação a horizontal em graus.

O coeficiente de determinação obtido para esta correlação foi  $r^2 = 0,919$ , denotando que a reta explica bem o fenômeno<sup>(145)</sup>.

A correlação entre estes valores se encontra apresentada na Figura 5.17. Nota-se assim que se pode comprovar o efeito da reflexão mais intensa na variação do traço para ângulos de projeção mais próximos de 90° em relação à horizontal.



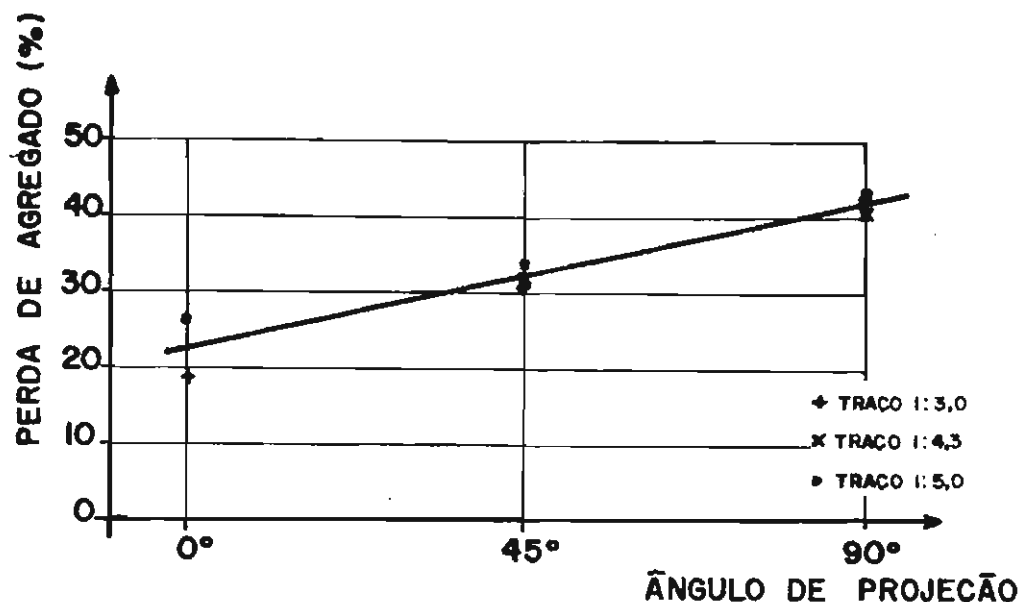


FIGURA 5.17: Correlação entre o ângulo de projeção e a perda total de agregados

Outro ponto muito interessante a se notar nos resultados apresentados na Tabela 5.14. é a constância do valor da relação água/cimento para um determinado ângulo de projeção. Isto pode ser explicado pelo fato de se ter utilizado o equipamento de projeção com pré-umidificação a alta pressão, que possibilita uma umidificação mais homogênea do material. Com isto, o cimento que está umidificado não terá mais possibilidade de ser separado da água durante o processo da reflexão, o que faz com que o valor da relação a/c não seja influenciado pela reflexão.

Para a análise das demais propriedades foram então moldadas três placas obedecendo a mesma orientação dos traços reconstituídos neste estudo, cuja caracterização se encontra no Anexo 9. O sistema utilizado foi fixar as placas nos anteparos da Figura 5.16.

Para que fosse possível moldar as placas numa só operação, o que equivale dizer a executar uma camada de 16 cm numa só passada (inclusive no teto) foi utilizado um alto teor de aditivo a base de carbonato (5 % em relação à massa de cimento), ao contrário do estudo da variação do traço

apresentado em 5.5.2.2. Foram realizadas outras tentativas com teores menores de aditivo (da ordem de 3 % em relação à massa de cimento), que conduziram a uma série de deslocamentos. Portanto, para prevenir os acidentes durante a execução dos ensaios optou-se por este alto teor.

Nessas placas e a partir dos testemunhos extraídos foram feitos ensaios para análise da pega e endurecimento iniciais (PEM e PEC), resistência à compressão aos 7 e 28 dias de idade (NBR 5739 da ABNT), absorção, volume de vazios permeáveis e massa específica<sup>(79)</sup>. Os resultados destes ensaios se encontram comentados nos próximos itens.

#### 5.5.2.3. Compactação

A compactação do material, avaliada pelos resultados de absorção após imersão, volume de vazios permeáveis e massa específica obtidos pelo ensaio da ASTM<sup>(79)</sup> (Tabela 5.15.), mostrou uma ligeira tendência a ser maior para ângulos de projeção cada vez maiores em relação à horizontal.

TABELA 5.15: Análise da compactação do concreto projetado com aditivos à base de carbonatos segundo o ângulo de projeção.

PROPRIEDADE	ÂNGULO DE PROJEÇÃO COM A HORIZONTAL		
	0°	45°	90°
ABSORÇÃO APÓS IMERSÃO (%)	8,5	7,4	7,4
VOLUME DE VAZIOS PERMEÁVEIS (%)	17,7	15,7	15,7
MASSA ESPECÍFICA (g/cm <sup>3</sup> )	2,08	2,13	2,14

Este resultado pode ser justificado pelo fato de se ter utilizado aditivos á base de carbonato, que são aceleradores de endurecimento. Assim, como temos um maior nível de reflexão para ângulos mais próximos dos  $90^{\circ}$  em relação à horizontal, demanda-se um maior tempo para o preenchimento de uma mesma espessura de concreto projetado e, com isto, permite-se uma maior compactação do material pelo próprio jato de concreto.

#### 5.5.2.4. Pega e resistências iniciais

Para a análise da pega e endurecimento iniciais, as placas, cuja caracterização se encontra no Anexo 9, foram acompanhadas nas primeiras quatro horas com os ensaios do Penetrômetro de Meynadier (PEM) e do Penetrômetro de Energia Constante (PEC).

Os resultados obtidos nestes ensaios se encontram apresentados na Figura 5.18. Neles pode-se observar que o ganho de resistência inicial foi diretamente proporcional ao ângulo de projeção. A placa posicionada no teto atingiu a resistência de 8 MPa em apenas 3 horas após a projeção, enquanto a placa posicionada a  $45^{\circ}$  obteve o mesmo resultado demorando 40 minutos a mais. Já a placa posicionada na vertical demorou 4 horas para tal.

A justificativa para a ocorrência deste fenômeno poderá estar associada a maior compactação do material, uma vez que o teor de aditivo em relação à massa de cimento não deve ter sofrido grandes variações como ocorreu com a relação a/c.

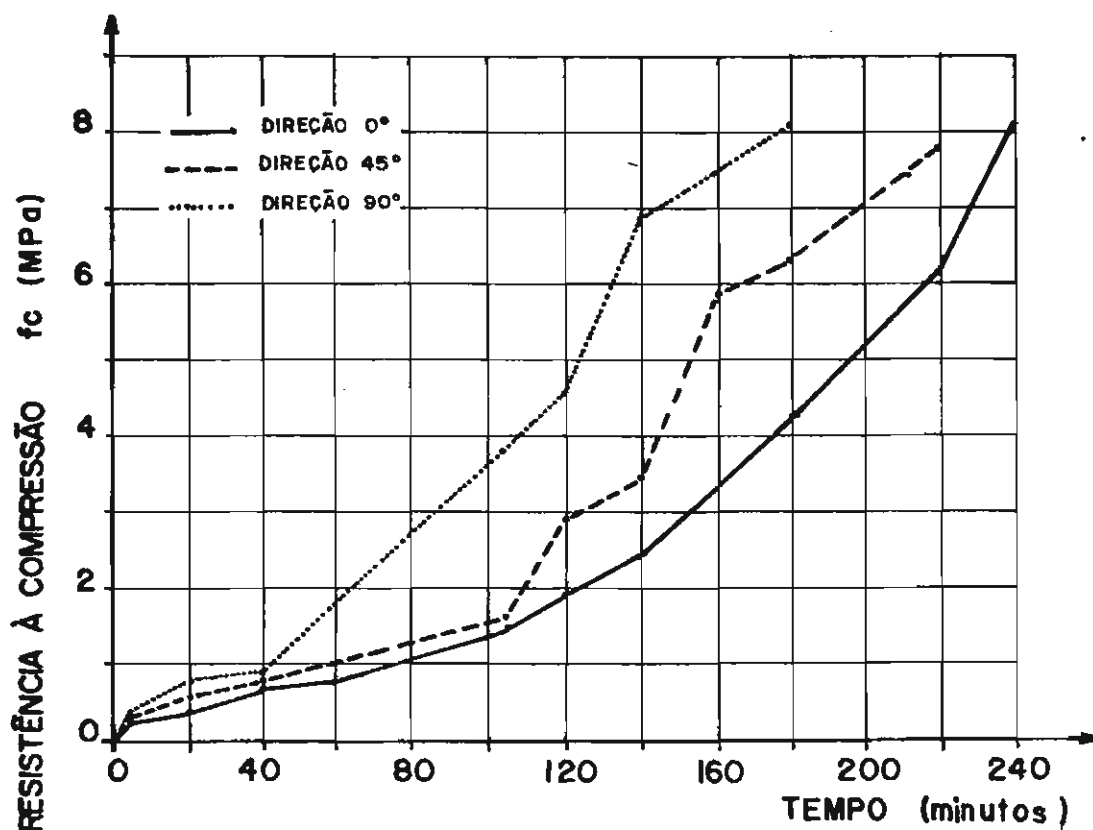


FIGURA 5.18: Resistências iniciais para as três direções de projeção obtidas com o uso de aditivos à base de carbonato.

#### 5.5.2.5. Resistência à compressão

Ao contrário do que se poderia esperar, ao melhor desempenho nas primeiras idades não correspondeu o pior nas resistências a maiores idades do concreto projetado no teto. Como se pode observar pelos resultados obtidos pela análise por regressão linear (Figura 5.19) entre a resistência à compressão axial e o ângulo de projeção:

$$f_{c7} = 14,23 + 0,0559 * \phi \quad \text{com } r^2 = 0,848$$

$$f_{c28} = 19,48 + 0,0719 * \phi \quad \text{com } r^2 = 0,820$$

onde

$f_{c7}$  = resistência à compressão axial aos 7 dias de idade

$f_{c28}$  = resistência à compressão axial aos 28 dias de idade

$\phi$  = ângulo de projeção em relação à horizontal.

A explicação para o fato de se obter maiores resistências à compressão para maiores ângulos de projeção em relação à horizontal, pode estar ligada à maior compactação do material, da mesma forma que as resistências iniciais.

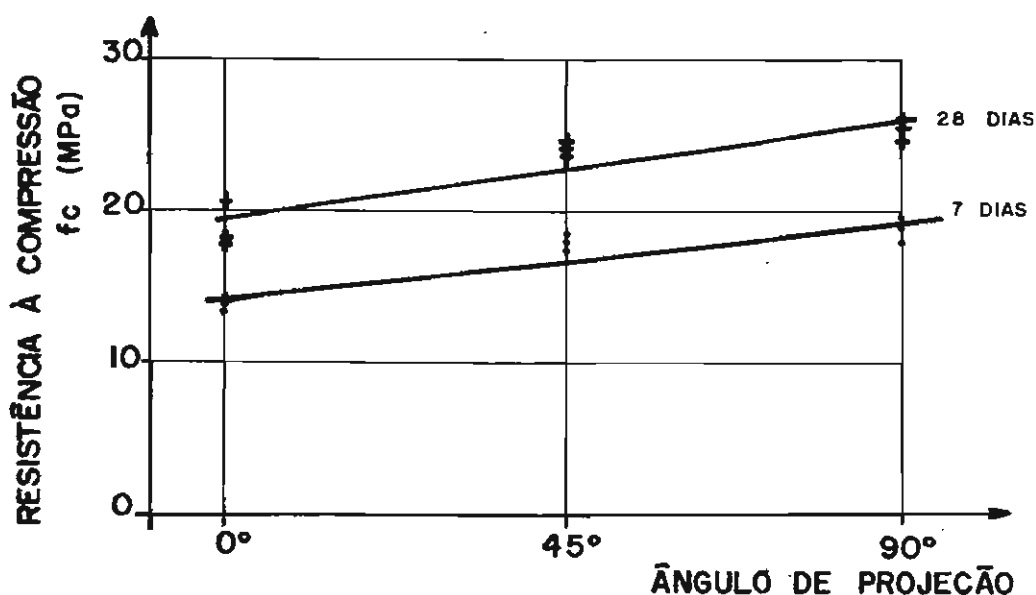


FIGURA 5.19: Relação entre a resistência à compressão aos 7 e aos 28 dias e a direção de projeção.

### 5.5.3. A influência do aditivo à base de aluminato

Não foi possível analisar a variação de traço quando da utilização de aditivos à base de aluminatos por não se dispor, na época, de uma metodologia de ensaio que permitisse realizar esta avaliação. A diferença básica da metodologia de reconstituição de traços, quando da utilização de aditivos à base de aluminatos, reside na

necessidade de se utilizar solventes ácidos para remover a camada de nata de cimento hidratado que permanece aderida à superfície dos agregados, mesmo quando a lavagem da mistura é realizada poucos minutos após a projeção do material<sup>(124)</sup>. Este procedimento se deve ao efeito instantâneo do aditivo à base de aluminatos sobre a pega do cimento.

Para a análise da influência do uso do aditivo à base de aluminato de potássio nas outras propriedades do concreto projetado, foram moldadas três placas, cuja caracterização se encontra no Anexo 10. O sistema utilizado foi idêntico ao dos aditivos à base de carbonato, fixando-se as placas nos anteparos da Figura 5.16.

Nessas placas e a partir dos testemunhos extraídos foram feitos ensaios para análise da pega e endurecimento iniciais (PEM e PEC), resistência à compressão aos 7 e 28 dias de idade (NBR 5739 da ABNT), absorção, volume de vazios permeáveis e massa específica<sup>(79)</sup>. Além destes ensaios foram realizados os de permeabilidade segundo a metodologia proposta por Dantas e Tango<sup>(26)</sup>. Os resultados destes ensaios se encontram comentados nos próximos itens.

#### 5.5.3.1. Compactação

A compactação do material, avaliada pelos resultados de absorção após imersão, volume de vazios permeáveis e massa específica obtidos pelo ensaio da ASTM<sup>(79)</sup> (Tabela 5.16.), mostrou uma tendência inversa em relação ao concreto projetado com aditivos à base de carbonatos. Assim, a compactação tendeu a ser menor para ângulos de projeção cada vez maiores em relação à horizontal.

Este resultado pode ser justificado pelo fato dos aditivos à base de aluminatos serem aceleradores de pega. Assim, caso se tenha ou não um maior nível de reflexão para ângulos mais próximos dos 90° em relação à horizontal, o maior tempo para

o preenchimento de uma mesma espessura de concreto projetado não proporcionará uma maior compactação do material, como ocorreu com os aditivos à base de carbonatos (item 5.5.2.3.), pois as camadas inferiores já terão endurecido o suficiente para evitá-lo.

A menor compactação obtida para os maiores ângulos de projeção em relação à horizontal pode ser, neste caso, explicada pela menor energia de compactação oferecida pelo jato de concreto quando dirigido para cima.

TABELA 5.16: Análise da compactação do concreto projetado com aditivos à base de aluminato segundo o ângulo de projeção.

PROPRIEDADE	ÂNGULO DE PROJEÇÃO COM A HORIZONTAL		
	0°	45°	90°
ABSORÇÃO APÓS IMERSÃO (%)	7,6	7,8	8,6
VOLUME DE VAZIOS PERMEÁVEIS (%)	16,2	16,5	17,9
MASSA ESPECÍFICA (g/cm <sup>3</sup> )	2,13	2,12	2,08

#### 5.5.3.2. Pega e resistências iniciais

Para a análise da pega e endurecimento iniciais, as placas foram acompanhadas nas primeiras cinco horas com os ensaios do Penetrômetro de Meynadier (PEM) e do Penetrômetro de Energia Constante (PEC).

Os resultados obtidos nestes ensaios se encontram apresentados na Figura 5.20. Ao contrário do ocorrido com a

utilização dos aditivos à base de carbonato, o comportamento do concreto se mostrou muito semelhante para as três direções de projeção.

A ocorrência deste comportamento poderia indicar uma independência da ação do aditivo acelerador de pega em relação à maior ou menor compactação do material, ao contrário do aditivo à base de carbonatos. Isto porque, a menor compactação obtida junto ao teto não implicou numa perda de desempenho sensível do material nesta situação.

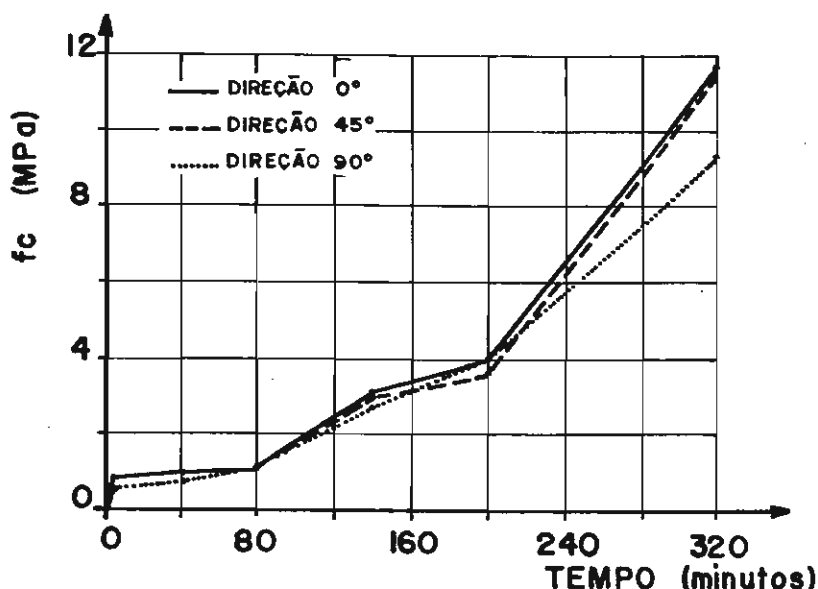


FIGURA 5.20: Resistências iniciais para as três direções de projeção obtidas com o uso de aditivos à base de aluminato.

#### 5.5.3.3. Resistência à compressão

Da mesma forma que o ocorrido com o concreto projetado com aditivos à base de carbonatos, o desempenho nas primeiras idades se manteve para a resistência à compressão a maiores idades quando da utilização de aditivos à base de aluminato.



Como se pode observar pelos resultados apresentados na Tabela 5.17., a resistência à compressão se manteve constante para todos os ângulos de projeção (testes de hipótese A e B do anexo 10). Isto pode vir a corroborar a hipótese de que o desempenho com relação à pega e endurecimento do concreto projetado, quando da utilização de aditivos à base de aluminato, não guarde uma relação tão estreita com a compactação do material como a do aditivo à base de carbonato.

TABELA 5.17: Influência do ângulo de projeção na resistência à compressão axial do concreto projetado com aditivo à base de aluminato.

ÂNGULO DA DIREÇÃO DE PROJEÇÃO COM HORIZONTAL	RESISTÊNCIA MÉDIA À COMPRESSÃO AXIAL (MPa) (NBR 5739 DA ABNT)			
	9 DIAS	C. V.*	28 DIAS	C.V.*
0°	16,2	2,9	20,7	5,1
45°	16,1	5,6	22,0	3,4
90°	16,8	1,4	20,7	6,0

\* Coeficiente de variação

#### 5.5.3.4. Permeabilidade

As placas referentes à projeção na parede e no teto tiveram quatro corpos de prova extraídos para a determinação do coeficiente de permeabilidade cada uma. Dois deles foram extraídos no sentido paralelo à direção do jato de projeção (perpendicular à placa) e os outros dois foram extraídos no sentido ortogonal ao jato (paralelo à camadas de concreto da placa).

O objetivo era evidenciar o efeito negativo da laminação na permeabilidade do material e, conseqüentemente, na

durabilidade do mesmo, o que ficou comprovado pelos resultados apresentados na Tabela 5.18. Estes resultados, medidos aos 28 dias de idade, evidenciam uma laminação que possivelmente se originou devido ao alto teor de aditivo empregado.

Com estes resultados percebe-se que a água tem um caminho preferencial de percolação pelas camadas de concreto projetado, qual seja o paralelo às camadas de projeção. Obviamente, qualquer falha de execução das camadas proporcionará a passagem de água de um lado a outro da mesma percorrendo o caminho mais fácil.

TABELA 5.18: Resultados obtidos para o coeficiente de permeabilidade do concreto projetado

POSIÇÃO DA PLACA	SENTIDO DA AVALIAÇÃO	COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE (cm/s)
PAREDE	PERPENDICULAR ÀS CAMADAS	$< 10^{-11}$ $< 10^{-11}$
	PARALELO ÀS ÀS CAMADAS	$9,0 \times 10^{-8}$ $3,5 \times 10^{-10}$
TETO	PERPENDICULAR ÀS CAMADAS	$< 10^{-11}$ $< 10^{-11}$
	PARALELO ÀS ÀS CAMADAS	$1,4 \times 10^{-8}$ $< 10^{-11}$

#### 5.5.4. O controle do concreto segundo a direção de projeção

Já foi dito que "por diversos fatores, o concreto projetado no teto, por exemplo na abertura de obras escavadas, freqüentemente apresenta menores resistências do que aquele que é aplicado em superfícies verticais, como as paredes laterais dos túneis ou placas. Este fator é comumente ignorado na amostragem" (118).

Pelos resultados aqui apresentados percebe-se que essa afirmação não é uma verdade absoluta. No caso da utilização de aditivos à base de carbonatos obteve-se até uma melhora no desempenho do material. Este fato pode ser considerado como uma referência porque as condições de projeção não foram alteradas para se possibilitar projeções no teto, o que nem sempre acontece na prática onde é comum o aumento do teor de aditivo e diminuição da intensidade de umidificação. Com isto teria-se uma redução nestes valores o que tenderia a uniformizá-los.

Já no caso dos aditivos à base de aluminatos, não se obteve diferenças significativas com relação ao desempenho. Também não se tem conhecimento de sua utilização prática no Brasil, que não seja na via úmida. Por isso, torna-se difícil prever o comportamento prático da mão-de-obra. No entanto, devido à sua intensa ação quanto à pega, transmite uma maior segurança ao mangoteiro, que não deve ver necessidade de alterar o teor do material.

Não se espera, com este estudo, indicar como totalmente desnecessária a avaliação do concreto projetado no teto durante a amostragem para o controle da qualidade, mesmo porque não se pode dizer que ele foi conclusivo. Seria necessário para isso se proceder a uma avaliação mais extensa dentro do próprio túnel para estabelecer correlações mais confiáveis entre a resistência de teto e da parede vertical. No entanto, pode-se afirmar que, mantidas as mesmas condições de projeção, o concreto projetado no teto é, no mínimo equivalente ao da parede, quando se utiliza aditivos à base de aluminatos, ou até mesmo superior, quando da utilização de aditivos à base de carbonatos.

## 5.6. AVALIAÇÃO DO CONCRETO PROJETADO ATRAVÉS DE RESULTADOS DE CONTROLE DE OBRAS DE TÚNEIS

Foram tomadas duas obras como referências para a análise dos resultados. A primeira, que tem um caráter histórico importante, pois foi a primeira a ter resultados documentados no Brasil, foi a da construção da Ferrovia do Aço<sup>(5)</sup>. A segunda foi a construção dos túneis da Extensão Norte do Metrô de São Paulo no Tucuruvi a cargo da CBPO, em cujo canteiro foi instalado o laboratório de campo onde se realizaram os ensaios descritos neste capítulo. Os resultados do acompanhamento da primeira obra se encontram descritos no Anexo 11 e os resultados da obra do Metrô no Anexo 12.

As especificações da obra da Engefer se encontram descritas no item 2.4. As especificações para a obra do Metrô do Tucuruvi são as seguintes:

- a. Resistência média à compressão ( $f_{cj}$ ): 4,25 MPa a seis ou dez horas; 10,20 MPa a um dia; 16,15 MPa a três dias e 24,50 MPa a vinte e oito dias de idade.
- b. Resistência característica à compressão ( $f_{ck}$ ): 18,0 MPa a vinte e oito dias.

### 5.6.1. Caracterização das amostragens

As amostras utilizadas para as análises deste item se encontram detalhadas na Tabela 5.19. O critério adotado para a separação destas amostragens tinha por objetivo a obtenção de lotes homogêneos.

O processo de projeção denominado como de via seca tradicional. O sistema de umidificação utilizado foi descrito no item 3.3.4.

TABELA 5.19: Caracterização das amostragens obtidas no acompanhamento de obras.

AMOSTRA-GEM	CARACTERÍSTICAS DO PROCESSO DE PROJEÇÃO	TRAÇO/ Ømax/ consumo de cimento por m <sup>3</sup> de conc.	TEOR/ DOSAGEM/ TIPO/ MARCA DO ADITIVO	PERÍODO	VOLUME (m <sup>3</sup> )	LAB.
PRIMEIRA	Via seca tradicional (Ferrovia do aço)	1:1,40:2,12 19 mm 500 kg/m <sup>3</sup>	2% a 5% ignorada ignorada	de 03/05/81 a 03/02/82	±4000	ign.
SEGUNDA	Via seca tradicional (Metrô de SP)	1:1,92:1,92 9,5 mm 450 kg/m <sup>3</sup>	3% manual REAX	de 02/09/90 a 30/10/90	±210	BAUER
TERCEIRA				de 02/09/91 a 30/10/91		
QUARTA	Via seca com injeção de água sob pressão (Metrô de SP)	1:2,13:1,75 9,5 mm 450 kg/m <sup>3</sup>	3% manual OTTO	de 02/10/91 a 28/11/91	±740	BAUER
QUINTA						VISO
SEXTA				de 29/11/91 a 13/12/91	±250	BAUER
SÉTIMA						VISO
OITAVA				de 17/12/91 a 31/01/92	±630	BAUER
NONA						VISO
DÉCIMA				de 04/02/92 a 22/03/92	±380	BAUER
DÉCIMA PRIMEIRA						VISO
DÉCIMA SEGUNDA	Via seca com injeção de água sob pressão com e sem robô (Metrô de SP)	1:2,21:2,14 9,5 mm 415 kg/m <sup>3</sup>	3% dosador e manual OTTO	de 23/03/92 a 01/06/92	±500	BAUER
DÉCIMA TERCEIRA						VISO

A dosagem do aditivo foi executada pelo sistema manual. e os teores fornecido correspondem ao valor percentual em relação à massa de cimento. Todos os aditivos utilizados foram do tipo carbonato em pó. O aditivo utilizado no caso da obra da Ferrovia do Aço não foi especificado. Porém, pode-se presumir por informações verbais obtidas junto a técnicos que trabalharam na obra, que era à base de carbonato fornecido em pó.

O processo de projeção via seca com utilização da injeção de água sob pressão. Nele a pressão de água variava dentro da faixa de 2 a 2,5 MPa de acordo com as condições de umidade da mistura seca fornecida. No caso da obra do Metrô foram utilizadas máquinas de projeção do tipo CP-6 e CP-8 da Este Industrial e Comercial Ltda. com sistema de rotor de câmaras.

O robô utilizado na execução do concreto projetado correspondente à décima segunda e décima terceira amostragens era do tipo combo, produzido pela Putzmeister. O sistema de alimentação utilizado nestas amostragens era do tipo contínuo de esteiras com dosador produzido pela própria construtora. Ele consistia basicamente, num silo com uma abertura inferior que dosava o aditivo em função da largura desta abertura.

#### **5.6.2. Resultados obtidos nas amostragens**

Na Tabela 5.20. se encontram relacionados os resultados obtidos para a resistência à compressão média aos 28 dias de idade (NBR 5739 DA ABNT). Em conjunto se encontram apresentados o desvio padrão, a variância e o número de amostras analisadas.

Na Tabela 5.21. se encontram relacionados os resultados obtidos para a resistência à compressão média às 10 horas de idade (NBR 5739 DA ABNT), que serão utilizados no estudo da

influência da marca do aditivo. Em conjunto se encontram apresentados o desvio padrão, a variância e o número de amostras analisadas.

TABELA 5.20: Resultados de resistência à compressão aos 28 dias de idade obtidos para cada uma das amostragens.

AMOSTRAGEM	RESISTÊNCIA (MPa)	DESVIO PADRÃO	VARIÂNCIA	AMOSTRAS
PRIMEIRA	20,45	4,09	16,75	20
SEGUNDA	27,40	8,28	68,63	7
TERCEIRA	30,23	7,18	51,58	6
QUARTA	29,39	4,63	21,47	41
QUINTA	35,42	5,44	29,57	18
SEXTA	27,65	3,26	10,66	13
SÉTIMA	29,59	4,42	19,54	8
OITAVA	29,73	5,91	35,00	24
NONA	32,41	6,71	44,97	10
DÉCIMA	28,94	4,97	24,75	21
DÉCIMA PRI.	28,10	2,99	8,93	15
DÉCIMA SEG.	29,76	6,33	40,06	19
DÉCIMA TER.	30,53	5,72	32,75	7

TABELA 5.21: Resultados de resistência à compressão às 10 horas de idade obtidos na sexta à nona amostragem.

AMOSTRAGEM	RESISTÊNCIA (MPa)	DESVIO PADRÃO	VARIÂNCIA	AMOSTRAS
SEXTA	13,27	2,12	4,49	12
SÉTIMA	16,00	4,11	16,89	7
OITAVA	14,26	2,89	8,36	20
NONA	14,81	1,98	3,96	10

### 5.6.3. Análise dos resultados

#### 5.6.3.1. Perspectiva histórica

O primeiro fato que se pode constatar a partir da análise dos resultados obtidos para as duas obras (Ferrovia do Aço e Metrô de São Paulo) é uma nítida evolução a nível de desempenho quanto a resistência à compressão. A um nível de 1 % de significância<sup>(145)</sup> (teste de hipótese A do Anexo 13), pode-se afirmar que a resistência média à compressão do concreto no início da década de 90 é maior que a do início da década de 80. Isto vale tanto quando se compara a primeira amostragem (1981 a 1982) com a segunda amostragem (1990) ou com a terceira amostragem (1991) (Tabela 5.19.). O aumento na resistência à compressão (Tabela 5.20.) foi de 34 %, quando comparado com a amostragem de 1990, e de 48 %, quando comparado com a amostragem de 1991. Isto ocorreu concomitantemente a uma redução de aproximadamente 11 % no consumo de cimento para ambos os casos.

As razões que levaram a esta melhoria no desempenho do concreto projetado via seca são difíceis de serem apontadas pelo fato dos registros da época serem muito restritos. Uma das possíveis causas pode residir na intensidade de umidificação da mistura seca por parte do mangoteiro. Como já foi apresentado no item 5.2.2.1., uma maior umidificação da mistura seca pode conduzir à obtenção de um aumento significativo na resistência à compressão.

Pode-se concluir deste fato que o consumo de cimento não é um fator preponderante para a obtenção de uma maior resistência à compressão no concreto projetado.



### 5.6.3.2. Influência da injeção de água sob pressão

Para a análise da influência da injeção de água sob pressão na pré-umidificação do concreto projetado (via semi-úmida), foram tomados para a análise dois grupos de amostragens. No primeiro grupo se encontram a segunda e a terceira amostragem (Tabela 5.19.) que caracterizam o concreto projetado via seca com umidificação convencional. No segundo grupo é composto pela série de amostragens que vai da quarta à sétima amostragem. Apesar de algumas variações no traço, estes dois grupos guardam entre si uma série de semelhanças como o mesmo tipo e consumo de cimento, os mesmos agregados e foram executados com os mesmos equipamentos e pelo mesmo pessoal dentro de uma mesma obra em períodos de tempo muito próximos (da terceira à sétima amostragem foram consumidos apenas dois meses e meio).

A primeira análise realizada teve por objetivo obter uma comparação mais poderosa entre os dois sistemas de umidificação. Assim, comparou-se inicialmente a segunda e a terceira populações para se avaliar se podiam ser consideradas como amostragens diferentes de uma mesma população. Isto é, se apesar da diferença de um ano entre a execução de uma e outra poderíamos considerá-las como semelhantes. Obteve-se, na comparação das médias feita no teste de hipótese B do Anexo 13, a constatação de que se pode considerá-las como equivalentes a um nível de significância de 0,5 %<sup>(145)</sup>. No teste de hipótese C obteve-se a constatação de que se pode considerar as variâncias como semelhantes a nível de 1 % de significância<sup>(145)</sup>. Desta forma utilizaremos a seguinte equação, proposta por Helene<sup>(134)</sup>, para a obtenção da variância da população composta pela segunda e terceira amostragem:

$$s_c^2 = \frac{sc_1^2(n_1-1) + sc_2^2(n_2-1) + \dots + sc_k^2(n_k-1)}{(n_1-1) + (n_2-1) + \dots + (n_k-1)} \quad (3)$$

onde:

$s_c$  = desvio padrão do processo de produção e ensaio do concreto;

$s_{c_i}$  = desvio padrão do processo de produção e ensaio do concreto obtido para a amostra  $i$ ;

$n_i$  = número de exemplares da amostra  $i$ .

Assim, a variância do concreto projetado com umidificação convencional passa a ser 62,75.

Da mesma forma, foi feita a análise para a quarta e quinta amostragem que, na verdade, consistem em amostragens diferentes feitas na mesma população, só que por laboratórios diferentes. Para este caso a variância passa a ser 31,65. Através do teste de hipótese D do Anexo 13 comprovou-se que a variância do concreto projetado com umidificação normal é duas vezes maior que o daquele que utiliza pré-umidificação com injeção de água sob pressão a um nível de significância de 10 %.

Raciocínio semelhante foi feito com a sexta e sétima amostragens. Obteve-se, através da equação (3), a variância de 14,93 para esta população. Através do teste de hipótese E do Anexo 13, comprovou-se que, a um nível de significância de 5 %, a projeção de concreto com umidificação convencional apresenta uma variância equivalente a 4,2 vezes a variância obtida com a pré-umidificação com injeção de água sob pressão.

Tais constatações estão ligadas, naturalmente, a maior homogeneidade proporcionada pela injeção de água sob pressão, que supre as limitações da umidificação convencional, conforme foi descrito nos itens 3.3.4. e 3.4.

Este sistema pode ser apontado assim como um dos grandes

fatores de eliminação de um dos "defeitos" que mais depuseram contra o concreto projetado: a falta de homogeneidade. Com isto o coeficiente de variação esperado cai dos 30 % para valores em torno da metade deste, dando maior confiabilidade ao material.

#### 5.6.3.3. Influência da marca do aditivo acelerador

Para analisar a influência da marca do aditivo sobre as propriedades do concreto projetado foram tomadas a sexta, a sétima, a oitava e a nona amostragem. As duas primeiras se referem ao aditivo de um fabricante e as duas outras a outro. Os resultados obtidos para a resistência à compressão aos 28 dias se encontram apresentados na Tabela 5.20. e os relativos às 10 horas na Tabela 5.21. Através de vários testes de hipótese (item F do Anexo 13) comprovou-se não haver diferença significativa de desempenho entre os dois materiais. Isto tanto à resistência à baixa idade como a maiores. A variância não mostrou nenhuma tendência predominante de comportamento segundo a marca de aditivo utilizado.

Com isto pode-se concluir que não há porque não considerar tais produtos como equivalentes, o que favorece tremendamente o produtor que terá. Deve-se lembrar que estes resultados não abrangem todo o problema. A pega, propriedade fundamental para que se evite os deslocamentos, por exemplo, não foi contemplada nesta análise.

#### 5.6.3.4. Influência da mecanização do processo

Para se analisar a influência da utilização de um sistema de projeção mecanizado dotado de braço mecânico (robô), sistema de alimentação contínua e dosador de aditivo sobre as

propriedades do concreto projetado foram tomadas a décima, a décima primeira, a décima segunda e a décima terceira amostragem. As duas primeiras se referem ao sistema convencional de projeção e as duas outras ao sistema mecanizado. Os resultados obtidos para a resistência à compressão aos 28 dias e respectivas variâncias se encontram apresentados na Tabela 5.20. Através de vários testes de hipótese (item G do Anexo 13) comprovou-se não haver diferença significativa de desempenho entre os dois processos a nível de resistência à compressão, tendo-se aumentado a variância significativamente (10%) com a mecanização.

Ao contrário do que se pode supor, esta constatação não depõe contra o sistema mecanizado. Um dos fatores que podem ter levado a este resultado é o fato do sistema ter sido incorporado aos poucos, o que faz com que os resultados apresentados como de sistema mecanizado contém uma parte obtida pelo sistema convencional, o que hoje é impossível de discretizar. Neste período também está incluída a fase de adaptação da mão-de-obra a um sistema que não se teve notícia de ser utilizado anteriormente no Brasil para o concreto projetado via seca. Assim, se as propriedades não se alteraram tanto no sentido de prejudicar como no sentido de melhorar o desempenho do material, são inegáveis as vantagens obtidas com o processo mecanizado como o aumento da produção e da segurança da mão-de-obra, as quais se encontram detalhadas no item 3.2.6.

Através dos vários aspectos ligados à influência do processo de projeção do concreto nas suas propriedades discutidos neste capítulo e, somando-se o conhecimento das características específicas deste material levantadas no Capítulo IV, foi elaborado um pequeno apanhado de recomendações para o seu controle, o qual é o tema do próximo capítulo.

## **CAPÍTULO VI: RECOMENDAÇÕES PARA O CONTROLE DO PROCESSO DE PROJEÇÃO DO CONCRETO**

### **6.1. INTRODUÇÃO**

Como foi visto no Capítulo IV, o concreto projetado possui uma série de características intrínsecas. Estas características, por sua vez, são dependentes do próprio processo de projeção como a existência da reflexão, a liberação de poeira, a ocorrência de deslocamentos e, em alguns casos, a falta de homogeneidade.

Já no Capítulo V, foram analisados experimentalmente, alguns aspectos da influência do processo de projeção nas propriedades do concreto projetado via seca. Entre elas a umidificação, os aditivos aceleradores de pega, a velocidade de projeção, a direção de projeção e, de permeio, os equipamentos e a mão-de-obra.

Os equipamentos tem sua influência constatada através da variação imposta às propriedades do material obtida com a utilização de um bico largo ou afunilado, ou com a aplicação do sistema de pré-umidificação com injeção de água sob pressão ou mesmo quando se percebe a necessidade de utilização de dosadores de aditivo.

A mão-de-obra, por sua vez, deve ser tratada com muito cuidado pois ela é quem vai controlar uma série de fatores do processo que interferem nas propriedades do material. Isto ocorre segundo dois aspectos principais: as características controladas pelo mangoteiro e aquelas controladas pelo encarregado do serviço de projeção. Ao mangoteiro é atribuída a responsabilidade de controle da umidificação da mistura, da velocidade de projeção através do controle da vazão de ar comprimido e da direção de projeção além de evitar o surgimento dos defeitos típicos do

concreto projetado como sombras, laminação, oclusão de material refletido, etc. O encarregado tem, além da responsabilidade de controle geral da equipe de projeção, a tarefa de zelar pela homogeneidade das condições de projeção como a garantia de manutenção do equipamento utilizado, a verificação da homogeneidade e intensidade correta de fornecimento do ar comprimido, da mistura seca, da água e do aditivo acelerador. Também controla aspectos importantes ligados à continuidade do serviço como a pré-hidratação e os procedimentos a serem seguidos no caso das interrupções dos serviços por entupimentos ou quaisquer outros tipos de falhas.

A seguir estão descritos os cuidados a serem tomados no processo de projeção, tomando-se por base os aspectos aqui apresentados. Para facilitar a exposição destes cuidados, os mesmos foram divididos em três grandes grupos. No primeiro estão os cuidados a serem tomados antes de se dar início ao serviço de projeção propriamente dito, aqui chamados cuidados anteriores à projeção. No segundo grupo estão aqueles que devem ser observados durante a projeção. Por fim, o terceiro grupo é composto por aqueles relacionados à obtenção das propriedades especificadas e o controle dos defeitos constatados após a realização da projeção como a reflexão exagerada, o deslocamento, a variância elevada, a laminação e a baixa compactação, o que foi aqui denominado controle do processo após a projeção.

## **6.2. CUIDADOS ANTERIORES À PROJEÇÃO**

### **6.2.1. Formação e qualificação da mão-de-obra**

Da equipe de operários destinada à execução do serviço de projeção especificamente, destacam-se como membros chave o encarregado e o mangoteiro, os quais devem receber uma

atenção especial quanto à sua formação e qualificação.

No entanto, não se deve excluir nenhum de seus membros do processo de formação e qualificação, ficando a cargo do engenheiro responsável pelo trabalho a decisão quanto ao nível e a intensidade a ser adotado para cada um deles. A seguir se encontra uma proposta de roteiro a ser seguido nesta formação, no qual estão priorizadas a formação do mangoteiro e do encarregado.

#### 6.2.1.1. Palestras e aulas práticas

A qualificação da mão-de-obra tem por objetivo a conscientização dos cuidados a serem tomados para que se garanta a qualidade de execução do concreto projetado em túneis. Para isso pode-se utilizar de expedientes como a realização de uma palestra e de uma aula prática baseadas no seguintes tópicos fundamentais:

Para a palestra:

- a. Características do concreto projetado
- b. Descrição do processo; englobando materiais, mistura, transporte, equipamentos e técnica de projeção.
- c. Problemas existentes no processo: variação de propriedades, reflexão, sombra, limpeza das camadas.
- d. Vantagens da boa execução

Para a aula prática:

- a. Como realizar uma projeção correta: início e término, regulagem do equipamento, direcionamento do jato e seqüência de preenchimento de placas ou estruturas.
- b. Regras de segurança no trabalho.

#### 6.2.1.2. Roteiro para qualificação do mangoteiro

O roteiro de qualificação do mangoteiro aqui apresentado está baseado no disposto no projeto de norma 18:306.03-002 da ABNT "Concreto Projetado - Procedimento para qualificação de mangoteiro"<sup>(148)</sup> e do ACI<sup>(88)</sup>.

O processo de qualificação do mangoteiro poderia se dividir em três etapas sendo a primeira denominada instrução, a segunda teste prático e a terceira a prova.

Na instrução, o mangoteiro deve receber a formação necessária ao pleno desenvolvimento de suas tarefas. Isto ocorre com a realização das palestras e aulas práticas descritas no item 6.2.1.1.

O teste prático tem por objetivo fornecer uma avaliação da qualificação do mangoteiro, verificando o aproveitamento durante as instruções. Também poderá ser utilizado para a avaliação de candidatos a serem contratados. É neste teste prático em que se concentram as recomendações da norma nacional<sup>(148)</sup> e americana<sup>(88)</sup>.

Uma crítica comum ao teste prático é o elevado custo envolvido<sup>(149)</sup>. Nos Estados Unidos isto fica mais evidente pelo fato de se utilizar painéis especiais com armadura simulada e ensaios sofisticados como a realização de radiografias das mesmas. Durante o projeto de pesquisa EPUSP/CBPO/IPT-01<sup>(63)</sup> foi desenvolvido um teste prático simples e bem mais barato. Este teste consiste na moldagem de duas placas com um intervalo de tempo não inferior a 15 minutos entre ambas. O mangoteiro deve ser instruído para que realize as duas moldagens nas mesmas condições. Para tal deverá ser fornecido um anteparo onde o mangoteiro verificará as condições de projeção e deverá se responsabilizar pelo ajuste de vazão de água e ar comprimido.

Na moldagem das placas deverá ser observado se o mangoteiro



obedece a seqüência indicada no item 6.3.4.5.

No concreto projetado serão executados os ensaios de determinação do fator água/materiais secos (H)<sup>(124)</sup>, de determinação do índice de reflexão<sup>(123)</sup>, de determinação da massa específica aparente do concreto fresco<sup>(53)</sup> e de determinação da consistência<sup>(125)</sup>.

A avaliação do aproveitamento do mangoteiro é, segundo Crom<sup>(149)</sup>, o ponto de maior dificuldade de medição e quantificação. A determinação dos próprios limites a serem obedecidos é muito difícil e dependerá do critério do próprio examinador, o qual deverá externá-los ao mangoteiro antes da realização do teste, obviamente. Como ponto de partida poderão ser tomados como valores limites admissíveis os constantes da Tabela 6.1.

TABELA 6.1: Limites admissíveis para avaliação do aproveitamento do mangoteiro.

PROPRIEDADE	VALOR LIMITE
Reflexão	< 35% em projeção horizontal
Fator água/materiais secos (H)	máxima diferença de H entre duas placas = 1%
Massa específica aparente do concreto fresco	máxima diferença entre duas placas = 2%
Consistência	50 ± 20

A prova consiste num teste escrito ou oral a que se deve se submeter o mangoteiro para avaliar seus conhecimentos gerais sobre o assunto. No projeto de norma da ABNT<sup>(148)</sup>, mais especificamente em seus apêndices A, B e C, existe uma série de questões propostas para esta prova abordando conceitos gerais, ou ligados à utilização do concreto projetado em reparos estruturais ou em túneis. Obviamente, também é recomendável que se insira algumas questões relativas ao

trabalho específico a que se candidata o mangoteiro, formuladas pelo próprio examinador.

A prova não deverá ser ministrada por escrito, como indicado no projeto de norma, uma vez que o pessoal ligado a este tipo de trabalho nem sempre é alfabetizado. Deve-se facilitar ao máximo a compreensão destes testes por parte do mangoteiro, como ocorre nos EUA, onde são preparados alguns questionários em espanhol<sup>(149)</sup>.

Deve-se estabelecer então um critério de aproveitamento ou aprovação do operário. Para tal, deve-se estipular o número de questões mínimas a serem efetuadas. A aprovação do candidato deve ser vinculada ao teste prático, ficando para o questionário a função de eliminar empates ou refinar o julgamento.

#### 6.2.1.3. Roteiro para qualificação do encarregado

Não existe nenhuma norma ou recomendação que procure orientar a qualificação do encarregado de projeção. Isto porque ele é, normalmente, um operário de grande experiência no assunto, a qual é freqüentemente formada dentro da própria empresa. No entanto, esta atividade é de importância fundamental para o bom andamento do processo de projeção. Portanto, é recomendável que este profissional passe pelo processo de formação e qualificação de mangoteiro, o que lhe dará melhores condições de avaliação do trabalho do subordinado e oportunidade de eliminação de vícios profissionais.

O roteiro para a qualificação específica do encarregado poderia se desenvolver nos mesmos moldes do destinado ao mangoteiro (item 6.2.1.2.), isto é, percorrendo as mesmas etapas.

Na instrução, deveriam constar tópicos específicos da sua

atribuição, como por exemplo, a organização e o funcionamento do processo de projeção do concreto

O teste prático tem por objetivo fornecer uma avaliação prática da qualificação do encarregado verificando o seu aproveitamento durante as instruções. Também poderá ser utilizado para a avaliação de candidatos a serem contratados.

Durante a realização do teste prático, o candidato a encarregado deverá ser examinado quanto ao conhecimento nos seguintes tópicos:

- a. Avaliação visual dos materiais (cimento aventado, agregado contaminado, etc.).
- b. Ajuste do equipamento
- c. Início de operação
- d. Avaliação do mangoteiro
- e. Fim de operação
- f. Limpeza do equipamento

O candidato a encarregado deverá ser avisado de que está sendo avaliado em cada um dos itens anteriormente descritos quando da realização do teste. Em cada um destes itens deverá receber um conceito entre bom, médio e ruim, feito por avaliador competente. A cada um destes conceitos deverá ser atribuído uma certa quantia de pontos, qual seja, 3 ou 2 ou 1 respectivamente. O candidato será considerado aprovado quando alcançar um total de pontos não inferior a 10 e não obtiver o conceito ruim em mais de dois itens.

O encarregado poderá ser submetido a uma prova oral, conforme o indicado no item 6.2.1.2 para o mangoteiro, acrescida de perguntas que o avaliador julgar pertinentes o que possibilita desempates no caso de seleção e uma avaliação mais definida do mesmo.

### 6.2.2. Equipamentos

Os equipamentos que compõem o sistema para a projeção de concreto por via seca são, basicamente, uma máquina de projeção, equipamentos de produção da mistura seca (betoneira), alimentadora, dosador de aditivo, bomba d'água e compressores. Além destes equipamentos, serão comentados com maiores detalhes alguns aspectos da pré-umidificação como o bico e o sistema de injeção de água, fundamentais para a otimização do processo (item 5.6.3.2.).

#### 6.2.2.1. Betoneira

As betoneiras utilizadas para a mistura seca são, geralmente, as de eixo horizontal ou inclinado, sendo que as primeiras apresentam melhor desempenho. Devem ter capacidade de produção compatível com a demanda da frente de serviço. Para a otimização do processo e minimização de perdas, a betoneira deve possuir caçamba de alimentação.

No caso de grandes produções ou nas situações em que se deseja uma simplificação do processo, podem ser utilizados caminhões-betoneira. Neste caso, deve-se tomar cuidados para se evitar a pré-hidratação, uma vez que os volumes produzidos são grandes e pode haver grande distância entre a usina e a obra. Outro problema que pode ocorrer é a falta de eficiência do caminhão betoneira na homogeneização da mistura seca. Isto tem maior risco de ocorrência no caso das usinas que não possuem sistema de pré-mistura, o que facilita o trabalho do caminhão betoneira.

#### 6.2.2.2. Alimentação contínua

A utilização da alimentação contínua se justifica pela necessidade de se garantir um fluxo constante de mistura seca o que possibilita uma dosagem controlada de aditivo, quando utilizado em pó. Além disso, se obtém uma maior produtividade com redução nas perdas de material.

Qualquer que seja o tipo de alimentadora contínua utilizada, esta deve ter um reservatório com capacidade que garanta o fornecimento da mistura seca. Da mesma forma, a vazão de mistura por ela proporcionada deve ser no mínimo igual à produtividade dos equipamentos por ela servidos.

Caso o lay-out da obra possibilite, a alimentação direta máquina de projeção, deve-se dar preferência a esta opção pela praticidade da mesma. Além disso, nesta situação, têm-se garantido o teor e a homogeneidade da mistura do aditivo acelerador de pega em pó, uma vez que sua dosagem pode ser feita diretamente na betoneira. O grande cuidado que se deve ter, neste caso, é o de evitar a pré-hidratação.

#### 6.2.2.3. Dosador de aditivo

O dosador de aditivo em pó deve ser constituído, basicamente, de um silo metálico com capacidade mínima igual a 1,5 saco de aditivo. Este silo deve ser revestido internamente com papelão ou plástico de modo a evitar o contato direto das paredes com o pó do aditivo, reduzindo assim o processo de corrosão. Exemplos de dosadores de aditivos em pó se encontram apresentados no item 3.2.4.

A utilização de dosadores é fundamental por dois aspectos. Em primeiro lugar porque, da precisão com que é dosado o aditivo depende o desempenho do material (item 5.3.2.). Em segundo lugar, quando se utiliza o dosador, reduz-se o

contato do operário com um material que traz riscos à saúde<sup>(150)</sup>.

#### 6.2.2.4. Bomba de água

Para processos usuais, a bomba d'água deve ser tal que forneça uma vazão na faixa de cinco a vinte litros por minuto sob pressão de no mínimo 100 KPa, superior à pressão de ar do mangote. Entretanto, para obter-se uma umidificação otimizada do fluxo de mistura seca, que passa no mangote, é necessário que a água penetre nele a elevadas pressões, da ordem de 2 a 4 MPa. Para tal, são necessários sistemas especiais de injeção de água sob pressão.

#### 6.2.2.5. Máquina de Projeção

A escolha da máquina de projeção começa por selecionar o tipo de processo de projeção, se via seca ou úmida, pois eles não devem ser encarados como totalmente equivalentes. Alguns dos aspectos a serem levados em conta nesta seleção se encontram detalhados no item 3.4.

Outro fator importante a ser analisado é a disponibilidade do mesmo, isto é, deve-se verificar quais são os equipamentos que a empresa já possui e aqueles que se encontram disponíveis no mercado, dando preferência aos primeiros naturalmente. No caso do Brasil, o único tipo de máquina que conta com fabricação nacional é o de via seca de rotor de câmaras como o apresentado na Figura 3.11.

Outro critério de escolha é a capacidade de produção do equipamento, que deve ser compatível com as condições da obra.

Deve-se proceder a um programa constante de manutenção da máquina de projeção, conforme o indicado no item 3.3.2. para que assim se obtenha um melhor andamento no processo.

#### 6.2.2.6. Compressor de ar

O ar comprimido é um dos principais responsáveis pela garantia da velocidade de projeção através da regulagem da sua vazão.

No item 3.2.5. estão descritas as recomendações do ACI<sup>(9)</sup> para a vazão de ar comprimido. No entanto, deve-se ter o cuidado de preservar estes valores para a que se tenha um bom funcionamento da máquina de projeção. O maior risco para que isto não aconteça reside no uso incorreto das linhas de ar comprimido, onde são conectados uma série de equipamentos pneumáticos, o que reduz a vazão de ar na máquina de projeção.

#### 6.2.2.7. Sistema de pré-umidificação e bicos

Deverá ser utilizado preferencialmente o sistema de pré-umidificação nas projeções de concreto via seca. Isto tem por objetivo a redução da poeira pelo aumento do tempo de contato no mangote entre a mistura seca e a água. Para tanto, esta última deve entrar no mangote a no mínimo 3 m do bico de projeção. Cabe lembrar que, para otimização do processo como um todo, é importante que a entrada de água ocorra sob elevada pressão.

Para se evitar o problema de diminuição da área útil do mangote provocada pela incrustação de anéis de pasta de cimento e aditivo nas paredes do mesmo (problema agravado com o uso de aditivos líquidos à base de aluminatos e

microsiflica), deve-se limitar a 5 m a distância entre a entrada de água e o bico de projeção, como mostra a Figura 6.1. Além disso, deve-se procurar eliminar todas as irregularidades neste percurso, particularmente comuns nas junções. Estas irregularidades podem reter certas quantidades de material que quando se desprendem, produzem um golpe no mangoteiro. Para que se minimize o efeito de incrustação e entupimento é recomendável que a entrada de aditivo líquido ocorra na água e nunca diretamente no mangote de modo a diminuir a concentração no momento de entrar em contato com o cimento.

O bico deve ter uma forma tronco-cônica, ou seja, afunilado e oferecer uma redução de no mínimo 1/5 e no máximo 1/4 do diâmetro do mangote e um comprimento não inferior a 40 cm, conforme o apresentado na Figura 6.1. Isto tem por objetivo concentrar o jato de concreto diminuindo a reflexão e aumentando a compactação.

### 6.2.3. Dosagem

O último passo a ser dado antes de se iniciar o serviço de projeção propriamente dito é a realização de um estudo de dosagem. A justificativa para isto reside na necessidade de "se conhecer o processo de produção do concreto projetado para que se possa dosá-lo adequadamente"<sup>(6)</sup>.

Outro ponto fundamental é o "conhecimento de todos os requisitos de desempenho a serem atendidos pelo material"<sup>(6)</sup>, definidos em projeto e que devem constar das especificações.

É justamente na etapa de dosagem onde se deve selecionar os materiais a serem utilizados (cimento, agregados e aditivos) e fixadas as características a serem observadas no seu recebimento. Além disso, deve-se realizar aqui a opção pela utilização ou não de concretos projetados especiais.



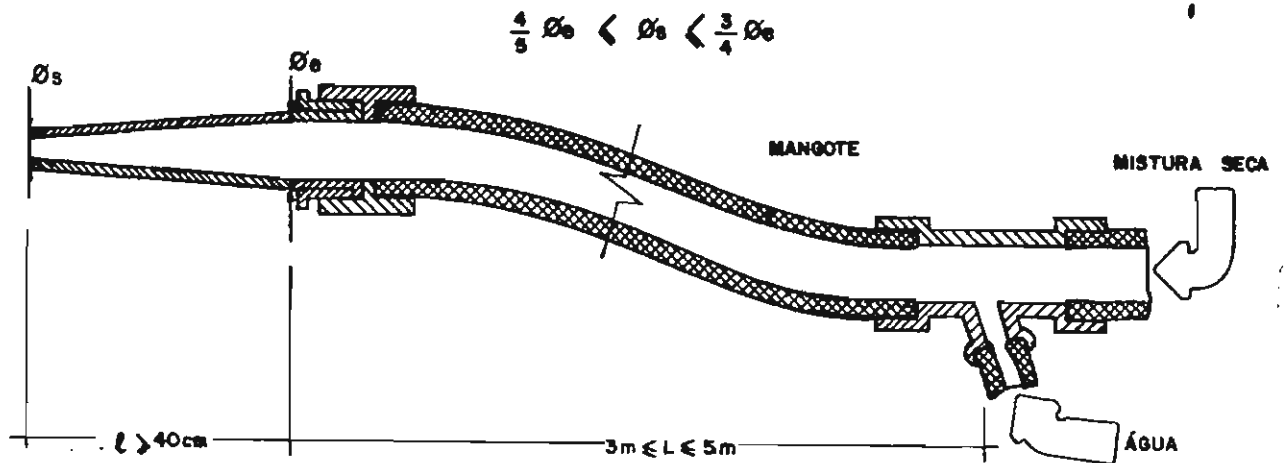


FIGURA 6.1: Esquema de pré-umidificação com afunilamento do bico.

#### 6.2.4. Materiais

Uma vez definidos, os materiais a serem utilizados no processo de projeção, deve-se proceder ao recebimento e armazenamento adequado dos mesmos na obra de modo a garantir as suas qualidades no momento da projeção. A seguir serão feitas algumas recomendações neste sentido, abordando os principais materiais utilizados no concreto projetado: cimento, agregados e aditivos.

Seja qual for o material, deve-se garantir, inicialmente, que os fornecedores tenham previamente comprovado a qualidade de seus produtos, ou que disponham de histórico de bom fornecimento.

#### 6.2.4.1. Cimento

Praticamente não há restrição quanto ao tipo de cimento a ser empregado no concreto projetado<sup>(3)</sup>(12). Um único cuidado que se deve ter é com os cimentos muito finos, como os de alta resistência inicial. Nesses casos pode haver uma maior liberação de pó, dada a maior dificuldade de umedecimento dos materiais de elevada área específica. Quando o teor de umidade da mistura seca é elevado, estes cimentos finos tem a propriedade de se aderirem às paredes das câmaras do rotor produzindo entupimentos e, conseqüentemente, grandes variações de fluxo. Por outro lado, têm a vantagem de diminuir a reflexão, pelo próprio aumento da coesão.

De qualquer forma, todo o cimento que chega à obra deve sofrer uma inspeção, conforme recomenda a boa prática. Deve-se observar se o material entregue está dentro das especificações estabelecidas durante a dosagem.

#### 6.2.4.2. Agregados miúdos

Deve-se garantir que o material entregue se encontra dentro das especificações estabelecidas no processo de dosagem.

É importante que o material esteja isento de graxas, óleos, pedaços de madeira, matéria orgânica e torrões de argila. Deve-se tomar muito cuidado com as graxas e óleos que aumentam o risco de deslocamento. Pedaços de madeira, ou mesmo britas de maiores diâmetros, são grandes agentes causadores de entupimentos.

Já a matéria orgânica, os torrões de argila e o material pulverulento, além de aumentarem a demanda de água, produzem uma grande quantidade de pó durante o processo de projeção.

É muito conveniente que o local de armazenamento tenha

contrapiso de concreto com declividade adequada para evitar acúmulo de água cobertura e ventilação adequada de modo a se obter uma maior constância nas condições de umidade do material, o que facilita o processo de umidificação do material no momento da projeção.

#### 6.2.4.3. Agregados graúdos

Valem aqui as mesmas recomendações feitas para os agregados miúdos.

Os agregados graúdos normalmente utilizados no concreto projetado tem sua dimensão máxima característica restrita a valores entre 4,8 mm e 19,5 mm.

Vale a pena ressaltar o fato de que, quanto maior for a dimensão máxima característica do agregado, maior será o desgaste do equipamento e a intensidade da reflexão.

#### 6.2.4.4. Aditivos aceleradores de pega

Devem ser observadas as mesmas condições de fornecimento estipuladas para os outros materiais, ou seja, conformidade com o especificado durante a dosagem.

O aditivo é o componente do concreto projetado que maior risco apresenta de perda das propriedades e características originais por armazenamento inadequado. Por isso devem ser tomadas uma série de precauções. Para a liberação do uso de aditivos líquidos, por exemplo, deverá ser feito um exame visual prévio de modo a constatar a existência ou não de cristalização. Tal fenômeno é comum quando o aditivo é estocado no inverno e pode produzir entupimentos na bomba dosadora de aditivos e mesmo nas mangueiras.

O armazenamento deve ser feito nas embalagens originais, íntegras e bem vedadas, sendo que a qualquer sinal de contaminação com agentes estranhos deverá ser vedada a utilização do aditivo em questão. As embalagens devem ser armazenadas em local seco, fora do sol e da ação das intempéries.

Aditivos diferentes devem ser identificados e armazenados em locais distintos, de modo a garantir sua correta utilização. É indispensável constar na identificação a data de recebimento do aditivo.

Antes da utilização, os aditivos líquidos devem ser homogeneizados, pois é comum haver alterações do tipo decantação e precipitação. No caso destas alterações persistirem após a agitação, o lote deverá ser descartado.

#### **6.2.5. Preparo da superfície**

Recomenda-se que, antes da projeção, a superfície esteja isenta de material deletério, que deve ser removido através de um jato de ar comprimido<sup>(14)</sup> ou mesmo picaretas<sup>(9)</sup>, no caso de se apresentar endurecido. Normalmente não é necessária a utilização de jatos de areia e água sob pressão, uma vez que em testes executados na Companhia do Metropolitano de São Paulo<sup>(80)</sup> não apresentaram diferença de desempenho significativa.

No entanto, a boa aderência entre o concreto projetado e o substrato de concreto (projetado ou convencional) pode ser obtida quando este está próximo ou pouco aquém da condição de saturação com superfície seca<sup>(133)</sup>.

### 6.3. CUIDADOS DURANTE A PROJEÇÃO

As recomendações presentes neste item foram elaboradas para o caso do processo de projeção por via seca com máquina de projeção a rotor, uma vez que é a mais largamente empregada no Brasil e que foi utilizada para a elaboração deste trabalho. Estas recomendações foram elaboradas considerando as indicações da ABNT<sup>(151)</sup> e do ACI<sup>(9)</sup>.

#### 6.3.1. Confeção da mistura seca

A mistura seca deve ser proporcionada e fornecida totalmente homogeneizada, devendo para isso, serem obedecidas as prescrições de traço e mistura do concreto convencional, seja em volume ou em massa (sendo preferível esta última opção), utilizando uma betoneira adequada. Entretanto, há uma particularidade nas condições da mistura seca que tem importância fundamental, que é a sua umidade. Naturalmente, se utilizam agregados estocados em baias e, portanto, dotados de uma certa umidade que deve permanecer entre 3% e 6%<sup>(91)</sup> (o ACI<sup>(9)</sup> recomenda de 4% a 6%). Isto se deve ao fato de que quando se utilizam materiais com umidade inferior a 3% agravam-se os problemas de liberação de poeira e, quando ela é superior a 6% aumenta muito o risco da pré-hidratação do cimento, principalmente quando da utilização de aditivos em pó pré-misturados. Umidades muito altas facilitam o empelotamento e conferem adesão à mistura seca o que pode provocar entupimentos, tanto mais frequentes e intensos quanto maior o teor de finos da mistura.

#### 6.3.1.1. Cuidados gerais

Para se obter melhores condições de homogeneidade da mistura seca, recomenda-se a seguinte ordem de colocação de materiais na betoneira:

1. agregado graúdo
2. agregado miúdo
3. mistura inicial (30 a 60 segundos.)
4. adição do cimento
5. mistura (2,5 a 3 minutos.)

Não se deve dispensar uma cuidadosa avaliação visual das condições de homogeneidade, o que pode ser realizado através da observação da uniformidade da cor da mistura seca. Este cuidado é fundamental, pois o processo de projeção não tem a capacidade de corrigir problemas de falta de homogeneidade na mistura.

#### 6.3.1.2. Controle da mistura seca

Para concretos projetados convencionais não é comum realizar-se controle de qualidade na mistura seca. Entretanto, quando o concreto não é produzido na obra (concreto dosado em central) é conveniente que, periodicamente, se reconstitua o traço de concreto<sup>(124)</sup> para verificar o seu enquadramento em relação as especificações e/ou contrato de fornecimento.

### 6.3.2. Verificação das condições dos equipamentos

Antes de se dar início à projeção é imprescindível que se efetue a vistoria prévia das condições de instalação, manutenção, funcionamento e limpeza dos seguintes equipamentos:

- a. betoneira
- b. alimentadora
- c. dosador de aditivos e suas mangueiras
- d. bomba de água e suas mangueiras
- e. máquina de projeção, mangote e bico
- f. compressor de ar e suas mangueiras.

Com a verificação do equipamento pode-se evitar problemas e até acidentes. Um acidente típico, que pode ser evitado com a inspeção é o desprendimento de mangueiras por falta de correntes de segurança e devido a encaixes desgastados. A grande liberação de poeira, principalmente junto da máquina de projeção que tenha seus discos de aço e borracha muito desgastados (itens 3.3.2. e 4.4.1.) pode ser evitado quando se constata que o ar comprimido escapa pelas untas do rotor e pela cuba de alimentação da máquina.

No caso dos dosadores de aditivo, ar comprimido e bombas d'água deve-se proceder a uma cuidadosa verificação dos ajustes destes equipamentos. Isto tem por objetivo garantir a obtenção dos teores especificados para os materiais durante o processo de dosagem (item 6.2.3.).

### 6.3.3. Início da projeção

#### 6.3.3.1. Seqüência de início de operações

Verificadas as condições da mistura e dos equipamentos, pode-se colocar os mesmos em funcionamento obedecendo a seguinte ordem:

- a. Água: o mangoteiro deve abrir o registro de água até obter uma vazão aproximada da que deverá ser utilizada, deixando o ajuste para o momento da projeção;
- b. Ar: deve-se liberar o fluxo de ar pelos registros do equipamento (Figura 3.13.);
- c. Mistura seca: liga-se então a máquina de projeção permitindo que o material desça da cuba alimentadora para o rotor e daí para o mangote (Figura 3.13.);
- d. Aditivo: caso seja utilizado dosador de aditivos líquidos, este deve ser acionado após a chegada da mistura seca ao bico de projeção e
- e. Ajuste da água: o mangoteiro deve fazer o ajuste fino da vazão de água ao final da seqüência de início de operações.

Após se obter um fluxo constante do material pode-se dirigir então o jato de concreto para o alvo de projeção. Deve-se evitar ao máximo qualquer intervenção no processo que venha a alterar as condições da mistura, como ajustes freqüentes de água, do teor de aditivos e da vazão e pressão de ar comprimido.



#### 6.3.3.2. Controle da consistência

O controle da consistência do material recém projetado<sup>(125)</sup> fornece um bom subsídio para avaliação de sua trabalhabilidade. Além disto, é uma excelente forma de verificação da intensidade da umidificação do material. Por isso deve-se ter especial carinho na identificação do valor de consistência desejado para cada aplicação específica, bem como a sua tolerância.

#### 6.3.3.3. Controle da pressão de ar comprimido

O controle da pressão de ar comprimido tem por real objetivo o controle da velocidade de projeção para um determinado equipamento. Isto é de importância fundamental para a obtenção de um concreto projetado com níveis adequados de compactação. Por isto, no caso de dúvida, deve-se proceder ao ensaio de determinação da massa específica aparente do concreto fresco<sup>(53)</sup>.

#### 6.3.4. Técnica de projeção

##### 6.3.4.1. Direcionamento do jato

Crom<sup>(114)</sup> apontou em seu trabalho, o qual foi elaborado a partir da experiência acumulada na execução de reservatórios de água, uma série de cuidados a serem tomados no jateamento do concreto. Tais cuidados foram, em sua quase totalidade, incorporados pelo ACI<sup>(9)</sup>. Ele recomenda que se impinja movimentos circulares uniformes ao bico "para distribuir uniformemente o material" (Figura 6.2.), a qual tem sua

origem na ineficiência do anel umidificador (item 3.3.4.). Outra de suas recomendações seria a de, na operação normal, direcionar o jato de concreto perpendicularmente sobre o plano da superfície que está servindo de alvo, conforme os esquemas apresentados na Figura 6.3. Isto se deve ao fato de que, quanto mais inclinado for o ângulo que o jato do concreto faz com o plano de aplicação, maior seja a reflexão conforme o apresentado na Figura 4.4.

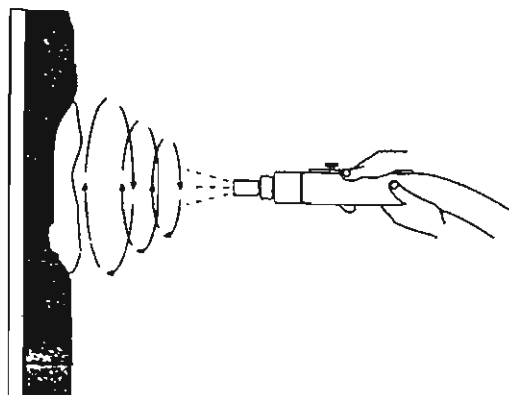


FIGURA 6.2: Movimento circular do bico de projeção<sup>(9)</sup>.

#### 6.3.4.2. Distância de projeção

Existe uma distância de projeção ótima para que se minimize a reflexão. Assim, deve-se restringir a distância guardada pelo mangoteiro a esse valor (normalmente entre 1 m e 1,4 m).

Deve-se salientar o fato de que a distância de projeção ótima depende da intensidade do fluxo de ar comprimido. Quando o fluxo é muito intenso o mangoteiro não consegue se aproximar do alvo de projeção, o que dificulta o correto direcionamento do jato em algumas situações como é o caso das superfícies irregulares (item 6.3.4.5. e 6.3.4.6.). Quando o fluxo é muito baixo não se tem garantida uma velocidade de projeção que possibilite uma adequada compactação do material (item 5.4.), apesar de facilitar a aproximação do mangoteiro ao alvo de projeção.

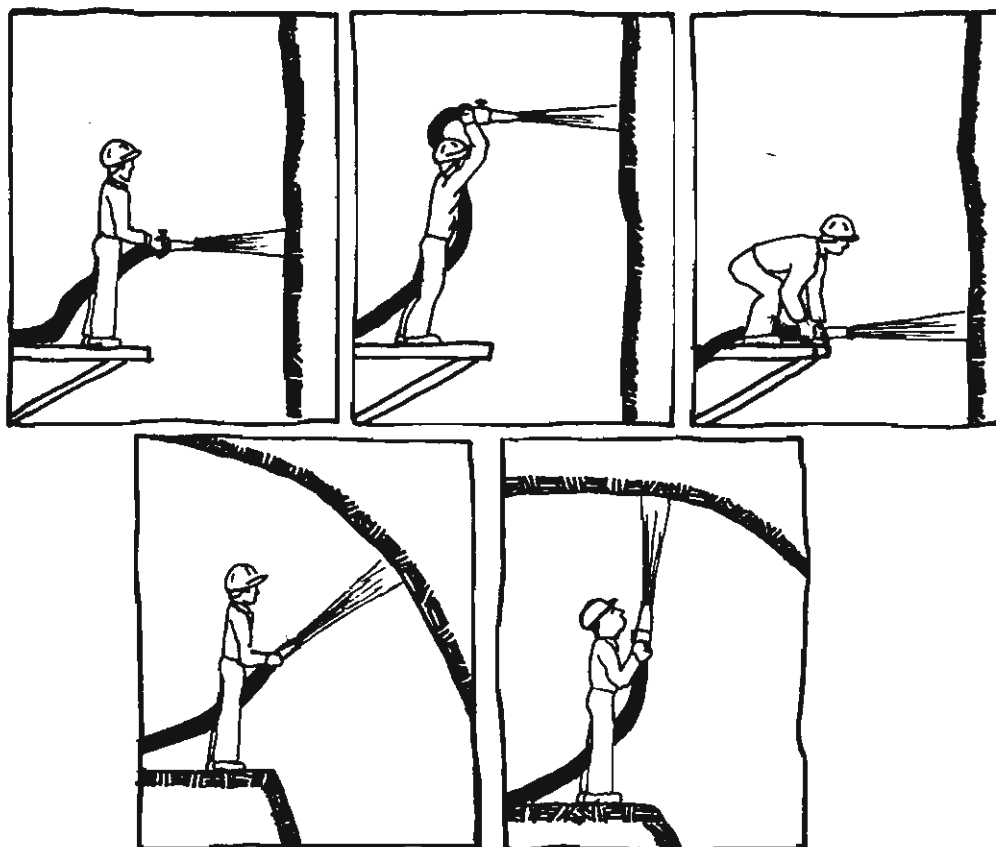


FIGURA 6.3: Direcionamento do jato de concreto contra o alvo de projeção segundo sua altura<sup>(9)</sup> (114) e sua inclinação.

#### 6.3.4.3. Projeção da camada inicial

Antes da projeção do concreto propriamente dita, no caso de substratos instáveis ou com infiltrações de água, seria recomendável realizar uma projeção preliminar numa espessura de não menos de dois centímetros. Esta camada tem finalidade de preparar um substrato mais adequado para a projeção das camadas estruturais de concreto projetado, diminuindo-se assim o deslocamento.

#### 6.3.4.4. Projeção das demais camadas

Geralmente, a espessura desejada de concreto projetado é conseguida através de várias camadas formadas pelo movimento constante do bico de projeção e pelas sucessivas "passadas" sobre a área que está sendo trabalhada. As espessuras máximas obtidas sem que ocorra o deslocamento, são influenciadas por alterações no processo de projeção como as descritas no item 4.3. Durante a operação de projeção, deve-se procurar atingir a maior espessura possível, pelo fato de assim minimizar a reflexão (item 4.2.2.) e diminuir o número de juntas e a laminação responsáveis pela perda de resistência do concreto (item 4.5.1.2.) e impermeabilidade (item 5.5.3.4.). A espessura máxima pode ser determinada em testes que ocorram em paralelo ao processo de dosagem e confirmada durante o andamento da obra. Desta forma pode-se determinar o número mínimo de camadas necessárias para preenchimento da camada de material.

As superfícies da camada anterior, onde vai se projetar a segunda camada, devem estar limpas, isentas de material refletido, bolsões de areia e material segregado nas oclusões de material refletido. Fungos, estalactites provenientes de infiltrações, bem como todo o material solto ou friável devem ser removidos com o uso de jatos de ar comprimido ou jato de água e/ou areia.

#### 6.3.4.5. Preenchimento de espaços delimitados por cantos

Assim que o jato estiver ajustado, o mangoteiro deve começar a mover o bico rapidamente em toda a área de trabalho selecionada, distribuindo uma primeira camada de material. Em seguida, prossegue-se a projeção do concreto começando sempre de baixo para cima e das laterais para o centro do vão, formando um recôncavo para minimizar o problema das

oclusões de material refletido. Em seguida, executa-se o preenchimento da parte central seguindo a seqüência demonstrada na Figura 6.4.

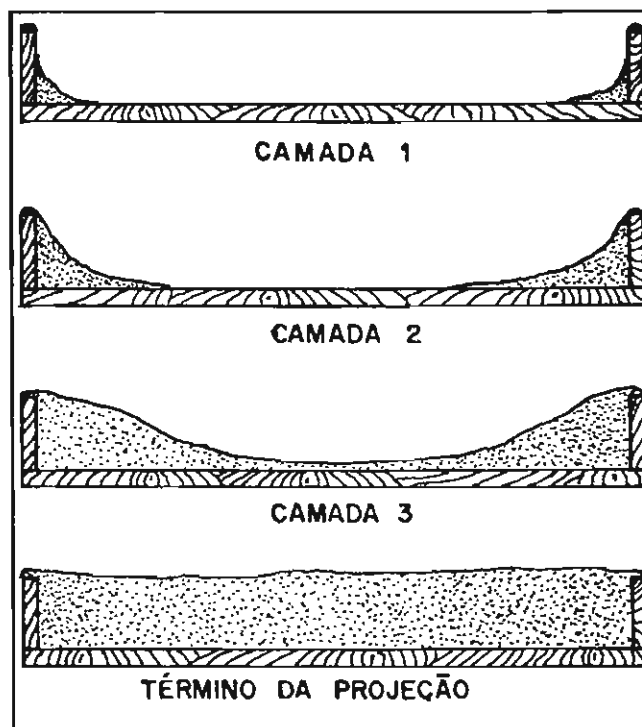


FIGURA 6.4: Seqüência de preenchimento de vão entre cambotas ou placas<sup>(151)</sup>.

#### 6.3.4.6. Projeção sobre armaduras

São duas as preocupações principais quando se procede à projeção sobre barras de aço. A primeira é evitar que elas saiam do seu posicionamento correto devido ao impacto imposto pelo jato de concreto. Por isso é recomendável que se providencie espaçadores tanto mais firmes quanto possível sem, no entanto, introduzir um volume de aço maior que o necessário.

Outra preocupação é evitar a ocorrência do efeito de sombra.

Para tal, deve-se proceder à projeção numa distância um pouco menor que o convencional (item 6.3.4.2.). É recomendável também, a utilização de uma umidificação um pouco mais intensa que o normal sem, no entanto, produzir excessos que venham a forçar o escorrimento do material por de traz da barra.

#### **6.3.5. Encerramento da projeção**

Para se encerrar a projeção o procedimento é o seguinte:

- a) Mistura seca: desliga-se a máquina de projeção interrompendo o fluxo de mistura seca;
- b) Água: o mangoteiro fecha o registro da água;
- c) Ar: após a ocorrência do fluxo limpo de ar são fechados os seus registros na máquina de projeção;

Em qualquer que seja a situação, o mangote deve ser esvaziado quando da interrupção da projeção, principalmente quando o ponto de aplicação estiver em posição mais elevada que a máquina.

#### **6.3.6. Segurança e higiene no trabalho**

É importante que sempre se tenha em mente a preocupação com a higiene e a segurança no trabalho. No entanto, para o concreto projetado, este ponto deve ser encarado com uma atenção especial. Isto porque são muitos os riscos de acidentes ligados ao serviço de projeção: britas voam a alta velocidade em todas as direções, deslocamentos, poeira liberada em grandes quantidades, produtos fortemente alcalinos, riscos de entupimentos que podem produzir estouros de mangotes e mangueiras desgastados, etc.

As próprias máquinas de projeção podem representar um elevado risco de acidentes, principalmente quando sua manutenção é inadequada (item 6.3.2.). É comum o corte das pontas dos dedos dos operários quando estes tentam desentupir o respiro do rotor com as próprias mãos.

Uma das peças da máquina que mais apresentam deficiências é o vibrador da cuba de alimentação. Ele é normalmente substituído por um operário que, com uma barra de aço, soca o material para introduzi-lo nas câmaras do rotor. Com um pequeno descuido, o operário pode introduzir a barra na câmara do rotor, travando a máquina e recebendo um forte golpe nas mãos.

Por tudo isso deve-se, durante o processo de formação e qualificação da mão-de-obra (item 6.2.1.), informá-la dos riscos do trabalho e da necessidade de utilização do equipamento de proteção individual.

#### **6.3.7. Cura**

A cura é um dos itens mais desprezados no concreto projetado. Apesar do seu elevado consumo de cimento e dos agregados de dimensão relativamente reduzida (itens 4.7.2.1. e 5.6.1.), não é comum que se proceda a uma cura cuidadosa.

Uma das dificuldades apontadas para a não execução da cura é a grande área exposta do material após a execução, pois não conta com as fôrmas como o concreto convencional, o que encarece o procedimento.

Nos túneis, é muito difícil a aplicação de cura com água. A aspersão, que seria a forma mais lógica, fica impedido por tornar o ambiente ainda mais insalubre pela elevação da umidade. Com isso, o concreto fica, normalmente exposto ao ar da ventilação forçada dos mesmos, a qual é dirigida à frente de trabalho por ser o local de maior produção de

poeira e que, por outro lado, possui o concreto mais recente e, mais necessitado da cura.

#### **6.4. CONTROLE DO PROCESSO APÓS A PROJEÇÃO**

##### **6.4.1. Controle do concreto em baixas idades**

O controle do concreto projetado deverá ser executado logo a projeção, durante aquilo que se convencionou chamar baixas idades (até 10 horas)<sup>(6)</sup>. Esta é uma importante etapa do controle do processo uma vez que há tempo hábil, normalmente, para se intervir no mesmo em caso de não conformidade com o especificado durante o processo de dosagem. O controle do concreto a baixas idades se fará através da avaliação dos seus índices físicos e da sua resistência, como se encontra detalhado nos próximos itens.

##### **6.4.1.1. Índices físicos do concreto recém projetado**

Os seguintes ensaios devem ser realizados com apoio de um laboratório de obra:

a. Fator água/materiais secos (H)<sup>(124)</sup>: o valor de H deve ser controlado uma vez que influi diretamente na resistência mecânica, reflexão e homogeneidade do concreto (item 5.2.).

b. Reconstituição da mistura recém projetada<sup>(124)</sup>: Permite estimar o traço, o nível de reflexão e a relação água/cimento real do concreto incorporado ao alvo de projeção.

c. Consistência<sup>(125)</sup>: através deste ensaio verifica-se de forma indireta, se o teor de água adicionado ao concreto é



adequado quando o concreto não possui aditivo acelerador ou quando este é a base de carbonatos (aditivos em pó convencionais). Permite uma rápida correção do teor de água. No caso de aditivos líquidos, de pega instantânea, permite verificar se o aditivo está agindo efetivamente (o teste de consistência realizado deve apresentar final de escala).

d. Reflexão<sup>(121)</sup><sup>(122)</sup><sup>(123)</sup>: visa quantificar as perdas de material que não se fixa ao alvo de projeção, uma vez que tem reflexo direto no custo de produção. Além disso, a reflexão excessiva proporciona um maior risco de surgimento de outros defeitos como a oclusão de material refletido, laminação, etc. (item 4.2.).

No sentido de se proporcionar uma referência para as tolerâncias dos valores especificados na dosagem, estão listados abaixo alguns valores que, caso sejam ultrapassados, devem ocasionar uma intervenção no processo. Cabe lembrar que, para a definição de valores genéricos para o concreto projetado, deve-se efetuar estudos mais aprofundados, sendo estes aqui apontados destinados ao processo cujas características se encontram descritas no item 5.1.

a. Fator água/materiais secos (H): 0,5%

Verificando-se o controle da umidificação do material e/ou o controle do teor de aditivos e/ou a vazão de mistura seca (pode haver algum entupimento de câmaras do rotor ou diminuição da área livre do mangote por encrustações ou variação no fluxo de ar comprimido) e/ou a intensidade da reflexão (item d).

b. Reconstituição da mistura recém projetada: variação do traço (m): 0,5

Verificando-se o controle de proporcionamento e homogeneização da mistura (item 6.3.1.) e/ou os mesmo pontos do item a.

c. Consistência: 20 mm

Verificando-se os mesmos pontos do item b.

d. Reflexão: 13%

Verificando-se o controle da umidificação do material e/ou o controle do teor de aditivos e/ou a vazão de mistura seca (conforme o apontado no item a.) e/ou a velocidade de projeção (através da pressão e vazão do ar comprimido ou alterações no equipamento como troca de bico) e/ou verificando-se os procedimentos de projeção utilizados pelo mangoteiro e/ou a espessura da camada projetada.

Caso não se consiga uma perfeita restauração deste índices intervindo-se no processo de projeção, deve-se reavaliar o processo de dosagem do material<sup>(6)</sup>.

A freqüência da realização dos ensaios se encontra apresentada na Tabela 6.2.

TABELA 6.2: Freqüência sugerida para a amostragem e realização dos ensaios no concreto projetado via seca.

ETAPA	ENSAIO	FREQUÊNCIA (LOTE)
Mistura seca	.reconstituição de traço *	.a cada 5 dias de produção ou 50 m <sup>3</sup>
Baixas idades	.H ** .consistência .reflexão  .resistência à compressão .reconstituição de traço	.diariamente .diariamente .a cada 5 dias de produção .diariamente .a cada 5 dias de produção
Idades avançadas	.resistência à compressão .índice de vazios	.a cada 2 m de avanço

\* Concreto fornecido por central.

\*\* Fator água/materiais secos.

#### 6.4.1.2. Resistência a baixas idades

A verificação da resistência do concreto projetado em baixas idades é efetuada com o uso do penetrômetro de Meynadier e do penetrômetro de energia constante<sup>(74)</sup>. Os resultados dos ensaios deverão estar em conformidade com as curvas de referência especificados pelo projetista (item 2.4.2.1.).

No caso das resistências não atingirem os valores mínimos especificados, o fato deve ser imediatamente comunicado ao setor de engenharia responsável para que sejam tomadas as devidas providências.

A causa do problema pode ser, entre outras:

- a. Baixo consumo de aditivo por falha no sistema de dosagem (dosador desregulado por exemplo);
- b. Concreto mal proporcionado (pesagem), o que pode ter proporcionado uma mudança no consumo de cimento e, conseqüentemente no teor de aditivo;
- c. Mudança no tipo ou partida de cimento e/ou aditivo (incompatibilidade);
- d. Incorreções no processo (pré-hidratação, excesso de água, falta de pressão/vazão do ar, etc.).

Caso as resistências ultrapassem o limite superior da faixa especificada, deve ser providenciada uma redução no teor de aditivo efetivamente adicionado ao concreto, retornando-se ao processo de dosagem<sup>(6)</sup>.

A freqüência da realização dos ensaios se encontra apresentada na Tabela 6.2.

#### 6.4.2. Controle do concreto em idades avançadas

A verificação da resistência à compressão do concreto projetado (NBR 5739 da ABNT) em idades avançadas (maiores que 10 horas) já é executada a muito tempo como parte (ou totalidade) do controle da qualidade do mesmo<sup>(5)</sup>. Esta verificação deve ser efetuada por extração de testemunhos em posições previamente definidas na estrutura para se verificar possíveis heterogeneidades na mesma, o que pode ser produzido pela própria direção de projeção (item 5.5.).

Os resultados obtidos nos ensaios de compressão deverão enquadrar-se no intervalo especificado pela classe definida na etapa de projeto (item 2.4.2.2.). O não enquadramento implicará em imediata alteração no proporcionamento das materiais (dosagem).

Além disso, o controle da resistência do concreto em idades avançadas permite verificar o seu nível de homogeneidade através de seu coeficiente de variação. O Metrô de São Paulo define como coeficiente de variação esperado 30%<sup>(68)</sup>. No entanto, com a atual tecnologia, se pode esperar que o coeficiente de variação do concreto projetado via seca não exceda os 20% (item 5.6.3.2.). Este valor pode fornecer uma avaliação do nível de controle da qualidade do processo de projeção como um todo.

O índice de vazios<sup>(79)</sup> deverá ser verificado sempre que houverem exigências de projeto. Quando ocorrem valores superiores às especificações (item 2.4.2.3.), deve-se verificar as causas da falta de compactação, como baixa velocidade de projeção, concreto projetado com umidificação abaixo da ótima, excesso de aditivo, etc.

A frequência da realização dos ensaios se encontra apresentada na Tabela 6.2.

### **6.4.3. Controle das falhas de produção**

#### **6.4.3.1. Defeitos localizados**

São chamados defeitos localizados o efeito de sombra (itens 4.5.1.1. e 6.3.4.6.) e a oclusão da reflexão formando os bolsões de areia (item 4.2.4.). Tais tipos de defeitos são evitados pelo respeito às regras da boa técnica de projeção (itens 6.3.4.5. e 6.3.4.6.). Assim deve-se avaliar, a priori, o comportamento do mangoteiro de modo a se evitar o surgimento deste problema. Isto por que a sua detecção é um dos pontos mais difíceis da tecnologia do concreto projetado uma vez que eles permanecem recobertos por uma camada íntegra. Sua detecção normalmente só acontece pela extração de testemunhos (quando coincide com a área lesada) ou pelo surgimento de vazamentos (típico de túneis executados abaixo do lençol freático) quando a única coisa que resta a fazer é executar procedimentos de reparo (caros e complexos).

#### **6.4.3.2. Defeitos generalizados**

Os aqui chamados defeitos generalizados são a laminação e as imperfeições superficiais. Ao contrário das imperfeições localizada, estes defeitos podem ser facilmente identificados pela extração de testemunhos em qualquer parte da estrutura (laminação) ou mesmo pela inspeção visual (imperfeições superficiais). Assim, deve-se intervir imediatamente no processo de projeção de modo a se eliminar a causa destes defeitos.

No caso da laminação, a sua origem pode estar ligada à umidificação insuficiente da mistura e/ou ao entupimento de algumas câmaras do rotor e/ou à uma técnica inadequada de projeção (item 6.3.4.) e/ou a uma mistura inadequada (item

6.2.2.1.) e, até mesmo, o uso de aditivo à base de aluminato em excesso (item 5.5.3.4.).

Os defeitos superficiais podem denotar a sua origem a partir do seu próprio aspecto. Se forem manchas de várias tonalidades, como eflorescências, poderá ter surgido do uso de teores excessivos de aditivos ou outros produtos químicos<sup>(12)</sup>. Se o aspecto for muito rústico e heterogêneo pode indicar o excesso de água, com ineficiência do sistema de umidificação (tradicional normalmente), que produz a "lavagem" dos finos. E, finalmente, se surgirem "dunas" no concreto indicam, certamente, que o direcionamento do jato esteve bem abastado da desejada perpendicularidade.

#### 6.4.3.2. Deslocamentos

Os deslocamentos (item 4.3.) podem ser um sinal de que não se está projetando o concreto na consistência adequada (item 6.4.1.1.). Além disso, este defeito perigoso, pode ter tido sua origem em outras falhas do processo de projeção como a ocorrência de lentes de areia e/ou pelo umedecimento exagerado de uma camada do concreto projetado e/ou pela execução de camadas com espessura excessiva e/ou por falha no sistema de alimentação do aditivo acelerador. Assim deve-se intervir nestes pontos imediatamente após a ocorrência do primeiro deslocamento.

### 6.5. SÍNTESE

Na Tabela 6.3. se encontra uma síntese das atividades a serem desenvolvidas no controle do processo de projeção.

TABELA 6.3: Síntese das recomendações para o controle do processo de projeção.

ATIVIDADES	COMENTÁRIOS
(A) Formação e qualificação da mão-de-obra	A mão-de-obra deve receber formação adequada ou ter experiência e habilidade comprovada por meio de teste <sup>(148)</sup> Deve ser verificado se os operários respeitam as regras de segurança e higiene no trabalho e, principalmente, se utilizam equipamento de proteção individual.
(B) Verificação dos equipamentos - vazão e pressão de ar e água	Avaliação das condições de manutenção e ajuste dos mesmos: Pressão e vazão de ar comprimido, alimentação contínua e homogênea da mistura seca e aditivos, umidificação na intensidade ótima e com pressão acima da de ar comprimido.
(C) Dosagem	Verificar se o encarregado tem conhecimento dos valores especificados na dosagem, suas tolerâncias e a frequência de amostragem
(D) Materiais	Deve-se verificar se as propriedades definidas durante o processo de dosagem são conferidos durante o recebimento dos materiais. As condições de armazenamento dos agregados não devem permitir contaminações e grandes variações no teor de umidade dos mesmos Os aditivos deve ser conservados em lugar fresco e seco, sem contato direto com a luz do sol. Antes da sua utilização, deve-se verificar a ocorrência ou não de cristalização.
(E) Preparo da superfície	Verificar se a superfície está limpa, isenta de material refletido, poeira, graxas, óleos, materiais provenientes do solo, etc.
(F) Mistura seca	Verificar, por inspeção visual, as condições de homogeneização através da variação da cor (o que não deve ocorrer). Verificar, por reconstituição de traço <sup>(124)</sup> , se o concreto misturado em central, mantém o proporcionamento definido na dosagem.
(G) Ligação dos equipamentos 1. ar comprimido 2. bomba de água 3. alimentadora 4. máquina de projeção 5. dosador de aditivos	Caso a máquina de projeção esteja com sua cuba cheia deve-se inverter os itens 3 e 4, obviamente O item 5 só será efetuado no caso de utilização de aditivos líquidos pois, no caso de se utilizar aditivos em pó ele deve ocorrer concomitantemente com o item 3

**TABELA 6.3: Síntese das recomendações para o controle do processo de projeção (continuação).**

ATIVIDADES	COMENTÁRIOS
<p>(H) Ajustes iniciais - vazão e pressão de ar e água</p>	<p>Avaliação visual, realizada pelo mangoteiro e encarregado. Índices a serem obtidos com agulhas de Proctor: projeção na horizontal: 40 a 60 projeção no teto: 60 a 80 No caso de aditivos à base de aluminatos, estes índices devem estar acima de 80 Ajustada a água só poderá ser executada uma alteração quando ocorrer uma não conformidade nos índices especificados acima</p>
<p>(I) Direção do jato de concreto</p>	<p>Deve-se dirigir o jato perpendicularmente ao plano de projeção. Resulta em menor reflexão e maior compactação</p>
<p>(J) Distância do buco à superfície de aplicação</p>	<p>O bico deve permanecer afastado do plano de projeção de 1 a 1,5 metros de distância. -Muito próximo do alvo de projeção: tem-se grande reflexão e o mangoteiro terá dificuldade de visualização do trabalho -Muito distante do alvo de projeção: maior reflexão com diminuição da compactação do material e risco de ocorrência de sombra</p>
<p>(K) Movimento do bico de projeção</p>	<p>O bico deve receber movimentos circulares para homogeneizar o material projetado.</p>
<p>(L) Manutenção de fluxo constante de material seco pelo mangote</p>	<p>Visa manter a umidade constante e evitar: poeira, maior reflexão, deslocamentos, escorrimientos, etc.</p>
<p>(M) Constatação de entupimento: - no mangote - na linha d'água - no fornecimento de aditivo</p>	<p>Procedimento: - interromper o processo de projeção - identificar o ponto de entupimento iniciando a procura em pontos de estrangulamento - utilizar mangote reserva se a limpeza for demorada. - remover todo o aditivo cristalizado</p>
<p>(N) Projeção em locais limitados por cantos</p>	<p>Iniciar da parte inferior da superfície para a superior e das bordas para o centro do espaço.</p>
<p>(O) Deslocamento</p>	<p>Na ocorrência de deslocamentos deve-se verificar imediatamente as condições do processo para se prevenir acidentes. Determinar a consistência: se for baixa deve-se verificar o teor de umidade e de aditivos. Se for normal ou alta, deve-se verificar a ocorrência de falha no sistema de alimentação do aditivo, lentes de areia e espessura da camada projetada, que pode estar grande demais.</p>
<p>(P) Ocorrência de solavancos</p>	<p>Verificar a localização e proceder à eliminação das irregularidades internas do mangote, que produzem acúmulos e posterior desprendimento destes materiais.</p>



TABELA 6.3: Síntese das recomendações para o controle do processo de projeção (continuação).

ATIVIDADES	COMENTÁRIOS
(Q) Término de operação: 1. alimentadora 2. dosador de aditivo 3. esvaziar o mangote 4. água e ar comprimido	Em interrupção mais longa, desmontar e limpar a máquina de projeção, utilizando vassoura e ar comprimido
(R) Limpeza da máquina de projeção	Toda a mistura seca deve ser removida da máquina de projeção.
(S) Limpeza dos dosadores de aditivos	Não se deve permitir a permanência de sobras de aditivo nos reservatórios do equipamento. No caso de aditivos líquidos, deve-se bombear água limpa pelo sistema até se garantir que esteja isento de material excedente
(T) Limpeza do mangote quando utilizada a pré-umidificação	Limpar cuidadosamente o bico de projeção e o dispositivo pré-umidificador, desconectando o mangote, principalmente concretos com micro-sílica e aditivos líquidos.
(U) Defeitos localizados	Corrigir falhas do mangoteiro. Verificar se o mesmo está qualificado.
(V) Laminação	Verificar se ocorre variações de fluxo, excresses de água, excesso de aditivo, erros no direcionamento do jato ou ainda mistura seca não homogeneizada.
(W) Defeitos superficiais: - Dunas - Manchas - Rugosidade acentuada	- Corrigir direcionamento do jato. - Verificar o teor de aditivo. - Verificar se não se há umidificação em excesso.
(X) Espessura da camada	Verificar adequação dos gabaritos e espaçadores
(Y) Cura	Verificar se a cura está adequada, o que, em caso contrário é detectado pela ocorrência de fissuras.
(Z) Elevado coeficiente de variação	Procurar eliminar falhas na umidificação do material, como equipamento inadequado e intervenções constantes do mangoteiro no controle de umidificação. Verificar as condições de dosagem, alimentação e homogeneização do aditivo.

## CAPÍTULO VII: COMENTÁRIOS FINAIS

Fica claro entender porque o concreto projetado é definido pela descrição do processo de projeção quando se percebe que as suas propriedades são totalmente influenciadas por esse processo. Através do estudo experimental aqui apresentado, pode-se concluir que este material tem suas propriedades intensamente afetadas pelo processo de projeção utilizado. Isto se dá tanto a nível de propriedades básicas como a resistência á compressão, como de suas propriedades específicas como a reflexão, a poeira e o deslocamento.

No entanto, o estudo das interrelações entre o material e o processo de projeção apresentam uma série de dificuldades, como a inexistência de normalização, os altos custos envolvidos na operação do mesmo e, principalmente, a grande variedade de fatores que atuam simultaneamente no processo, cujo isolamento nem sempre é fácil de se obter.

Estas razões explicam em parte o fato de não se ter publicado, no Brasil, trabalhos contendo recomendações para o controle do processo de projeção, situação que aqui procurou-se contribuir para remediar. Além disso, vários trabalhos publicados contém erros de avaliação do material, por não enfocarem o processo de projeção como um todo. Um exemplo típico disto era o de acreditar que com a redução da relação água/cimento se contribuiria para a melhor qualidade do material, ou ainda que ao se projetar o concreto no teto se obteria, necessariamente, um material de menor qualidade.

Neste sentido foram apontadas algumas necessidades como a de maior conhecimento da atuação do equipamento nas propriedades do material para assim se otimizar o processo como um todo, como ocorreu com a utilização da pré-umidificação com injeção de água a elevada pressão, que reduziu, no mínimo, à metade a variância do concreto projetado.

Outro problema ligado às publicações de resultados de estudos sobre concreto projetado, reside no fato de nem sempre se definir todas as condições do processo de projeção que influenciam nas propriedades do material, tais como o equipamento utilizado, a pressão de ar e água, a distância de projeção, o tipo de bico, etc. além de condições de umidade da mistura seca (antes de entrar na máquina de projeção), o tipo e teor de aditivo utilizado bem como o dosador empregado, o nível da mão-de-obra, etc.

Isto é de grande importância para, por um lado, se compreender os motivos da grande variabilidade de resultados que caracterizou a história do concreto projetado<sup>(117)</sup> e, por outro, para se levar em conta durante a realização do controle da qualidade do processo de projeção.

Existe uma grande necessidade de publicação de normas sobre o assunto, o que permitiria a correta avaliação do material sem incorrer no erro comum de tratá-lo da mesma forma que o concreto convencional<sup>(53)</sup>. Desta forma pode-se convencer o meio técnico de que o concreto projetado é um material confiável, conquanto seja corretamente executado e avaliado. Isto já principia por acontecer uma vez que se constata a utilização do concreto projetado como estrutura definitiva de túneis (Obras do Metrô da Linha Paulista e Extensão Norte e o Túnel do Anel Viário da Cidade de Campinas), o que era discutível na década passada<sup>(58)</sup>. Ou mesmo quando se percebe que já se pode esperar coeficientes de variação menores que 30 %<sup>(68)</sup>, mesmo se utilizando consumos de cimento bem mais reduzidos que na década de 80 (item 5.6.3.1.), o que, em outras palavras, faz como que o controle do processo de projeção se aproxime das condições do concreto moldado convencional.

Deve-se ressaltar que este trabalho não encerrou os estudo do problema. muitos aspectos do processo de projeção que interferem na qualidade do material, permanecem sem uma melhor definição. Muitos pontos que aqui não foram tratados, dada a grande amplitude do tema, são aspectos que não podem ser desprezados em pesquisas futuras.

Entre eles estão a influência dos aditivos na microestrutura. Já se sabe da dificuldade de compactação provocada pelos aditivos à base de aluminatos, mas a correlação entre estes valores e o volume de vazios do material é de difícil obtenção pelo fato do teor de aditivo alterar substancialmente a consistência do material e, conseqüentemente, a necessidade de água na umidificação. Outro aspecto é o desenvolvimento de uma forma de controle efetivo da velocidade de projeção, ou melhor, da energia de compactação do material, estabelecimento de parâmetros (quantitativos) para o controle e dosagem confiáveis, da mesma forma do que já se dispõe para o concreto convencional<sup>(134)</sup>.

Existe uma grande necessidade de estudos específicos quanto à durabilidade do material, levando-se em conta as suas características peculiares de elevada porosidade, baixa permeabilidade, uso de aditivos com elevados teores de aluminatos e álcalis, etc.

Mesmo os ensaios que ora estão em fase final de normalização devem ser postos em utilização de modo a garantir a confiabilidade dos mesmos e a possibilidade concreta de comparação de resultados. O exemplo mais crítico é a determinação da consistência do material e, indiretamente a sua trabalhabilidade, o que só hoje é possível.

Outros ensaios devem ser desenvolvidos de modo a se avaliar a evolução do seu módulo de elasticidade e deformação lenta, propriedades importantes nas obras de túneis<sup>(73)</sup>, principalmente nas primeiras idades.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Proceedings of the Engineering Foundation Conference: Use of shotcrete for underground structural support. ACI Publication SP-45. American Concrete Institute. Detroit, USA, 1973. 465pp.
- (2) AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Proceedings of the Engineering Foundation Conference: Shotcrete for ground support. ACI Publication SP-54. American Concrete Institute. Detroit, USA, 1976. 766pp.
- (3) READING, Thomas J. Preface. In: Shotcreting. ACI Publication SP-14. American Concrete Institute. Detroit, USA, 1966, pp v-vi.
- (4) PALERMO, Giovanni. Concreto Projetado. A construção São Paulo n<sup>OS</sup> 2080/2081. São Paulo 1987 pp39-42
- (5) AMARAL, L. A. P.; DAVIDOVITSCH, A. D.; SERMAN, C. Controle de resistência do concreto projetado na execução de túneis. In.: Seminário Sobre Controle da Resistência do Concreto do Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON). 1983. 33pp.
- (6) PRUDÊNCIO Jr., Luiz R. Dosagem e controle do concreto projetado. In.: Ciclo de Palestras: Concreto Projetado - Aplicações e Novas Tendências. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP) e Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo (IPT). EPUSP 09 de outubro de 1991. (Anais). pp 17-28.
- (7) GUIMARÃES F<sup>O</sup>, João Duarte. Vantagens da pré-umidificação no concreto projetado. Revista Construção São Paulo, ed. PINI, n<sup>O</sup> 2291, 6 de janeiro de 1992. pp 9.
- (8) MOORE, J.A. e SAUNDERS, N.R. Gumite and Air-Placed Concrete. Brochure G 76. Gunite Contractors Association. Los Angeles, California, USA. 1984. 49 pp.
- (9) AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI manual of concrete practice: part 5 Guide to Shotcrete (ACI 506R-90). Reported by ACI Committee 506. Detroit, USA, 1990. 41 pp.
- (10) HILLS, D. L. A review of sprayed concrete - Part 1 Concrete. London. February 1980. Volume 14 Number 2. pp 17
- (11) WEBB, Chris. Sprayed concrete. Concrete. London. May 1990. Volume 24 Number 5. pp 34-37.
- (12) ALIVA Hormigón Proyectado. P. Teichert - E. Loich, td.S/A-Avegno, Suíça. 1981. 89 pp.
- (13) ABNT. Argamassa e Concreto Projetado. Projeto de norma CE 18:03.07-001 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). São Paulo. 1990.
- (14) RYAN, Timothy F. Gunite a handbook for engineers. Cement and Concrete Association, London, England, 1973. 63 pp.
- (15) JONES, Ronald Alan. A field investigation of the performance of shotcrete in underground construction. Illinois, USA 1976. Thesis Ph. D. Engineering civil at University of Illinois at Urbana-Champaign. 355pp.
- (16) KULCSAR Neto, Francisco. Sílica-como trabalhar com ela sem riscos para a saúde. FUNDACENTRO - Fundação Jorge

- Duprat Figueiredo de Segurança e Medicina do Trabalho. São Paulo. s.d.
- (17) DOMINGUES, L. C. S. e PALERMO, G. A introdução da segurança no projeto de túneis NATM em solo. In: 2<sup>o</sup> Simpósio de Escoramentos Subterrâneos, Rio de Janeiro, 1985. Rio de Janeiro, ABGE, 1985. pp180-194
- (18) HEINZ, Heinrich K. Introdução á engenharia de túneis. Fundação para o desenvolvimento Técnico da Engenharia - FDTE. Curso CC-57. Utilização do concreto projetado no revestimento de túneis. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 1989.
- (19) McCLURE, Cole R. Use of shotcrete from the standpoint of the designer. In: Engineering Foundation Conference: Use of shotcrete for underground structural support. Berwick Academy. South: Berwick, Maine, USA. July 16-20, 1973. American Concrete Institute ACI Publication SP-45. Detroit, USA. 1973 pp18-21
- (20) KADEN, Richard A.: Environmental consideration for shotcrete. Concrete International, Special Issue. USA; January; 1981. pp34-40
- (21) LÄNGERLE, Domingo. Situação atual do concreto projetado em âmbito mundial. Palestra proferida na Companhia do Metropolitano de São Paulo - Metrô em 23 de novembro de 1990.
- (22) AFPC-SNBATI-STRRES. Les techniques de réparation et de renforcement des ouvrages en béton. Fascicule n<sup>o</sup> 3. BÉTON PROJETÉ - Collection AFPC - SNBATI - STRRES. Paris, septembre, 1985. 64pp
- (23) MORGAN, D. R. Dry-mix silica fume shotcrete in Western Canada, Concrete International, jan 1988. pp24-32
- (24) GILBRIDE, P. et alii. Deterioration and rehabilitation of berth faces in tidal zones at the port of Saint John. In: MALHOTRA, V.M. Concrete in marine environment. Detroit, ACI, 1988. ACI Publication SP-109. pp 199-225.
- (25) LUB, K. B. e VAN WANROIJ, M. C. G. Strengthening of reinforced concrete beams with shotcrete-ferrocement. Journal of Ferrocement vol 19, n<sup>o</sup> 4, October 1989. pp 363-371.
- (26) DANTAS, F. A. S. e TANGO, C. E. S. Estudo do Coeficiente de Permeabilidade em Concreto Projetado. In: Anais da 32<sup>a</sup> Reunião do IBRACON. Fortaleza, CE. Agosto de 1990.
- (27) DYKMANS, M. J. Shotcreting of prestressed concrete tanks. SHOTCRETING. ACI Publication SP-14. American Concrete Institute, Detroit, USA, 1966. pp 99-108.
- (28) SCHUPACK, Norris e POSTON, Randall W. Durability of prestressed concrete tanks. Concrete International. USA, october, 1989. pp51-55, continuação pp 58.
- (29) TURNER, Lloyd. The shape of things to come. Concrete International, january 1986. pp 18-22.
- (30) SHIDELER, J.J. and LITVIN, A. Structural applications of pumped and sprayed concrete. Portland Cemet Association. Development Departament. Bulletin D72. Illinois, USA, jan.1964. 39pp
- (31) LORMAN, Wllian R. Engineering properties of shotcrete, NCEL Report. No. 429. ACI Publication SP-14 a,

- American Concrete Institute, Detroit, USA, 1968. 53pp
- (32) ESTE Industrial e Comercial ltda. Projetando soluções com tecnologia avançada para toda obra. São Paulo, SP. sd. (catálogo).
- (33) CROM, Theodore R. Dry-mix shotcrete practice. In: SHOTCRETING. ACI Publication SP-14. American Concrete Institute. Detroit, USA, 1966. pp15-32.
- (34) KOBLER, Helmut G. Dry-mix coarse-aggregate shotcrete as underground support In: SHOTCRETING. ACI Publication SP-14. American Concrete Institute. Detroit, USA, 1966. pp33-58
- (35) HOFFMEYER, T. A. Wet-mix shotcrete practice. In: SHOTCRETING. ACI Publication SP-14. American Concrete Institute. Detroit, USA, 1966. pp59-74
- (36) FREDERICKS, J. C.; SAUNDERS, N. R. E BROADFOOT, J. T. Recent developments in positive displacement shotcrete equipment In: SHOTCRETING. ACI Publication SP-14. American Concrete Institute. Detroit, USA, 1966. pp75-83
- (37) ALBERTS, Claes. Use of remote controlled spraying nozzle. In: Proceedings of the Engineering Foundation Conference: Use of Shotcrete for Underground Structural Support. ASCE - ACI Publication SP-45. American Concrete Institute, Detroit, USA, 1973. pp65-78
- (38) GOFF, James S. Remote nozzle permits high production & Safety. In: Proceedings of the Engineering Foundation Conference: Use of Shotcrete for Underground Structural Support. ASCE - ACI Publication SP-45. American Concrete Institute, Detroit, USA, 1973. pp 405-417
- (39) STEENSON, H.N. Using accelerator - wet process. In: Proceedings of the Engineering Foundation Conference: Use of Shotcrete for Underground Structural Support. ASCE - ACI Publication SP-45. American Concrete Institute, Detroit, USA, 1973. pp104-113
- (40) GRAHAM, James R. Polymer Shotcrete. In: Proceedings of the Engineering Foundation Conference: Use of Shotcrete for Underground Structural Support. ASCE - ACI Publication SP-45. American Concrete Institute, Detroit, USA, 1973. pp418-430.
- (41) ROBINS, P. J. and AUSTIN, S.A. Sprayed steel fibre concrete. Concrete. London. March, 1985. Volume 9. Number 3. pp17 and April, 1985. Volume 9. Number 4. pp18
- (42) SCHUTZ, Raymond J. Properties of shotcrete admixtures In: Proceedings of the Engineering Foundation Conference: Shotcrete for Ground Support. ACI Publication SP-54. American Concrete Institute. Detroit, USA, 1976. pp45-58
- (43) PACKMAM, G. R. Admixtures for shotcrete, In: Proceedings of the Engineering Foundation Conference: Shotcrete for Ground Support. ACI Publication SP-54. American Concrete Institute. Detroit, USA, 1976. pp89-96.
- (44) ALBERTS, Claes e KRAMERS, Maarten. Swedish shotcrete equipment and developments in fibrous shotcrete. In: Proceedings of the Engineering Foundation

- Conference: Shotcrete for Ground Support. ACI Publication SP-54. American Concrete Institute. Detroit, USA, 1976. pp254-268
- (45) ROGERS, Elwood R. Developments in shotcrete equipment. In: Proceedings of the Engineering Foundation Conference: Shotcrete for Ground Support. ACI Publication SP-54. American Concrete Institute. Detroit, USA, 1976. pp211-224
- (46) PACKMAM, G. R. Shotcrete equipment. In: Proceedings of the Engineering Foundation Conference: Shotcrete for Ground Support. ACI Publication SP-54. American Concrete Institute. Detroit, USA, 1976. pp250-253.
- (47) ALIVA ein Unternehmen der Sika-Gruppe-Aliva AG. Aliva-DUPLO wet and dry mix spraying machine type 285. Widen, Suíça, /1990/. (catálogo).
- (48) ALIVA. Aliva 280 Universal - wet and dry mix spraying machine. Widen, Suíça, sd. (catálogo). 4 pp.
- (49) CORWINE, John W. Steel fiber reinforced shotcrete with microsilica - field experience. Presentation at CANMET/ACI First International Conference on the Use of Fly Ash, Silica Fume, Slag and Other Mineral By-Products in Concrete. July 31-August 5, 1983. Montebello, Quebec, Canada 3 pp.
- (50) HENAGER, Charles M. Steel Fibrous shotcrete: a summary of the state-of-the-art Concrete International, Special Issue. USA, January, 1981 pp 50-58
- (51) MOLINARI, Gilberto. Restauração de concreto pelo processo cimento-gun. Separata IPT n<sup>o</sup> 188 da revista Engenharia. n<sup>o</sup> 66. Ano VI. São Paulo. Fevereiro de 1948. 12 pp.
- (52) ECKSCHMIDT, Horst. O concreto projetado visto por quem conhece. Construção Pesada, abril-maio 1971 pp74-80.
- (53) PRUDÊNCIO Jr., Luiz Roberto. Avaliação do fator água/cimento e compacidade do concreto projetado. In: I Congresso Latinoamericano de Patologia de La Construcción y III de Control de Calidad. Córdoba, Argentina, Abril de 1991. 8 pp.
- (54) FERREIRA, Sérgio G., Concreto projetado jatocret. In: Colóquio sobre Durabilidade do Concreto Armado. Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON). São Paulo. junho de 1972. pp173-200.
- (55) FIASCO NETO, José. Problemas diversos na implatação de túneis. Anais do I Seminário DERSA - Rodovia dos Imigrantes. DERSA. São Paulo. 1976 pp.72-77
- (56) PORTO, Pérsio J.P. Métodos construtivos de túneis na Rodovia dos Imigrantes. Anais do I Seminário DERSA - Rodovia dos Imigrantes. DERSA. São Paulo. 1976 pp190-198
- (57) GITELMAN, Mosze et alli. Filosofia e condicionantes de projeto trecho serra: obras de arte especiais e obras de contenção. Anais do I Seminário DERSA - Rodovia dos Imigrantes. DERSA. São Paulo. 1976 pp371-381
- (58) SIMONDI, S., NEGRO Jr., A. KUPERMAN, S.C. Utilização de concreto projetado como revestimento definitivo de túnel escavado em solo. In: Colóquio sobre Concreto em Fundações e Obras Subterrâneas. Instituto Brasileiro do Concreto. São Paulo, 1982 49pp
- (59) CIPRIANI, José Carlos. Concreto projetado usos e



- tecnologia no Brasil. In: 2<sup>o</sup> Simpósio sobre Escavações Subterrâneas ABGE. Anais, Volume I. Rio de Janeiro. 1985. 31 pp.
- (60) KUPERMAN, Selmo C. Determinação do índice de reflexão médio de argamassas e concreto projetado em painéis - método de ensaio. Texto base 18.3.9 - agosto 1983 CB-18 ABNT
- (61) KUPERMAN, Selmo C. Determinação do tempo de pega de combinações de pasta de cimento portland e aditivos aceleradores de pega-método de ensaio. Texto base 18.3.8 agosto 1983 - CB-18 - ABNT.
- (62) FIGUEIREDO, A. D. ; PRUDÊNCIO Jr., L. R.; SILVA M. G. Concreto projetado: estágio atual e perspectivas futuras. In: 10<sup>o</sup> ENCO - Encontro Nacional da Construção, Gramado, Rio Grande do Sul, novembro de 1990. 19pp
- (63) FIGUEIREDO, A. D. Proyecto conjunto de investigación de hormigón proyectado para túneles: una experiencia brasileira. In.: RILEM International Seminar: Direct Transfer of Research Results to Industry. Buenos Aires, Argentina. novembro de 1991. 5pp
- (64) BOSCOV, Pedro. Pesquisa do concreto projetado para túneis. In: I Encuentro de las Ingenierías Civiles Iberoamericanas. Caceres, España, Mayo 1992. Volume II, pp 183-200.
- (65) SILVA, M. G.; PRUDÊNCIO Jr., L. R.; FIGUEIREDO, A.D. Utilização de Fibras e microssílica em concreto projetado para túneis. In: 10<sup>o</sup> ENCO - Encontro Nacional da Construção, Gramado, Rio Grande do Sul, novembro de 1990. 18pp.
- (66) ARMELIN, H. S.; TELLES, R. C. D.; PRUDÊNCIO Jr., L. R. Concreto projetado via úmida: Experiências práticas. In.: Ciclo de Palestras: Concreto Projetado - Aplicações e Novas Tendências. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP) e Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo (IPT). EPUSP 09 de outubro de 1991. (Anais). pp66-83.
- (67) AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI manual of concrete practice: part 5 Specifications for Materials, Proportioning, and Application of Shotcrete. (ACI 506.2-90). Reported by ACI Committee 506. Detroit, USA, 1990. 7pp.
- (68) PALERMO, Giovanni e MARQUES, Edson Lourenção. Controle e propriedades do concreto projetado empregado na Extensão Norte do Metropolitano de São Paulo. In: 23<sup>a</sup> Reunião do Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON). Colóquio sobre Concreto em Fundações Subterrâneas. São Paulo, julho de 1982. 28pp.
- (69) ÖSTERREICHISCHER BETONVEREIN. Guidelines on Shotcrete - Part 1: Application Austrian Concrete Society, january 1990. 35pp.
- (70) ALIVA. Aliva 260 Dry mix spraying and conveying machine. Widen, Suíça, sd. (catálogo). 4 pp.
- (71) ALLENTOWN PNEUMATIC GUN, INC. GR 1200 Rotary Gun - The top of the Allentown line. Allentown, EUA, sd. (catálogo). 2 pp.
- (72) PAULON, Vladimir Antonio. Execução de concretos duráveis. Associação Brasileira do Cimento Portland -

- ABCP. São Paulo, 1986. (ET-84). 45 pp.
- (73) CELESTINO, Tarcísio B. Requisitos de projeto do revestimento de concreto projetado. In.: Ciclo de Palestras: Concreto Projetado - Aplicações e Novas Tendências. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP) e Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo (IPT). EPUSP 09 de outubro de 1991. (Anais). pp 45-55.
- (74) PRUDÊNCIO Jr., Luiz Roberto. Strength Evaluation of Early Age Shotcrete. In.: Evaluation and Rehabilitation of Concrete Structures and Innovations in Design. ACI International Conference. Hong Kong. Anais. ACI Publication SP-128.CT92. American Concrete Institute, Detroit, USA, 1991. 15 pp.
- (75) EMURB. Especificação para concreto projetado pelos processos via seca e via úmida. EMURB. Prefeitura do Município de São Paulo. Secretaria de Vias públicas. PROMON Engenharia S. A. São Paulo. 1988. 182 pp.
- (76) THE CONCRETE SOCIETY. Specification for sprayed concrete. The Concrete Society. Construction and Formwork Committee. London, England, 1979. 6pp.
- (77) METRÔ. Especificações de serviço para execução de concreto projetado - Companhia do Metropolitano de São Paulo. São Paulo, 1986. 41pp.
- (78) KRANTZ, G. W. Selected pneumatic gunites for use in underground mining: a comparative engineering analysis. Bureau of Mines, U.S. Department of the Interior. Information Circular 8984, 1984. 64 pp.
- (79) ASTM. Standard test method for specific gravity, absorption, and voids in hardened concrete. Designation: C642-82. 1987 Annual Book of American Society for Testing and Materials (ASTM) Standards. Section 4 - Construction. Volume 04.02 Concrete and aggregates. USA. 1987.pp407-409.
- (80) PALERMO, Giovanni; MARQUES, Edson Lourenção. Estudo de aderência em concreto projetado da obra da Extensão Norte do Metropolitano de São Paulo. In: 23<sup>a</sup> Reunião do Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON). Colóquio sobre Concreto em Fundações Subterrâneas. São Paulo, julho de 1982. 13pp.
- (81) CETESB. Determinação do grau de agressividade do meio aquoso ao concreto - procedimento. LI.007 CETESB - Companhia de Saneamento Ambiental. São Paulo. 1988. 11pp.
- (82) HELENE, P. R. L. Durabilidade do concreto versus agressividade do meio. Tecnologia de Edificações volume 2. Separata dos encartes publicados na revista A CONSTRUÇÃO. Editora PINI. São Paulo. Agosto de 1985 pp87-94
- (83) KUPERMAN, S. C.; ONUMA, N. T.; VIEIRA Jr., L. P. Estágio atual de normalização. In.: Ciclo de Palestras: Concreto Projetado - Aplicações e Novas Tendências. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP) e Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo (IPT). EPUSP 09 de outubro de 1991. (Anais). pp114-124.
- (84) RUFFERT, Gunther. Experience with the Application of the new german standard DIN 18.551, "Shotcrete".

- Concrete International, Special Issue. USA; January; 1981. pp 108-108.
- (85) MORGAN, D. R. Shotcrete support of underground openings in Canadá. In.: Tunnelling in the 90's - Eighth Annual General Meeting. Tunnelling Association of Canada. Vancouver, B.C. Canada. Nov. 1990. pp121-139
- (86) ASSOCIATION FRANÇAISE DU BETON. Guide du Beton Projete. N° 98<sup>bis</sup> - October 1977. França. 31 pp.
- (87) AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI manual of concrete practice: part 5 State-of-the-art Report on Fiber Reinforced Shotcrete. (ACI 506.1r-84). Reported by ACI Committee 506. Detroit, USA, 1990. 13 pp.
- (88) AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI manual of concrete practice: part 5 Guide to Certification of Shotcrete Nozzlemen. (ACI 506.3r-82). Reported by ACI Committee 506. Detroit, USA, 1990. 11 pp.
- (89) KUPERMAN, Selmo C. Essecificação para argamassas e concretos projetados. Texto base \*\*.\*.\* mes/ano - CB-18 - Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).
- (90) ARMELIN, Hugo S. Concreto projetado com fibras. In.: Ciclo de Palestras: Concreto Projetado - Aplicações e Novas Tendências. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP) e Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo (IPT). EPUSP 09 de outubro de 1991. (Anais). pp100-113.
- (91) BEKAERT S.A. DRAMIX - Tunnelling the World. N. V. Bekaert S. A. Zwevegem, Belgium, 1991. 218pp.
- (92) MORGAN, D. R. e MOWAT, D. N. A comparative evaluation of plain, mesh and steel-fiber reinforced shotcrete. In: Fiber International Concrete - International Symposium. ACI Publication SP 81. American Concrete Institute, Detroit, USA, 1984.
- (93) OPSHAL, O. A. Steel fiber reinforced shotcrete for rock support. Royal Norwegian Council for Scientific and Industrial Research (NTNF). NTNF Project 1053.09511. 1982. 68pp.
- (94) REDFORD, M. S. e ALEXANDER, M. Evaluation of comparative performance of fibre and mesh reinforced shotcrete linings. In.: SANCOT Seminar. November, 1990. pp 7-22.
- (95) MORGAN, D. R.; McASKILL, N.; RICHARDSON, B. N. e ZELLERS, R. C. A comparative evaluation of plain, polypropilene fiber, steel fiber, and wire mesh reinforced shotcretes. Transportation Research Record # 1226, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D. C., 1989. pp 78-87.
- (96) ARMELIN, Hugo S. e HAMASSAKI, Luiz T. Avaliação do concreto projetado reforçado com fibras de aço e polipropileno na construção de túneis - NATM. 32<sup>a</sup> Reunião Anual do Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON). 1990. 12pp.
- (97) How microsíllica improves concrete. Concrete Construction. April 1985. Volume 30. Number 4. USA pp327-332.
- (98) SILVA, Maristela G. da. Concreto projetado com adição de microsíllica. In.: Ciclo de Palestras: Concreto Projetado - Aplicações e Novas Tendências. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP) e

- Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo (IPT). EPUSP 09 de outubro de 1991. (Anais). pp 1-16.
- (99) BÜRGE, Theodor A. Fiber reinforced high-strength shotcrete with condensed silica fume. In: Proceedings of the Second International Conference on Fly-ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete. Madrid, 1986. ACI Publication SP 91. American Concrete Association, Detroit, USA, 1986. v2. pp1153-1170.
- (100) WOOD, David. Shotcrete - Steel fibre reinforced with silica fume additives. Tec News, April, 1989. pp3-5.
- (101) OHAMA, Yoshihiko. Recent development of concrete-polymer composites. In.: RILEM International Seminar: Direct Transfer of Research Results to Industry. Buenos Aires, Argentina. novembro de 1991. 11pp.
- (102) BATES, R. C. Polymer shotcrete - discussion In: Proceedings of the Engineering Foundation Conference: Use of Shotcrete for Underground Structural Support. ASCE - ACI Publication SP-45. American Concrete Institute, Detroit, USA, 1973. pp431-433.
- (103) TEZUKA, Yasuko. Concretos Polímeros. Publicações Especiais 5. Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S/A - IPT. Divisão de Engenharia Cível. São Paulo, 1979. 38pp.
- (104) TEX-CRETE INC. The latex modified cement shotcrete system. Tex-crete Inc. Gurnee, Illinois, USA. s. d. 3pp.
- (105) DOW CHEMICAL U.S.A. Restore and protect vertical and overhead structures with latex modified shotcrete. DOW Chemical U.S.A. Functional Products and Systems Department. Midland, Michigan 48640. s.d. 8pp.
- (106) CARDOSO, Jorge L. Desenvolvimento de produtos para recuperação do concreto e argamassa projetada. Revista IBRACON. Informe técnico. Ano II. N<sup>o</sup> 5. Jul/ago/set, 1992. São Paulo. pp 75-78.
- (107) EGGER, H. R. Shotcrete: wet or dry process. In: Proceedings of the Engineering Foundation Conference: Shotcrete for Ground Support. ACI Publication SP-54. American Concrete Institute. Detroit, USA, 1976. pp241-249.
- (108) GLASSGOLD, I. Leon. Refractory shotcrete - current state-of-the-art. Concrete International, Special Issue. USA, January, 1981 pp41-49.
- (109) ALIVA. Aliva-401.1 Conveying-Belt Powder dosing equipment with dosing roll. Widen, Suíça, sd. (catálogo). 2pp.
- (110) BREKKE, Tor L. Summary of Session III - European Shotcreting Practices. In: Proceedings of the Engineering Foundation Conference: Use of Shotcrete for Underground Structural Support. ASCE - ACI Publication SP-45. American Concrete Institute, Detroit, USA, 1973. pp 96-100.
- (111) OVERLIE, E. F. e RIPPENTROPP, G. Steel fiber microsilica shotcrete with remote controlled equipment. In: Proceedings of 1987 Rapid Excavation and Tunnelling Conference, New Orleans, Louisiana. jun 14-17, 1987. Society of mining Engineers of the

- American Institute of mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers - American Society of Civil Engineers (ASCE). Volume 1, 1987. pp 351-370.
- (112) A. S. HOYER ELLEFSEN. Shotcreting by Robot. Noruega. sd. (catálogo). 8pp.
- (113) MONAGHAN, D. A.; HOADLEY, D. J.; ANDERSON, G. L. Remote shotcrete lining of raised shafts. In: Proceedings of the Engineering Foundation Conference: Shotcrete for Ground Support. ACI Publication SP-54. American Concrete Institute. Detroit, USA, 1976. pp225-240.
- (114) CROM, Theodore R. Dry mix shotcrete nozzling. Concrete International, Special Issue. USA; January; 1981. pp 80-93.
- (115) ALLENTOWN. Dry process- Hose, nozzles & accessories. Allentown Pneumatic Gun, Inc. Allentown, USA, s.d. (Catálogo). 8pp.
- (116) BOSCOV, Pedro. Desenvolvimento no processo de escavação de túneis em NATM. In.: Ciclo de Palestras: Concreto Projetado - Aplicações e Novas Tendências. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP) e Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo (IPT). EPUSP 09 de outubro de 1991. (Anais). pp 84-99.
- (117) GLASSGOLD, I. Leon. Shotcrete durability: An Evaluation. Concrete International, August, 1989, pp78-85
- (118) ROSE, Don et alii. The Atlanta Research Chamber - Applied Research Report and Monographs. Metropolitan Atlanta Rapid Transit Authority, U. S. Department of Transportation Administration, Washington, D.C. MARTA GA-06-0007, march, 1981. 525 pp.
- (119) PARKER, H. W., FERNADEZ-DELGADO, G. e LORIG, L. J. A practical new approach to shotcrete rebound losses. In: Proceedings of the Engineering Foundation Conference: Shotcrete for Ground Support. ACI Publication SP-54. American Concrete Institute. Detroit, USA, 1976. pp 149-187.
- (120) SCHUTZ, Raymond J. Factors influencing dry-process accelerated shotcrete. Concrete International. USA. January 1981. pp75-79.
- (121) PRUDÊNCIO Jr., Luiz R. Concreto projetado - Determinação da reflexão por reconstituição de traço. Texto Base. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). São Paulo, 1992.
- (122) ABNT. Concreto projetado - Determinação do índice de reflexão por medição direta. Projeto de norma CE 18:306.02-006. Associação Brasileira de Normas Técnicas. São Paulo, 1992.
- (123) ABNT. Concreto projetado - Determinação do índice de reflexão em placas. Projeto de norma CE 18:306.02-002. Associação Brasileira de Normas Técnicas. São Paulo, 1992.
- (124) ABNT. Concreto projetado - Reconstituição de mistura recém projetada. Projeto de norma CE 18:306.02-005. Associação Brasileira de Normas Técnicas. São Paulo, 1992.
- (125) ABNT. Concreto projetado - Determinação da

- consistência de misturas. Projeto de norma CE 18:306.02-007. Associação Brasileira de Normas Técnicas. São Paulo, 1992.
- (126) MAIDL, B. Palestra em workshop. Johannesburgo, África do Sul. Dezembro de 1989. (cópia xerox).
- (127) HILLS, D. L. A review of sprayed concrete - Part 3 Concrete. London. April 1980. Volume 14 Number 4. pp32-34
- (128) ARMELIN, Hugo. Steel Fibre Reinforced Dry-Mix Shotcrete - A Study of Fibre Orientation and its Effects on Mechanical Properties In: RILEM 4<sup>th</sup> Symposium on Fibre Reinforced Cement and Concrete. Proceedings. Sheffield, England, jul. 1992. pp...
- (129) WARD, W. H. e HILLS, D. L. Sprayed Concrete: Tunnel support requirements and the dry mix process In: Proceedings of the Engineering Foundation Conference: Shotcrete for Ground Support. ACI Publication SP-54. American Concrete Institute. Detroit, USA, 1976. pp475-532.
- (130) READING, T. J. Shotcrete as a construction material. In: Shotcreting. American Concrete Institute ACI Publication SP-14. Detroit, 1965 pp1-14
- (131) READING, T. J. Durability of Shotcrete. Concrete International, Special Issue. USA; January; 1981. pp 27-33.
- (132) REGOURDM M.; HORNAIN, H.; MORTUREUX, B, Microstructure of Concrete in Agressive Environments. Durability of Building Materials and Components, ASTM STP 691, PV. Sereda and G.G. Litran, Eds., American Society for Testing and Materials, 1980, pp253-268
- (133) SCHRADER, Ernest K. e KADEN, Richard A. Durability of Shotcrete. In: SCANLON, J. M. Concrete durability, Datherine and Bryant Mather International Conference. ACI Publication SP-100. American Concrete Institute, Detroit, USA, 1987. pp1071-1101.
- (134) HELENE, Paulo R. L. Contribuição ao estabelecimento de parâmetros para dosagem e controle dos concretos de cimento Portland. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1987. 278pp.
- (135) SILVA, M. G. e DANTAS, F. A. S. Avaliação da permeabilidade em concreto projetado. In: XI Jornadas Sulamericanas de Engenharia Estrutural. Porto Alegre, RS, 1991. 11pp.
- (136) DANTAS, F. A. S.; TANGO, C. E. S. e SILVA, M. G. Permeabilidade do concreto projetado. In.: Ciclo de Palestras: Concreto Projetado - Aplicações e Novas Tendências. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP) e Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo (IPT). EPUSP 09 de outubro de 1991. (Anais). pp 56-65.
- (137) SEEGBRECHT, G. W.; LITVIN, A. e GEBLER, S. M. Durability of Dry-Mix Shotcrete. Concrete International. USA. October 1989. pp47-50.
- (138) ABNT. Cimento Portland de moderada resistência a sulfatos (MRS) e cimento Portland de alta resistência a sulfatos (ARS) - NBR 5737 (EB 903). Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). São Paulo. 7pp.

- (139) BÜRGE, T. A. e BACHLI, R. Aditives and mixtures for shotcrete. Tunnels & Tunnelling, January, 1991. pp54-56.
- (140) GEBLER, S. M.; LITVIN, A.; McLEAN, W. J. e SCHUTZ, R. Durability of Dry-Mix Shotcrete Containing Rapid-Set Accelerators. ACI Materials Journal, V. 89, No 3, May-June 1992. Detroit, USA.
- (141) DJANIKIAN, J. G. Cimentos Resistentes a Sulfatos. Dissertação de Mestrado. São Paulo, EPUSP, 1980.
- (142) WONG, G. e POOLE, T. The effect of Pozzolans and Slags on the Sulfate Resistance of Hydraulic Cement Mortars. In: SCANLON, J. M. Concrete durability, Datherine and Bryant Mather International Conference. ACI Publication SP-100. American Concrete Institute, Detroit, USA, 1987. pp2121-2134
- (143) GEBLER, Steven H. Durability of Dry-Mix Shotcrete containing Regulated-Set Cement. Concrete International. October 1989. pp56-58.
- (144) STEWART, E. P. New test data aid quality control of gunite. Engineering News-Record. USA, november 9, 1933. pp558-561.
- (145) COSTA NETO, Pedro L. de O. Estatística. São Paulo, ed. Edgar Blücher, 1977, 264pp.
- (146) BAUDER, Walter. An european accelerator manufacturer's views In: Proceedings of the Engineering Foundation Conference: Shotcrete for Ground Support. ACI Publication SP-54. American Concrete Institute. Detroit, USA, 1976. pp59-65.
- (147) PARKER, Harvey W. Current field research program on shotcrete. In: Proceedings of the Engineering Foundation Conference: Use of Shotcrete for Underground Structural Support. ASCE - ACI Publication SP-45. American Concrete Institute, Detroit, USA, 1973. pp331-350.
- (148) ABNT. Concreto projetado - Procedimento para qualificação de mangoteiro (via seca). Projeto de norma CE 18:306.03-002. Associação Brasileira de Normas Técnicas. São Paulo, 1991.
- (149) CROM, Theodore R. Shotcrete nozzlemen certification. Concrete International, February 1986. American Concrete Institute (ACI). Detroit, USA. pp27-30.
- (150) SIKA. Manual técnico. Sika S.A. Produtos Químicos Para Construção. Rio de Janeiro, 1985. 88pp.
- (151) ABNT. Aplicação de argamassa e concreto projetado via seca - procedimento. Projeto de norma CE 18:306.03-001. Associação Brasileira de Normas Técnicas. São Paulo, 1989.

## ANEXOS

- ANEXO 1: CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS EMPREGADOS NO TRABALHO
- ANEXO 2: ESTUDO SOBRE A INFLUÊNCIA DO TEOR DE UMIDADE  
(EQUIPAMENTO CONVENCIONAL)
- ANEXO 3: ESTUDO SOBRE A INFLUÊNCIA DO TEOR DE UMIDADE  
(EQUIPAMENTO COM INJEÇÃO DE ÁGUA SOB PRESSÃO)
- ANEXO 4: ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO TEOR DE ADITIVO NAS  
PROPRIEDADES DO CONCRETO PROJETADO
- ANEXO 5: ESTUDO DO EFEITO DA DOSAGEM MANUAL DE ADITIVO
- ANEXO 6: ESTUDO DO EFEITO DA PRÉ-HIDRATAÇÃO
- ANEXO 7: ESTUDO DO EFEITO DA VELOCIDADE DE PROJEÇÃO
- ANEXO 8: ESTUDO DA VARIAÇÃO DE TRAÇO SEGUNDO A DIREÇÃO DE  
PROJEÇÃO (RECONSTITUIÇÃO)
- ANEXO 9: ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA DIREÇÃO DE PROJEÇÃO NO  
CONCRETO COM ADITIVO À BASE DE CARBONATO
- ANEXO 10: ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA DIREÇÃO DE PROJEÇÃO NO  
CONCRETO PROJETADO COM ADITIVO À BASE DE ALUMINATO
- ANEXO 11: RESULTADOS DO ACOMPANHAMENTO DA OBRA DA FERROVIA  
DO AÇO
- ANEXO 12: RESULTADOS DO ACOMPANHAMENTO DA OBRA DA EXTENSÃO  
NORTE DO METRÔ DE SÃO PAULO
- ANEXO 13: TESTES DE HIPÓTESE PARA OS RESULTADOS DOS ANEXOS  
11 E 12.



## ANEXO 1

## CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS EMPREGADOS NO TRABALHO

## CIMENTOS:

CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS (%)	CPE-32 CAUÊ	SERRANA T1	CIMINAS ARI-E USADO EM PLACAS		CIMINAS ARI-E USADO NA OBRA	
			CLÍNQUER (70 %)	ESCÓRIA (30 %)	CLÍNQUER (70 %)	ESCÓRIA (30 %)
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,24	3,50	3,52	1,97	3,52	2,96
CaO	60,34	60,75	66,64	43,20	66,64	43,16
SiO <sub>2</sub>	21,42	18,26	20,92	34,46	21,10	35,07
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,10	4,31	5,25	11,58	5,29	11,08
SO <sub>3</sub>	1,98	3,27	0,89	-	0,80	-
MgO	2,02	4,78	0,80	7,56	0,63	6,10
K <sub>2</sub> O	0,53	0,64	-	-	-	-
CaO livre	1,01	1,52	2,32	-	-	-
Perda ao fogo	5,66	3,59	0,60	1,45	0,57	1,28
Resíduo insolúvel	0,35	0,48	-	0,12	0,09	
Na <sub>2</sub> O	0,17	0,13	-	-	-	-
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	-	0,72	-	-	-	-
C <sub>3</sub> S	-	53,79	69,38	-	61,93	-
C <sub>2</sub> S	-	11,85	7,73	-	13,85	-
C <sub>3</sub> A	-	5,51	7,96	-	8,05	-
C <sub>4</sub> AF	-	10,64	10,70	-	10,65	-

## CIMENTOS:

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS E MECÂNICAS	CPE-32 CAUÊ	SERRANA T1	CIMINAS ARI-E USADO EM PLACAS		CIMINAS ARI-E USADO NA OBRA	
Início de pega (h)	2:30	2:20	3:00		3:17	
Fim de pega (h)	4:00	7:20	7:40		4:48	
Finura Blaine (m <sup>2</sup> /kg)	435	346	459		498	
Finura #200 (%)	2,0	4,5	0,4		-	
Finura #325 (%)	-	-	-		0,72	
Resistência à compressão						
1 dia (MPa)	-	-	12,4		14,7	
3 dias (MPa)	23,0	21,7	28,2		31,3	
7 dias (MPa)	31,3	28,7	40,1		41,6	
28 dias (MPa)	43,8	37,8	52,4		52,6	

## AGREGADOS:

ENSAID (abertura em mm)	AREIA (% acumulada)	PEDRISCO (% acumulada)
12,5	0	0
9,5	0	0
6,3	0	23
4,8	0	66
2,4	4	93
1,2	17	100
0,6	43	100
0,3	70	100
0,15	92	100
(0,15)	100	100
Teor de argila (%)	0,5	AUSENTE
Teor de pulverulentos (%)	1,2	2,7
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	2,61	2,72

## ADITIVOS:

ADITIVO	FABRICANTE	COMPONENTE PRINCIPAL	COMPOSIÇÃO QUÍMICA (%)	APARÊNCIA
VEDACIT RAPIDÍSSIMO	Otto Baungart	Carbonato de sódio Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> (41%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> : 5,08 Na <sub>2</sub> O: 25,1 K <sub>2</sub> O: 0,16 CO <sub>2</sub> : 17,0	pó branco
GLUNITE SR	Reax	Carbonato de sódio Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> (58%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> : 0,03 Na <sub>2</sub> O: 35,0 K <sub>2</sub> O: 0,02 CO <sub>2</sub> : 24,3	pó bege
SIGUNIT L65	Sika	Silicato de sódio		líquido amarelado
SIGUNIT L20	Sika	Aluminato de potássio		líquido amarelado

## ANEXO 2

## ESTUDOS SOBRE A INFLUÊNCIA DO TEOR DE UMIDADE

Cimento: Serrana TL

Traco: 1:2,50:1,85

Equipamento de projeção convencional com umidificação junto ao bico.

PLACA	MASSA DA PLACA (kg)	MASSA DA REFLEXÃO (kg)	H (%)	F <sub>c1a</sub> (MPa)	IDADE (dias)	ABSORÇÃO (%)		VOLUME DE VAZIOS (%)	MASSA ESPECÍFICA (g/cm <sup>3</sup> )			
						(1)	(2)		(M1)	(M2)	(M3)	(M4)
1	132,0	89,0	7,2	18,6	7	8,3	9,1	18,5	2,05	2,22	2,23	2,51
				21,0		7,9	8,7	18,1	2,07	2,23	2,25	2,52
				17,2		8,1	8,7	18,1	2,08	2,25	2,26	2,53
				16,7		7,7	8,2	17,2	2,10	2,26	2,27	2,53
				15,2		7,8	8,2	17,2	2,09	2,25	2,26	2,52
				16,3		7,9	8,4	17,5	2,09	2,26	2,26	2,53
				16,1		7,6	8,2	17,2	2,11	2,27	2,28	2,55
2	150,0	42,0	9,8	9,2	7	8,4	9,5	19,8	2,08	2,26	2,28	2,59
				11,4		8,2	9,0	18,9	2,09	2,26	2,28	2,58
				10,2		8,4	9,5	19,8	2,10	2,25	2,28	2,59
				14,1		8,2	8,6	18,1	2,09	2,26	2,27	2,55
				13,0		7,9	8,6	18,1	2,10	2,27	2,28	2,57
				12,3		7,9	8,4	17,7	2,11	2,28	2,29	2,57
				13,4		8,8	9,6	19,8	2,07	2,25	2,27	2,58
3	124,7	93,2	8,4	23,7	7	6,8	7,3	15,5	2,12	2,27	2,28	2,52
				22,9		7,1	7,5	15,7	2,11	2,26	2,26	2,50
				23,6		6,8	7,1	15,1	2,13	2,28	2,28	2,51
				23,8		6,9	7,2	15,2	2,11	2,26	2,26	2,49
				24,5		6,9	7,2	15,2	2,11	2,26	2,26	2,49
				24,6		6,9	7,2	15,2	2,12	2,26	2,27	2,49

Observações:

1. Resistência à compressão axial segundo NBR-5739 da ABNT.

2. Relação água/materiais (H) secos determinada por coleta e secagem de amostra com:

$$H = \frac{M_h - M_s}{M_s} \times 100$$

onde: M<sub>h</sub> = massa úmida e  
M<sub>s</sub> = massa seca

3. Absorção d'água, volume de vazios e massa específica segundo ASTM C-642/B1 com:

$$a. \text{ Absorção (1) após imersão} = \frac{B - A}{A} \times 100$$

$$b. \text{ Absorção (2) após imersão} = \frac{C - A}{A} \times 100$$

$$c. \text{ Volume de vazios permeáveis} = \frac{C - A}{C - D} \times 100$$

$$d. \text{ Massa específica: } M1 = \frac{A}{C - D}; M2 = \frac{B}{C - D}; M3 = \frac{C}{C - D}; M4 = \frac{A}{A - D}$$

Onde: A = massa seca em estufa;

B = massa saturada após imersão;

C = massa saturada após imersão e fervura;

D = massa submersa após imersão e fervura.

#### TESTE DE HIPÓTESE A

Comparação de várias médias - amostras de tamanhos diferentes<sup>(145)</sup>

Fonte de variação	Soma de quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F	Fa
Entre Amostras	$SQE = S \frac{\sum_{i=1}^k T_i^2}{n_i} - \frac{T^2}{n} = 468,36$	$k-1 = 2$	$SQE = \frac{468,36}{2} = 234,18$	$F = \frac{SQE}{SQR} = 85,4$	$F_{2,21,0,05} = 5,1$
Residual	$SQR = 0 - S \frac{\sum_{i=1}^k T_i^2}{n_i} = 57,53$	$5 n_i - k = 21$	$SQR = \frac{57,53}{21} = 2,74$		
Total	$SQT = SQE + SQR = 525,89$	$5 n_i - 1 = 23$			

Onde:

S = somatória

k = número de amostras

$n_i$  = número de elementos de cada amostra

F = quociente de Snedecor

Como  $F < F$  então concluímos que há diferença significativa a nível de 1 % de significância.

### TESTE DE HIPÓTESE B

Comparação de várias médias - amostras de tamanhos diferentes<sup>(145)</sup>

Fonte de variação	Soma de quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F	Fa
Entre Amostras	$SQE = S \frac{\sum_{i=1}^k T_i^2}{n_i} - \frac{T^2}{S} = 45,65$	$k-1 = 2$	$SQE = \frac{SQE}{k-1} = 22,83$	$F = \frac{S_E^2}{S_R^2} = 60,2$	$F_{B, 21, 1x} = 5,8$
Residual	$SQR = S - \frac{\sum_{i=1}^k T_i^2}{n_i} = 7,96$	$S \quad n_i - k = 21$	$SQR = \frac{SQR}{S n_i - k} = 0,83$		
Total	$SQT = SQE + SQR = 53,61$	$S \quad n_i - 1 = 23$			

Onde:

S = somatória

k = número de amostras

$n_i$  = número de elementos de cada amostra

F = quociente de Snedecor

Como  $F < F$  então concluímos que há diferença significativa a nível de 1 % de significância.

## ANEXO 3

## ESTUDO SOBRE A INFLUÊNCIA DO TEOR DE UMIDADE

Cimento: AF 40 Serrana

Aditivo: 3% REAX GUNITE SR

Traço: 1:2,50:1,85

Equipamento de projeção com pré-umidificação a 5m do bico.

Pressão de água: 2,5 MPa

Pressão de ar 0,7 MPa

Data de moldagem: 20/11/90

PLACA	CONSISTÊNCIA PROCTOR (mm)	H (%)	F <sub>c9</sub> (MPa)	F <sub>c28</sub> (MPa)	IDADE (dias)	ABSORÇÃO (%)		VOLUME DE VAZIOS PERMEÁ- VEIS(%)	MASSA ESPECÍFICA (g/cm <sup>3</sup> )				
						(1)	(2)		(M1)	(M2)	(M3)	(M4)	
1	90	8,5		27,2	49								
			22,1	34,2		6,0	7,4	15,6	2,11	2,23	2,26	2,50	
			30,3	28,9		6,4	8,6	17,9	2,08	2,21	2,26	2,53	
			25,2	27,1									
2	40	9,6		36,0	49								
			30,5	35,4		6,0	6,1	13,0	2,13	2,26	2,26	2,45	
			31,7	36,7		5,8	5,9	12,6	2,13	2,26	2,26	2,44	
			31,3	37,9									
3	45	9,5		38,0	49								
			34,1	37,1		5,6	5,6	12,1	2,15	2,27	2,27	2,44	
			33,7	37,3		5,4	5,5	11,8	2,15	2,27	2,27	2,44	
			36,4	39,2									
4	110	8,0		22,6	49								
			16,4	23,2		7,2	9,1	18,6	2,04	2,19	2,23	2,51	
			18,1	17,7		8,0	10,4	20,9	2,01	2,17	2,22	2,51	
			15,3	17,5									

## Observações:

1. Consistência Proctor segundo Prudêncio<sup>(125)</sup>
2. Resistência à compressão axial segundo NBR-5739 da ABNT.
3. Relação água/materiais (H) (idem Anexo 2).
4. Absorção d'água, volume de vazios e massa específica (idem Anexo 2).

## TESTE DE HIPÓTESE A

Comparação de várias médias - amostras de mesmo tamanho<sup>(145)</sup>

Fonte de variação	Soma de quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F	Fa
Entre Amostras	$SQE = S \sum_{i=1}^k \frac{T_i^2}{n} - \frac{T^2}{nk} = 559,73$	$k-1 = 3$	$SOE = \frac{SQE}{k-1} = 186,58$	$F = \frac{SE^2}{SR^2} = 34,5$	$F_{3,8,1\%} = 7,6$
Residual	$SQR = Q - S \sum_{i=1}^k \frac{T_i^2}{n} = 43,26$	$k(n-1) = 8$	$SQR = \frac{SQR}{kn-1} = 5,41$		
Total	$SQT = SQE + SQR = 602,99$	$nk-1 = 11$			

Onde:

S = somatória

k = número de amostras

n = número de elementos da amostra

F = quociente de Snedecor

Como Fa(F então concluímos que há diferença significativa a nível de 1 % de significância.

#### TESTE DE HIPÓTESE B

Comparação de várias médias - amostras de mesmo tamanho<sup>(145)</sup>

Fonte de variação	Soma de quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F	Fa
Entre Amostras	$SQE = S \sum_{i=1}^k \frac{T_i^2}{n} - \frac{T^2}{nk} = 784,58$	$k-1 = 3$	$SOE = \frac{SQE}{k-1} = 261,48$	$F = \frac{SE^2}{SR^2} = 46,2$	$F_{3,12,1\%} = 6,6$
Residual	$SQR = Q - S \sum_{i=1}^k \frac{T_i^2}{n} = 67,86$	$k(n-1) = 12$	$SQR = \frac{SQR}{kn-1} = 5,66$		
Total	$SQT = SQE + SQR = 852,44$	$nk-1 = 15$			

Como Fa(F então concluímos que há diferença significativa a nível de 1 % de significância.

## TESTE DE HIPÓTESE C

Comparação de várias médias - amostras de mesmo tamanho<sup>(145)</sup>

Fonte de variação	Soma de quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F	F <sub>α</sub>
Entre Amostras	$SQE = S \sum_{i=1}^k \frac{T_i^2}{n} - \frac{T^2}{nk} = 78,76$	$k-1 = 3$	$SQE = \frac{SQE}{k-1} = 26,25$	$F = \frac{SQE}{SQR} = 19,4$	$F_{3,4,1\%} = 16,$
Residual	$SQR = Q - SQE = 5,42$	$k(n-1) = 4$	$SQR = \frac{SQR}{kn-1} = 1,36$		
Total	$SQT = SQE + SQR = 84,17$	$nk-1 = 7$			

Como  $F > F_{\alpha}$  então concluímos que há diferença significativa a nível de 1 % de significância.



## ANEXO 4

## ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO TEOR DE ADITIVO NAS PROPRIEDADES DO CONCRETO PROJETADO.

Cimento: CPE 32 CAUÊ

Aditivo: SIGUNIT L65: placas 75, 76 e 77; REAX: placas 78, 79 e 80; SIGUNIT L20: placas 160, 161, 162 e 163.

Traço: 1,2,50,1,85

Equipamento de projeção com pré-unidificação a 5m do bico.

Pressão de água: 2,5 MPa

Pressão de ar: 0,7 MPa

PLACA	TEOR ADITIVO (%)	CONSIS- TÊNCIA PROCTOR (mm)	H (%)	F <sub>c7</sub> (MPa)	F <sub>c28</sub> (MPa)	F <sub>c91</sub> (MPa)	IDADE (dias)	ABSORÇÃO (%)		VOLUME DE VA- ZIOS	MASSA ESPECÍFICA (g/cm <sup>3</sup> )			
								(1)	(2)		PERMEÁ- VEIS (%)	(M1)	(M2)	(M3)
75	0	43	9,9	31,8	46,8		27	5,0	5,1	11,4	2,23	2,34	2,34	2,52
				35,7	46,7			5,0	5,1	11,5	2,23	2,34	2,34	2,52
				33,1	50,2			5,1	5,3	11,8	2,23	2,35	2,35	2,53
76	4,3	32	12,1	27,5	34,8		27	6,3	6,3	13,7	2,17	2,31	2,31	2,52
				24,7	34,2			6,4	6,5	14,0	2,15	2,29	2,29	2,50
				25,1	34,0			6,4	6,5	14,0	2,16	2,30	2,30	2,51
77	8,0	42	9,6	21,8	32,9		27	6,9	7,2	15,3	2,14	2,29	2,29	2,53
				21,2	31,6			6,9	7,3	15,6	2,14	2,29	2,29	2,54
				21,6	22,0			6,7	7,1	15,2	2,15	2,29	2,30	2,53
78	3,0	24	10,7	22,7	28,7	36,5	29	6,7	7,0	15,2	2,16	2,31	2,31	2,55
				23,1	30,3	36,8		6,7	7,1	15,2	2,16	2,30	2,31	2,54
				22,1	30,5	36,3		6,7	7,1	15,4	2,16	2,30	2,31	2,55
79	4,5	59	10,4	21,8	29,4	35,9	29	6,5	6,7	14,7	2,18	2,32	2,33	2,56
				22,3	28,8	34,6		6,4	7,0	15,2	2,19	2,33	2,34	2,58
				22,7	29,2	34,6		6,5	6,8	14,7	2,18	2,32	2,33	2,55
80	7,5	80	9,2	19,5	25,7	31,4	29	6,9	7,3	15,9	2,17	2,32	2,33	2,58
				18,6	26,0	31,6		6,9	7,3	15,8	2,18	2,32	2,33	2,58
				18,8	25,5	31,1		6,9	7,3	15,9	2,18	2,33	2,34	2,59
160	0,0	22	7,6	31,2	43,6		28	6,1	6,1	13,3	2,17	2,30	2,30	2,50
				29,7	41,2			6,1	6,2	13,4	2,17	2,30	2,30	2,50
				31,2	42,4			5,9	6,0	13,0	2,18	2,31	2,31	2,50
161	2,5	47	9,0	25,3	33,3		28	6,5	6,6	14,3	2,16	2,30	2,30	2,52
				24,6	32,4			6,5	6,6	14,3	2,16	2,30	2,30	2,51
				25,3	33,5			6,8	6,9	14,8	2,14	2,29	2,29	2,52
162	3,0	42	8,8	27,5	32,3		28	6,7	6,9	14,8	2,15	2,29	2,28	2,52
				26,2	36,4			7,1	7,3	15,5	2,13	2,28	2,29	2,52
				24,2	28,0			6,7	6,9	14,8	2,14	2,29	2,28	2,51
163	3,5	37	8,4	25,7	36,6		28	6,8	7,0	15,0	2,14	2,29	2,29	2,52
				26,0	31,1			6,8	7,2	15,4	2,14	2,28	2,29	2,52
				25,1	32,2			6,6	6,8	15,6	2,15	2,29	2,29	2,51

Observações: iden Anexo 3.

Resultados do ensaio com Penetrômetro de Meynadier da placa 76:

PLACA:		76		PENETRÔMETRO DE MEYNADIER				DATA:		23/04/91		HORARIO DA PROECCAO:			
PENETR.		HORARIO		INTERVALO		INDICE DE PENETRACAO									
No.	DA	DE	TEMPO(min)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	MEDIA	S
1	12:23	90		17	17	17	17	17	22 *	17	12 *	17 *	22 *	17	0
2	12:53	120		32 *	27 *	27	27	22 *	22	27	27	22	22 *	25,3	2,58
3	13:23	150		27	27	27	27	27	27	37 *	27 *	27 *	22 *	27	0
4	13:53	180		32	22 *	27 *	27	32	37 *	34 *	27	27	27	28,7	2,58
5	13:51	180		17	32	32	32	27	37 *	27	27 *	27 *	37 *	30,3	2,58
6	14:13	200		37 *	37 *	42 *	42	42	47 *	42	37	42	37	40,3	2,58
7	14:33	220		42 *	42 *	47 *	47 *	47	42	42	47	47	42	44,5	2,74
8	14:51	240		57	47 *	52 *	52	52	52	57	52	62 *	62 *	53,7	2,58
9	15:13	260		67	67	67	F/E *	62 *	F/E *	62 *	F/E	F/E	F/E		
10															

Resultados do ensaio com Penetrômetro de Meynadier da placa 77:

PLACA:		77		PENETRÔMETRO DE MEYNADIER				DATA:		23/04/91		HORARIO DA PROECCAO:			
PENETR.		HORARIO		INTERVALO		INDICE DE PENETRACAO									
No.	DA	DE	TEMPO(min)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	MEDIA	S
1	11:57	20		32 *	37	32	42 *	42 *	42	37	37	32 *	37	36,5	3,16
2	12:12	40		62	F/E	F/E	F/E								
3															

Resultados do ensaio com Penetrômetro de Meynadier da placa 78:

PLACA:		78		PENETRÔMETRO DE MEYNADIER				DATA:		30/04/91		HORARIO DA PROECCAO:			
PENETR.		HORARIO		INTERVALO		INDICE DE PENETRACAO									
No.	DA	DE	TEMPO(min)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	MEDIA	S
1	10:12	20													
2	10:52	40		17 *	22 *	17 *	17 *	17	17	17	17	17	17	17	0
3	11:12	60		27 *	17 *	22	27 *	22	22	17 *	27	22	22	22,8	2,04
4	11:32	80		32 *	32 *	27	27	27	22 *	27	27	22 *	27	27	0
5	11:52	100		32	32 *	37 *	32	32	32	32	37	27 *	27 *	32	0
6	12:12	120		37 *	42 *	37	37	37	42 *	37	37	37	32 *	37	0
7	12:32	180		52 *	52 *	47	47	37 *	47	42	47	47	42 *	48,2	2,04
8	12:52	200		37 *	42 *	47	52	52	47	52	42	52 *	52 *	48,7	4,08
9	13:12	220		42 *	42 *	52 *	47	47	52	52	47	57 *	47	48,7	2,58
10	13:32	240		67	67 *	67 *	67 *	57 *	67	67	67	67	67	67	0







## Resultados do ensaio com Penetrômetro de Energia Constante da placa 162:

PLACA: 162		PENETRÔMETRO DE ENERGIA CONSTANTE (PEC)										DATA:		HORARIO DA PROJECÃO: 10:20	
PENETR.   HORARIO   INTERVALO		PEC ( DIFERENÇA DE LEITURA )													
No.	DA PENETR.	TEMPO (min)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	MEDIA	S	
1	12:20	120	12,5	12,6	13	11,5 *	13,9 *	13,3	10,1 *	13,6 *	12,6	11,7	12,6	0,54	
2	13:20	180	13,3 *	12,1 *	8,7 *	11,3	9,5 *	9,5	10,2	9,9	9,9	9,7	10,1	0,64	
3	14:20	240	8,6	9,5 *	9,6 *	7 *	8,7	6 *	8,5	9,4	9,4	8,1	8,8	0,52	
4	16:20	360	8 *	7,3	8,6 *	6,1 *	7,7	7,3	3,8 *	6 *	7,6	7,5	7,3	0,58	
5															

## Resultados do ensaio com Penetrômetro de Energia Constante da placa 163:

PLACA: 163		PENETRÔMETRO DE ENERGIA CONSTANTE (PEC)										DATA:		HORARIO DA PROJECÃO: 10:36	
PENETR.   HORARIO   INTERVALO		PEC ( DIFERENÇA DE LEITURA )													
No.	DA PENETR.	TEMPO (min)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	MEDIA	S	
1	12:36	120	15,2	13,3	15,5	12 *	13,2	12,9 *	15,2 *	15,1	13,3	14	14	0,92	
2	13:36	180	10,7	12,3	10,3 *	13,7 *	13	13,1	11,6	10,6	9,5 *	13,8 *	11,9	1,1	
3	14:36	240	7,9	8,8	10,6 *	11,4 *	6,2 *	10,4	8,7	9,9	9,4	7,4 *	9,2	0,91	
4	16:36	360	8	7,4	5,5 *	7,4	7,9	6,5 *	6,7	7,5	8,3 *	8 *	7,5	0,46	
5															

## TESTE DE HIPÓTESE A

Comparação de várias médias - amostras de mesmo tamanho<sup>(145)</sup>

Fonte de variação	Soma de quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F	Fa
Entre Amostras	$SQE = S \sum_{i=1}^k \frac{T_i^2}{n} - \frac{T^2}{nk} = 1,23$	$k-1 = 2$	$SQE = \frac{SQE}{k-1} = 0,615$	$F = \frac{SQE}{SQR} = 0,59$	$F_{2,6,10\%} = 2,9$
Residual	$SQR = Q - SQE = \sum_{i=1}^k \frac{T_i^2}{n} - \frac{T^2}{nk} = 6,27$	$k(n-1) = 6$	$SQR = \frac{SQR}{kn-1} = 1,045$		
Total	$SQT = SQE + SQR = 7,50$	$nk-1 = 8$			

Onde.

S = somatória

k = número de amostras

n = número de elementos da amostra

F = quociente de Snedecor

Como  $F_a > F$  então concluímos que não há diferença significativa a nível de 10 % de significância.

### TESTE DE HIPÓTESE B

Comparação de várias médias - amostras de mesmo tamanho<sup>(145)</sup>

Fonte de variação	Soma de quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F	$F_a$
Entre Amostras	$SQE = S \frac{\sum_{i=1}^k T_i^2}{n} - \frac{T^2}{nk} = 1,89$	$k-1 = 2$	$s_{E^2} = \frac{SQE}{k-1} = 0,945$	$F = \frac{s_{E^2}}{s_{R^2}} = 0,11$	$F_{2,6,10\%} = 2,9$
Residual	$SQR = Q - S \frac{\sum_{i=1}^k T_i^2}{n} = 52,91$	$k(n-1) = 6$	$s_{R^2} = \frac{SQR}{kn-1} = 8,818$		
Total	$SQT = SQE + SQR = 54,80$	$nk-1 = 8$			

Como  $F_a < F$  então concluímos que não há diferença significativa a nível de 10 % de significância.





## Resultados do ensaio com Penetrômetro de Meynadier da placa B7.

PLACA: B7		PENETRÔMETRO DE MEYNADIER		DATA:		HORARIO DA PROJECAO:		15:15							
HORARIO		TEMPERATURA		INDICE DE PENETRACAO											
No.	DA	PLACA	TEMPERATURA	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	MEDIA	S
1	15:30	20	20	22	17	17	22	17 *	22	22	27	22	27 *	21.2	2.04
2	15:30	40	20	27	22	22	27 *	22	27	27 *	17 *	22 *	22	22	0
3	16:10	40	20	22 *	27 *	32 *	27 *	22	22	22	27	27	22	23.7	2.58
4	16:40	90	20	27 *	22	17 *	17 *	27 *	27	27	27	22	22	23.7	2.58
5	17:00	110	20	27 *	32	37 *	32	27 *	27	32	32	27	37 *	30.3	2.58
6															

## TESTE DE HIPÓTESE A

Comparação de duas médias com dados não emparelhados - segundo caso<sup>(145)</sup>

$$\text{Primeira situação: } \bar{x}_1 = 26,1 \quad s_1 = 2,69 \quad n_1 = 3$$

$$\text{Segunda situação: } \bar{x}_2 = 21,1 \quad s_2 = 3,91 \quad n_2 = 3$$

Hipóteses:

$$H_0: \mu_1 = \mu_2$$

$$H_1: \mu_1 > \mu_2$$

$$s_p = \frac{\sqrt{(n_1-1)s_1^2 + (n_2-1)s_2^2}}{n_1 + n_2 - 2} = 3,3$$

$$s_p = 1,82$$

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{s_p \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}} = 3,36$$

$$t_{4,5\%} = 2,132$$

Como  $t_{4,5\%} < t$  há evidência a nível de 5% de significância, logo rejeitamos  $H_0$ .

## TESTE DE HIPÓTESE B

Comparação de duas médias com dados não emparelhados - segundo caso<sup>(145)</sup>

$$\text{Primeira situação: } \bar{x}_1 = 33,43 \quad s_1 = 0,062 \quad n_1 = 3$$

$$\text{Segunda situação: } \bar{x}_2 = 30,67 \quad s_2 = 3,482 \quad n_2 = 3$$

Hipóteses:

$$H_0: \mu_1 = \mu_2$$

$$H_1: \mu_1 > \mu_2$$

$$s_p = \frac{(n_1-1)s_1 + (n_2-1)s_2}{n_1 + n_2 - 2} = 1,772$$

$$s_p = 1,331$$

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{s_p \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}} = 2,53$$

$$t_{4,5\%} = 2,132$$

Como  $t_{4,5\%} < t$  há evidência a nível de 5% de significância, logo rejeitamos  $H_0$ .

TESTE DE HIPÓTESE C

Comparação de duas médias com dados não emparelhados - segundo caso<sup>(145)</sup>

$$\text{Primeira situação: } \bar{x}_1 = 37,2 \quad s_1^2 = 28,7 \quad n_1 = 3$$

$$\text{Segunda situação: } \bar{x}_2 = 36,4 \quad s_2^2 = 26,9 \quad n_2 = 3$$

Hipóteses:

$$H_0: \mu_1 = \mu_2$$

$$H_1: \mu_1 > \mu_2$$

$$s_p = \frac{(n_1-1)s_1 + (n_2-1)s_2}{n_1 + n_2 - 2} = 28,3$$

$$s_p = 5,32$$

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{s_p \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}} = 0,18$$

$$t_{4,5\%} = 1,533$$

Como  $t_{4,5\%} > t$  não há evidência a nível de 5% de significância, logo aceitamos  $H_0$ .

## TESTE DE HIPÓTESE D

Comparação de duas médias com dados não emparelhados - segundo caso<sup>(145)</sup>

Primeira situação:  $\bar{x}_1 = 16,0$      $s_1^2 = 0,18$      $n_1 = 3$

Segunda situação:  $\bar{x}_2 = 15,6$      $s_2^2 = 0,22$      $n_2 = 3$

Hipóteses:

$$H_0: \mu_1 = \mu_2$$

$$H_1: \mu_1 > \mu_2$$

$$s_p^2 = \frac{(n_1-1)s_1^2 + (n_2-1)s_2^2}{n_1 + n_2 - 2} = 0,2$$

$$s_p = 0,447$$

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{s_p \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}} = 1,10$$

$$t_{4, 5\%} = 1,533$$

Como  $t_{4, 5\%} > t$  não há evidência a nível de 5% de significância, logo aceitamos  $H_0$ .

## ANEXO 6

## ESTUDO DO EFEITO DA PRÉ-HIDRATAÇÃO

Cimento: ARI-E CIMINAS: placas 10, 11 e 12. CPE 32 CAUÊ: placas 13,14 e 15

Aditivo: 3% de REAX GUNITE SR

Traço: 1:2,50:1,85

Equipamento de projeção com pré-umidificação a 5m do bico.

Pressão de água: 2,5 MPa

Pressão de ar: 0,7 MPa

PLACA	TEMPO DE ESPERA (min.)	CONSISTÊNCIA (PROCTOR) (mm)	H (%)	F <sub>c7</sub> (MPa)	F <sub>c28</sub> (MPa)	F <sub>c91</sub> (MPa)	IDADE (dias)	ABSORÇÃO (%)		VOLUME DE VAZIOS (%)	MASSA ESPECÍFICA (g/cm <sup>3</sup> )			
								(1)	(2)		PERMEÁVEIS (%)	(M1)	(M2)	(M3)
10	0	65	8,4	18,5	31,6		42	6,6	7,6	15,8	2,08	2,22	2,24	2,47
		75		25,4	26,6			6,5	7,4	15,4	2,08	2,22	2,24	2,46
				27,4	30,7									
					27,2									
11	30	65	8,7	11,7	15,5		42	8,8	11,3	22,2	1,97	2,14	2,19	2,53
		75		9,9	17,6			8,9	12,6	24,2	1,97	2,11	2,16	2,54
		85		13,7	14,2									
					22,6									
12	60	45	9,2	23,3	30,0		42	7,1	7,5	15,4	2,06	2,21	2,22	2,44
		38		23,8	28,8			7,0	7,7	15,8	2,05	2,20	2,21	2,44
		43		19,9	26,4									
					31,6									
13	0	90				25,6	84	6,6	7,9	17,0	2,14	2,28	2,31	2,58
		85				25,0		6,7	7,5	16,1	2,14	2,28	2,30	2,55
						26,2		6,6	7,4	15,8	2,15	2,29	2,30	2,55
						29,4								
						28,4								
						26,5								
14	30	90				11,9	84	8,7	10,9	22,4	2,06	2,23	2,28	2,65
		85				16,9		10,0	12,2	24,5	2,01	2,21	2,25	2,65
						14,6		8,6	11,4	23,2	2,04	2,21	2,27	2,65
						16,3								
						16,9								
						13,7								
15	60	80				17,4	84	7,0	8,5	17,9	2,12	2,27	2,30	2,58
		80				24,8		7,1	8,3	17,6	2,11	2,26	2,29	2,56
		86				25,6		7,3	9,1	19,0	2,09	2,25	2,28	2,58
						19,9								
						24,2								
						21,0								

Observações: idem Anexo 3.

## TESTE DE HIPÓTESE A

Comparação de várias médias - amostras de mesmo tamanho<sup>(145)</sup>

Fonte de variação	Soma de quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F	F <sub>α, 0,1x</sub>
Entre Amostras	$SQE = S \sum_{i=1}^k \frac{T_i^2}{n} - \frac{T^2}{nk} = 257,71$	$k-1 = 2$	$SQE = \frac{SQE}{k-1} = 128,9$	$F = \frac{S_E^2}{S_R^2} = 12,9$	$F_{2, 9, 1x} = 10,5$
Residual	$SQR = Q - S \sum_{i=1}^k \frac{T_i^2}{n} = 59,84$	$k(n-1) = 6$	$SQR = \frac{SQR}{kn-1} = 9,97$		
Total	$SQT = SQE + SQR = 317,55$	$nk-1 = 8$			

Como Fa &lt; F então concluímos que há diferença significativa a nível de 1 % de significância.

## TESTE DE HIPÓTESE B

Comparação de várias médias - amostras de mesmo tamanho<sup>(145)</sup>

Fonte de variação	Soma de quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F	F <sub>α, 0,1x</sub>
Entre Amostras	$SQE = S \sum_{i=1}^k \frac{T_i^2}{n} - \frac{T^2}{nk} = 361,21$	$k-1 = 2$	$SQE = \frac{SQE}{k-1} = 180,61$	$F = \frac{S_E^2}{S_R^2} = 22,0$	$F_{2, 9, 1x} = 8,0$
Residual	$SQR = Q - S \sum_{i=1}^k \frac{T_i^2}{n} = 73,96$	$k(n-1) = 9$	$SQR = \frac{SQR}{kn-1} = 8,218$		
Total	$SQT = SQE + SQR = 435,17$	$nk-1 = 11$			

Como Fa &lt; F então concluímos que há diferença significativa a nível de 1 % de significância.

## TESTE DE HIPÓTESE C

Comparação de várias médias - amostras de mesmo tamanho<sup>(145)</sup>

Fonte de variação	Soma de quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F	F <sub>α</sub>
Entre Amostras	$SQE = S \sum_{i=1}^k \frac{T_i^2}{n} - \frac{T^2}{nk} = 77,01$	$k-1 = 2$	$SQE = \frac{SQE}{k-1} = 38,50$	$F = \frac{SQE}{SQR} = 53,5$	$F_{2, 15, 1\%} = 30,8$
Residual	$SQR = 0 - S \sum_{i=1}^k \frac{T_i^2}{n} = 2,16$	$k(n-1) = 3$	$SQR = \frac{SQR}{kn-1} = 0,72$		
Total	$SQT = SQE + SQR = 79,17$	$nk-1 = 5$			

Como  $F_a > F$  então concluímos que não há diferença significativa a nível de 10 % de significância.

## TESTE DE HIPÓTESE D

Comparação de várias médias - amostras de mesmo tamanho<sup>(145)</sup>

Fonte de variação	Soma de quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F	F <sub>α</sub>
Entre Amostras	$SQE = S \sum_{i=1}^k \frac{T_i^2}{n} - \frac{T^2}{nk} = 423,48$	$k-1 = 2$	$SQE = \frac{SQE}{k-1} = 211,74$	$F = \frac{SQE}{SQR} = 36,6$	$F_{2, 15, 1\%} = 6,4$
Residual	$SQR = 0 - S \sum_{i=1}^k \frac{T_i^2}{n} = 86,87$	$k(n-1) = 15$	$SQR = \frac{SQR}{kn-1} = 5,79$		
Total	$SQT = SQE + SQR = 510,35$	$nk-1 = 17$			

Como  $F_a < F$  então concluímos que há diferença significativa a nível de 1 % de significância.

## TESTE DE HIPÓTESE E

Comparação de várias médias - amostras de mesmo tamanho<sup>(145)</sup>

Fonte de variação	Soma de quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F	F <sub>α</sub>
Entre Amostras	$SQE = S \sum_{i=1}^k \frac{T_i^2}{n} - \frac{T^2}{nk} = 80,47$	$k-1 = 2$	$SQE = \frac{SQE}{k-1} = 40,24$	$F = \frac{SQE}{SQR} = 58,7$	$F_{2,6,1\%} = 10,6$
Residual	$SQR = Q - SQE = 4,11$	$k(n-1) = 6$	$SQR = \frac{SQR}{kn-1} = 0,685$		
Total	$SQT = SQE + SQR = 84,58$	$nk-1 = 8$			

Como F > F<sub>α</sub> então concluímos que há diferença significativa a nível de 1 % de significância.

Onde:

S = somatória

k = número de amostras

n = número de elementos da amostra

F = quociente de Snedecor

## ANEXO 7

## ESTUDO DO EFEITO DA VELOCIDADE DE PROJEÇÃO

Cimento: SERRANA TL

Traço: 1:2,50:1,85

Equipamento de projeção convencional com bico afunilado (Placas A, B e C) e bico prolongado (Placas D, E e F)

PLACA	PRESSÃO DE AR COMPR. (MPa)	PESO DA PLACA (kg)	PESO DA RE- FLEXÃO (kg)	F <sub>C7</sub> (MPa)	F <sub>C14</sub> (MPa)	IDADE (dias)	ABSORÇÃO (%)		VOL. DEI MASSA ESPECÍFICA (g/cm <sup>3</sup> ) VAZIOS PERMEÁ.					
							(1)	(2)	(%)	(M1)	(M2)	(M3)	(M4)	
A	0,15	112,8	31,0		19,4		7,9	10,1	20,9	2,07	2,22	2,28	2,62	
					23,5		8,1	10,1	20,9	2,06	2,23	2,27	2,61	
					19,3		8,0	10,2	21,1	2,07	2,24	2,29	2,63	
					15,6									
					19,8									
				17,4										
B	0,25	112,5	29,5		19,2		7,6	10,1	20,9	2,07	2,23	2,28	2,62	
					21,8		7,4	9,4	19,7	2,10	2,26	2,30	2,62	
					23,8		7,9	10,1	20,8	2,06	2,23	2,27	2,61	
					26,6									
					21,4									
				17,2										
C	0,40	116,0	33,7		32,1		6,5	6,7	14,4	2,15	2,29	2,29	2,51	
					37,1		6,4	6,7	14,4	2,15	2,29	2,30	2,52	
					32,7									
					35,9									
					25,8									
				35,2										
D	0,15	115,7	10,5		19,8		8,3	11,0	22,4	2,03	2,20	2,26	2,62	
					12,0		7,6	9,8	20,3	2,08	2,23	2,28	2,61	
					7,5		8,3	10,4	21,3	2,05	2,22	2,26	2,61	
					16,5									
					10,5									
				12,1										
E	0,25	108,1	29,7		18,1		8,2	9,8	20,3	2,07	2,24	2,28	2,60	
					14,9		7,8	9,9	20,7	2,08	2,24	2,29	2,62	
					19,3		7,0	8,9	18,8	2,12	2,27	2,31	2,61	
					23,5									
					20,4									
				21,0										
F	0,40	106,0	25,5		16,3		6,9	8,5	18,1	2,13	2,28	2,31	2,61	
					22,9		6,8	8,5	18,1	2,13	2,28	2,31	2,60	
					20,3		7,0	8,7	18,4	2,12	2,27	2,30	2,61	
					20,9									
					18,3									
				22,9										

Observações: idem Anexo 3.



## TESTE DE HIPÓTESE A

Comparação de várias médias - amostras de mesmo tamanho<sup>(145)</sup>

Fonte de variação	Soma de quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F	Fa
Entre Amostras	$SQE = S \sum_{i=1}^k \frac{T_i^2}{n} - \frac{T^2}{nk} = 665,6$	$k-1 = 2$	$s_{E^2} = \frac{SQE}{k-1} = 332,8$	$F = \frac{s_{E^2}}{s_{R^2}} = 28,9$	$F_{2;15;1\%} = 6,36$
Residual	$SQR = Q - S \sum_{i=1}^k \frac{T_i^2}{n} = 172,8$	$k(n-1) = 15$	$s_{R^2} = \frac{SQR}{kn-1} = 11,5$		
Total	$SQT = SQE + SQR = 838,40$	$nk-1 = 17$			

Onde:

S = somatória

k = número de amostras

n = número de elementos da amostra

F = quociente de Snedecor

Como  $Fa < F$  então concluímos que há diferença significativa a nível de 1 % de significância.

## TESTE DE HIPÓTESE B

Comparação de várias médias - amostras de mesmo tamanho<sup>(145)</sup>

Fonte de variação	Soma de quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F	Fa
Entre Amostras	$SQE = S \sum_{i=1}^k \frac{T_i^2}{n} - \frac{T^2}{nk} = 188,39$	$k-1 = 2$	$s_{E^2} = \frac{SQE}{k-1} = 94,20$	$F = \frac{s_{E^2}}{s_{R^2}} = 8,17$	$F_{2;15;1\%} = 6,4$
Residual	$SQR = Q - S \sum_{i=1}^k \frac{T_i^2}{n} = 172,86$	$k(n-1) = 15$	$s_{R^2} = \frac{SQR}{kn-1} = 11,52$		
Total	$SQT = SQE + SQR = 361,25$	$nk-1 = 17$			

Como  $Fa < F$  então concluímos que há diferença significativa a nível de 1 % de significância.

## ANEXO B

## ESTUDO DA VARIAÇÃO DE TRAÇO SEGUNDO A DIREÇÃO DE PROJEÇÃO (RECONSTITUIÇÃO)

Cimento: CPE 32 Cauê

Aditivo: nenhum

Traço: 1:2,96:2,04 (1:5,0)

Equipamento de projeção com pré-umidificação a 5 metros do bico com pressão de água: 2,0 MPa

Pressão de ar: 0,7 MPa

Distribuição granulométrica (NBR 7211 da ABNT) das amostras lavadas sobre a peneira #200

PENEIRA (abertura em mm)	PAREDE		45°		TETO	
	Retido (g)	Retido (%)	Retido (g)	Retido (%)	Retido (g)	Retido (%)
9,5	0	0	0	0	0	0
6,3	129,4	18,2	103,6	15,0	84,0	12,7
4,8	69,7	9,8	56,5	8,2	44,1	6,7
2,4	101,1	14,2	76,2	11,0	88,1	13,4
1,2	67,7	9,5	57,4	8,3	58,0	8,8
0,6	125,6	17,6	133,1	19,3	116,8	17,7
0,3	102,9	14,4	125,6	18,2	120,5	18,3
0,15	70,9	9,9	86,5	12,5	92,5	14,0
0,075	41,5	5,8	47,5	6,9	52,1	7,9
0,075	4,6	0,6	4,1	0,6	3,2	0,5
TOTAL	713,4	100,0	690,5	100,0	659,3	100,0
TEOR DE UMIDADE-H	9,2 %		10,1 %		10,9 %	

Traço: 1:2,5:1,8 (1:5,0)

Distribuição granulométrica (NBR 7211 da ABNT) das amostras lavadas sobre a peneira #200

PENEIRA (abertura em mm)	45°		TETO	
	Retido (g)	Retido (%)	Retido (g)	Retido (%)
9,5	0	0	0	0
6,3	50,9	7,4	48,3	7,3
4,8	35,8	5,2	30,2	4,6
2,4	79,4	11,6	60,5	9,1
1,2	75,0	10,9	58,4	8,8
0,6	162,8	23,7	156,4	23,7
0,3	138,9	20,2	148,7	22,5
0,15	85,2	12,4	91,3	13,8
0,075	51,0	7,4	55,2	8,3
0,075	8,2	1,2	12,3	1,9
TOTAL	687,2	100,0	641,3	100,0
TEOR DE UMIDADE-H	8,0 %		8,3 %	
CONSISTÊNCIA (mm)	80 - 75 - 80		68 - 50 - 55 - 50	

Traço: 1:1,64:1,36 (1:3,0)

Distribuição granulométrica (NBR 7211 da ABNT) das amostras lavadas sobre a peneira #200

PENEIRA (abertura em mm)	PAREDE		45°		TETO	
	Retido (g)	Retido (%)	Retido (g)	Retido (%)	Retido (g)	Retido (%)
9,5	0	0	0	0	0	0
6,3	40,2	6,1	40,4	6,6	40,1	6,9
4,8	34,0	5,2	30,0	4,9	29,9	5,1
2,4	75,8	11,6	67,4	10,9	63,0	10,8
1,2	63,6	9,7	56,4	9,2	51,4	8,8
0,6	145,9	22,3	134,7	21,9	120,2	20,5
0,3	141,2	21,5	125,2	20,3	120,8	20,6
0,15	86,4	13,2	86,6	14,0	82,4	14,1
0,075	49,5	7,5	52,1	8,4	55,5	9,5
(0,075)	19,1	2,9	13,5	2,2	21,9	3,7
TOTAL	655,7	100,0	616,3	100,0	585,2	100,0
TEOR DE UMIDADE-H	7,6 %		7,6 %		8,7 %	
CONSISTÊNCIA (mm)	80 - 110 - 105		115 - 85		85 - 90 - 85	









## TESTE DE HIPÓTESE A

Comparação de várias médias - amostras de mesmo tamanho<sup>(145)</sup>

Fonte de variação	Soma de quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F	Fa
Entre Amostras	$SQE = S \frac{\sum_{i=1}^k T_i^e}{n} - \frac{T^e}{nk} = 0,8$	$k-1 = 2$	$SQE$ $s_E^e = \frac{SQE}{k-1} = 0,4$	$F = \frac{s_E^e}{s_R^e} = 0,74$	$F_{2,6,10\%} = 3,46$
Residual	$SQR = 0 - S \frac{\sum_{i=1}^k T_i^e}{n} = 3,24$	$k(n-1) = 6$	$SQR$ $s_R^e = \frac{SQR}{kn-1} = 0,54$		
Total	$SQT = SQE + SQR = 4,04$	$nk-1 = 8$			

Onde:

S = somatória

k = número de amostras

n = número de elementos da amostra

F = quociente de Snedecor

Como  $F_a > F$  então concluímos que não há diferença significativa a nível de 10 % de significância.

## TESTE DE HIPÓTESE B

Comparação de várias médias - amostras de mesmo tamanho<sup>(145)</sup>

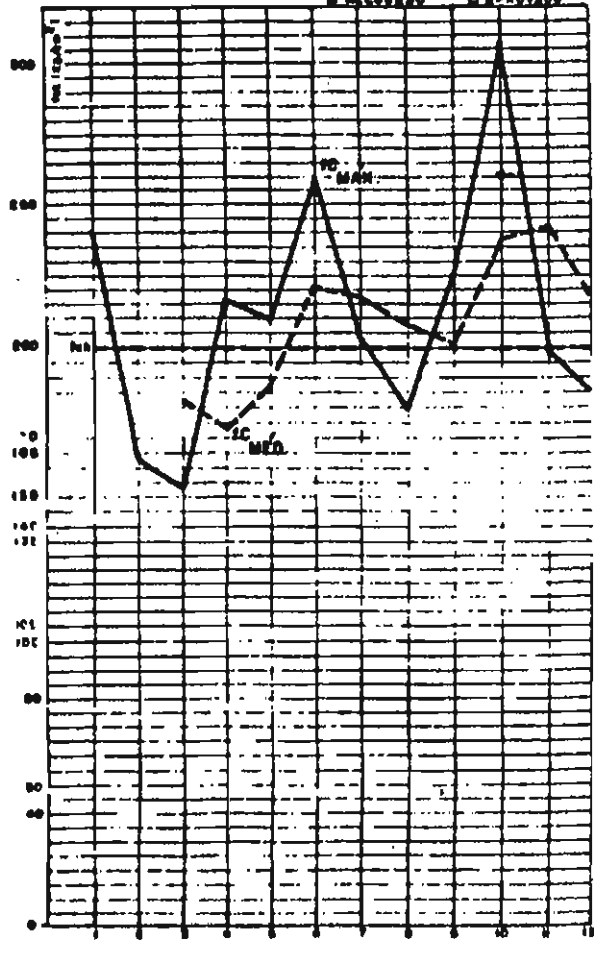
Fonte de variação	Soma de quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F	Fa
Entre Amostras	$SQE = S \frac{\sum_{i=1}^k T_i^e}{n} - \frac{T^e}{nk} = 3,27$	$k-1 = 2$	$SQE$ $s_E^e = \frac{SQE}{k-1} = 1,635$	$F = \frac{s_E^e}{s_R^e} = 1,001$	$F_{2,6,10\%} = 3,46$
Residual	$SQR = 0 - S \frac{\sum_{i=1}^k T_i^e}{n} = 9,8$	$k(n-1) = 6$	$SQR$ $s_R^e = \frac{SQR}{kn-1} = 1,633$		
Total	$SQT = SQE + SQR = 13,07$	$nk-1 = 8$			

Como  $F_a > F$  então concluímos que não há diferença significativa a nível de 10 % de significância.



PIBUNIBEDD PEDRAZ		CONTOLE ESTATÍSTICO DE CONCRETO PROJETO		engofol			
TRAÇO 1:1,40:2,12		IDADE 28 DIAS		IC <sub>90</sub> 200 kgf/cm <sup>2</sup> LOTE 11			
EXEMPLAR Nº	DATA DE MOLDAGEM	CORPO DE PROVA 1	CORPO DE PROVA 2	CORPO DE PROVA 3	IC MÁXIMO	IC MÉDIO	VALOR DE ENSAIO (kgf/cm <sup>2</sup> )
1	05.05.81	237	239	240	240,0	238,7	-
2	07.05.81	158	158	164	164,0	160,0	-
3	21.05.81	166	166	153	153,0	147,0	181,9
4	05.06.81	202	217	-	217,0	209,5	172,2
5	15.06.81	210	208	208	210,0	208,7	188,4
6	17.06.81	240	238	256	256,0	244,7	220,9
7	02.07.81	203	203	203	203,0	203,0	218,8
8	10.07.81	175	175	180	180,0	176,7	208,1
9	15.07.81	219	221	218	221,0	219,3	199,7
10	27.08.81	295	303	308	308,0	302,0	232,7
11	23.09.81	181	198	-	198,0	189,5	236,9
12	24.09.81	145	127	185	185,0	152,3	214,6

MÉDIA DE 3 ENSAIOS CONSECUTIVOS (ACI / 318/71)  
 RECURSADO APROVADO



MÉDIAS  
211,3 204,3 -

CONCEITOS (ACI-214/65)  
 DSV.PDR. S. = 44,3  
 COEFIC. V. = 21,72  
 CONTROLE DO PROCESSO  
 POBRE

DSV.PDR. S.1 = 8,7  
 COEFIC. V.1 = 4,2X  
 CONTROLE DO ENSAIO  
 BOM

RESISTÊNCIAS (NB-1/78)  
 LIM. INF. = 149,9 kgf/cm<sup>2</sup>  
 Fck esti. = 149,0 kgf/cm<sup>2</sup>  
 LIM. SUP. = 179,6 kgf/cm<sup>2</sup>  
 adotar para Fck esti.  
 149,9 kgf/cm<sup>2</sup>  
 LOTE: RECURSADO

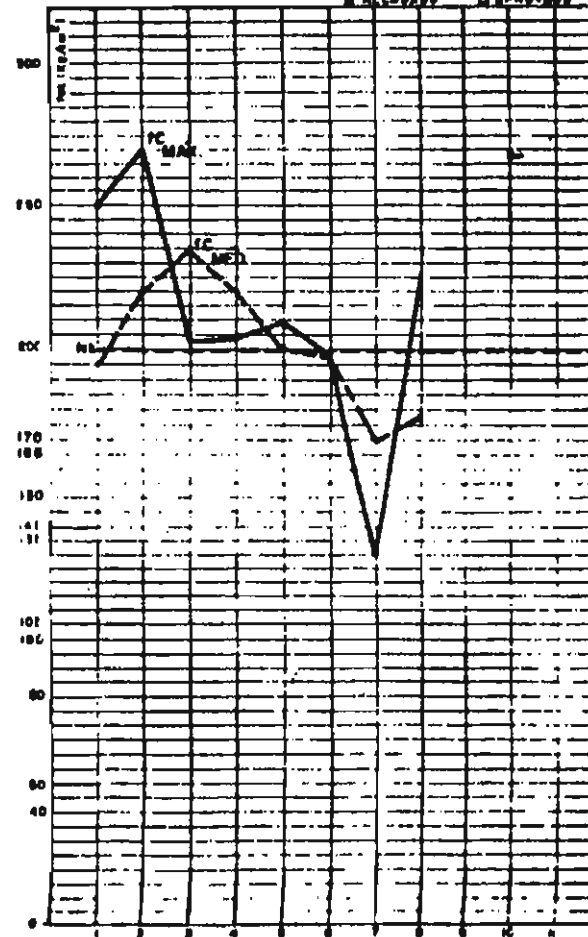
Fck est. (ACI-318/71)  
 167,0 kgf/cm<sup>2</sup>  
 LOTE: RECURSADO

CRITÉRIO P.B.FUSCO  
 MED FcMAX =  
 211,3 kgf/cm<sup>2</sup>  
 LOTE: APROVADO

OBS

PIBUNIBEDD PEDRAZ		CONTOLE ESTATÍSTICO DE CONCRETO PROJETO		engofol			
TRAÇO 1:1,40:2,12		IDADE 28 DIAS		IC <sub>90</sub> 200 kgf/cm <sup>2</sup> LOTE 11			
EXEMPLAR Nº	DATA DE MOLDAGEM	CORPO DE PROVA 1	CORPO DE PROVA 2	CORPO DE PROVA 3	IC MÁXIMO	IC MÉDIO	VALOR DE ENSAIO (kgf/cm <sup>2</sup> )
1	24.09.81	240	250	247	250,0	245,7	195,8
2	25.09.81	264	257	270	270,0	263,7	220,8
3	01.10.81	200	198	196	200,0	198,0	235,8
4	28.10.81	202	195	200	202,0	199,0	220,2
5	10.11.81	209	198	200	209,0	202,3	199,8
6	19.11.81	196	198	192	209,0	202,3	199,8
7	15.01.82	130	120	121	198,0	195,3	198,9
8	03.02.82	215	215	223	223,0	217,7	178,9
9							
10							
11							
12							

MÉDIA DE 3 ENSAIOS CONSECUTIVOS (ACI / 318/71)  
 RECURSADO APROVADO



MÉDIAS  
210,3 205,7 -

CONCEITOS (ACI-214/65)  
 DSV.PUR. S = 41,5  
 COEFIC. V = 20,2X  
 CONTROLE DO PROCESSO:  
 POBRE

DSV.PDR. S.1 = 5,1  
 COEFIC. V.1 = 2,5X  
 CONTROLE DO ENSAIO  
 EXELENTE

RESISTÊNCIAS (NB-1/78)  
 LIM. INF. = 120,9 kgf/cm<sup>2</sup>  
 Fck esti. = 150,0 kgf/cm<sup>2</sup>  
 LIM. SUP. = 178,7 kgf/cm<sup>2</sup>  
 adotar para Fck esti.  
 150,0 kgf/cm<sup>2</sup>  
 LOTE: RECURSADO

Fck est. (ACI-318/71)  
 170,7 kgf/cm<sup>2</sup>  
 LOTE: RECURSADO

CRITÉRIO P.B.FUSCO  
 MED FcMAX =  
 210,3 kgf/cm<sup>2</sup>  
 LOTE: APROVADO

OBS

ANEXO 11  
 RESULTADOS DO ACOMPANHAMENTO DA OBRA DA FERROVIA DO ACO (S)

## ANEXO 12

RESULTADOS DO ACOMPANHAMENTO DA OBRA DA EXTENSÃO NORTE DO METRÔ DE SÃO PAULO  
 Construtora: Companhia Brasileira de Projetos e Obras - (CBPO)

Resultados referentes à segunda e quarta amostragem:

TUNEL	ABO- BADA	INVERT PROVIDE	DEF. DATA	t.o. PROJECAO	amb: CON-	COD. TRACO	CIMENTO		ADI- TIVO	fcj					LAB.	OBS		
							MAR	TIPO CA		6h	10h	24h	3d	7d			28d	
										[4,25]C	[4,25]C	[10,2]C	[16,2]C	[18,7]C			[24,5]C	
DUP.PAULICETA	7		19. 9. 90			450	CP1-P	IPA	ARI	RS	REAX	-	16.40	25.37	27.00	-	36.37	BAUER
DUP.PAULICETA	7		26. 9. 90			450	CP1-P	IPA	ARI	RS	REAX	5.23	-	11.40	14.90	-	22.37	BAUER
DUP.PAULICETA	10		3. 10. 90			450	CP1-P	IPA	ARI	RS	REAX	-	18.40	21.80	-	31.67	40.20	BAUER
DUP.PAULICETA	13		12. 10. 90			450	CP1-P	IPA	ARI	RS	REAX	-	8.40	14.87	20.93	-	28.23	BAUER
DUP.PAULICETA	20		19. 10. 90			450	CP1-P	IPA	ARI	RS	REAX	-	5.00	7.23	9.00	-	13.10	BAUER
DUP.PAULICETA	24		24. 10. 90			450	CP1-P	IPA	ARI	RS	REAX	-	11.07	16.37	15.23	-	26.07	BAUER
DUP.PAULICETA	29		30. 10. 90			450	CP1-P	IPA	ARI	RS	REAX	-	12.87	17.00	20.33	-	25.43	BAUER
SINGELO V.2		22	2. 10. 91			450	CP1-0	IPA	ARI	RS	REAX	-	10.37	13.27	19.96	-	27.27	BAUER
SINGELO V.1		15	2. 10. 91			450	CP1-0	IPA	ARI	RS	REAX	-	13.57	22.00	28.00	-	32.07	BAUER
DUP.PAULICETA		9	3. 10. 91			450	CP1-0	IPA	ARI	RS	REAX	-	9.20	16.90	23.60	-	30.75	BAUER
SINGELO V.2	54		4. 10. 91			450	CP1-0	IPA	ARI	RS	REAX	-	13.43	21.13	22.30	-	26.93	BAUER
SINGELO V.1		18	4. 10. 91			450	CP1-0	IPA	ARI	RS	REAX	-	15.10	19.77	26.40	-	40.97	BAUER
SINGELO V.2	40		8. 10. 91			450	CP1-0	IPA	ARI	RS	REAX	-	9.07	14.57	-	29.77	33.83	BAUER
SINGELO V.1		21	8. 10. 91			450	CP1-0	IPA	ARI	RS	REAX	-	12.70	14.23	-	32.87	36.60	BAUER
SINGELO V.1	52		10. 10. 91			450	CP1-0	IPA	ARI	RS	REAX	-	9.07	15.33	-	24.20	27.90	BAUER
SINGELO V.2		30	10. 10. 91			450	CP1-0	IPA	ARI	RS	REAX	-	6.07	12.03	-	24.50	30.20	BAUER
SINGELO V.2		34	15. 10. 91			450	CP1-0	IPA	ARI	RS	REAX	-	-	-	16.10	-	24.03	BAUER
SINGELO V.1		20	15. 10. 91			450	CP1-0	IPA	ARI	RS	REAX	-	-	-	16.70	-	24.13	BAUER
SINGELO V.2	82		18. 10. 91			450	CP1-0	IPA	ARI	RS	REAX	-	9.33	12.67	16.77	-	26.50	BAUER
SINGELO V.1	49		18. 10. 91			450	CP1-0	IPA	ARI	RS	REAX	-	16.50	18.90	20.40	-	29.30	BAUER
SINGELO V.2		43	22. 10. 91			450	CP1-0	IPA	ARI	RS	REAX	-	16.27	19.30	22.17	-	27.33	BAUER
SINGELO V.1	79		22. 10. 91			450	CP1-0	IPA	ARI	RS	REAX	-	16.67	21.13	26.87	-	33.37	BAUER
SINGELO V.1		42	25. 10. 91			450	CP1-0	IPA	ARI	RS	REAX	-	9.67	14.20	15.70	-	25.87	BAUER
SINGELO V.2	100		25. 10. 91			450	CP1-0	IPA	ARI	RS	REAX	-	14.47	19.10	23.13	-	32.47	BAUER
SINGELO V.1	98		29. 10. 91			450	CP1-0	IPA	ARI	RS	REAX	-	18.57	18.33	24.43	-	32.33	BAUER
SINGELO V.2		52	29. 10. 91			450	CP1-0	IPA	ARI	RS	REAX	-	20.27	26.43	29.97	-	36.70	BAUER
TUN.TUCURUVI	14		30. 10. 91			450	CP1-0	IPA	ARI	RS	REAX	-	13.67	16.67	21.87	-	34.60	BAUER
SINGELO V.1	100		1. 11. 91			450	CP1-0	IPA	ARI	RS	REAX	-	14.10	18.93	17.93	-	33.83	BAUER
SINGELO V.2		57	1. 11. 91			450	CP1-0	IPA	ARI	RS	REAX	-	15.13	20.73	24.90	-	39.97	BAUER
SINGELO V.2		60	5. 11. 91			450	CP1-0	IPA	ARI	RS	REAX	-	5.13	14.03	18.73	-	31.53	BAUER
SINGELO V.1	117		6. 11. 91			450	CP1-0	IPA	ARI	RS	REAX	-	11.13	16.33	20.27	-	31.07	BAUER
SINGELO V.2	131		7. 11. 91			450	CP1-0	IPA	ARI	RS	REAX	-	13.37	17.03	21.87	-	31.53	BAUER
SINGELO V.1	123		8. 11. 91			450	CP1-0	IPA	ARI	RS	REAX	-	11.60	13.77	16.10	-	25.33	BAUER
SINGELO V.2	142		12. 11. 91			450	CP1-0	IPA	ARI	RS	REAX	-	7.97	9.53	15.77	-	26.50	BAUER
TUN.TUCURUVI	20		13. 11. 91			450	CP1-0	IPA	ARI	RS	REAX	-	7.40	7.50	12.20	-	20.07	BAUER
DUP.PAULICETA	42		14. 11. 91			450	CP1-0	IPA	ARI	RS	REAX	-	9.80	15.73	19.60	-	26.67	BAUER
SINGELO V.1	137		14. 11. 91			450	CP1-0	IPA	ARI	RS	REAX	-	11.73	16.50	21.23	-	28.80	BAUER
SINGELO V.1	148		19. 11. 91			450	CP1-0	IPA	ARI	RS	REAX	-	9.97	12.27	15.23	-	23.90	BAUER
SINGELO V.2	158		19. 11. 91			450	CP1-0	IPA	ARI	RS	REAX	-	9.23	12.97	15.73	-	26.90	BAUER
DUP.PAULICETA	73		21. 11. 91			450	CP1-0	IPA	ARI	RS	REAX	-	12.90	13.53	19.03	-	29.00	BAUER

Resultados referentes à quarta, sexta e oitava amostragem.

TUNEL	ABO- INVERT		DATA PROJECAO	t. o amb CON- SUMO	COD. TRACO MAR	CIMENTO		fcj					LAB.	OBS	
	BADA	PROVIDEF.				ADI-	6h	10h	24h	3d	7d	28d			
	AVAN.	AVAN.				TIPO TIVO	(4,25)	(10,2)	(16,2)	(24,2)	(24,2)				
TUN.TUCURUVI	39		21. 11. 91	450	CP1-0	IPAIARI	RS:REAX	-	12.33	14.30	21.50	-	33.40	BAUER	
SINGELO V.1		74	22. 11. 91	450	CP1-0	IPAIARI	RS:REAX	-	7.70	9.27	12.53	-	19.90	BAUER	
SINGELO V.2		81	22. 11. 91	450	CP1-0	IPAIARI	RS:REAX	-	9.30	10.87	15.73	-	27.10	BAUER	
SINGELO V.1		80	26. 11. 91	450	CP1-0	IPAIARI	RS:REAX	-	11.23	15.20	17.53	-	25.70	BAUER	
DUP.PAULICEIA	80		26. 11. 91	450	CP1-0	IPAIARI	RS:REAX	-	12.63	14.57	21.13	-	28.63	BAUER	
SINGELO V.2	177		27. 11. 91	450	CP1-0	IPAIARI	RS:REAX	-	10.43	12.03	15.53	-	24.86	BAUER	
TUN.TUCURUVI	41		27. 11. 91	450	CP1-0	IPAIARI	RS:REAX	-	10.77	11.73	14.13	-	26.40	BAUER	
SINGELO V.1	171		28. 11. 91	450	CP1-0	IPAIARI	RS:REAX	-	17.67	18.77	25.53	-	30.67	BAUER	
SINGELO V.2	103		29. 11. 91	450	CP1-2	IPAIARI	RS:REAX	-	12.97	13.70	16.57	-	24.27	BAUER	
TUN.TUCURUVI	49		2. 12. 91	450	CP1-2	IPAIARI	RS:REAX	-	9.90	12.03	14.40	-	22.10	BAUER	
DUP.PAULICEIA	94		3. 12. 91	450	CP1-2	IPAIARI	RS:REAX	-	12.13	14.03	19.63	-	28.33	BAUER	
SINGELO V.1	181		3. 12. 91	450	CP1-2	IPAIARI	RS:REAX	-	15.63	17.20	21.07	-	30.83	BAUER	
SINGELO V.2	93		3. 12. 91	450	CP1-2	IPAIARI	RS:REAX	-	10.37	17.63	21.00	-	30.93	BAUER	
DUP.PAULICEIA	98		5. 12. 91	450	CP1-2	IPAIARI	RS:REAX	9.17	-	18.43	21.60	-	26.33	BAUER	
SINGELO V.1	189		6. 12. 91	450	CP1-2	IPAIARI	RS:REAX	-	12.03	13.70	17.23	-	24.30	BAUER	
SINGELO V.2	97		6. 12. 91	450	CP1-2	IPAIARI	RS:REAX	-	11.97	12.97	17.83	-	24.40	BAUER	
SINGELO V.2	206		10. 12. 91	450	CP1-2	IPAIARI	RS:REAX	-	13.97	18.43	23.57	-	-	BAUER	
SINGELO V.1	196		10. 12. 91	450	CP1-2	IPAIARI	RS:REAX	-	12.57	16.07	21.53	-	25.73	BAUER	
DUP.PAULICEIA	100		10. 12. 91	450	CP1-2	IPAIARI	RS:REAX	7.07	-	15.30	19.93	-	28.00	BAUER	
TUN.TUCURUVI	61		11. 12. 91	450	CP1-2	IPAIARI	RS:REAX	-	14.83	24.80	29.63	-	33.27	BAUER	
SINGELO V.2	105		13. 12. 91	450	CP1-2	IPAIARI	RS:REAX	*	16.07	18.37	24.17	*	30.37	BAUER	
SINGELO V.1	204		13. 12. 91	450	CP1-2	IPAIARI	RS:REAX	*	16.83	17.83	22.77	*	30.60	BAUER	
DUP.PAULICEIA	121		17. 12. 91	450	CP1-2	IPAIARI	RS:OTTO	7.60	-	13.37	15.90	-	22.43	BAUER	
SINGELO V.1	211		17. 12. 91	450	CP1-2	IPAIARI	RS:OTTO	-	10.80	13.37	18.33	-	23.43	BAUER	
SINGELO V.2	222		17. 12. 91	450	CP1-2	IPAIARI	RS:OTTO	*	11.17	19.27	24.77	-	32.13	BAUER	
SINGELO V.1	216		19. 12. 91	450	CP1-2	IPAIARI	RS:OTTO	-	20.17	24.03	29.60	-	32.77	BAUER	
SINGELO V.2	111		19. 12. 91	450	CP1-2	IPAIARI	RS:OTTO	-	19.67	25.73	32.77	-	40.23	BAUER	
DUP.PAULICEIA		40	20. 12. 91	450	CP1-2	IPAIARI	RS:OTTO	6.17	-	11.83	15.53	-	25.20	BAUER	
DUP.PAULICEIA	132		3. 1. 92	450	CP1-2	IPAIARI	RS:OTTO	7.60	-	10.57	-	14.40	-	BAUER	
SINGELO V.1		109	3. 1. 92	450	CP1-2	IPAIARI	RS:OTTO	8.87	-	14.13	-	20.50	-	BAUER	
DUP.PAULICEIA	138		7. 1. 92	450	CP1-2	IPAIARI	RS:OTTO	10.97	13.16	-	-	22.37	-	BAUER	
SINGELO V.1	112		7. 1. 92	450	CP1-2	IPAIARI	RS:OTTO	-	14.67	16.70	-	27.43	-	BAUER	
SINGELO V.2	110		7. 1. 92	450	CP1-2	IPAIARI	RS:OTTO	-	9.80	12.46	-	21.50	-	BAUER	
DUP.PAULICEIA	145		10. 1. 92	450	CP1-2	IPAIARI	RS:OTTO	-	12.95	14.50	26.13	-	21.77	BAUER	
SINGELO V.1	236		10. 1. 92	450	CP1-2	IPAIARI	RS:OTTO	-	13.23	17.47	19.73	-	26.77	BAUER	
SINGELO V.2	248		10. 1. 92	450	CP1-2	IPAIARI	RS:OTTO	-	13.90	15.43	26.75	-	35.77	BAUER	
DUP.PAULICEIA	153		14. 1. 92	450	CP1-2	IPAIARI	RS:OTTO	10.33	-	17.07	19.20	-	26.83	BAUER	
SINGELO V.1	244		14. 1. 92	450	CP1-2	IPAIARI	RS:OTTO	-	16.83	21.50	20.37	-	33.70	BAUER	
SINGELO V.2	257		14. 1. 92	450	CP1-2	IPAIARI	RS:OTTO	-	14.87	24.17	23.77	-	34.03	BAUER	
SINGELO V.1	251		17. 1. 92	450	CP1-2	IPAIARI	RS:OTTO	-	10.10	12.87	15.87	-	26.93	BAUER	
SINGELO V.2	265		17. 1. 92	450	CP1-2	IPAIARI	RS:OTTO	-	14.90	20.97	28.63	-	40.33	BAUER	
DUP.PAULICEIA		49	21. 1. 92	450	CP1-2	IPAIARI	RS:OTTO	9.20	-	12.13	18.33	-	21.90	BAUER	
SINGELO V.1	260		21. 1. 92	450	CP1-2	IPAIARI	RS:OTTO	-	16.40	21.80	30.37	-	31.00	BAUER	
SINGELO V.2	276		22. 1. 92	450	CP1-2	IPAIARI	RS:OTTO	-	15.30	20.00	28.93	-	33.30	BAUER	
DUP.PAULICEIA	175		23. 1. 92	450	CP1-2	IPAIARI	RS:OTTO	4.90	-	12.47	15.97	-	18.37	BAUER	
SINGELO V.1	132		24. 1. 92	450	CP1-2	IPAIARI	RS:OTTO	-	16.13	26.20	31.60	-	36.13	BAUER	
SINGELO V.2	268		24. 1. 92	450	CP1-2	IPAIARI	RS:OTTO	-	17.60	25.97	26.60	-	36.53	BAUER	
SINGELO V.1	274		28. 1. 92	450	CP1-2	IPAIARI	RS:OTTO	-	11.93	16.00	-	-	26.37	BAUER	
SINGELO V.2	141		28. 1. 92	450	CP1-2	IPAIARI	RS:OTTO	-	11.63	14.33	-	-	27.67	BAUER	
SINGELO V.1	283		31. 1. 92	450	CP1-2	IPAIARI	RS:OTTO	-	-	-	-	-	28.73	BAUER	
SINGELO V.2	294		31. 1. 92	450	CP1-2	IPAIARI	RS:OTTO	-	-	-	-	-	29.37	BAUER	

TUNEL	ABO- INVERT			L.O.	COD.	CIMENTO			FCJ					LAO.	OBS			
	BADA	PROVIDE	DATA			CON-	TRACO	MAR	TIPO	ADI-	6h	10h	24h			3d	7d	20d
	AVAN.	AVAN.	AVAN.			SUMO	CA	CA	TIVO	(4,25)								
			PROJECAO	amb					[4,25]	[10,63]	[16,73]	[24,23]						
DUP.PAULICEIA	306		12. 3. 92		415	CP3-1	IPAIARI	RSIREAX		6.83		11.30	16.77		23.70	BAUER		
SINGELO V.2	EST.273/276		12. 3. 92		415	CP3-1	IPAIARI	RSIREAX			7.27	20.37	30.53		39.20	BAUER 2a Fase		
SINGELO V.1	EST.273/276		16. 3. 92		415	CP3-1	IPAIARI	RSIREAX			6.57	11.70	19.90		29.13	BAUER 2a Fase		
SINGELO V.2	EST.258/269		16. 3. 92		415	CP3-1	IPAIARI	RSIREAX			7.27	14.70	18.77		29.37	BAUER 2a Fase		
SINGELO V.2	EST.251/260		20. 3. 92		415	CP3-1	IPAIARI	RSIREAX			8.17	16.07	26.00		32.03	BAUER 2a Fase		
SINGELO V.1	EST.251/260		23. 3. 92		415	CP3-1	IPAIARI	RSIREAX			11.53	15.30	20.07		25.97	BAUER 2a Fase		
SINGELO V.1	290		4. 2. 92		415	CP3-1	IPAIARI	RSIOTTO			9.47	15.63	20.00		25.67	BAUER		
SINGELO V.2		149	4. 2. 92		415	CP3-1	IPAIARI	RSIOTTO			15.43	19.00	26.10		29.70	BAUER		
DUP.PAULICEIA	205		5. 2. 92		415	CP3-1	IPAIARI	RSIOTTO				21.83	28.60		35.23	BAUER		
SINGELO V.1	154		7. 2. 92		415	CP3-1	IPAIARI	RSIOTTO			7.83	11.50	16.90		26.40	BAUER		
SINGELO V.1	147		7. 2. 92		415	CP3-1	IPAIARI	RSIOTTO			6.78	10.97	20.03		27.00	BAUER		
SINGELO V.1	306		11. 2. 92		415	CP3-1	IPAIARI	RSIOTTO			14.13	16.30	17.27		22.57	BAUER		
SINGELO V.2	158		11. 2. 92		415	CP3-1	IPAIARI	RSIOTTO			8.03	18.53	26.57		40.67	BAUER		
DUP.PAULICEIA	141		12. 2. 92		415	CP3-1	IPAIARI	RSIOTTO	8.30		11.00	16.87		23.57	BAUER			
SINGELO V.1	320		18. 2. 92		415	CP3-1	IPAIARI	RSIOTTO			10.30	16.70	19.73		30.07	BAUER		
SINGELO V.2	335		18. 2. 92		415	CP3-1	IPAIARI	RSIOTTO			12.83	15.37	18.73		30.13	BAUER		
DUP.PAULICEIA	245		19. 2. 92		415	CP3-1	IPAIARI	RSIOTTO	7.87		11.53	26.37		30.13	BAUER * 8:00			
TUN.TUCURUVI	73		21. 2. 92		415	CP3-1	IPAIARI	RSIOTTO			10.10	14.30	18.87		20.50	BAUER		
SINGELO V.1	161		21. 2. 92		415	CP3-1	IPAIARI	RSIOTTO			11.60	23.90	26.07		39.13	BAUER		
SINGELO V.1	332		25. 2. 92		415	CP3-1	IPAIARI	RSIOTTO			16.23	18.63	23.07		29.20	BAUER		
DUP.PAULICEIA		81	26. 2. 92		415	CP3-1	IPAIARI	RSIOTTO	7.60		18.27	26.07		32.03	BAUER * 8:00			
TUN.TUCURUVI	81		27. 2. 92		415	CP3-1	IPAIARI	RSIOTTO			4.87	14.13	28.63		27.17	BAUER		
DUP.PAULICEIA	273		28. 2. 92		415	CP3-1	IPAIARI	RSIOTTO			9.45	11.63	15.63		19.30	BAUER		
SINGELO V.1	167		28. 2. 92		415	CP3-1	IPAIARI	RSIOTTO			7.93	9.63	18.74		24.03	BAUER		
DUP.PAULICEIA	283		4. 3. 92		415	CP3-1	IPAIARI	RSIOTTO	9.10		17.87		22.10		29.30	BAUER		
TUN.TUCURUVI	92		10. 3. 92		415	CP3-1	IPAIARI	RSIOTTO			4.83	13.50	22.33		31.58	BAUER		
TUN.TUCURUVI	122		18. 3. 92		415	CP3-1	IPAIARI	RSIOTTO			5.07	12.00	19.63		26.37	BAUER		
SINGELO V.2	EST.241/251		25. 3. 92		415	CP3-1	IPAIARI	RSIOTTO			11.17	17.96	17.37		21.93	BAUER 2a Fase		
TUN.TUCURUVI	142		25. 3. 92		415	CP3-1	IPAIARI	RSIOTTO			10.27	12.57	16.20		22.07	BAUER		
DUP.PAULICEIA		61	25. 3. 92		415	CP3-1	IPAIARI	RSIOTTO			13.67	22.17	32.63		41.43	BAUER		
SINGELO V.1	EST.240/250		28. 3. 92		415	CP3-1	IPAIARI	RSIOTTO			13.70	17.03	18.87		27.50	BAUER 2a Fase		
SINGELO V.2	EST.241/230		31. 3. 92		415	CP3-1	IPAIARI	RSIOTTO			11.77	17.50	21.60		30.63	BAUER 2a Fase		
SINGELO V.1	EST.240/228		1. 4. 92		415	CP3-1	IPAIARI	RSIOTTO			7.70	13.30	21.77		26.37	BAUER 2a Fase		
DUP.PAULICEIA		18	1. 4. 92		415	CP3-1	IPAIARI	RSIOTTO			13.43	18.00	25.57		30.40	BAUER EST.334		
SINGELO V.2	EST.230/220		3. 4. 92		415	CP3-1	IPAIARI	RSIOTTO			15.40	23.10	25.60		39.03	BAUER 2a Fase		
SINGELO V.1	EST.228/219		7. 4. 92		415	CP3-1	IPAIARI	RSIOTTO			15.20	19.23	21.20		27.27	BAUER 2a Fase		
SINGELO V.2	EST.220/209		8. 4. 92		415	CP3-1	IPAIARI	RSIOTTO			11.70	16.37	20.73		27.87	BAUER 2a Fase		
DUP.PAULICEIA		27	8. 4. 92		415	CP3-1	IPAIARI	RSIOTTO			4.10	14.83	24.80		31.83	BAUER		
SINGELO V.1	EST.219/208		10. 4. 92		415	CP3-1	IPAIARI	RSIOTTO			10.20	13.67	15.13		22.43	BAUER 2a Fase		
SINGELO V.1	EST.208/197		14. 4. 92		415	CP3-1	IPAIARI	RSIOTTO			5.63	14.27	22.67		33.47	BAUER 2a Fase		
DUP.PAULICEIA		37	14. 4. 92		415	CP3-1	IPAIARI	RSIOTTO			15.10	19.90	29.27		36.33	BAUER frente		
SINGELO V.2	EST.199/188		16. 4. 92		415	CP3-1	IPAIARI	RSIOTTO			16.33	20.45	30.00		34.07	BAUER 2a Fase		
SINGELO V.1	EST.197/187		22. 4. 92		415	CP3-1	IPAIARI	RSIOTTO			8.37	16.80	21.30		29.07	BAUER 2a Fase		
DUP.PAULICEIA		46	22. 4. 92		415	CP3-1	IPAIARI	RSIOTTO			12.23	16.80	22.83		31.63	BAUER frente		
SINGELO V.2	EST.188/180		23. 4. 92		415	CP3-1	IPAIARI	RSIOTTO			8.00	11.60*	14.90		15.43	BAUER 2a Fase		
TUN.TUCURUVI	151		24. 4. 92		415	CP3-1	IPAIARI	RSIOTTO			12.30	18.87	26.33		36.70	BAUER		
TUN.TUCURUVI	163		28. 4. 92		415	CP3-1	IPAIARI	RSIOTTO			11.00	13.20	19.73			BAUER		
DUP.PAULICEIA		4	29. 4. 92		415	CP3-1	IPAIARI	RSIOTTO					15.54			BAUER		
DUP.PAULICEIA		19	29. 4. 92		415	CP3-1	IPAIARI	RSIOTTO			11.80	12.47				BAUER		
DUP.PAULICEIA	EST.350/368		5. 5. 92		415	CP3-1	IPAIARI	RSIOTTO			18.43	20.87	31.47			BAUER		
DUP.PAULICEIA	EST.316/320		6. 5. 92		415	CP3-1	IPAIARI	RSIOTTO			13.53	17.37	26.30			BAUER 2a Fase		
TUN.TUCURUVI	181		7. 5. 92		415	CP3-1	IPAIARI	RSIOTTO	13.47				20.93			BAUER		
DUP.PAULICEIA	EST.318/322		12. 5. 92		415	CP3-1	IPAIARI	RSIOTTO			4.03	8.50	14.47			BAUER 2a Fase		
DUP.PAULICEIA	EST.322/336		15. 5. 92		415	CP3-1	IPAIARI	RSIOTTO			9.40	15.30				BAUER		
TUN.TUCURUVI	214		15. 5. 92		415	CP3-1	IPAIARI	RSIOTTO			12.57	20.50				BAUER		

Resultados referentes à oitava, à décima e décima segunda amostragem.

TUNEL	ABO- INVERT		DATA PROJECAO	t.o amb	CON-SUMO	CIMENTO			FCJ						LAD.	OBS		
	BADA	PROV:DEF.				COD.	ADI-TRACO	MAR:CA	TIPO	RS:TIVO	6h	10h	24h	3d			7d	20d
	AVAN.	AVAN																
DUP.PAULICEIA			11. 9. 91		450	CP1-P	IPA:ARI	RS:REAX	-	9.00	15.40	26.30	29.30	28.15	VISOC			
SINGELO V.1	14		20. 9. 91		450	CP1-P	IPA:ARI	RS:REAX	-	8.55	18.90	28.05	31.90	35.25	VISOC			
DUP.PAULICEIA		18	24. 9. 91		450	CP1-P	IPA:ARI	RS:REAX	-	11.00	18.60	25.75	25.20	27.60	VISOC			
SINGELO V.2	36		26. 9. 91		450	CP1-P	IPA:ARI	RS:REAX	-	4.65	10.00	20.75	29.40	27.90	VISOC			
DUP.PAULICEIA			30. 9. 91	14	450	CP1-P	IPA:ARI	RS:REAX	-	-	13.65	15.45	19.90	19.70	VISOC			
SINGELO V.2			23. 3. 10. 91		450	CP1-0	IPA:ARI	RS:REAX	-	11.10	17.00	34.00	29.30	40.50	VISOC			
DUP.PAULICEIA			7. 4. 10. 91		450	CP1-0	IPA:ARI	RS:REAX	-	8.60	14.20	17.60	24.50	27.40	VISOC			
SINGELO V.1			19. 5. 10. 91		450	CP1-0	IPA:ARI	RS:REAX	-	7.95	17.80	18.50	29.10	34.30	VISOC			
DUP.PAULICEIA			3. 8. 10. 91		450	CP1-0	IPA:ARI	RS:REAX	-	-	15.30	20.60	25.00	32.00	VISOC			
SINGELO V.1			48. 9. 10. 91		450	CP1-0	IPA:ARI	RS:REAX	-	13.75	21.80	31.20	27.50	41.30	VISOC			
DUP.PAULICEIA			1. 10. 10. 91		450	CP1-0	IPA:ARI	RS:REAX	-	4.90	21.95	-	23.20	38.90	VISOC			
SINGELO V.2			35. 16. 10. 91		450	CP1-0	IPA:ARI	RS:REAX	-	11.70	17.50	21.90	23.20	35.00	VISOC			
SINGELO V.2	78		16. 10. 91		450	CP1-0	IPA:ARI	RS:REAX	-	17.70	20.10	27.40	25.30	44.40	VISOC			
SINGELO V.1			22. 10. 91	37	450	CP1-0	IPA:ARI	RS:REAX	-	15.80	16.80	18.90	24.00	27.80	VISOC			
SINGELO V.2	111		30. 10. 91		450	CP1-0	IPA:ARI	RS:REAX	11.20	-	23.20	24.30	26.80	40.40	VISOC			
SINGELO V.2	131		7. 11. 91		450	CP1-0	IPA:ARI	RS:REAX	-	17.80	20.40	26.10	41.30	36.80	VISOC			
SINGELO V.2	145		13. 11. 91		450	CP1-0	IPA:ARI	RS:REAX	-	11.00	24.50	30.90	33.80	39.90	VISOC			
DUP.PAULICEIA		22	13. 11. 91		450	CP1-0	IPA:ARI	RS:REAX	11.50	-	27.30	32.50	34.80	40.50	VISOC			
SINGELO V.2	157		19. 11. 91		450	CP1-0	IPA:ARI	RS:REAX	11.20	16.70	-	29.20	25.90	34.20	VISOC			
DUP.PAULICEIA	170/71		20. 11. 91		450	CP1-0	IPA:ARI	RS:REAX	-	-	-	20.30	23.90	25.00	VISOC			
TUN.TUCURUVI			23. 11. 91	4/5	450	CP1-0	IPA:ARI	RS:REAX	-	-	-	25.00	27.90	28.70	VISOC			
SINGELO V.1	167		27. 11. 91		450	CP1-0	IPA:ARI	RS:REAX	12.00	14.50	18.10	23.20	23.10	32.40	VISOC			
DUP.PAULICEIA	85		28. 11. 91		450	CP1-0	IPA:ARI	RS:REAX	-	-	22.00	28.70	26.80	33.00	VISOC			
TUN.TUCURUVI	FUNDO TUNEL		29. 11. 91		450	CP1-2	IPA:ARI	RS:REAX	*	12.50	*	*	*	26.50	VISOC			
TUN.TUCURUVI			29. 11. 91		450	CP1-2	IPA:ARI	RS:REAX	9.30	h	20.20	27.30	28.50	28.80	VISOC			
TUN.TUCURUVI	47		30. 11. 91		450	CP1-2	IPA:ARI	RS:REAX	17.90	15.40	20.20	23.90	23.40	28.70	VISOC			
TUN.TUCURUVI			1. 12. 91	6/7/	450	CP1-2	IPA:ARI	RS:REAX	*	*	25.40	27.20	39.60	40.80	VISOC			
TUN.TUCURUVI	51		3. 12. 91		450	CP1-2	IPA:ARI	RS:REAX	8.00	14.50	19.90	0.5	28.40	28.30	VISOC			
SINGELO V.2	198		6. 12. 91		450	CP1-2	IPA:ARI	RS:REAX	-	-	22.10	21.00	20.10	27.40	VISOC			
DUP.PAULICEIA		35	11. 12. 91		450	CP1-2	IPA:ARI	RS:REAX	6.70	11.60	15.90	19.10	34.00	30.20	VISOC			
SINGELO V.1		98	12. 12. 91		450	CP1-2	IPA:ARI	RS:REAX	9.20	14.00	18.70	23.50	23.90	26.00	VISOC			
DUP.PAULICEIA		38	17. 12. 91		450	CP1-2	IPA:ARI	RS:REAX	*	24.00	25.00	31.70	31.50	*	VISOC			
SINGELO V.2	221		17. 12. 91		450	CP1-2	IPA:ARI	RS:REAX	13.70	20.00	24.70	31.50	32.80	*	VISOC			
SINGELO V.2	240		7. 1. 92		450	CP1-2	IPA:ARI	RS:OTTO	*	13.10	19.50	21.70	29.50	23.90	VISOC			
DUP.PAULICEIA	57		8. 1. 92		450	CP1-2	IPA:ARI	RS:OTTO	10.20	16.70	22.30	29.30	31.10	38.80	VISOC			
SINGELO V.1	243		14. 1. 92		450	CP1-2	IPA:ARI	RS:OTTO	*	14.50	21.30	26.50	29.80	30.50	VISOC			
TUN.TUCURUVI			15. 1. 92	46	450	CP1-2	IPA:ARI	RS:OTTO	14.60	18.40	18.00	20.60	17.30	23.30	VISOC			
SINGELO V.1	259		21. 1. 92		450	CP1-2	IPA:ARI	RS:OTTO	11.60	11.40	16.50	15.50	23.80	27.90	VISOC			
DUP.PAULICEIA	171		22. 1. 92		450	CP1-2	IPA:ARI	RS:OTTO	*	14.10	17.90	25.80	20.40	29.30	VISOC			
SINGELO V.2	286		28. 1. 92		450	CP1-2	IPA:ARI	RS:OTTO	8.60	13.90	20.70	22.40	32.60	39.40	VISOC			
TUN.TUCURUVI	103		29. 1. 92		450	CP1-2	IPA:ARI	RS:OTTO	*	16.60	23.80	28.10	32.80	39.70	VISOC			
SINGELO V.1		139	31. 1. 92		450	CP1-2	IPA:ARI	RS:OTTO	-	16.10	25.10	32.10	41.50	38.10	VISOC			
TUN.TUCURUVI	65		13. 12. 91		450	CP1-2	IPA:ARI	RS:OTTO	12.30	13.30	15.00	18.50	20.50	25.20	VISOC			

TUNEL	ABO- BADA	INVERT PROVIDEN	DATA PROJECCAO	Elo amb	CON- SUMO	COD. TRACO	CIMENTO		ADI- TIPO	FcJ					LAB.	OBS		
							MAR	TIPO		6h	10h	24h	3d	7d			28d	
										(4,25)	(4,25)	(10,2)	(16,15)	(24,3)			(24,3)	
TUN.TUCURUVI			2. 4. 2. 92			415	CP3-1	IPA	ARI	RS	OTTO	-	7.00	20.30	24.80	31.40	*	VISOC
SINGELO V.2	302		4. 2. 92			415	CP3-1	IPA	ARI	RS	OTTO	10.30	13.90	18.70	22.50	24.80	*	VISOC
DUP.PAULICEIA	204		5. 2. 92			415	CP3-1	IPA	ARI	RS	OTTO	6.00	10.80	12.60	18.40	20.50	23.50	VISOC
DUP.PAULICEIA	122		6. 2. 92			415	CP3-1	IPA	ARI	RS	OTTO	9.10	11.50	13.90	21.00	18.90	32.30	VISOC
SINGELO V.1	305		11. 2. 92			415	CP3-1	IPA	ARI	RS	OTTO	10.80	13.20	18.10	22.80	25.10	27.00	VISOC
DUP.PAULICEIA		67	17. 2. 92			415	CP3-1	IPA	ARI	RS	OTTO	8.10	12.10	13.30	20.40	20.30	24.30	VISOC
DUP.PAULICEIA	240		18. 2. 92			415	CP3-1	IPA	ARI	RS	OTTO	11.60	14.20	19.50	27.00	26.70	27.80	VISOC
SINGELO V.1	340		20. 2. 92			415	CP3-1	IPA	ARI	RS	OTTO	-	8.30	17.00	22.10	28.00	32.30	VISOC
DUP.PAULICEIA	240		25. 2. 92			415	CP3-1	IPA	ARI	RS	OTTO	-	14.20	17.70	-	22.40	31.50	VISOC
SINGELO V.1	165		26. 2. 92			415	CP3-1	IPA	ARI	RS	OTTO	-	11.70	11.60	16.70	19.40	24.10	VISOC
TUN.TUCURUVI		83	4. 3. 92			415	CP3-1	IPA	ARI	RS	OTTO	-	22.60	31.20	36.30	35.40	30.20	VISOC
DUP.PAULICEIA	p/ evitar despi		5. 3. 92			415	CP3-1	IPA	ARI	RS	OTTO	-	13.60	22.50	32.00	32.90	23.30	VISOC
DUP.PAULICEIA	297		10. 3. 92			415	CP3-1	IPA	ARI	RS	OTTO	6.30	11.10	19.10	18.30	23.50	29.70	VISOC
TUN.TUCURUVI	76		11. 3. 92			415	CP3-1	IPA	ARI	RS	OTTO	*	8.50	13.90	22.00	27.40	28.30	VISOC
SINGELO V.2	(cont.acabamento)		12. 3. 92			415	CP3-1	IPA	ARI	RS	OTTO	4.40	15.00	15.50	15.50	24.10	29.20	VISOC
SINGELO V.2	(Reves. 2a fase)		17. 3. 92			415	CP3-1	IPA	ARI	RS	OTTO	7.00	12.20	18.90	28.20	30.40	29.80	VISOC
TUN.TUCURUVI	124		19. 3. 92			415	CP3-1	IPA	ARI	RS	OTTO	-	-	17.80	29.20	30.70	28.20	VISOC
SINGELO V.1	(Reves. 2a fase)		24. 3. 92			415	CP3-1	IPA	ARI	RS	OTTO	5.30	13.80	20.00	27.50	28.60	28.90	VISOC
DUP.PAULICEIA		21	2. 4. 92			415	CP3-1	IPA	ARI	RS	OTTO	-	15.80	14.90	25.30	26.50	32.90	VISOC
SINGELO V.2	(Reves. 2a fase)		3. 4. 92			415	CP3-1	IPA	ARI	RS	OTTO	7.50	12.40	17.00	27.00	23.00	31.20	VISOC
SINGELO V.2	(Reves. 2a fase)		8. 4. 92			415	CP3-1	IPA	ARI	RS	OTTO	-	11.20	13.40	15.20	16.90	24.60	VISOC
SINGELO V.1	(Reves. 2a fase)		14. 4. 92			415	CP3-1	IPA	ARI	RS	OTTO	-	9.00	11.90	13.10	28.50	21.30	VISOC
SINGELO V.1	(Reves. 2a fase)		24. 4. 92			415	CP3-1	IPA	ARI	RS	OTTO	-	25.40	33.90	20.40	31.40	39.10	VISOC
TUN.TUCURUVI	160		20. 4. 92			415	CP3-1	IPA	ARI	RS	OTTO	-	8.90	21.10	19.90	17.40	35.70	VISOC
TUN.TUCURUVI	176		6. 5. 92			415	CP3-1	IPA	ARI	RS	OTTO	-	16.00	27.40	26.30	33.10	-	VISOC
TUN.TUCURUVI	213		15. 5. 92			415	CP3-1	IPA	ARI	RS	OTTO	-	9.00	14.90	25.90	-	-	VISOC
TUN.TUCURUVI	227		19. 5. 92			415	CP3-1	IPA	ARI	RS	OTTO	-	6.60	16.60	-	-	-	VISOC

Resultados referentes à décima primeira e décima terceira amostragem.

## ANEXO 13

## TESTES DE HIPÓTESE PARA OS RESULTADOS DOS ANEXOS 11 E 12

## TESTE DE HIPÓTESE A

Comparação de duas médias com dados não emparelhados - segundo caso<sup>(145)</sup>

Segunda amostragem:  $\bar{x}_1 = 27,40$      $s_1^2 = 68,63$      $n_1 = 7$

Primeira amostragem:  $\bar{x}_2 = 20,45$      $s_2^2 = 16,75$      $n_2 = 20$

Hipóteses:

$$H_0: \mu_1 = \mu_2$$

$$H_1: \mu_1 > \mu_2$$

$$s_p^2 = \frac{(n_1-1)*s_1^2 + (n_2-1)*s_2^2}{n_1 + n_2 - 2} = 31,95$$

$$s_p = 5,652$$

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{s_p \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}} = 2,80$$

$$t_{25,1\%} = 2,485$$

Como  $t_{25,1\%} < t$  há evidência a nível de 1% de significância, logo rejeitamos  $H_0$ .

Comparação de duas médias com dados não emparelhados - segundo caso<sup>(145)</sup>

Terceira amostragem:  $\bar{x}_1 = 30,23$      $s_1^2 = 51,58$      $n_1 = 6$

Primeira amostragem:  $\bar{x}_2 = 20,45$      $s_2^2 = 16,75$      $n_2 = 20$

Hipóteses:

$$H_0: \mu_1 = \mu_2$$

$$H_1: \mu_1 > \mu_2$$

$$s_p^2 = \frac{(n_1-1)*s_1^2 + (n_2-1)*s_2^2}{n_1 + n_2 - 2} = 27,56$$

$$s_p = 5,25$$

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{s_p \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}} = 4,0$$

$$t_{24, 1\%} = 2,492$$

Como  $t_{24, 1\%} < t$  há evidência a nível de 1% de significância, logo rejeitamos  $H_0$ .

### TESTE DE HIPÓTESE B

Comparação de duas médias com dados não emparelhados - segundo caso<sup>(145)</sup>

$$\text{Terceira amostragem: } \bar{x}_1 = 30,23 \quad s_1 = 51,58 \quad n_1 = 6$$

$$\text{Segunda amostragem: } \bar{x}_2 = 27,40 \quad s_2 = 68,63 \quad n_2 = 7$$

Hipóteses:

$$H_0: \mu_1 = \mu_2$$

$$H_1: \mu_1 > \mu_2$$

$$s_p = \frac{\sqrt{\frac{(n_1-1)s_1^2 + (n_2-1)s_2^2}{n_1 + n_2 - 2}}}{\sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}} = 60,68$$

$$s_p = 7,80$$

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{s_p \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}} = 0,65$$

$$t_{11, 0,5\%} = 3,106$$

Como  $t_{11, 0,5\%} > t$  não há evidência a nível de 0,5% de significância, logo aceitamos  $H_0$ .

### TESTE DE HIPÓTESE C

Comparação de duas variâncias<sup>(145)</sup>

$$\text{Segunda amostragem: } s_1 = 68,63 \quad n_1 = 7$$

$$\text{Terceira amostragem: } s_2 = 51,58 \quad n_2 = 6$$



Hipóteses:

$$H_0: d_1 = d_2$$

$$H_1: d_1 > d_2$$

$$F_{4,5} = \frac{s_1^2}{s_2^2} = 1,33$$

$$F_{4,5;0,005} = 14,51$$

Como  $F_{4,5;0,005} > F_{4,5}$  há evidência a nível de 1% de significância, logo aceitamos  $H_0$ .

#### TESTE DE HIPÓTESE D

Comparação de duas variâncias<sup>(145)</sup>

$$\text{Segunda e terceira amostragem: } s_1^2 = 62,75 \quad n_1 = 13$$

$$\text{Quarta e quinta amostragem: } s_2^2 = 31,65 \quad n_2 = 59$$

Hipóteses:

$$H_0: d_1 = d_2$$

$$H_1: d_1 > d_2$$

$$F_{12,58} = \frac{s_1^2}{s_2^2} = 1,98$$

$$F_{12,58;0,025} = 1,92$$

Como  $F_{12,58;0,025} < F_{12,58}$  não há evidência a nível de 5% de significância, logo rejeitamos  $H_0$ .

## TESTE DE HIPÓTESE E

Comparação de duas variâncias<sup>(145)</sup>Segunda e terceira amostragem:  $s_1^2 = 62,75$      $n_1 = 13$ Sexta e sétima amostragem:  $s_2^2 = 14,93$      $n_2 = 21$ 

Hipóteses:

$$H_0: \sigma_1^2 = \sigma_2^2$$

$$H_1: \sigma_1^2 > \sigma_2^2$$

$$F_{12,20} = \frac{s_1^2}{s_2^2} = 4,20$$

$$F_{12,20;0,05} = 2,68$$

Como  $F_{12,20;0,05} < F_{12,20}$  não há evidência a nível de 5% de significância, logo rejeitamos  $H_0$ .

## TESTE DE HIPÓTESE F

Comparação de duas médias com dados não emparelhados - segundo caso<sup>(145)</sup>

Resistência à compressão aos 7 dias de idade.

Ditava amostragem:  $\bar{x}_1 = 14,26$      $s_1^2 = 8,36$      $n_1 = 20$ Sexta amostragem:  $\bar{x}_2 = 13,27$      $s_2^2 = 4,49$      $n_2 = 12$ 

Hipóteses:

$$H_0: \mu_1 = \mu_2$$

$$H_1: \mu_1 > \mu_2$$

$$s_p^2 = \frac{(n_1-1)s_1^2 + (n_2-1)s_2^2}{n_1 + n_2 - 2} = 6,94$$

$$s_p = 2,63$$

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\frac{s_p \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}}} = 1,03$$

$$t_{20,10\%} = 1,310$$

Como  $t_{20,10\%} > t$  não há evidência a nível de 10% de significância, logo aceitamos  $H_0$ .

Resistência à compressão aos 7 dias de idade.

$$\text{Sétima amostragem: } \bar{x}_1 = 16,00 \quad s_1 = 16,89 \quad n_1 = 7$$

$$\text{Nona amostragem: } \bar{x}_2 = 14,81 \quad s_2 = 3,96 \quad n_2 = 10$$

Hipóteses:

$$H_0: \mu_1 = \mu_2$$

$$H_1: \mu_1 > \mu_2$$

$$s_p = \frac{\sqrt{(n_1-1)s_1^2 + (n_2-1)s_2^2}}{n_1 + n_2 - 2} = 9,13$$

$$s_p = 3,02$$

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\frac{s_p \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}}} = 0,80$$

$$t_{15,10\%} = 1,341$$

Como  $t_{15,10\%} > t$  não há evidência a nível de 10% de significância, logo aceitamos  $H_0$ .

Resistência à compressão aos 7 dias de idade.

$$\text{Ditava e nona amostragem: } \bar{x}_1 = 14,44 \quad s_1 = 6,96 \quad n_1 = 30$$

$$\text{Sexta e sétima amostragem: } \bar{x}_2 = 14,28 \quad s_2 = 10,79 \quad n_2 = 19$$

Hipóteses:

$$H_0: \mu_1 = \mu_2$$

$$H_1: \mu_1 > \mu_2$$

$$s_p = \frac{\sqrt{\frac{(n_1-1)s_1^2 + (n_2-1)s_2^2}{n_1 + n_2 - 2}}}{\sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}} = 0,43$$

$$s_p = 2,90$$

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{s_p \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}} = 0,20$$

$$t_{25,10\%} = 1,299$$

Como  $t_{25,10\%} > t$  não há evidência a nível de 10% de significância, logo aceitamos  $H_0$ .

Resistência à compressão aos 28 dias de idade.

Quarta amostragem:  $\bar{x}_1 = 29,73$      $s_1^2 = 35,00$      $n_1 = 24$

Sexta amostragem:  $\bar{x}_2 = 27,65$      $s_2^2 = 10,66$      $n_2 = 13$

Hipóteses:

$$H_0: \mu_1 = \mu_2$$

$$H_1: \mu_1 > \mu_2$$

$$s_p = \frac{\sqrt{\frac{(n_1-1)s_1^2 + (n_2-1)s_2^2}{n_1 + n_2 - 2}}}{\sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}} = 26,65$$

$$s_p = 5,16$$

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{s_p \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}} = 1,17$$

$$t_{25,10\%} = 1,300$$

Como  $t_{25,10\%} > t$  não há evidência a nível de 10% de significância, logo aceitamos  $H_0$ .

Resistência à compressão aos 28 dias de idade

Nona amostragem:  $\bar{x}_1 = 32,73$      $s_1^2 = 44,97$      $n_1 = 10$

Sétima amostragem:  $\bar{x}_E = 29,59$   $s_E^2 = 19,54$   $n_E = 8$

Hipóteses:

$$H_0: \mu_1 = \mu_E$$

$$H_1: \mu_1 > \mu_E$$

$$s_p^2 = \frac{(n_1-1)s_1^2 + (n_E-1)s_E^2}{n_1 + n_E - 2} = 33,84$$

$$s_p = 5,8$$

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_E}{s_p \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_E}}} = 1,14$$

$$t_{16,10\%} = 1,337$$

Como  $t_{16,10\%} > t$  não há evidência a nível de 10% de significância, logo aceitamos  $H_0$ .

Resistência à compressão aos 28 dias de idade.

Ditava e nona amostragem:  $\bar{x}_1 = 30,52$   $s_1^2 = 39,46$   $n_1 = 34$

Sexta e sétima amostragem:  $\bar{x}_E = 28,39$   $s_E^2 = 14,93$   $n_E = 21$

Hipóteses:

$$H_0: \mu_1 = \mu_E$$

$$H_1: \mu_1 > \mu_E$$

$$s_p^2 = \frac{(n_1-1)s_1^2 + (n_E-1)s_E^2}{n_1 + n_E - 2} = 30,18$$

$$s_p = 5,49$$

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_E}{s_p \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_E}}} = 1,40$$

$$t_{53,10\%} = 1,299$$

Como  $t_{53,10\%} > t$  não há evidência a nível de 10% de significância, logo aceitamos  $H_0$ .

## TESTE DE HIPÓTESE 6

Comparação de duas médias com dados não emparelhados - segundo caso<sup>(145)</sup>  
Resistência à compressão aos 28 dias de idade.

Décima segunda amostragem:  $\bar{x}_1 = 29,76$      $s_1^2 = 40,06$      $n_1 = 19$

Décima amostragem:  $\bar{x}_2 = 28,94$      $s_2^2 = 24,75$      $n_2 = 21$

Hipóteses:

$$H_0: \mu_1 = \mu_2$$

$$H_1: \mu_1 > \mu_2$$

$$s_p^2 = \frac{(n_1-1)s_1^2 + (n_2-1)s_2^2}{n_1 + n_2 - 2} = 32,00$$

$$s_p = 5,66$$

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{s_p \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}} = 0,46$$

$$t_{28,10\%} = 1,300$$

Como  $t_{28,10\%} > t$  não há evidência a nível de 10% de significância, logo aceitamos  $H_0$ .

Resistência à compressão aos 28 dias de idade.

Décima terceira amostragem:  $\bar{x}_1 = 30,53$      $s_1^2 = 32,75$      $n_1 = 7$

Décima primeira amostragem:  $\bar{x}_2 = 28,10$      $s_2^2 = 8,93$      $n_2 = 15$

Hipóteses:

$$H_0: \mu_1 = \mu_2$$

$$H_1: \mu_1 > \mu_2$$

$$s_p^2 = \frac{(n_1-1)s_1^2 + (n_2-1)s_2^2}{n_1 + n_2 - 2} = 16,08$$

$$s_p = 4,01$$

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{s_p \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}} = 1,308$$

$$t_{20;10\%} = 1,325$$

Como  $t_{20;10\%} > t$  não há evidência a nível de 10% de significância, logo aceitamos  $H_0$ .

Resistência à compressão aos 28 dias de idade.

Décima e décima primeira amostragem:  $\bar{x}_1 = 29,97$      $s_1 = 38,21$      $n_1 = 26$

Décima segunda e décima terceira amostragem:  $\bar{x}_2 = 28,59$      $s_2 = 18,33$      $n_2 = 36$

Hipóteses:

$$H_0: \mu_1 = \mu_2$$

$$H_1: \mu_1 > \mu_2$$

$$s_p = \frac{(n_1-1)s_1^2 + (n_2-1)s_2^2}{n_1 + n_2 - 2} = 26,61$$

$$s_p = 5,16$$

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{s_p \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}} = 1,04$$

$$t_{40;10\%} = 1,297$$

Como  $t_{40;10\%} > t$  não há evidência a nível de 10% de significância, logo aceitamos  $H_0$ .

Comparação de duas variâncias<sup>(145)</sup>

Décima e décima primeira amostragem:  $s_1 = 38,21$      $n_1 = 26$

Décima segunda e décima terceira amostragem:  $s_2 = 18,33$      $n_2 = 36$

Hipóteses:

$$H_0: d_1 = d_2$$

$$H_1: d_1 > d_2$$

$$F_{26,24} = \frac{s_1^2}{s_2^2} = 2,08$$

$$F_{26,24;0,025} = 1,89$$

Como  $F_{26,24;0,025} < F_{26,24}$  não há evidência a nível de 10% de significância, logo rejeitamos  $H_0$ .