

PAULO ROBERTO DO LAGO HELENE

**CONTROLE DE QUALIDADE DO CONCRETO**

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

**Departamento de Engenharia de Construção Civil da EPUSP.**

São Paulo, 1980

PAULO ROBERTO DO LAGO HELENE

Eng. Civil, Escola Politécnica da Universidade  
de São Paulo, 1972.

CONTROLE DE QUALIDADE DO CONCRETO

Dissertação apresentada à Escola  
Politécnica da Universidade de  
São Paulo para a obtenção do tí  
tulo de Mestre em engenharia.

Orientador: Prof. Dr. Francisco Romeu Landi

Departamento de Engenharia de Construção Civil da  
EPUSP

São Paulo, 1980

À Augusta, companheira

A Daniel e Mariana, meus filhos

A Tati e Bosco, meus pais

## Agradecimentos

Aos Profs. Francisco Romeu Landi e Oscar Costa cujo apoio e incentivo transcend<sup>m</sup>eram em muito os limites da orientação desta dissertação.

Aos Profs. Alvaro Garcia Meseguer, Francisco Morán Cabré e Péricles Brasiliense Fusco pela boa vontade com que em conversas informais forneceram subsídios indispensáveis para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos Colegas da Disciplina de Materiais de Construção da Escola Politécnica da USP e do Agrupamento de Tecnologia de Concreto do IPT, pelo desprendimento, companheirismo e estímulo com os quais me prestaram valiosas colaborações durante o transcorrer deste trabalho.

Às Senhoritas Marilene Sterza e Meire Antonia A.Pegoraro pela datilografia e ajuda na montagem.

À Augusta, minha querida esposa, pela paciente orientação da estrutura da dissertação e extenuante revisão dos originais.

## RESUMO

Este trabalho tem como objetivo apresentar o que é o controle de qualidade do concreto, como foi e é considerado nas normas de projeto e execução de obras de concreto armado do Brasil e qual a metodologia que pode ser seguida para controlar o processo de produção de forma eficaz e consciente.

Diferencia as técnicas de controle de qualidade da qualidade propriamente dita e tece considerações sobre os critérios de controle de qualidade aplicados ao controle da resistência à compressão do concreto.

Situa e limita o controle de qualidade do concreto dentro de um controle mais amplo e imprescindível, que é o controle tecnológico dos materiais e serviços de uma construção.

Levanta a necessidade de integração dos diversos especialistas que atuam em uma construção com o objetivo de estabelecer regras práticas que permitam a todos alcançar o objetivo comum de realizar uma obra segura e econômica.

A introdução apresenta algumas considerações sobre o problema do controle estatístico de qualidade do concreto.

O capítulo I, descreve o desenvolvimento das normas brasileiras para projeto e execução de obras de concreto armado através de uma perspectiva histórica. Analisa o modo como era considerada a resistência dos materiais nos diferentes métodos de introdução da segurança no projeto estrutural. Procura ressaltar a importância crescente do controle da resistência do concreto, tanto em relação à segurança da estrutura quanto em relação ao benefício econômico resultante de uma maior uniformidade do processo de produção.

O capítulo II, apresenta os conceitos básicos relacionados ao controle de qualidade de forma geral, indicando uma metodologia que pode ser aplicada, em princípio, a qualquer processo de produção em série.

O capítulo III, trata de alguns aspectos comuns ao controle de produção e ao controle de aceitação do concreto. Analisa as causas de variações e os fatores que intervêm na qualidade po

tencial do concreto. Ressalta a importância da eficiência das operações de ensaio e controle e a importância da uniformidade dos materiais. Propõe também um critério mais exato para separação de lotes a serem submetidos à aceitação, complementando o atualmente recomendado na NB-1 (1978) da Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT.

O capítulo IV, sugere as cartas ou gráficos de acompanhamento do processo, para fins de controle de produção, indicando as faixas de operação mais convenientes e alguns critérios para interpretação destas cartas.

O último capítulo analisa os critérios para controle de aceitação segundo a recomendação da NB-1 (1978) da ABNT. Apresenta algumas passagens importantes para a escolha de um estimador e expõe também os problemas relacionados à fixação da resistência média de dosagem.

Finalmente, a conclusão propõe que os conceitos derivados da estatística para o controle de qualidade sejam estendidos a todas as etapas da obra, a fim de que no futuro contribuam para o estabelecimento de um nível único de qualidade na construção civil.

## ABSTRACT

This work intends to present what quality control of concrete is, how it was and is considered within Codes of Practice of reinforced concrete in Brazil and which methodology could be followed to control the production process in an efficient and conscious manner.

It differentiates the techniques of quality control from quality itself and establishes considerations about control of the concrete compression strength.

It situates and gives limits to the quality control of concrete within a wider and essential control, which is the technological control of material and services of a construction.

It shows the necessity to integrate the various experts actuating in a construction aiming at establishing practical rules which allow everyone to attain the common goal — achieving an economic and safe construction.

The introduction presents some considerations about the problem of statistic control of concrete quality.

Chapter I describes the development of Brazilian Standards for design and execution of reinforced concrete constructions through a historical perspective. It analyzes how material strength used to be considered in the various methods of introducing safety in structural design. It also points out the increasing importance of concrete strength control both regarding the structural safety and the economic benefits resulting from a greater uniformity in the production process.

Chapter II presents the basic concepts related, in a general way, to the quality control, indicating a methodology which can be applied, in general, to any process of mass production.

Chapter III introduces some common aspects of production control and of the concrete acceptance control. It analyzes the causes for variations and intervenient factors in the potential quality of the concrete. It highlights the

importance of uniformity of materials. It also proposes a more exact criterion for the separation of lots to be submitted to acceptance, complementing what is recommended nowadays by the NB-1 (1978) of ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (Brazilian Association for Technical Standards).

Chapter IV suggests the charts or graphics of process follow-up, to be used to control production, indicating the most convenient stages of operation, and some recommendations for these charts interpretation.

The last chapter analyzes the criterion for judgement of acceptability of concrete, according to NB-1 (1978). It introduces some important passages to select an estimator and also presents the problems related to the establishment of medium strength of design mix.

Finally, the conclusion proposes that the concepts derived from statistics for the quality control be extended to all stages of the construction, in order to contribute, in the future, to the establishment of a unique quality level in civil construction.

## SUMÁRIO

	pág.
RESUMO .....	iv
ABSTRACT .....	vi
INTRODUÇÃO .....	001
CAPÍTULO I	
A CONSIDERAÇÃO DA RESISTÊNCIA DOS MATERIAIS NOS MÉTODOS DE INTRODUÇÃO DA SEGURANÇA NO PROJETO DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO .....	005
1.1 Regulamento para as construções em concreto armado (1931) .....	006
1.2 Normas para execução e cálculo de concreto armado (1937) .....	010
1.3 Cálculo e execução de obras de concreto armado (1960) .....	014
1.4 Projeto e execução de obras de concreto armado (1978) .....	022
CAPÍTULO II	
CONTROLE DE QUALIDADE .....	031
2.1 Generalidades .....	031
2.2 Metodologia do controle de qualidade .....	035
CAPÍTULO III	
ASPECTOS COMUNS AO CONTROLE DE PRODUÇÃO E ACEITAÇÃO DO CONCRETO .....	040
3.1 Definição da qualidade a ser atendida .....	040
3.2 Definição dos métodos de ensaio .....	047

3.3	Explicitação dos fatores que influem na qualidade final .....	052
3.4	Quantificação dos fatores que influem na qualidade final .....	054
3.5	Definição do lote a analisar .....	057
3.6	O procedimento de retirada de exemplares .....	061
3.7	A forma de constituição da amostra .....	065
CAPÍTULO IV		
	CONTROLE DE PRODUÇÃO DO CONCRETO .....	067
4.1	Generalidades .....	067
4.2	Carta de valores individuais .....	068
4.3	Carta do desvio padrão .....	070
4.4	Carta do coeficiente de variação das operações de ensaio e controle .....	072
4.5	Exemplo .....	074
CAPÍTULO V		
	CONTROLE DE ACEITAÇÃO DO CONCRETO .....	086
5.1	Generalidades .....	086
5.2	A fórmula matemática que a partir dos resultados obtidos estima o valor característico .....	087
5.3	O problema da resistência média de dosagem .....	102
5.4	A frequência de constatação da qualidade .....	116
	CONCLUSÃO .....	119
	BIBLIOGRAFIA .....	122

## Notação

### a. Letras maiúsculas

AF-320 - cimento Portland de Alto Forno cuja resistência mínima à compressão a 28 dias de idade, segundo MB-1 (1974) da ABNT, é 32 MPa

C - consumo de cimento por metro cúbico de concreto

CP-320 - cimento Portland comum cuja resistência mínima à compressão a 28 dias de idade, segundo MB-1 (1974) da ABNT, é 32 MPa

F - ações

$F_d$  - ações de cálculo

$F_k$  - ações características

M - momento fletor

N - força normal

R - solicitações resistentes

$R_k$  - solicitações resistentes características

$R_u$  - solicitações resistentes últimas

S - solicitações atuantes

$S_d$  - solicitações atuantes de cálculo

$S_k$  - solicitações atuantes características

### b. Letras romanas minúsculas

$f_{cd}$  - resistência de cálculo do concreto à compressão

$f_{cj}$  - resistência à compressão do concreto a j dias de idade

$f_{ckj}$  - resistência característica do concreto à compressão a j dias de idade empregada quando se refere ao valor especificado no projeto estrutural

$f_{ckj,est}$  - resistência característica estimada do concreto à compressão a j dias de idade

- $f_{ckj,real}$  - resistência característica real do concreto à compressão a  $j$  dias de idade
- $f_{cmj}$  - resistência média do concreto à compressão a  $j$  dias de idade empregada quando se refere ao valor especificado no projeto da estrutura.
- $f_{cmj,d}$  - resistência média inicial do concreto à compressão a  $j$  dias de idade, adotada ou calculada para fins de dosagem
- $f_{cmj,est}$  - resistência média do concreto à compressão a  $j$  dias de idade, referente ao valor calculado a partir dos exemplares de uma amostra
- $f_d$  - valor de cálculo da resistência dos materiais
- $k_n$  - coeficiente
- $m$  - número de exemplares considerados para o cálculo de um determinado parâmetro estatístico ( $m \leq n$ )
- $n$  - número de objetos, normalmente empregado para designar o número de exemplares de uma amostra
- $p$  - número de corpos de prova de uma mesma amassada, correspondentes portanto a um exemplar
- $s$  - desvio padrão das resistências dos materiais de correntes de um dado processo de produção e ensaio, referente ao valor calculado a partir dos exemplares de uma amostra
- $s_c$  - desvio padrão de um processo de produção e ensaio de concreto obtido a partir dos resultados de resistência à compressão dos exemplares de uma amostra
- $s_{creal}$  - desvio padrão de um processo de produção de concreto obtido a partir dos resultados de resistência à compressão dos exemplares de uma amostra
- $s_d$  - desvio padrão de um processo de produção e ensaio de concreto à compressão adotado ou calculado para fins de dosagem

- $s_e$  - desvio padrão das operações de ensaio e controle obtido a partir de resultados de resistência à compressão dos exemplares de uma amostra
- $t$  - tempo
- $v$  - coeficiente de variação da resistência à compressão do concreto [notação empregada na NB-1 (1960) da ABNT]
- $v_c$  - coeficiente de variação de um processo de produção e ensaio de concreto obtido a partir dos resultados de resistência à compressão dos exemplares de uma amostra
- $v_{creal}$  - coeficiente de variação de um processo de produção de concreto obtido a partir dos resultados de resistência à compressão dos exemplares de uma amostra
- $v_d$  - coeficiente de variação de um processo de produção e ensaio de concreto à compressão adotado ou calculado para fins de dosagem
- $v_e$  - coeficiente de variação das operações de ensaio e controle obtido a partir dos resultados de resistência à compressão dos exemplares de uma amostra
- c. Letras gregas minúsculas
- $\gamma_c$  - coeficiente de minoração da resistência à compressão do concreto
- $\gamma_f$  - coeficiente de majoração das ações [impropriamente designado coeficiente de segurança na NB-1 (1978) da ABNT]
- $\gamma_m$  - coeficiente de minoração da resistência dos materiais
- $\lambda$  - coeficiente
- $\mu$  - resistência média do concreto à compressão referente a um lote, uma população ou um universo

- $\sigma$  - desvio padrão do processo de produção e ensaio do concreto referente a um lote, uma população ou um universo
- $\sigma$  - tensões de utilização [notação imprecisa empregada na NB-1 (1960) da ABNT]
- $\sigma_{adm}$  - tensões admissíveis de resistência dos materiais [notação empregada na NB-1 (1960) da ABNT]
- $\sigma_{c28}$  - tensão média de ruptura do concreto à compressão obtida a 28 dias de idade [notação imprecisa empregada na NB-1 (1960) da ABNT]
- $\sigma_R$  - tensão mínima de ruptura do concreto à compressão [notação imprecisa empregada na NB-1 (1960) da ABNT]
- $\psi_6$  - coeficiente

## Lista de Diagramas

pág.

Diagrama 1.1.1. - Método determinista das tensões admissíveis. Critério adotado pelo Regulamento para as Construções em Concreto Armado (1931) .....	006
Diagrama 1.2.1. - Método determinista dos estados limites. Critério adotado pelas Normas para Execução e Cálculo de Concreto Armado (1937) .....	011
Diagrama 1.3.1. - Método parcialmente probabilista dos estados limites. Critério adotado pela NB-1 Cálculo e Execução de Obras de Concreto Armado (1960) .....	015
Diagrama 1.4.2. - Método semi-probabilista dos estados limites. Critério adotado pela NB-1 Projeto e Execução de Obras de Concreto Armado (1978) .....	026
Diagrama 1.4.3. - Representação esquemática da análise estatística recomendada no método semi-probabilista dos estados limites. Critério adotado pela NB-1 Projeto e Execução de Obras de Concreto Armado (1978) .....	027
Diagrama 3.3.1. - Fatores que influem na qualidade final do concreto. [a resistência obtida para fins de controle é diferente (em geral superior) à resistência real do concreto na obra] .....	053
Diagrama 5.2.9. - Critério de estimativa da resistência característica do concreto à compressão segundo a NB-1 (1978) .....	101

Lista de Quadros	pág.
Quadro 1.4.1 - Alguns fatores que ainda estão incorpo <u>r</u> ados aos coeficientes de ponderação re <u>co</u> mendados pelo texto da NB-1 (1978) ....	024
Quadro 2.2.1 - Dinâmica do controle de qualidade .....	036
Quadro 3.1.2 - Critérios subjetivos de padrão de quali <u>d</u> ade da execução .....	045
Quadro 3.1.3 - Resistência média inicial de dosagem. Exemplo de cálculo para $f_{ckj} = 35$ MPa .....	046
Quadro 3.1.5 - Proposta de critérios subjetivos para o estabelecimento da resistência média ini <u>ci</u> al de dosagem .....	047
Quadro 3.2.1 - Coeficiente de variação das operações de ensaio e controle .....	051
Quadro 3.4.1 - Principais fatores que influenciam o re <u>s</u> ultado de resistência à compressão po <u>te</u> ncial do concreto, medida no ensaio de controle .....	055
Quadro 3.5.1 - Extensão máxima de lotes a serem anali <u>s</u> ados .....	058
Quadro 3.5.3 - Resultados de cimentos nacionais .....	060
Quadro 3.5.4 - Variações na resistência do concreto em função do traço para tres cimentos na <u>ci</u> onais .....	061
Quadro 3.6.1 - Influência das operações de ensaio na es <u>ti</u> mativa da resistência característica .....	065
Quadro 5.4.1 - Índices de amostragem para controle sis <u>te</u> mático de aceitação do concreto .....	117

## Lista de Figuras

pág.

Figura 3.1.1 - Representação da variabilidade da resistência à compressão do concreto .....	041
Figura 3.4.2 - Mudança de centragem da média do processo de produção e ensaio do concreto em função do tempo, como decorrência da variação de alguns dos fatores que influem na resistência à compressão do concreto .....	056
Figura 3.5.2 - Variação da resistência do concreto em função da resistência do cimento, a 28 dias de idade .....	059
Figura 4.2.1 - Carta de controle de produção com base em resultados individuais .....	069
Figura 4.3.1 - Carta de controle de produção com base no desvio padrão do processo de produção e ensaio .....	070
Figura 4.4.1 - Carta de controle de produção com base no coeficiente de variação devido às operações de ensaio e controle .....	072
Figura 5.2.1 - Esquema geral de curvas características de operação de um estimador .....	088
Figura 5.2.2 - Posição relativa da média do estimador em relação ao valor real, $f_{ckj,real}$ , do lote .....	089
Figura 5.2.3 - Posição relativa entre a resistência característica real, $f_{ckj,real}$ , e a resistência característica estimada, $f_{ckj,est}$ , em relação à resistência característica especificada ou de projeto, $f_{ckj}$ .....	090
Figura 5.2.4 - Proposta de fronteiras para a curva de eficiência do estimador .....	091

Figura 5.2.5 - Alteração da eficiência de um dado estimador em função do número de exemplares da amostra, mantido um mesmo processo de produção e controle (desvio padrão e coeficiente de variação constantes) .....	092
Figura 5.2.6 - Alteração da eficiência de um dado estimador em função do coeficiente de variação do lote produzido, mantido um mesmo número $n$ de exemplares da amostra .....	093
Figura 5.3.2 - Curva de eficiência do estimador I para amostra com $n = 6$ exemplares .....	112
Figura 5.3.3 - Curva de eficiência do estimador I para amostra com $n = 12$ exemplares .....	113
Figura 5.3.4 - Curva de eficiência do estimador I para amostra com $n = 18$ exemplares .....	114

## Lista de Tabelas

pág.

Tabela 5.2.7. - Valores de $\psi_6$ em função do coeficiente de variação do processo de produção e ensaio, $v_c$ .....	098
Tabela 5.2.8. - Valores limites de resistência média à compressão do concreto, em função do desvio padrão do processo de produção e ensaio [restrições de Normas] .....	100
Tabela 5.3.1. - Valores limites de confiança do desvio padrão .....	104

## INTRODUÇÃO

Inúmeras pesquisas têm comprovado experimentalmente que a variabilidade das propriedades mecânicas dos materiais de construção obedecem a processos aleatórios ou estocásticos. Da mesma forma, as dimensões geométricas dos componentes estruturais, estão também, todas elas, sujeitas a variações aleatórias<sup>(1)</sup>.

Como consequência, sendo estes os elementos nos quais se baseiam o projeto e o dimensionamento da estrutura, é natural que se aceite sem discussão que os métodos de introdução da segurança no projeto estrutural têm que estar fundamentados em conceitos da teoria das probabilidades, abandonando gradativamente os métodos deterministas tradicionais.

O calculista que consiga moldar com precisão a distribuição de probabilidades das solicitações sobre uma estrutura e a distribuição de probabilidades da capacidade resistente dessa estrutura, pode, em princípio, determinar sua probabilidade de ruína e conseqüentemente sua segurança.

Todo projeto estrutural deve ter por regra básica conseguir uma estrutura de mínimo custo que atenda com segurança às solicitações de uso. Para tal necessita conhecer o comportamento de estruturas semelhantes já construídas ou conhecer a distribuição de todas as variáveis que entram no dimensionamento dessa estrutura.

Inicialmente o projeto estrutural se fundamentou em métodos de nominados deterministas tendo evoluído atualmente para os métodos semi-probabilistas - um primeiro passo antes de atingir os métodos probabilistas puros, mais exatos.

---

(1) JOINT COMMITTEE CEB/CIB/FIP/RILEM. Recommended principles for the control of quality and the judgement of acceptability of concrete. Comité Euro-International du Béton-CEB, Conseil International du Bâtiment - CIB, Fédération Internationale de la Précontrainte - FIP, Réunion Internationale des Laboratoires d'Essais et de Recherches sur les Matériaux et les Constructions - RILEM. Madrid, Instituto Eduardo Torroja - IET, Monografia n. 326, abr. 1975. 109 p.

Nos métodos deterministas considera-se fixos e não aleatórios os diferentes valores numéricos que servem de base para o cálculo, tais como, resistência dos materiais, valores das cargas, características geométricas, etc., enquanto que nos métodos probabilistas admite-se que esses valores têm uma determinada probabilidade de serem ou não atingidos, ou seja, são considerados como grandezas aleatórias, correspondendo portanto muito mais à realidade.

Existe evidentemente, seja qual for o método de cálculo adotado, uma estreita relação entre a resistência mecânica dos materiais de construção e a segurança da estrutura. Essa interação foi no entanto afinando-se à medida que evoluíram os métodos de introdução da segurança no projeto estrutural, conforme pode-se visualizar nas considerações apresentadas no capítulo I.

Como se sabe a resistência de um concreto não tem um único valor. Ela deve ser descrita como uma população com  $n + \infty$  valores. A experiência tem demonstrado que quando o concreto é fabricado sob condições usuais e constantes, a distribuição desta população pode ser considerada normal e ser descrita por dois parâmetros: a média ( $\mu$ ) e o desvio padrão ( $\sigma$ ).

A maioria das Normas atuais — não é o que acontecia antigamente — inclusive a NB-1 (1978) da ABNT<sup>(2)</sup>, simplifica a distribuição de resistências reduzindo-a a um só valor, denominado resistência característica  $f_{ckj}$ . Essa resistência característica tanto é definida para o projeto estrutural quanto para fins de produção do concreto. No entanto, está subentendido que se trata de um valor pertencente a uma população normal. Em especial no texto da NB-1 (1978) temos essa premissa expressa por:

*"Valores característicos"*

---

(2) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NB-1 Projeto e execução de obras de concreto armado. Rio de Janeiro, 1978. 76 p.

Valores característicos dos materiais, das ações e das solicitações são os valores que apresentam uma probabilidade pré-fixada de não serem ultrapassados no sentido desfavorável; para os materiais, é considerada a dispersão dos resultados dos ensaios dos materiais a serem empregados; para as ações e solicitações é considerada a incerteza na previsão ou no cálculo do seu valor.

Para as resistências dos materiais, admite-se uma distribuição normal, sendo o valor característico definido pela expressão:

$$f_k = f_m - 1,65.s$$

correspondente ao quantil de 5% da respectiva distribuição".<sup>(3)</sup>

A resistência que o projetista especifica para o concreto da estrutura deve ser fruto de um processo de otimização embutido nos critérios de segurança presentes em cada Norma. No entanto, a resistência do concreto realmente utilizada dependerá das variações aleatórias da qualidade de produção no canteiro.

A quantificação dessa variabilidade pode e deve ser efetuada através de técnicas de controle de qualidade introduzidas no país oficialmente pela NB-1 (1960)<sup>(4)</sup> por ocasião da revisão da NB-1 (1950).<sup>(5)</sup>

Recentemente, em 1978, foram novamente revistas e atualizadas as recomendações da NB-1 (1960) no sentido de incorporar as técnicas estatísticas atuais de controle de qualidade—especialmente desenvolvidas para o controle de um quantil—ao novo texto da NB-1 (1978).

---

(3) Op. cit., capítulo 5, ítem 5.2.

(4) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NB-1 Cálculo e execução de obras de concreto armado. Rio de Janeiro, 1960.

(5) Id., *ibid.*, 1950.

Essa mudança, que envolveu reformulação e até alteração de alguns conceitos anteriores, acarretou uma certa insegurança no meio técnico, que aliada à natural inércia, ainda impede o aproveitamento total das novas técnicas colocadas à disposição do setor. Nossa preocupação maior no trabalho é esclarecer e expressar nosso ponto de vista sobre uma série de aspectos particulares do procedimento de controle de qualidade, atualmente recomendado para o controle da resistência à compressão do concreto.

## I. A CONSIDERAÇÃO DA RESISTÊNCIA DOS MATERIAIS NOS MÉTODOS DE INTRODUÇÃO DA SEGURANÇA NO PROJETO DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO.

A evolução do conhecimento das distribuições das resistências mecânicas dos materiais de construção, em particular o aço e o concreto, permitiu a sua discretização nos métodos de introdução da segurança no projeto das estruturas de concreto armado, separando-a das demais variáveis inerentes ao projeto, porém ainda desconhecidas.

Essa evolução fica patente ao se fazer uma breve retrospectiva histórica, analisando desde o primeiro critério de dimensionamento de estruturas de concreto armado de âmbito nacional publicado no Brasil que foi o *Regulamento para as Construções em Concreto Armado*<sup>(1)</sup>, preparado pela Associação Brasileira de Concreto - ABC, em 1931, até a última edição da *NB-1 Projeto e Execução de Obras de Concreto Armado* colocada em vigor pela Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT, a partir de 1978.

Nesse período, felizmente houve uma notável mudança na forma de considerar e controlar a resistência dos materiais, permitindo transferir automaticamente para a economia da obra, a melhoria eventualmente conseguida através do controle de qualidade dos materiais de construção.

Procurar-se-á, então, apresentar como a resistência dos materiais foi considerada nos métodos de introdução da segurança no projeto das estruturas de concreto armado adotados no Brasil. Como resultado é inevitável que paralelamente sejam feitas considerações sobre a adequabilidade desses métodos, à luz do conhecimento atual e sob o enfoque da segurança, resultando daí uma visão, antes de tudo despretenciosa, da evolução da técnica de projetar estruturas de concreto armado observada no mesmo período.

---

(1) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CONCRETO - ABC. *Regulamento para as construções em concreto armado*. São Paulo, *Cimento Armado*, Órgão oficial da ABC, n.13, v.13, 3 jul. 1931. p.7-21.

1.1. Regulamento para as Construções em Concreto Armado (1931)<sup>(2)</sup>:

Trata-se de um método determinista de introdução da segurança, ou seja, tanto o comportamento estrutural quanto as grandezas envolvidas na verificação da segurança são considerados deterministicamente definidos, ficando todas as incertezas e desconhecimentos incluídos num único coeficiente de segurança. O diagrama de blocos 1.1.1. mostra que o critério de segurança é estabelecido limitando as tensões de utilização às tensões admissíveis calculadas a partir da aplicação de um único coeficiente de segurança interno,  $\gamma_m$ <sup>(3)</sup>, às tensões médias de ruptura dos materiais.

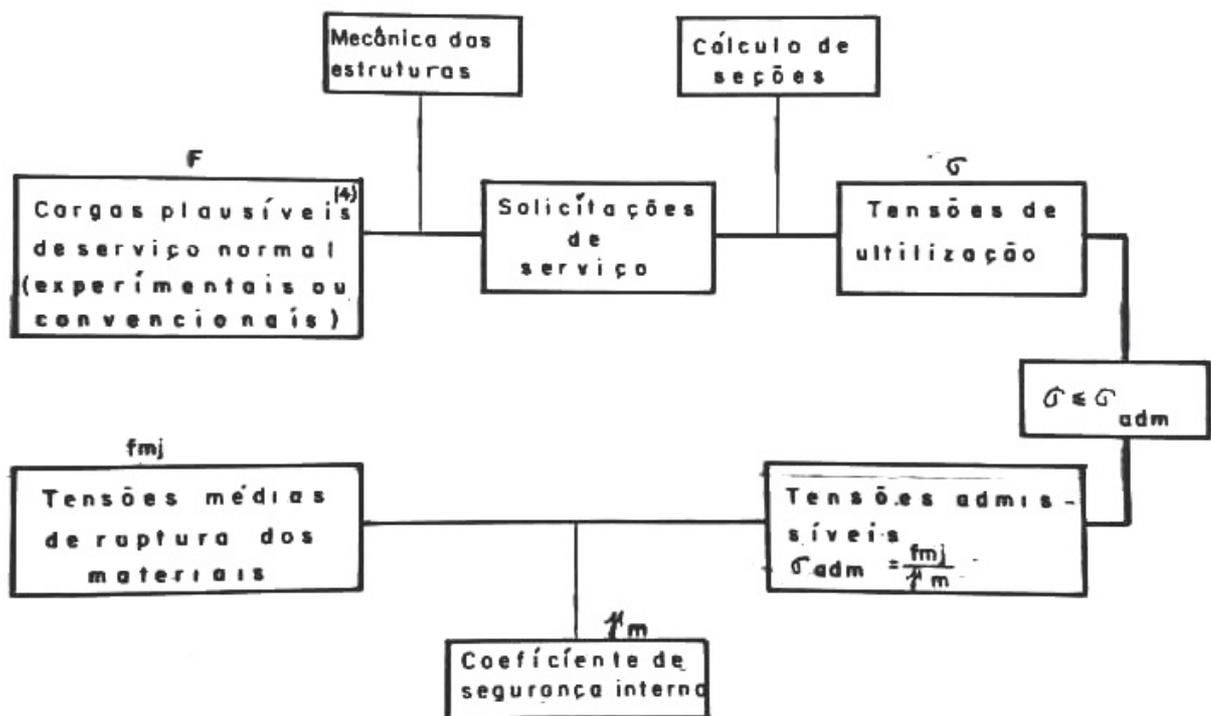


Diagrama 1.1.1. - Método determinista das tensões admissíveis. Critério adotado pelo Regulamento para as Construções em Concreto Armado (1931).

(2) Op. cit.

(3) Na discussão dos métodos de introdução da segurança no projeto das estruturas de concreto armado será utilizada a notação e nomenclatura atual, indicada na página  $\chi$ , reservando a notação e nomenclatura da época somente para os trechos transcritos.

(4) Julgamento subjetivo do valor máximo que efetivamente pode atuar num certo período de tempo — a chamada vida útil da estrutura. Representa um compromisso entre o provável e o possível.

Pode-se indicar os seguintes fundamentos implícitos neste método:

- a segurança da estrutura é garantida pela limitação das máximas tensões atuantes em serviço a valores admissíveis;
- as tensões admissíveis são calculadas e estabelecidas para cada material e cada solicitação, após observação do comportamento de estruturas semelhantes;
- os coeficientes de segurança internos ou globais ( $\gamma_m$ ) levam em conta a variabilidade das resistências, das ações, das dimensões, as hipóteses simplificadoras de cálculo, etc.

Como decorrência temos as seguintes desvantagens na sua aplicação:

- 1º) Não permite uma avaliação real da segurança<sup>(5)</sup>. Por exemplo; ao se utilizar coeficiente de segurança  $\gamma_m = 4$  para uma estrutura de madeira, e  $\gamma_m = 2$ , para a mesma estrutura, se fosse construída em aço, não significa com isso que a estrutura construída em madeira tenha o dobro da segurança da estrutura construída em aço. Na verdade esses coeficientes não representam o valor da segurança da estrutura contra a ruína e sim um valor que procura conseguir que estruturas semelhantes calculadas com diferentes coeficientes tenham a mesma capacidade resistente frente às mesmas solicitações. O valor desse coeficiente é, em princípio, empiricamente ajustado com base no desempenho de estruturas já construídas;
- 2º) Não distingue a variabilidade das resistências dos materiais da variabilidade das características geométricas dos componentes estruturais. Não incentiva portanto uma melho

---

(5) LANGENDONCK, Telemaco van. A noção de coeficiente de segurança e o cálculo do concreto armado no estádio III. São Paulo. Separata de Engenharia, fev./abr. 1945. 23 p.

ZAGOTTIS, Decio Leal de. Introdução da segurança no projeto estrutural. São Paulo, Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - EPUSP, 1974. 116 p.

ria da qualidade dos materiais e da qualidade da execução que traria evidentes benefícios econômicos, mantida uma mesma segurança.

Por exemplo, para fins de dimensionamento da estrutura, tanto faz se a resistência à compressão do concreto é obtida com uma dada dispersão ou o dobro dela. Mesmo que houvesse a intenção de melhorar a uniformidade do processo de produção do concreto, não haveria como fazer isso reverter em benefício imediato da economia da construção. Como identificar dentro de um único coeficiente de segurança, qual a parcela referente à variabilidade das resistências do concreto?

Da mesma forma, vale o raciocínio para as características geométricas dos componentes ou elementos estruturais. Sabe-se que ao executar uma estrutura, as suas dimensões finais não serão exatamente aquelas adotadas no cálculo, nem as armaduras estarão fielmente nas posições indicadas nas pranchas. O grau de concordância daquilo que foi executado, comparativamente ao que foi projetado pode medir a qualidade da execução. Essa divergência, apesar de tudo sempre presente, e, desde que dentro de certos limites estabelecidos pelas regras de bem construir, deve ser considerada no projeto da estrutura.

Neste método ela também está incluída no coeficiente de segurança  $\gamma_m$ , junto com todas as outras incertezas e desconhecimentos. Portanto coloca em igualdade de condições, tanto uma fabricação estacionária, seriada e precisa de elementos pré-moldados quanto uma execução convencional de componentes estruturais em canteiros de obra itinerante;

- 39) Não distingue a variabilidade das ações da variabilidade das resistências dos materiais não permitindo o aproveitamento do controle eventual sobre uma dessas variáveis. É o caso por exemplo de um reservatório. A máxima carga está limitada pelo seu extravasamento. Em quanto este saber po

de contribuir para a economia da estrutura? Infelizmente este método não oferece elementos no sentido de aproveitar este conhecimento de forma imediata. Não é possível uma adaquação automática do coeficiente de segurança. Parece claro que se deveria dispor de pelo menos dois coeficientes de desconhecimentos. Um para as ações e outro para as resistências, de forma a permitir uma eventual adequação destes para cada caso particular.

Este método não tem portanto, uma abertura para o conhecimento mais completo do comportamento dos materiais, das ações, das variações dimensionais, etc., não permitindo a evolução rápida dos critérios de segurança, com repercussão na economia da estrutura.

Este critério de introdução da segurança no projeto das estruturas de concreto armado perdurou paralelamente ao método dos estados limites nas Normas nacionais de 1937, 1940, 1943 e 1950.

Finalmente, do ponto de vista da resistência do concreto analisada sobre três aspectos fundamentais—a seguir itemizados — podemos dizer(6):

a) Definição da resistência básica do concreto à compressão à partir da qual é avaliada a segurança das estruturas:

*"A resistência limite de ruptura após 28 dias,  $R_{c28}$  /... [a partir da qual se calcula as tensões admissíveis].../é aquela obtida sobre cubos, de acordo com o boletim nº 1 do Laboratório da Escola Polytechnica de São Paulo".(7)*

Como se verifica não há uma definição explícita, podendo entender-se no entanto que se trata da resistência média a 28 dias.

---

(6) Cf. FUSCO, Péricles Brasiliense. Evolução dos conceitos do controle de concreto. São Paulo, Construção Pesada, fev. 1980. p.55-8.

(7) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CONCRETO-ABC. Regulamento para as construções em concreto armado. Cimento Armado. Orgão Oficial da ABC, n.13, v.13, 3 jul.1931 p.7-21. Secção V, § 38, item 6.

- b) Definição da resistência de dosagem, ou seja, resistência média a partir da qual se faz o proporcionamento do concreto a ser produzido em obra:

Não há indicação clara a esse respeito, podendo-se entender a penas que esta deve satisfazer à resistência  $f_{cm28}$  desejada. Não se permite considerar concretos dosados racionalmente com resistência média superior a 24,0 MPa ( $\sim 240 \text{ kgf/cm}^2$ ) nem produzir concretos arbitrariamente com fator água/cimento superior a 0,73.

- c) Controle da resistência básica do concreto à compressão:

*"O concreto dosado racionalmente será controlado, nos dias da concretagem na obra, com a determinação da humidade e da graduação dos agregados, e com a execução de provas de resistência à compressão". (8)*

Como se verifica não há uma indicação explícita de como controlar a resistência  $f_{cm28}$ . Entende-se que o controle é feito pela média dos resultados de ensaio, realizando-se pelo menos um ensaio por dia de concretagem. À luz dos critérios atuais essa exigência de amostragem diária pode ser enquadrada como rigorosa, principalmente se recordarmos a limitação dos equipamentos disponíveis na época, que permitiam uma produção máxima por betoneira da ordem de  $18 \text{ m}^3$  de concreto por jornada normal de trabalho.

#### 1.2. Normas para Execução e Cálculo de Concreto Armado (1937)(9):

A Associação Brasileira de Cimento Portland, fundada em 1936 no Rio de Janeiro, introduziu nessa norma, pela primeira vez

(8) Op. cit., Secção V, § 36, Ítem 2.

(9) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND-ABCP. Normas para execução e cálculo de concreto armado. Cimento e Concreto. São Paulo, Boletim de Informações da ABCP. 1937. 18 p. Número especial.

no mundo<sup>(10)</sup>, o critério de dimensionamento no regime de ruptura<sup>(11)</sup>, ou melhor denominado, o método determinista dos estados limites. Trata-se de impor que o carregamento de utilização da estrutura esteja suficientemente afastado de um carregamento que a levaria a um estado limite último, conforme indicado no diagrama de blocos 1.2.1.

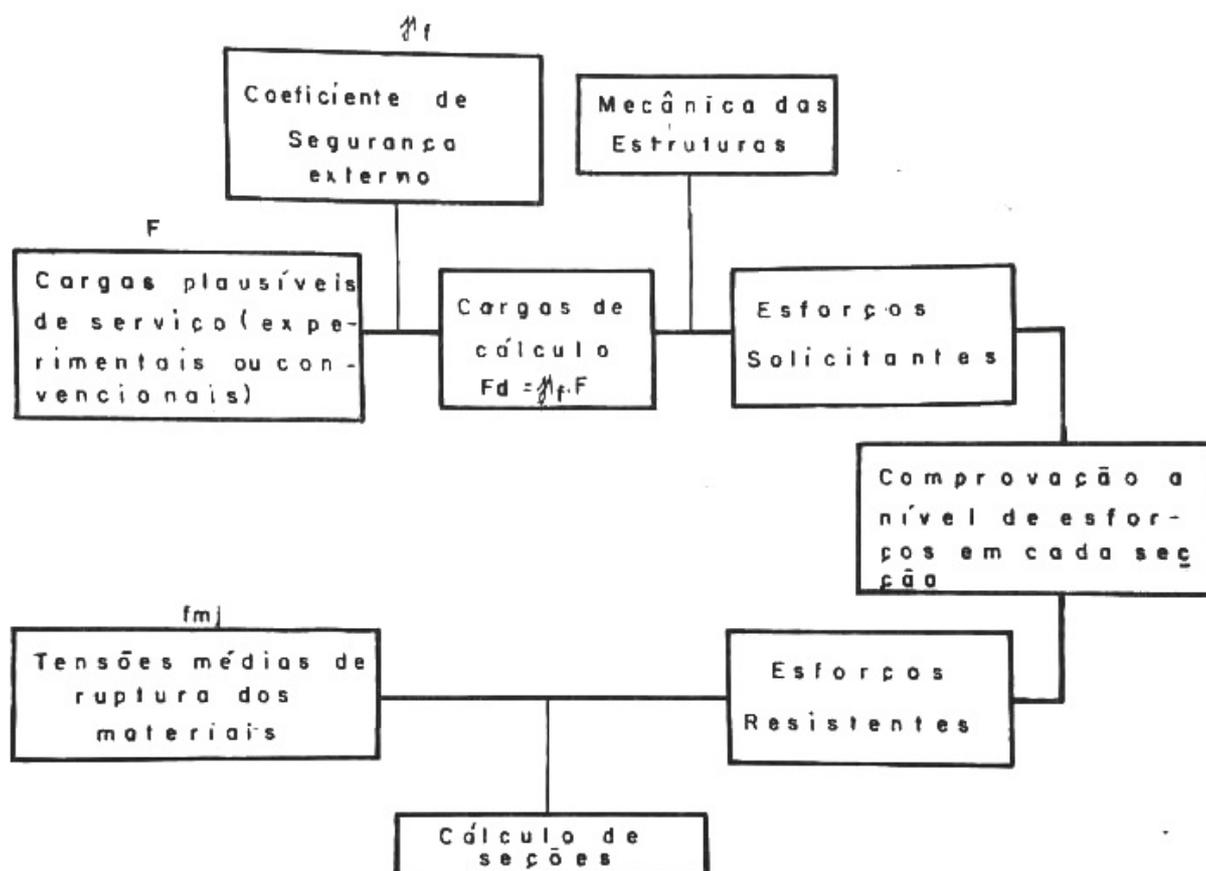


Diagrama 1.2.1. - Método determinista dos estados limites. Critério adotado pelas Normas para Execução e Cálculo de Concreto Armado (1937).

(10) Cf. LANGENDONCK, Telemaco van. Cálculo de concreto armado. Comentários a Norma Brasileira NB-1, itens 1 a 13. São Paulo, Associação Brasileira de Cimento Portland-ABCP, 1962.

(11) Na época este critério estava sendo amplamente discutido no meio técnico mundial, sendo esta norma decorrente do primeiro trabalho nacional sobre o tema, elaborado por LANGENDONCK, Telemaco van. Os novos métodos de dimensionamento das peças flectidas de concreto armado. São Paulo, Boletim do Instituto de Engenharia, 25(6): 125-144, jun.1937. Apesar de ser permitido o dimensionamento no regime de ruptura, estado III, somente para flexão, essa norma é para a época, o texto mundial mais avançado com relação à introdução da segurança no projeto das estruturas de concreto armado.

Esse afastamento é medido por um coeficiente de segurança externo,  $\gamma_f$ , que considera globalmente todas as incertezas e desconhecimentos, tais como, a variabilidade das resistências dos materiais, das ações, das dimensões, das hipóteses simplificadoras de cálculo, etc.

Representa uma evolução em relação ao método das tensões admissíveis pois o critério de dimensionamento é estabelecido a nível de esforços em cada secção e não a nível de tensões. Além disso ele considera também o comportamento, eventualmente não linear da estrutura, até que o estado limite último condicionante da segurança seja atingido. (12)

Do ponto de vista da consideração da resistência dos materiais não apresenta nenhuma evolução em relação ao método determinista das tensões admissíveis. Não incentiva a melhoria da qualidade dos materiais, nem da própria execução já que todas estas variáveis estão englobadas e pré-estabelecidas através do único coeficiente global de segurança externo,  $\gamma_f$ .

Uma vez mais o método não apresenta abertura para sua própria evolução rápida, já que o valor desse coeficiente também é empiricamente ajustado com base no desempenho de estruturas já construídas. Comparação esta subjetiva e incerta pois na indústria da construção civil tradicional praticamente todas as obras são protótipos, o que dificulta sobremaneira qualquer comparação.

Com relação à resistência do concreto temos:

- a) Definição da resistência básica do concreto a partir da qual é avaliada a segurança das estruturas:

---

(12) Cf. HACHICH, Waldemar Coelho. Sobre a segurança nos projetos de geotécnica. São Paulo, Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - EPUSP, 1978. Dissertação.

"A resistência à compressão do concreto,  $\sigma_R$ (13), na qual se baseia a fixação do valor das tensões admissíveis nos concretos dosados racionalmente, deve ser verificada, em corpos de prova cilíndricos, com a idade de 28 dias /.../ Essa resistência não deve ser menor que  $17,5 \text{ kgf/cm}^2$  /...". (14)

Como se verifica parece tratar-se da resistência média a 28 dias.

b) Definição da resistência de dosagem, ou seja, resistência média a partir da qual se faz o proporcionamento do concreto a ser produzido em obra:

"Dosagem racional - a dosagem racional faz-se de acordo com o /.../ processo devidamente justificado e previamente aprovado pela Fiscalização /...". (15)

Como se nota não há indicação clara a esse respeito, podendo-se entender apenas que esta deve satisfazer à resistência  $f_{cm28}$  desejada. Não se permite considerar concretos dosados racionalmente com resistência média-superior a  $17,5 \text{ MPa}$  ( $\sim 175 \text{ kgf/cm}^2$ ) nem produzir concretos empiricamente com consumos iguais ou inferiores a  $200 \text{ kg}$  de cimento por  $\text{m}^3$ .

c) Controle da resistência básica do concreto:

"O controle da resistência à compressão, obrigatório para os concretos dosados racionalmente, deve ser feito com corpos de prova cilíndricos /.../ Far-se-á um ensaio para cada  $50 \text{ m}^3$  de concreto lançado ou sempre que houver modificações nos mate-

---

(13)  $\sigma_R$  aparece somente no texto desta recomendação. Nas normas seguintes, NB-1 de 1940, 1943 e 1950 a resistência média à compressão, já é denominada  $\sigma_{c28}$ , notação esta que vigorou até 1978, a partir de quando passou a denominar-se  $f_{c28}$ .

(14) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND-ABCP. Op., cit., capítulo III, item 14.

(15) Op. cit., capítulo III, item 16.

*riais ou na dosagem /.../ Cada ensaio constará da ruptura de, no mínimo, dois corpos de prova". (16)*

Como se verifica não é dada uma indicação explícita de como controlar a resistência  $f_{cm28}$ . Entende-se que o controle deve ser feito pela média dos resultados de ensaio, não se aceitando concretos representados por corpos de prova cujos resultados são em média inferiores a 12,5 MPa ( $\sim 125 \text{ kgf/cm}^2$ ).

Após apenas três anos da edição desta norma com a fundação da Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT, em 1940 no Rio de Janeiro, foi editada, em 28 de setembro de 1940 a primeira norma de cálculo de caráter efetivamente nacional. Trata-se da NB-1/1940 - Cálculo e Execução de Obras de Concreto Armado que passou a reunir em suas recomendações a experiência nacional e internacional acumulada pelo meio técnico brasileiro.

Esta NB-1/1940 e as seguintes revisões de 1943 e 1950 continuaram recomendando os dois métodos já citados incluindo algumas alterações no texto sem no entanto tocar nos critérios gerais, objeto destas considerações.

A seguinte modificação notável só ocorre em 1960.

### 1.3. Cálculo e Execução de Obras de Concreto Armado NB-1 (1960)<sup>(17)</sup>:

Em 1960 além de ampliada a recomendação para cálculo em regime de ruptura, também foi discretizada a variabilidade das resistências dos materiais, contribuindo grandemente para o avanço do conhecimento do comportamento do concreto e do aço, conforme se apresenta no diagrama de blocos 1.3.1.

---

(16) Op. cit., capítulo III, ítem 18.

(17) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. NB-1 Cálculo e execução de obras de concreto armado. Rio de Janeiro, 1960.

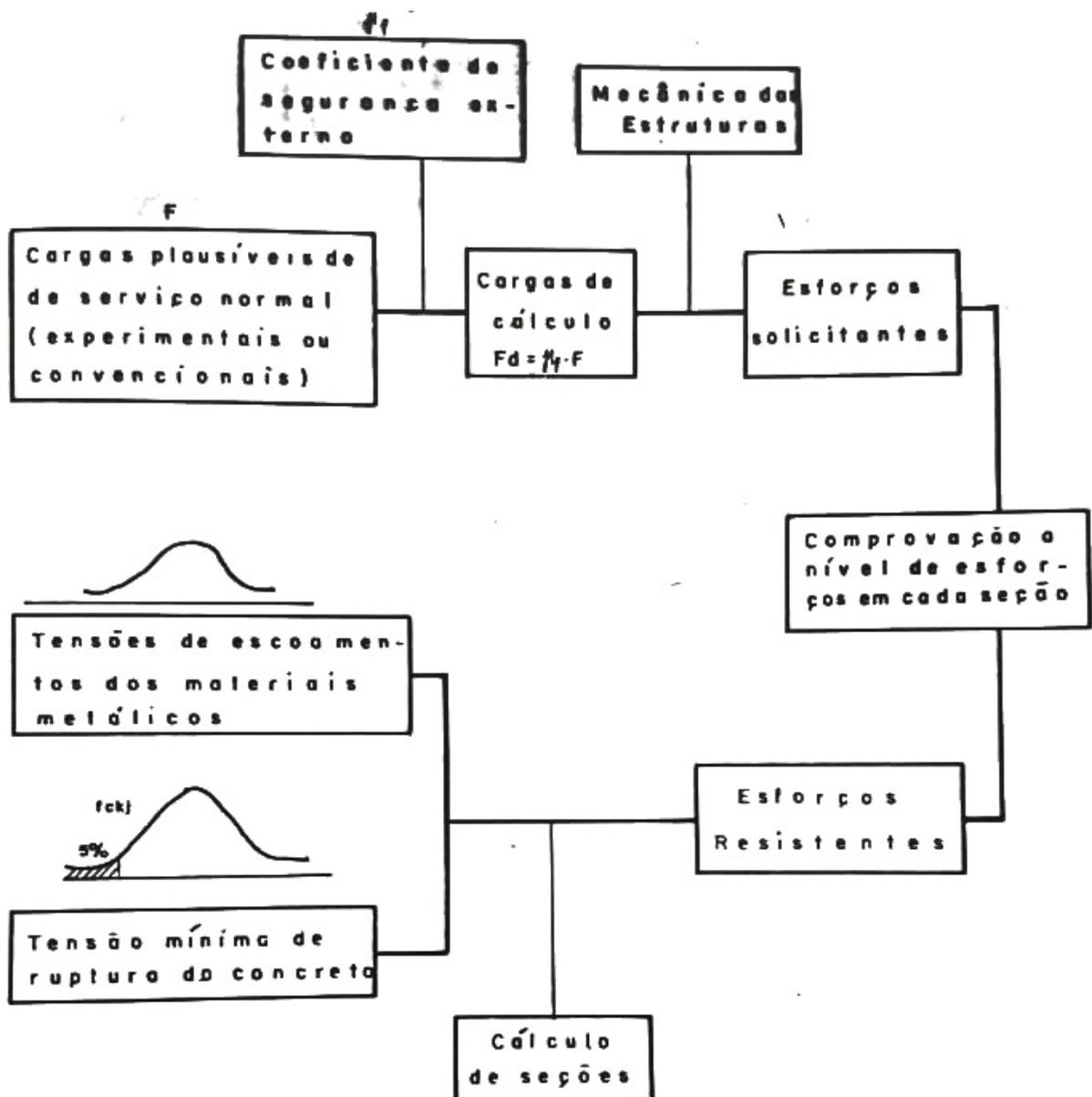


Diagrama 1.3.1. - Método parcialmente probabilista dos estados limites. Critério adotado pela NB-1 - Cálculo e Execução de Obras de Concreto Armado (1960).

Os conceitos da estatística e da teoria das probabilidades parcialmente introduzidos nesta norma, representaram uma enorme atualização para a época. Basta lembrar que segundo *Lobo Carneiro*<sup>(18)</sup>, os quatro únicos países do mundo, que no mesmo pe

(18) LOBO CARNEIRO, Fernando Luiz. Comentários sobre o projeto de revisão da norma brasileira NB-1. Salvador, 29 Sim-  
pósio de Estruturas, ABNT, 1958.

ríodo aceitavam tais conceitos, eram a União Soviética - URSS, a Alemanha Ocidental, a Inglaterra e os Estados Unidos-USA que desde 1957, através do *American Concrete Institute-ACI*, já recomendava tal procedimento<sup>(19)</sup>. Nos anos que antecederam a a provação da revisão desta norma, houve intensas discussões técnicas, no Brasil e no exterior, a respeito dos parâmetros característicos dos materiais de construção.

Tudo indica que o trabalho pioneiro foi publicado pelo engenheiro Sã<sup>(20)</sup> em 1936. Tomando por base o relatório do *Committee on Manual on Presentation of Data*, editado em 1933 pela *American Society for Testing and Material - ASTM*, Sã mostrou a necessidade, as implicações e as vantagens de uma análise estatística dos resultados de ensaio na avaliação dos parâmetros característicos das madeiras, abordando inclusive o problema da segurança. Em 1939, o engenheiro Oliveira<sup>(21)</sup>, também do *Instituto Nacional de Tecnologia - INT* no Rio de Janeiro, publica a primeira aplicação desses conceitos estatísticos no controle da resistência à compressão do concreto, analisando 600 corpos de prova de uma mesma obra.

Internacionalmente são clássicos os trabalhos de Morgan<sup>(22)</sup> e Walker<sup>(23)</sup>, que já definiam e propunham a adoção de uma resistência mínima especificada que fosse ultrapassada em 99 % das vezes, ou seja, correspondente ao quantil de 1 %.

- 
- (19) ACI - COMMITTEE - 214. Recommended practice for evaluation of compression test results of field concrete. American Concrete Institute, 1957.
- (20) SÃ, Paulo. Os números representativos das características de um material. Rio de Janeiro, Instituto Nacional de Tecnologia - INT, 1936. 20 p.
- (21) OLIVEIRA, Alberto Pastor de. O controle do concreto numa construção. Rio de Janeiro, Instituto Nacional de Tecnologia - INT, 1939. 21 p.
- (22) MORGAN, E. E. The design of concrete mixes on a minimum strength bases. London. The Engineer, 26 may 1944. p. 400-2.
- (23) WALKER, Stanton. Application of theory of probability to design of concrete for strength specifications. Chicago. Rock Products, mar. 1944.

Na mesma época o engenheiro *Lobo Carneiro*<sup>(24)</sup>, considerou exagerado esse valor sugerindo a adoção da resistência mínima como a correspondente ao quantil de apenas 2,5 %.

Em 1956 os engenheiros *Ary Torres* e *Carlos Eduardo Rosman* do *Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo - IPT*<sup>(25)</sup>, tomando por base os trabalhos e conceitos anteriormente publicados, desenvolvem e sistematizam um método para dosagem racional do concreto, cujos princípios foram posteriormente incorporados às recomendações do projeto de revisão da NB-1 em 1958. Em 1960 é publicada a primeira NB-1 que separa a variabilidade das resistências mecânicas dos materiais, das demais variabilidades inerentes ao projeto das estruturas de concreto armado.

Pode-se depreender os seguintes fundamentos implícitos nos critérios da NB-1/1960:

- a segurança em relação a solicitações normais (N,M) é analisada e considerada de forma global verificando os estados limites últimos ou de ruína e os estados de utilização ou de serviço de estrutura;
- o coeficiente de segurança externo ou global ( $\gamma_f$ ) leva em conta a variabilidade das ações, das dimensões, das hipóteses simplificadoras de cálculo, a importância social da obra, etc.

Tais fundamentos conduzem às seguintes críticas:

- 1.<sup>a</sup>) não permite uma avaliação real da segurança<sup>(26)</sup>. Considera

---

(24) LOBO CARNEIRO, Fernando Luiz. Os coeficientes de segurança e as tensões admissíveis em peças de concreto simples e de concreto armado. In: Symposium de Estruturas, Rio de Janeiro, v.2, jul. 1944. Anais ... Instituto Nacional de Tecnologia - INT, 1944. p.82-126.

(25) TORRES, Ary F. & ROSNAM, Carlos Eduardo. Método para dosagem racional do concreto. São Paulo, Associação Brasileira de Cimento Portland - ABCP, 1956.

(26) ZAGOTTIS, Décio Leal de. Introdução da segurança no projeito estrutural. São Paulo, Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - EPUSP, 1974, 116 p.

que os parâmetros mecânicos e geométricos da estrutura as sim como as ações são fenômenos deterministas, o que não corresponde à realidade;

- 2.<sup>a</sup>) não distingue a variabilidade das ações da variabilidade das características geométricas dos componentes estrutu rais não permitindo o aproveitamento do controle eventual sobre uma dessas variáveis — com os prejuízos já mencionados anteriormente;
- 3.<sup>a</sup>) engloba em um mesmo e único coeficiente todas as incertezas tanto decorrentes da capacidade resistente da estrutu ra quanto da solicitação atuante na estrutura. Isto dificul ta a evolução do conhecimento do comportamento das difer entes variáveis, impedindo o aprimoramento rápido dos critêri os de dimensionamento, majorando eventualmente o custo das estruturas.

Com relação à resistência do concreto, houve uma grande evoluç ão, conforme se depreende do próprio texto a seguir comentado:

- a) Definição da resistência básica do concreto a partir da qual é avaliada a segurança das estruturas:

*"A tensão  $\sigma_R$  na qual se baseia o cálculo das peças em função da carga de ruptura (estádio III) ou a fixação das tensões admissíveis, será igual à tensão mínima de ruptura do concreto a compressão, com 28 dias de idade, determinada em corpos de prova cilíndricos normais.*

*Considera-se, para os fins desta Norma, como tensão mínima de ruptura do concreto à compressão, a definida pelas fórmulas seg uintes:*

- quando houver sido determinado o coeficiente de variação da resistência do concreto, com pelo menos 32 corpos de prova da obra considerada ou de outra obra do mesmo construtor e de igual padrão de qualidade:  $\sigma_R = (1 - 1,65 v) \sigma_{c28}$ , mas não maior que  $0,8 \cdot \sigma_{c28}$ ;
- quando não for conhecido o coeficiente de variação:

- se houver controle rigoroso:  $G_R = 3/4 G_{c28}$   
 se houver controle razoável:  $G_R = 2/3 G_{c28}$   
 se houver controle regular:  $G_R = 3/5 G_{c28} / \dots$ " (27)

Conclui-se, portanto, que a resistência básica  $f_{ck28}$  foi definida implicitamente como sendo o quantil de 5% de uma distribuição normal. Isto representa uma grande evolução em relação aos critérios anteriores pois a resistência considerada no dimensionamento da estrutura é um valor que independe da variabilidade do processo de produção do concreto. Em outras palavras significa dizer que o construtor é incentivado a buscar diminuir o custo do  $m^3$  de concreto produzido, abaixando a resistência média de dosagem, através de uma melhoria no processo de produção e controle. Se ele conseguir reduzir o desvio padrão do processo de produção de 4,0 para 2,0 MPa, poderá imediatamente usufruir dos benefícios decorrentes da redução proporcional de consumo de cimento.

b) Definição da resistência de dosagem, ou seja, resistência média a partir da qual se faz o proporcionamento do concreto a ser produzido em obra:

"A dosagem racional pode ser feita por qualquer método baseado na relação entre a quantidade de água e o peso de cimento (relação água/cimento), desde que devidamente justificado e submetido à Fiscalização e desde que satisfaça às seguintes condições:

a) a fixação da relação água/cimento decorrerá da tensão  $G_{c28}$  calculada de acordo com as fórmulas do item 89, em função da tensão mínima de ruptura especificada  $G_R / \dots$ " (28)

---

(27) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. NB-1 Cálculo e execução de obras de concreto armado. Rio de Janeiro, 1960. Capítulo VI, seção E, item 89.

(28) Op. cit., capítulo VI, Seção F, item 90.

Como se verifica a dosagem passou a ser feita em função da resistência média  $f_{cm28}$  de forma a atender à resistência básica de projeto  $f_{ck28}$ , conforme definida no ítem 89 da NB-1 (1960).

A resistência média inicial de dosagem fica definida a partir de duas formas. Uma subjativa que depende exclusivamente do padrão de qualidade a ser implantado na futura obra e outra aparentemente mais precisa, que depende do conhecimento prévio de pelo menos 32 resultados de corpos de prova da mesma obra—no caso de ajustagem da dosagem—ou de outra obra do mesmo construtor onde o grau de controle da execução do concreto tenha sido o mesmo que se pretende ora implantar.

Infelizmente as duas formas recomendadas podem ser consideradas deficientes à luz dos conhecimentos atuais. Foi no entanto a última palavra em termos do estado de conhecimento nos fins da década de 50<sup>(29)</sup>.

Por exemplo, não deixa claro que 32 resultados devem ser considerados, ou seja, se dispomos de 200 resultados de uma obra semelhante, é válido escolher 32 deles ou utiliza-se os 200? Como se sabe atualmente o processo de produção do concreto não pode ser considerado estacionário por um longo período de tempo devido à variação inevitável das características dos materiais que entram na mistura. Logo, não é aconselhável utilizar resultados de corpos de prova que representem volumes elevados de concreto. Recordando que o texto da NB-1 (1960) recomenda moldar corpos de prova para cada  $30\text{ m}^3$ , 32 resultados podem corresponder até  $1000\text{ m}^3$ , ou seja, cerca de 6000 sacos de cimento,  $1000\text{ m}^3$  de areia e  $1300\text{ m}^3$  de agregados graúdos. Está claro que não se pode esperar uniformidade desses materiais, pois sendo de partidas e fornecimentos diversos, acarretam modificações na centragem da média do concreto produzido nesse período.

---

(29) Cf. FUSCO, Péricles Brasiliense. Evolução dos conceitos do controle de concreto. São Paulo, Construção Pesada, fev. 1980, p. 55-8.

Por outro lado, no caso de não se dispor de resultados da obra ou outra semelhante, deve-se calcular a resistência média inicial de dosagem  $f_{cm28,d}$  a partir da multiplicação de  $f_{ck28}$  por uma constante ( $4/3$ ,  $3/2$  ou  $5/3$ ) que é dependente do grau de controle a ser implantado na execução do concreto. Ora, isso pressupõe admitir "a priori" que o processo de produção do concreto terá coeficiente de variação de 0,15: 0,20 e 0,25 respectivamente. Esse conceito, fundamentado na constância do coeficiente de variação, foi posteriormente superado através de pesquisas internacionais que demonstraram ser o desvio padrão uma característica particular de um processo de produção e não o coeficiente de variação. Por exemplo, para o cálculo de resistência média de dosagem para duas concretagens de uma mesma obra, sendo uma com  $f_{ck28} = 13,5$  MPa ( $\sim 135$  kgf/cm<sup>2</sup>) e outra com  $f_{ck28} = 25,0$  MPa ( $\sim 250$  kgf/cm<sup>2</sup>) na qual o padrão de qualidade da obra pode ser enquadrado como controle rigoroso, temos:  $f_{cm28,d} = 18,0$  MPa ( $\sim 180$  kgf/cm<sup>2</sup>) e  $f_{cm28,d} = 33,0$  MPa ( $\sim 330$  kgf/cm<sup>2</sup>), respectivamente, o que nos mostra estar admitindo que haverá dois desvios padrão no mesmo processo de produção, de 2,7 MPa ( $\sim 27$  kgf/cm<sup>2</sup>) no primeiro caso e de 5,0 MPa ( $\sim 50$  kgf/cm<sup>2</sup>) no segundo. Como se sabe isso é absolutamente improvável de acontecer pois para um mesmo processo de produção de concreto, sabe-se que o desvio padrão é praticamente constante.

c) Controle da resistência básica do concreto:

*"O controle de resistência do concreto à compressão, obrigatório para os concretos dosados racionalmente, deve ser feito de acordo com os Métodos MB-2 e MB-3. A idade normal para ruptura é a de 28 dias /.../ Deve-se fazer um ensaio para cada 30m<sup>3</sup> de concreto lançado ou sempre que houver modificações nos materiais ou no traço /.../ Cada ensaio deve constar da ruptura de, pelo menos, 2 corpos de prova /..." (30)*

---

(30) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. Op. cit., capítulo VI, Seção F, item 93.

Como se depreende do texto não há uma indicação clara de como controlar a resistência básica  $f_{ck28}$ . Por exemplo, no caso de uma obra com volume total de concreto de  $600 \text{ m}^3$ , dispor-se-á apenas de 20 ensaios. Como saber se  $f_{ck28}$  foi ou não atendido?

Mais interessante e por vezes indispensável é saber se um dado volume de concreto lançado, por exemplo o correspondente a apenas um andar de um edifício (volume ~ de  $100 \text{ m}^3$ ), atende ou não à resistência mínima de projeto  $f_{ck28}$ . Como proceder nesse caso que só se disporá de apenas 3 resultados? Seria necessário então ensaiar 32 corpos de prova, ou seja, um ensaio para cada  $3 \text{ m}^3$  de concreto lançado?

Essas questões infelizmente acabaram tendo que ser respondidas através da utilização de recomendações internacionais sendo o texto do *American Concrete Institute - Recommended Practice for Evaluation of Strength Test Results of Concrete - ACI 214*, o mais empregado no meio técnico brasileiro. Além deste, no caso de ensaios de concreto pré-misturado poder-se-ia empregar também as recomendações da *British Ready Mixed Concrete Association - BRMCA - Code for Read Mixed Concrete*. Esses dois textos tinham e têm o inconveniente de estarem desvinculados dos critérios nacionais de introdução da segurança no projeto da estrutura, o que acarreta diferentes e divergentes interpretações possíveis.

#### 1.4. Projeto e Execução de Obras de Concreto Armado NB-1 (1978)<sup>(31)</sup>:

Este método de introdução da segurança no projeto estrutural, fruto de ampla investigação internacional, promovida pelo *Comitê Euro-Internacional du Béton-CEB<sup>(32)</sup>*, atualmente em vigor no Brasil, através da NB-1 (1978), considera somente as resistências e as ações como variáveis aleatórias.

(31) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. NB-1 Projeto e execução de obras de concreto armado. Rio de Janeiro, 1978. 76 p.

(32) COMITÉ EUROPÉEN DU BÉTON. Recommandations internationales CEB/FIP pour le calcul et l'exécution des ouvrages en béton: version française définitive, avec introduction des notations nouvelles. Bulletin l'Information n. 84. Paris, 1972.

Admite uma distribuição estatística dessas variáveis e fixa um só valor chamado valor característico. Com isto introduz uma grande simplificação ao *método probabilista puro*, ao mesmo tempo que melhora um pouco a avaliação da segurança sem contudo superar ainda todas as deficiências já apontadas no método da NB-1 (1960).

Entende-se por método probabilista puro aquele no qual o dimensionamento da estrutura é feito para uma determinada probabilidade de ruína, pré-estabelecida em função da vida útil, da importância e do custo da obra. Apesar de que existe um consenso entre os engenheiros de que a toda e qualquer estrutura está associada uma probabilidade de ruína não nula, o cálculo prático dessa probabilidade ainda está longe de ser resolvido, sendo possível somente em alguns casos muito particulares.<sup>(33)</sup> Essa dificuldade se deve principalmente à insuficiência das análises estatísticas para definir as distribuições das variáveis envolvidas. Daí a necessidade atual de uma simplificação, conforme inserida no texto da NB-1 (1978).

De qualquer forma o *Comité Euro-International du Béton - CEB*, propõe um método de introdução da segurança no projeto das estruturas, com fundamento muito mais racional, utilizando as vantagens do método dos estados limites, separando porém a influência da variabilidade de alguns dos fatores que intervêm na segurança da estrutura.

Para considerar as outras variáveis cujas distribuições são ainda desconhecidas ou não quantificáveis, são introduzidos coeficientes de ponderação parciais. Esses coeficientes de ponderação são denominados  $\gamma_m$  quando relativos à qualidade dos materiais e da execução da construção e  $\gamma_f$  quando relativos às ações e ao processo de cálculo. Na realidade esses coeficientes de ponderação parciais ou impropriamente chamados de coeficientes de segurança, englobam outros vários fatores que ain

---

(33) Cf. HACHICH, Waldemar Coelho. Sobre a segurança nos projetos de geotécnica. São Paulo, Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - EPUSP, 1978. Dissertação.

da são desconhecidos ou dificilmente quantificáveis cuja lista incompleta se encontra no quadro 1.4.1.

No estabelecimento dos coeficientes de ponderação parciais $\gamma_f$ e $\gamma_m$ são levados em conta os seguintes fatores:		
Fatores aleatórios	Principais causas de incerteza	Grandezas onde são consideradas
Resistência dos materiais	<ul style="list-style-type: none"> <li>- variabilidade dos materiais</li> <li>- correlação corpo de prova x realidade</li> <li>- erros de ensaio</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- resistência característica dos materiais - <math>f_k</math></li> <li>- coeficiente de minoração <math>\gamma_m</math></li> </ul>
Cargas e outras ações	<ul style="list-style-type: none"> <li>- variabilidade dos pesos próprios e ações não permanentes</li> <li>- probabilidade da ação simultânea das ações</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- valor característico das ações - <math>F_k</math></li> <li>- coeficiente de majoração ou de segurança <math>\gamma_f</math></li> </ul>
Processo de cálculo	<ul style="list-style-type: none"> <li>- precisão das hipóteses de cálculo</li> <li>- erros numéricos de aproximação</li> <li>- grau de precisão</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- valor de cálculo das ações <math>F_d</math></li> </ul>
Características geométricas e mecânicas da estrutura real	<ul style="list-style-type: none"> <li>- defeitos de execução, variações dimensionais, posição das armaduras, de prumo, etc.</li> <li>- imprecisões geométricas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- resistência de cálculo dos materiais <math>f_d</math></li> <li>- valor de cálculo das ações <math>F_d</math></li> </ul>
Particulares de cada comunidade	<ul style="list-style-type: none"> <li>- organização social e política</li> <li>- instrução dos técnicos</li> <li>- inspeção e controle da obra</li> <li>- qualidade dos fabricantes de materiais</li> <li>- desenvolvimento industrial e tecnológico</li> <li>- inspeção e controle de uso</li> <li>- importância social, política e econômica da obra</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- valor de cálculo das ações <math>F_d</math></li> <li>- resistência de cálculo dos materiais <math>f_d</math></li> </ul>
Outros	<ul style="list-style-type: none"> <li>- adaptação dos resultados assim calculados aos vigentes por não conhecimento completo do comportamento da estrutura e dos materiais</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- valor de cálculo das ações <math>F_d</math></li> <li>- valor de cálculo das resistências - <math>f_d</math></li> <li>- coeficiente de adequação do valor da resistência de cálculo do concreto (0,85 ou 0,80). <math>f_{cd}</math></li> </ul>

Quadro 1.4.1. - Alguns fatores que estão ainda incorporados aos coeficientes de ponderação recomendados pelo texto da NB-1 (1978).

Desta forma, à medida que aumentam o conhecimento e o controle dessas variáveis, tais como, ações, resistências, características geométricas, correlação corpo de prova x componente estrutural, hipóteses de cálculo, precisão de medidas, controle da execução, etc., o resultado poderá ser transferido, através dos valores característicos, para a economia da obra ou poderá ser utilizado para adequar os coeficientes de ponderação, com evidentes benefícios econômicos sem prejuízo da segurança.

Os diagramas 1.4.2. e 1.4.3. mostram esquematicamente a sequência a seguir no dimensionamento de estruturas pelo método semi-probabilista vendo-se claramente a vantagem e a importância do controle da resistência mecânica dos materiais de construção<sup>(34)</sup>.

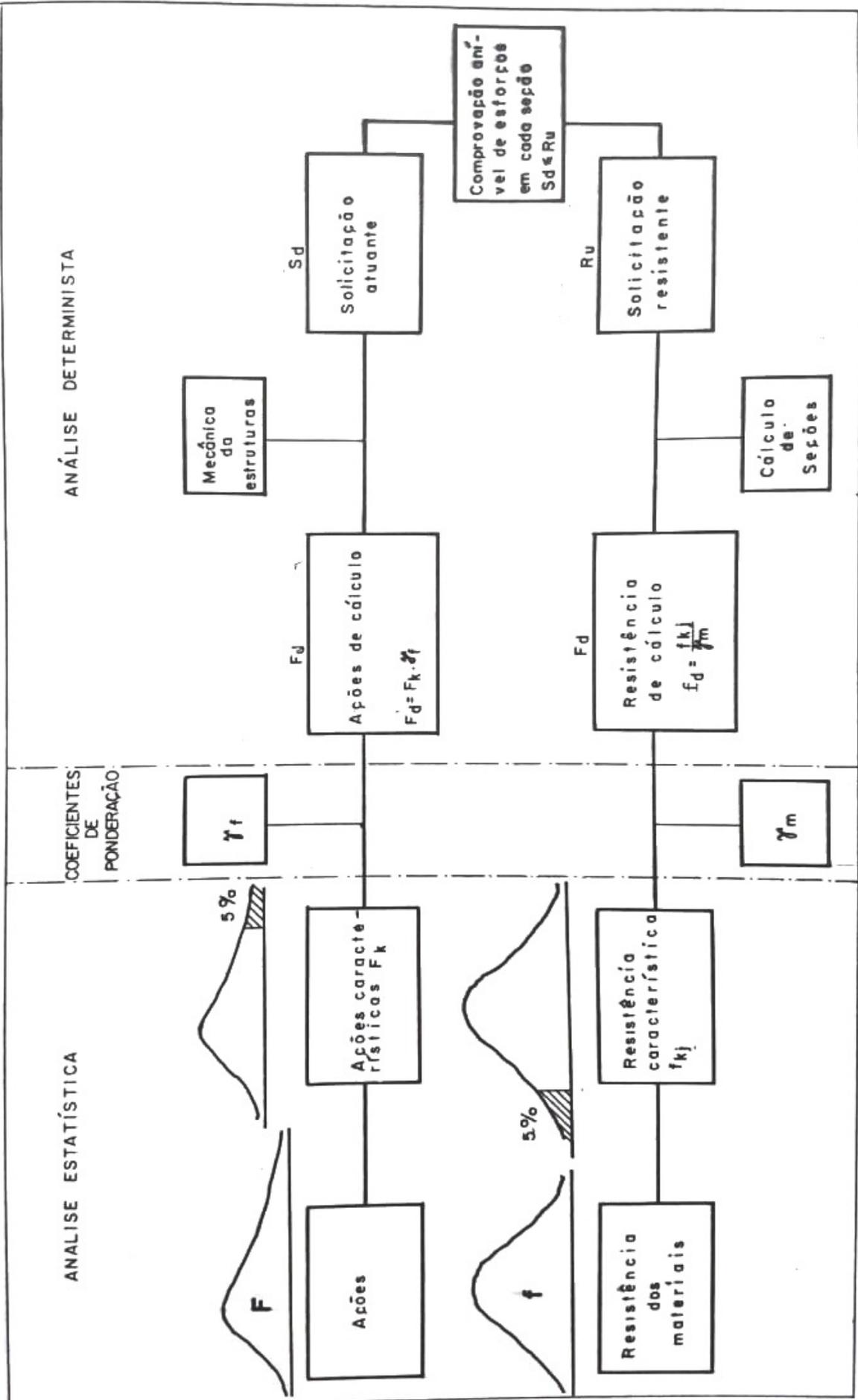
Dentro desta nova metodologia fica ressaltado a necessidade e o interesse do controle adequado das resistências dos materiais. Aparece também as deficiências de conhecimento nacional das demais variáveis envolvidas, como por exemplo as ações<sup>(35)</sup>.

---

(34) MORÁN CABRÉ, Francisco. Patología de la Construcción. Madrid, Curso de Estudios Mayores de la Construcción-CEMCO 76, Instituto Eduardo Torroja - IET, 1976.

(35) Enquanto nos métodos anteriores a 1978 as ações representadas pelas cargas acidentais foram consideradas como ações plausíveis, no método atual estas ações são admitidas como correspondentes ao quantil de 95%. No entanto não houve ainda, por absoluta falta de levantamentos estatísticos fiáveis, modificação nas cargas acidentais que continuam sendo recomendadas pela ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. NB-5 Cargas para cálculo de estruturas de edifícios. Rio de Janeiro, 1978. A edição anterior data de 1961 sendo que a norma atual, apesar de ampliada, adota em última análise os mesmos valores que os recomendados em 1961.

**DIAGRAMA 1.4.2 Método semi-Probabilista dos Estados Limites. Critério adotado pela NB-1 Projeto e Execução Obras de Concreto Armado (1978)**



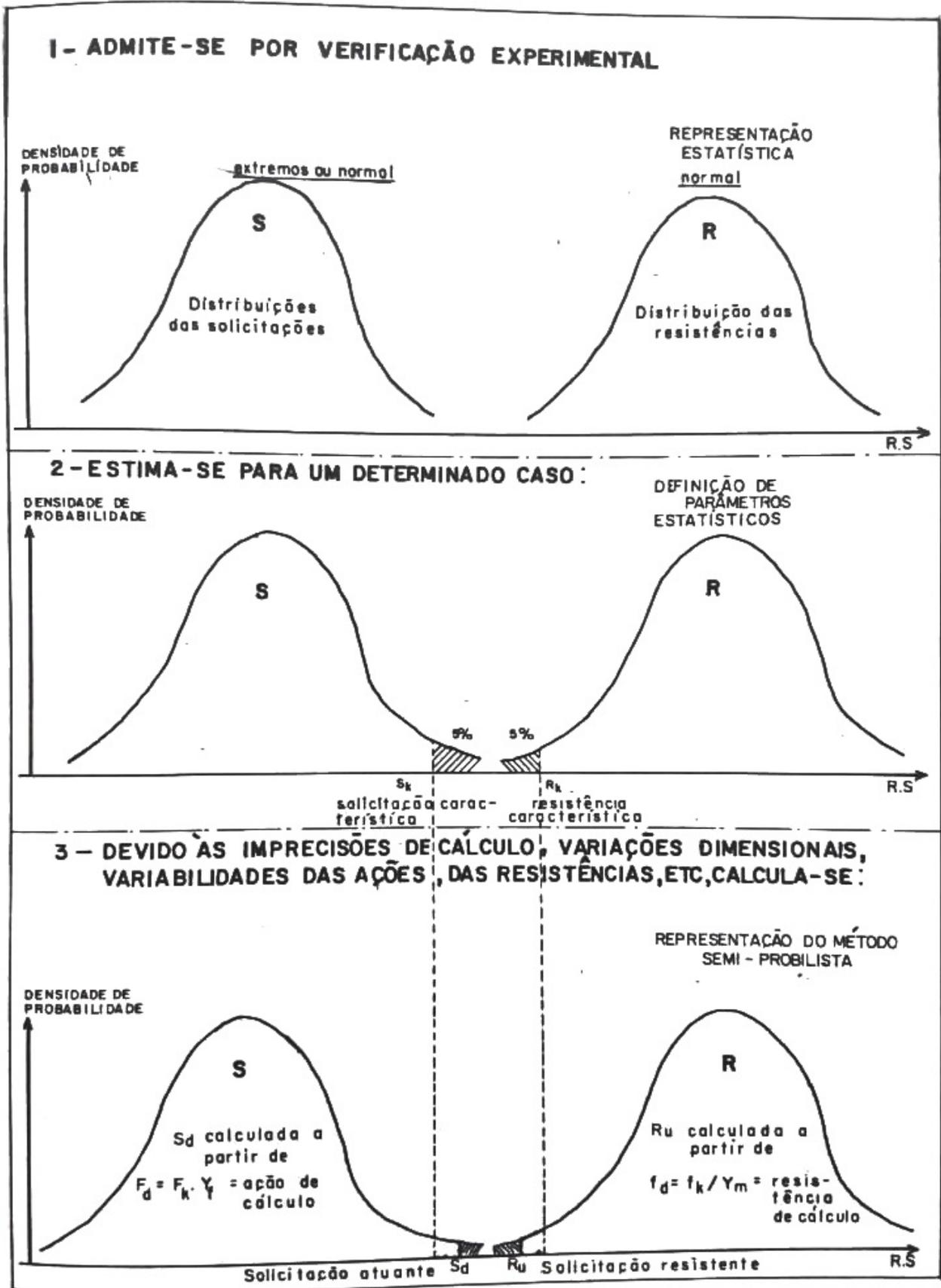


Diagrama 1.4.3. - Representação esquemática da análise estatística recomendada no método semi-probabilista dos estados limites. Critério adotado pela NB-1 Projeto e Execução de Obras de Concreto Armado (1978).

Quanto seria economizado se levantamentos estatísticos coerentes conseguissem provar que as cargas acidentais atualmente a dotadas são excessivas para nosso país? Se a uma redução com provadamente possível de 10% correspondesse uma economia de 1% de cimento, poder-se-ia economizar cerca de 4.200.000 sacos anualmente<sup>(36)</sup>. Quanto pode significar isto em termos de redução no consumo de combustível?

Outro ponto que se apresenta deficiente é com relação à consi deração das variações dimensionais inevitáveis dos elementos e componentes estruturais. Sempre vão existir deficiências nas formas, na posição das armaduras, no prumo, no alinhamento, no esquadro, etc. Essas variações devem estar provistas no dimen sionamento da estrutura. Neste método estão, só que incluídas nos dois coeficientes de ponderação,  $\gamma_m$  e  $\gamma_f$ . Porque não considerar como incluída somente em um deles, ou melhor, somente no  $\gamma_m$  já que em última instância vai acarretar uma modificação da solicitação resistente?

Poderia, inclusive, com vistas ao incentivo que sempre deve ha ver no método de dimensionamento, fixar alguns valores de to lerâncias geométricas bastante exigentes correspondentes a uma *execução ideal*. Assim como poderia ser estabelecido valores mais tolerantes correspondentes ao *máximo razoável*, ou seja, indicado para obras com pequeno rigor de controle tecnológico. A cada situação extrema deveria estar associado um coeficien te de ponderação. Desta forma aqueles que melhor executassem e controlassem suas obras poderiam usufruir imediatamente desse fato ao mesmo tempo que não seria alterada a probabilidade de ruína da estrutura.

Como se vê, carecemos da quantificação dessas e das demais va riáveis ainda desconhecidas, através da medida experimental de suas variabilidades com o fito de reduzir o atual desconheci mento das suas distribuições estatísticas. Essas investigações poderão adequar melhor os coeficientes ora empregados.

---

(36) Admitindo uma produção anual de 42 milhões de toneladas de cimento, prevista para 1980, e que 50% desse total se destine a obras convencionais de concreto armado.

Finalmente com relação à resistência à compressão do concreto, pode-se dizer que houve neste período uma mudança notável a ponto de ser objeto desta dissertação.

A definição atual da resistência básica do concreto,  $f_{ckj}$  a partir da qual é avaliada a segurança das estruturas é bastante clara e precisa correspondendo ao quantil de 5% de uma distribuição normal de frequências. Isto vale inclusive para os outros materiais, em especial o aço.

A definição atual da resistência de dosagem passou a ser determinada por uma regra de decisão, onde se adota um valor para o desvio padrão de dosagem  $s_d$ . Isto melhora em muito o critério anterior que se fundamentava no coeficiente de variação.

Com relação ao controle da resistência básica,  $f_{ckj}$ , os conceitos foram bem definidos, passando-se a empregar funções de aceitação que fornecem diretamente o valor do quantil desejado, mesmo no caso de pequenas amostras, o que tem extremo interesse prático.

Resumindo as considerações expressas neste capítulo pode-se dizer que:

- 1º) houve evolução significativa nos critérios de dimensionamento passando-se do método determinista das tensões admissíveis (1931 a 1960) para o método semi-probabilista dos estados limites (a partir de 1978);
- 2º) ainda não é perfeita a avaliação da segurança real da estrutura, com limitações de ordem teórica e carecendo de dados experimentais que permitam a evolução do atual método semi-probabilista de introdução da segurança no projeto das estruturas de concreto armado a métodos probabilistas mais exatos;
- 3º) os coeficientes de ponderação atualmente recomendados ainda incluem um grande número de variáveis. Parece ser interessante individualizar pelo menos a parcela relacionada à variabilidade das características geométricas dos componentes estruturais. Desta forma passaria a haver um inte

resse e um benefício imediato no aprimoramento das técnicas executivas;

- 49) apesar das ações, tal qual as resistências dos materiais, estarem individualizadas e formalmente analisadas estatisticamente no método recomendado atualmente, isto não acontece na prática. Parece ser interessante passar a controlar efetivamente as ações de modo a permitir sua adequação aos padrões Nacionais de utilização das estruturas de concreto armado;
- 59) a resistência básica tomada como referência para o dimensionamento da estrutura evoluiu do valor médio para um valor característico, com alta probabilidade de ser superado, melhorando sobremaneira a avaliação da segurança com repercussão imediata na economia;
- 69) os critérios para fixação da resistência média inicial de dosagem tornaram-se claros e precisos, restando, no entanto, a explicitação das técnicas de correção e atualização da resistência média de dosagem relativas a um processo de produção;
- 79) os critérios recomendados para o controle da resistência básica foram bem explicitados e utilizaram recursos atuais da estatística de forma a responder rapidamente sobre a situação da estrutura ou trechos dela.

A evolução do conhecimento das distribuições das resistências mecânicas dos materiais de construção, forçou a sua discretização nos métodos de introdução da segurança no projeto estrutural.

Esta separação, se por um lado contribui para a melhor adequação dos coeficientes de segurança à realidade, pois estes passam a representar um menor número de variáveis desconhecidas, por outro aumenta a importância do controle da variabilidade dessas resistências, conforme foi possível observar nos quadros esquematizados anteriormente, onde se percorreu de modo geral a evolução dos métodos de introdução da segurança no projeto das estruturas de concreto armado no Brasil.

## II. CONTROLE DE QUALIDADE

### 2.1. Generalidades

Segundo *Garcia Mesequer*<sup>(1)</sup>, toda atividade humana na qual, a partir de certas matérias primas e através de um certo processo de fabricação, se obtenha um produto final, é suscetível de ser controlada estatisticamente, desde que o processo se repita mantendo certas condições essenciais.

Toda estrutura de concreto armado, depois de acabada, possui uma série de características próprias que a diferencia daquela que foi especificada no projeto estrutural. O aço e o concreto não possuem exatamente a resistência característica especificada, as armaduras não estão perfeitamente nas posições desenhadas, as formas não têm as dimensões com as quais se efetuou o dimensionamento do componente estrutural, os pilares não guardam o prumo absoluto, etc.

O projeto estrutural não pode assegurar que durante a execução da estrutura serão empregados os materiais e os métodos construtivos por ele especificados. A etapa de produção, ou seja, a execução propriamente dita da obra estará sujeita a variações aleatórias de tal modo que não é possível prever com certeza qual será o resultado final. O grau de concordância dessas características finais com aqueles que foram anteriormente especificadas pode medir a qualidade da execução. Essa qualidade será tanto mais alta, quanto maior a conformidade do executado ao que foi projetado.

As informações sobre a qual se fundamentam as diversas decisões que devem ser tomadas durante o processo de conversão de um projeto em uma obra acabada, devem ser fornecidas por um conjunto de técnicas de controle que permitam estabelecer regras fixas de interpretação dessas informações. Tais técnicas e regras devem considerar o risco inerente a cada tomada de de

---

(1) GARCIA MESEGUER, Alvaro. Control de la calidad. In: 1<sup>er</sup> Colloque Européen sur le Contrôle de la Qualité dans la Construction, Madrid, mayo, 1976. Anais ... European Organization for Quality Control-EOQC, 1976. p.361-3.

cisão, com o objetivo de que a avaliação do risco global, inicialmente feita pelo calculista, ainda que apenas implicitamente, não seja comprometida até a realização final da obra.

Essas técnicas de controle não podem ser confundidas apenas com uma vigilância em obra e a realização de alguns ensaios. Daí a expressão *controle de qualidade* significar algo mais elaborado, algo que leva consigo a idéia de um controle estatístico. A qualidade não deve ser considerada como uma qualidade abstrata, mas sim como um parâmetro quantificável, e, não sob um enfoque determinista e sim sob um enfoque probabilista.

Um bom controle de qualidade terá por objetivo, então, garantir um nível pré-estabelecido de qualidade de um determinado produto.

Não pode ser confundido com o *controle da qualidade*<sup>(2)</sup>, como se estivesse implícito que ao fazer um controle de qualidade obrigatoriamente obter-se-ia produtos de alta qualidade. Não é objetivo do controle de qualidade elevar ou abaixar a qualidade, mas tão somente *manter uma qualidade*.

Em outras palavras, controle de qualidade de um produto, deve ser entendido como uma técnica que através de recursos matemáticos da estatística, tem por objetivo fornecer as informações essenciais para a manutenção do produto numa qualidade especificada, ao mínimo custo possível. Se aplicado à aceitação de um produto, terá por objetivo simplesmente fornecer a informação da conformidade ou não do produto a uma determinada qualidade. Consequentemente pode-se manter, aceitar ou rejeitar qual

---

(2) Esta expressão é normalmente empregada para designar que se deseja assegurar um concreto final, na estrutura, de alta qualidade e dentro das exigências do projeto estrutural. O termo que melhor se adequa a esta pretensão seria garantia da qualidade, derivado do inglês, "quality assurance". Esse programa que originariamente foi desenvolvido para o controle de usinas nucleares, é muito mais amplo que o controle da resistência à compressão do concreto, subentendido na expressão controle de qualidade do concreto. Um programa de garantia da qualidade envolve desde a organização interna da empresa até a origem, natureza e qualidade dos materiais em obra, documentando todos os passos necessários à obtenção do produto final.

quer qualidade — baixa, padrão ou alta—sem que necessariamente o controle de qualidade acarrete somente produtos de alta qualidade. É simplesmente uma técnica que ajuda a manter, aceitar ou rejeitar uma qualidade pré-estabelecida.

As técnicas de controle de qualidade podem ser aplicadas às o númeras atividades de uma construção, sendo objetivo destas considerações tão somente o controle de qualidade do concreto, a pesar de que a metodologia geral pode ser aplicada ao controle de outras variáveis, tais como, massa específica, fator á-gua/cimento, variações geométricas das formas, variações dimensionais dos elementos e componentes prontos, etc.

Ao se buscar defender a qualidade de um concreto devemos lembrar que esta reúne um grande número de características tais como: trabalhabilidade, durabilidade, resistência mecânica, homogeneidade, deformabilidade, impermeabilidade, etc. Portanto para a definição da qualidade do concreto seria necessário considerar todos os parâmetros que influenciam cada uma das características anteriormente mencionadas.

A resistência à compressão axial é no entanto uma característica que indiretamente engloba as demais, pois:

- após escolhida a natureza do algerante e um traço adequado, a durabilidade de um concreto está inversamente relacionada ao fator água/cimento. Desde que os meios de transporte, lançamento, adensamento e cura sejam adequados, quanto menor o fator água/cimento—até um limite em torno de 0,25 em peso, nas condições ambientais — menor a porosidade, maior a compacidade e conseqüentemente a durabilidade. Desde que Duff Abrams<sup>(3)</sup> em 1918 provou experimental e definitivamente que existe uma dependência forte entre o fator água/cimento e a resistência à compressão axial, basta controlar esta para estar indiretamente controlando a durabilidade de um determinado concreto;

---

(3) ABRAMS, Duff A. Design of concrete mixtures. Chicago, Structures Materials Research Laboratoires, Lewis Institute, dec. 1918. Bulletin 1.

- fixados os materiais e o traço, o módulo de deformação longitudinal é proporcional à variação da resistência à compressão de tal forma que ao comprovar a resistência estaremos comprovando indiretamente a *deformabilidade* do concreto;
- a *trabalhabilidade* e a *homogeneidade* também são função da quantidade de água para um mesmo traço de materiais, e, uma vez mais, estão relacionadas à resistência à compressão através do fator água/cimento;
- o teor de ar aprisionado — medida indireta da *permeabilidade* e da capacidade de *absorção d'água* de um concreto — é também variável com a resistência, fixado um traço. Variações de 1% no teor de ar aprisionado podem acarretar variações de até 8% na resistência à compressão<sup>(4)</sup>.

Como se verifica, a grosso modo, pode-se considerar que controlar a *resistência à compressão* de um concreto significa controlar a *qualidade* desse concreto. Esse é talvez um dos motivos que desvirtuou o entendimento correto das técnicas de *controle de qualidade* utilizadas para controlar a resistência à compressão do concreto.

Ao se falar em *controle de qualidade* do concreto, entendia-se como *controle da qualidade* do concreto, justamente porque as técnicas de controle de qualidade foram utilizadas para o controle da resistência à compressão do concreto, característica essa que engloba grosseiramente os parâmetros gerais de qualidade de um concreto. Na prática é possível e deve-se fazer o controle de qualidade de um concreto com baixa resistência e conseqüentemente alta deformabilidade e permeabilidade, ou seja, um concreto com baixa qualidade, pois isto estará garantindo a *segurança da estrutura* conforme previamente estabelecida — na maioria das vezes só em função de parâmetros resistentes — no respectivo projeto estrutural.

---

(4) Cf. TOBIO, J. M. *Resistencia del hormigón en estructuras terminadas*. Madrid, *Informes de la Construcción*, Instituto Eduardo Torroja - IET, n.203, 1968. p.57-64.

O controle de qualidade aplicado ao controle da resistência à compressão do concreto, deve ser entendido, dentro da conceituação de introdução da segurança no projeto estrutural, segundo o método semi-probabilista, NB-1 (1978), como um dos recursos do *controle tecnológico* das estruturas de concreto armado e protendido, não significando que a simples aceitação de um lote de concreto, ou mesmo de todos eles, implique na aceitação automática da estrutura de concreto.

É muito comum que construtores mal informados contratem Laboratórios exclusivamente para o controle de qualidade da resistência à compressão do concreto, crendo que estão com isto garantindo a *qualidade do concreto da estrutura*.

Essa qualidade depende não só da resistência potencial do concreto, medida pelos ensaios de controle, como principalmente do controle tecnológico dos materiais e serviços da obra, pois, estes sim, determinam a qualidade final da estrutura.

Também do ponto de vista da segurança é imprescindível o controle tecnológico dos materiais e serviços com a finalidade de que a estrutura seja executada em atendimento às normas de bem construir, pois é para essa situação que foram fixados os coeficientes de ponderação  $\gamma_f$  majoração das ações e  $\gamma_m$  minoração das resistências.

Qualquer inobservância a essas normas não estará contemplada nesses coeficientes e conseqüentemente reduzirá a segurança da estrutura.

## 2.2. Metodologia do controle de qualidade

O controle de qualidade pode atuar em duas fases: durante a *produção* de um elemento, componente ou subsistema e na *aceita*ção desse elemento, componente ou subsistema para a finalidação de a que se destina<sup>(5)</sup>.

---

(5) Cf. CALAVERA RUIZ, José. El propietario y el control de la calidad. In: 1<sup>er</sup> Colloque Européen sur le Contrôle de la Qualité dans la Construction, Madrid, mayo, 1976. A nais ... European Organization for Quality Control-EQQC, 1976. p.263-4.

Ambos são necessários para se alcançar um bom resultado final, mas suas missões são diferentes.

O quadro 2.2.1. apresentado a seguir permitirá verificar esta diferença.

Controle de Qualidade		
	Controle de Produção	Controle de Aceitação
O que é?	Controle dos FATORES que intervêm na qualidade final do produto	Comprovação da CONFORMIDADE
Por que se faz?	Para garantir que se alcance a qualidade especificada ao MÍNIMO CUSTO POSSÍVEL	Para verificar que se alcançou COMO MÍNIMO a qualidade especificada
Quem o faz?	O PRODUTOR (fabricante, construtor)	O CONSUMIDOR (fiscalização, proprietário)
Como se realiza?	Amostragem CONTÍNUA de todo o processo	Amostragem associada a um nível de confiança para um DETERMINADO LOTE
Variáveis de controle	As que INTERVÊM no processo produtivo	A PROPRIEDADES ESPECIFICADA

Quadro 2.2.1. Dinâmica do Controle de Qualidade.

A análise das perguntas e respostas do quadro demonstra que o controle de produção e de aceitação não são conceitos opostos, mas também não são idênticos e nem podem ser confundidos.

Podemos definir o *Controle de Produção* como o conjunto de métodos que auxiliam o produtor a conseguir o produto especificado da forma mais econômica. Visa obter informações sobre a constância do processo, sua uniformidade, e o nível de qualidade que está sendo produzido, possibilitando a correção dos desvios observados. Cada atitude corretiva do processo decorre das respostas às seguintes perguntas:

Que aspecto do processo de produção mudou?

Quanto mudou?

Quando mudou?

Por quanto tempo permanecerá a mudança?

Um controle eficiente da produção exige uma rápida retro-alimentação das medidas das variáveis que se controlam, correlacionadas com os requisitos exigidos. O critério de amostragem deve ser capaz de fornecer índices do valor e da dispersão do parâmetro de controle, com uma frequência maior que a suposta decorrente de perturbações controláveis no processo de produção. Por exemplo, se o processo de produção é capaz de alterar-se a cada  $50 \text{ m}^3$  não tem sentido amostrá-lo a cada  $100 \text{ m}^3$ .

A função de controle deve indicar a necessidade de introduzir medidas corretivas antes que o limite especificado seja violado. Por exemplo, se a especificação admite um máximo de 5% de defeituosos, a função de controle deve indicar a necessidade de medidas corretivas quando a % de defeituosos chega aos 2 ou 3%(6).

Por outro lado, no *Controle de Aceitação* do produto acabado, a finalidade da decisão é julgar a conformidade ou não de uma certa quantidade do produto e não julgar sua uniformidade. É necessário estabelecer para cada decisão, uma quantidade determinada do produto, denominada lote, dentro do qual far-se-á uma amostragem aleatória.

No entanto nenhuma certeza absoluta pode advir de uma decisão quando o juízo é decorrente de propriedades mensuráveis, sujeitas a variações aleatórias dos materiais, do processo de fabricação e dos processos de amostragem e ensaio.

No controle por variáveis qualquer juízo em relação ao cumprimento de uma propriedade especificada esta sujeito inevitavelmente ao risco de uma decisão errada. Sempre há a possibilidade de *de aceitar um mau produto e rejeitar um produto bom.*

---

(6) Cf. JOINT COMMITTEE CEB/CIB/FIP/RILEM. Recommended principles for the control of quality and the judgement of acceptability for concrete. Madrid, Instituto Eduardo Torroja-IET, Monografía n.326, abr. 1975.109 p.

O desejável portanto é estabelecer um critério de aceitação único, eficaz e prático, levando em conta por um lado a simplicidade de cálculo e por outro a sua eficiência estatística.

Destas considerações depreende-se que para o estabelecimento de um controle de qualidade necessita-se três condições básicas:

- 1.<sup>a</sup>) Definição da qualidade desejada: é necessário estabelecer claramente a ou as características mínimas do produto, que serão objeto do controle. A definição do nível de qualidade desejada ou a qualidade a ser especificada é uma etapa importante e constitui o ponto a partir do qual todos os elementos serão referidos. Esta etapa requer a expressão formal do que se espera do produto acabado. A explicitação das necessidades humanas em relação a este produto, a sua quantificação e a definição dos métodos de ensaio são os elementos que devem definir a qualidade mínima a ser especificada. O balanço ponderado das exigências sociais, psícológicas e fisiológicas com o custo econômico de seu atendimento integral, numa determinada região e época, definem o mínimo desempenho que deve apresentar o produto em questão, definindo uma qualidade. Como já visto, não é objetivo do controle de qualidade modificar a qualidade final do produto mas tão somente manter uma qualidade;
- 2.<sup>a</sup>) Especificação do sistema de controle: esta etapa envolve o conhecimento dos fatores que intervêm na qualidade, ou seja, o conhecimento do processo de produção. Requer tam**ém** o conhecimento estatístico da distribuição da ou das variáveis que serão objeto do controle. Definido um nível de qualidade que deve ser atendido e os fatores que intervêm, durante a produção na obtenção dessa qualidade final, pode-se então estabelecer o sistema de controle, através da identificação de lotes, formação de amostras, coleta de exemplares, etc.; e,
- 3.<sup>a</sup>) Estabelecimento do critério de aceitação: finalmente o critério de aceitação ou rejeição deve resultar da comparação

equilibrada e racional, das consequências técnicas, econômicas e sociais decorrentes da aceitação de um mau produto, com o custo da redução do risco dessa aceitação.

Portanto do ponto de vista do controle de qualidade, qualquer que seja o produto controlado, a metodologia de controle de qualidade deve conter respostas aos seguintes itens(7):

- 2.2.1. Definição da qualidade a ser atendida;
- 2.2.2. Definição dos métodos de ensaio;
- 2.2.3. Explicitação dos fatores que influem na qualidade final;
- 2.2.4. Quantificação desses fatores;
- 2.2.5. Definição do lote a analisar (*controle de produção*) ou a julgar (*controle de aceitação*);
- 2.2.6. O procedimento de retirada de exemplares;
- 2.2.7. A forma de constituição da amostra;
- 2.2.8. A frequência de constatação da qualidade;
- 2.2.9. A fórmula matemática que a partir dos resultados obtidos nos ensaios estime a qualidade especificada; e,
- 2.2.10.0 critério de aceitação ou rejeição (só para *controle de aceitação*).

Nos capítulos III, IV e V, critica-se a sistemática atualmente empregada para controle de produção e controle de aceitação do concreto, à luz dos conceitos e da metodologia aqui expressa.

---

(7) Cf. TANGO, Carlos Eduardo de Siqueira & HELENE, Paulo Roberto do Lago. Controle de qualidade: uma proposta para normalização em alvenaria estrutural. In: Colóquio sobre Alvenaria Estrutural de Blocos de Concreto, São Paulo, 1977. Anais... Instituto Brasileiro do Concreto-IBRACON, São Paulo, 1977.

### III. ASPECTOS COMUNS AO CONTROLE DE PRODUÇÃO E ACEITAÇÃO DO CONCRETO.

Antes de abordar especificamente a pragmática que envolve o controle de produção e o controle de aceitação do concreto, percorre-se os itens iniciais (2.2.1 a 2.2.7), citados no capítulo anterior e considerados indispensáveis para a implantação de uma metodologia correta de controle de qualidade do concreto.

#### 3.1 Definição da qualidade a ser atendida

Apesar de que não se deve nunca identificar a qualidade do concreto só com sua resistência, a resistência à compressão do concreto é o parâmetro principal que se adota normalmente para julgar sua qualidade. Como já foi visto anteriormente, a resistência à compressão é o melhor indicador de qualquer mudança que tenha havido no processo de produção ou nos próprios materiais, porém nem sempre deve ser o parâmetro principal.

Quando a preocupação com a durabilidade for mais importante que com a resistência, — e, em algumas obras de reservatórios e saneamento efetivamente o é — o parâmetro a ser controlado pode ser, por exemplo, o fator água/cimento responsável direto pela permeabilidade e risco de ataque ao concreto. Nestes casos o controle da umidade dos agregados e do adensamento da massa na estrutura deve prevalecer sobre os problemas estruturais advindos da resistência à compressão do concreto.

No entanto, vamos nos concentrar no controle de qualidade recomendado pela NB-1 (1978), que refere-se ao *controle da resistência à compressão do concreto*, podendo ser aplicado também ao controle da resistência à tração do concreto. Estabelece-se como mínima qualidade o valor da resistência à compressão que apresenta uma probabilidade de 5% de não ser alcançada. A curva densidade de probabilidade das resistências é admitida como normal, e o valor é calculado em função da dispersão dos resultados, originada pelo sistema de produção e ensaio. A esse valor denomina-se resistência característica do

concreto à compressão e indica-se com a notação  $f_{ckj}$ , conforme se indica na figura 3.1.1.

Segundo Rüsçh<sup>(1)</sup>, a curva de Gauss pode representar de maneira satisfatória a distribuição das resistências à compressão, sempre que o coeficiente de variação observado seja menor ou igual a 30%. Torrent<sup>(2)</sup>, considera que para coeficientes de variação superiores a 25% a distribuição que melhor se ajusta aos resultados é a distribuição log-normal, aceitando a distribuição normal para processos com variabilidade inferior a 25%. Nos casos normais de produção de concreto o coeficiente de variação não supera os 20%, de tal forma que se pode sempre empregar o modelo normal de distribuições.

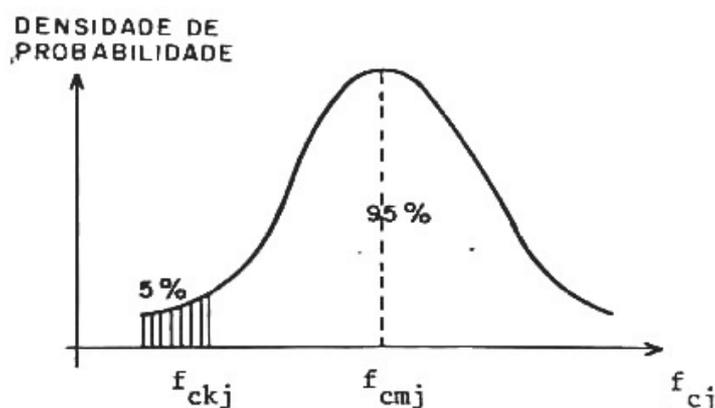


Fig. 3.1.1 - Representação da variabilidade da resistência à compressão do concreto.

A dosagem da mistura será efetuada considerando-se que deve existir uma distância entre a resistência característica,  $f_{ckj}$ , estabelecida pelo calculista da estrutura e a resistência média,  $f_{cmj}$ , obtida com um determinado traço, equipamento e método de ensaio, aos  $j$  dias de idade.

(1) RÜSCH, Hubert. Hormigón armado y hormigón pretensado (Stahl beton - Spannbeton). Barcelona, Compañia Editorial Continental S.A., dic. 1975. p. 53.

(2) TORRENT, R.I. The log-normal distribution: a better fitness for the results of mechanical testing of materials. Buenos Aires, Matériaux et Constructions, v. 11, n. 64, 1979. p. 235-45.

Essa distância é medida em função do desvio padrão do processo de produção e ensaio do concreto, conforme expresso na NB-1 (1978)<sup>(3)</sup>:

$$f_{cmj, d} = f_{ckj} + 1,65 \cdot s_d, \text{ onde;}$$

$f_{cmj, d}$  = resistência à compressão média inicial de dosagem à j dias de idade (normalmente são adotados 28 dias);

$s_d$  = desvio padrão de dosagem calculado a partir de dados da própria obra, ou de obra semelhante ou estimado em função do equipamento de mistura e padrão de qualidade da execução a ser implantado na obra;

$f_{ckj}$  = resistência característica do concreto à compressão especificada no projeto estrutural a j dias de idade.

Portanto o objetivo do controle de qualidade será levantar dados e informações suficientes para se produzir ao mínimo custo possível um concreto de resistência média e desvio padrão tal que sua resistência característica real,  $f_{ckj, real}$ , atenda à resistência característica  $f_{ckj}$  especificada no projeto estrutural.

A seguir dá-se algumas definições úteis à compreensão do significado de resistência característica do concreto:

$f_{ckj}$       Resistência característica do concreto à compressão é o valor que adota o projetista como base de cálculo. Está associada a um nível de confiança de 95%. Chama-se também resistência característica especificada ou de projeto. A esse valor é aplicado o coeficiente de minoração para a obtenção da resistência de cálculo  $f_{cd}$ , do concreto à compressão;

---

(3) Não foi adotada a notação da NB-1 (1978), capítulo 8, item 8.3.1.2, porque é uma notação simplificada e consequentemente imprecisa podendo gerar dúvidas no desenvolvimento desta dissertação.

- $f_{ckj}$ , real      *Resistência característica real* do concreto à compressão, correspondente ao concreto de uma região homogênea da estrutura, é o valor que tem uma probabilidade de 0,95 de ser igualado ou superado pelo valor obtido ao romper à compressão axial um corpo de prova cilíndrico (15φ x 30)cm tomado aleatoriamente dentro da região. Essa resistência característica real é um valor *impossível* de ser conhecido, pois seria necessário ensaiar todo o concreto da região considerada;
- $f_{ckj}$ , est      *Resistência característica estimada* do concreto à compressão, correspondente ao concreto de um lote que se supõe homogêneo, é o valor obtido ao ensaiar alguns corpos de prova cilíndricos (15φ x 30)cm e aplicar aos resultados obtidos uma fórmula matemática, o *estimador*. Teremos pois uma estimativa, feita a partir de uma amostragem, e não uma certeza absoluta do valor da resistência característica real do concreto do lote em exame.

Esses conceitos da estatística e da teoria das probabilidades, estão sendo aplicados à medida das características dos materiais desde há muitos anos, conforme já visto no item 1.3 do capítulo I.

A característica de normalidade da distribuição da resistência à compressão do concreto foi sempre verificada nos trabalhos citados, sendo comprovada nacionalmente no controle de 171 dosagens diferentes, apresentadas no estudo publicado em 1960 por *Gitahy*<sup>(4)</sup> que analisou um total de 25.380 corpos de prova, provenientes de várias obras do Estado de São Paulo.

A nível internacional<sup>(5)</sup>, mais recentemente, em 1969, foram estudadas 800 diferentes obras, desde pré-moldados a concreto mas

---

(4) GITAHY, Heraldo de Souza. Controle estatístico da qualidade do concreto. São Paulo, Instituto de Pesquisas Tecnológicas - IPT, Boletim 49, 1960. 39p.

(5) RACKWITZ, R. Statistical control in concrete structures. CEB Internacional course on structural concrete. Lisboa, Laboratório Nacional de Engenharia Civil - LENEC, 1973.

sa, onde as distribuições de frequência dos resultados de cada amostra, com número de exemplares variando de 20 a 1000, puderam em todos os casos ser ajustadas a uma distribuição normal. Dessa investigação resultou também a comprovação da constância do desvio padrão de produção.

Essa pesquisa aliada às observações de investigadores ingleses<sup>(6)</sup> e americanos<sup>(7)</sup> comprovaram ser o *desvio padrão* de um processo de produção de concreto praticamente *constante* para resistências médias acima de 21,0 MPa ( $\sim 210 \text{ kgf/cm}^2$ ).

Este fato invalida, em princípio, o critério de medir e classificar a qualidade da produção de concreto somente pelo valor do *coeficiente de variação*.

O seguinte exemplo pode ser empregado para explicar melhor esta idéia. Trata-se de comparar o rigor da execução que está sendo efetuada pelo produtor em dois canteiros distintos, a saber:

- canteiro 1: obra de concreto de alta resistência com

$$f_{ck28} = 35,0 \text{ MPa } (\sim 350 \text{ kgf/cm}^2)$$

- efetuando-se o controle encontra-se:

$$s_c = 4,1 \text{ MPa } (\sim 41 \text{ kgf/cm}^2)$$

$$f_{cm28} = 42,5 \text{ MPa } (\sim 425 \text{ kgf/cm}^2)$$

- calculando o coeficiente de variação obtemos:

$$v_c = \frac{s_c}{f_{cm28}} \cdot 100 = \frac{4,1}{42,5} \cdot 100 = 9,7\%$$

- canteiro 2: obra de concreto de resistência normal com

$$f_{ck28} = 16,0 \text{ MPa } (\sim 160 \text{ kgf/cm}^2)$$

(6) Apud BASILIO, Francisco de Assis. Controle de qualidade do concreto em obras correntes. In: Colóquio sobre Controle de Qualidade do Concreto Estrutural, São Paulo, 1973. Anais... Instituto Brasileiro do Concreto - IBRACON, set. 1973, 27p.

(7) Cf. ACI - COMMITTEE - 214. Controle estatístico de concreto. ACI-214/65. Proposed Revision of ACI-214/65. (Recommended Practice for Evaluation of Strength Test Results of Concrete) Trad. Eduardo Santos Basilio. São Paulo, Associação Brasileira de Cimento Portland - ABCP, 1978.

- efetuando-se o controle encontra-se:

$$s_c = 4,0 \text{ MPa } (- 40 \text{ kgf/cm}^2)$$

$$f_{cm28} = 23,0 \text{ MPa } (- 230 \text{ kgf/cm}^2)$$

- calculando o coeficiente de variação obtemos:

$$v_c = \frac{s_c}{f_{cm28}} \cdot 100 = \frac{4,1}{23,0} \cdot 100 = 17,4\%$$

Observando os dois coeficientes de variação obtidos, 9,7% e 17,4%, pode-se supor erroneamente que os dois canteiros têm qualidades distintas de produção, sendo um significativamente mais rigoroso que o outro. Com os conhecimentos atuais proporcionados pelas investigações citadas, o parâmetro correto a ser analisado é o desvio padrão, neste caso sensivelmente iguais. A conclusão correta, portanto, é considerar que os dois canteiros possuem o mesmo rigor de produção, ou seja, produzem concretos com baixa dispersão.

Esta parece ser a justificativa para a alteração havida em relação ao texto da NB-1 (1960) no texto atual da NB-1 (1978), no que concerne aos critérios de *padrão de qualidade* de uma execução, conforme se observa no quadro 3.1.2.

Quadro 3.1.2. Critérios subjetivos de <i>padrão de qualidade</i> da execução				
Valores sugeridos Texto	Padrão de qualidade da execução	Coeficiente de variação inicial de dosagem $v_d$	Desvio padrão inicial de dosagem $s_d$	Resistência média inicial de dosagem $f_{cmj,d}$ (MPa)
NB-1 (1960)	Rigoroso	15%	-	$f_{cmj,d} = 4/3 f_{ckj}$
	Razoável	20%	-	$f_{cmj,d} = 3/2 f_{ckj}$
	Regular	25%	-	$f_{cmj,d} = 5/3 f_{ckj}$
NB-1 (1978)	Assistência tecnológica e proporcionamento em peso	-	4,0 MPa	$f_{cmj,d} = f_{ckj} + 6,$
	Assistência tecnológica e agregados dosados em volume	-	5,5 MPa	$f_{cmj,d} = f_{ckj} + 9,$
	Proporcionamento em volume	-	7,0 MPa	$f_{cmj,d} = f_{ckj} + 11,$

Com os dados do quadro 3.1.2 pode-se efetuar os cálculos a seguir apresentados a título de exemplo. Trata-se de calcular a resistência média inicial de dosagem para as situações abaixo descritas, nas quais se identificam os padrões de qualidade de finidos na NB-1 (1960) com os definidos na NB-1 (1978) estabelecendo uma correspondência direta.

1.<sup>a</sup>) Obra em concreto armado com  $f_{ckj} = 16,0 \text{ MPa}$  ( $\sim 160 \text{ kgf/cm}^2$ )

Quadro 3.1.3. Resistência média inicial de dosagem. Exemplo de cálculo para $f_{ckj} = 16 \text{ MPa}$		
Padrão de qualidade	Solução	
	NB-1 (1960)	NB-1 (1978)
Execução rigorosa	$f_{cmj,d} = 21,3 \text{ MPa}$	$f_{cmj,d} = 22,6 \text{ MPa}$
Execução razoável	$f_{cmj,d} = 24,3 \text{ MPa}$	$f_{cmj,d} = 25,1 \text{ MPa}$
Execução regular	$f_{cmj,d} = 26,7 \text{ MPa}$	$f_{cmj,d} = 27,6 \text{ MPa}$

2.<sup>a</sup>) Obra em concreto de alta resistência com  $f_{ckj} = 35,0 \text{ MPa}$  ( $\sim 350 \text{ kgf/cm}^2$ )

Quadro 3.1.4. Resistência média inicial de dosagem. Exemplo de cálculo para $f_{ckj} = 35 \text{ MPa}$		
Padrão de qualidade	Solução	
	NB-1 (1960)	NB-1 (1978)
Execução rigorosa	$f_{cmj,d} = 46,7 \text{ MPa}$	$f_{cmj,d} = 41,6 \text{ MPa}$
Execução razoável	$f_{cmj,d} = 52,5 \text{ MPa}$	$f_{cmj,d} = 44,1 \text{ MPa}$
Execução regular	$f_{cmj,d} = 58,3 \text{ MPa}$	$f_{cmj,d} = 46,6 \text{ MPa}$

Através desses exemplos verifica-se que os critérios recomendados pela NB-1 (1960) eram mais prudentes para concretos de alta resistência fornecendo resistência média inicial de dosagem mais elevada. Como consequência, os traços recomendados, apesar de se colocarem a favor da segurança, estavam contra a economia. O mesmo pode-se dizer com relação aos critérios sugeridos

dos pela NB-1 (1978) em relação aos concretos de resistência normal. Ao fornecerem resistências médias iniciais mais elevadas estão induzindo à produção de concretos mais ricos, mais caros, ainda que tal procedimento esteja a favor da segurança. Considerando que a NB-1 (1960) foi aplicada com sucesso durante pelo menos 18 anos, admite-se que o critério do coeficiente de variação — a favor da economia para concretos de resistência normal — deveria ser mantido até um determinado limite, a partir do qual seria adotado o critério do desvio padrão que parece ser formalmente o mais correto.

O quadro 3.1.5 resume uma proposta que poderia ser adotada no sentido de se manter sempre a favor da economia, sem prejuízo da segurança.

Quadro 3.1.5. Proposta de critérios subjetivos para o estabelecimento da resistência média inicial de dosagem				
Padrão de qualidade da execução	Resistência média inicial de dosagem $f_{cmj,d}$			
	Para $f_{ckj}$ menor ou igual a	$f_{cmj,d}$	Para $f_{ckj}$ maior a	$f_{cmj,d}$
	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)
Riguroso	19,8	$4/3 f_{ckj}$	19,8	$f_{ckj} + 6,6$
Razoável	18,2	$3/2 f_{ckj}$	18,2	$f_{ckj} + 9,1$
Regular	17,4	$5/3 f_{ckj}$	17,4	$f_{ckj} + 11,6$

### 3.2 Definição dos métodos de ensaio

Para o controle da resistência à compressão dos concretos, são aplicáveis, atualmente, na moldagem e cura o MB-2 (1974) - *Confeção e Cura de Corpos de Prova de Concreto Cilíndricos ou Prismáticos* e na ruptura o MB-3 (1974) - *Ensaio de Compressão de Corpos de Prova Cilíndricos de Concreto*, ambos publicados pela Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT.

Os procedimentos descritos nesses métodos, aliados às recomen-

dações gerais sugeridas no texto da NB-1 (1978), formam parte das operações de ensaio ou de controle que têm por objetivo medir a *resistência potencial* do concreto que está sendo produzido ou entregue na obra.

Essas recomendações e procedimentos procuram oferecer as *melhores* condições para que o concreto dos corpos de prova desenvolvam sua *máxima* resistência potencial. Conforme se verificará a seguir, somente uma das operações de ensaio — a velocidade mais rápida de carregamento — pode elevar essa resistência potencial. Desde que se admita que os corpos de prova referentes a um mesmo exemplar sempre são curados juntos, nas mesmas condições, não há possibilidade de se obter resultado mais elevado que o fornecido por um ensaio correto. Portanto ao se analisar os resultados de dois corpos de prova de uma mesma amassada, que teoricamente deve possuir uma só resistência, devemos desprezar aquele que possui resistência máis baixa, pois certamente alguma das operações de ensaio foi a causadora dessa diminuição. O valor mais alto, foi menos afetado negativamente pelas operações de ensaio e representa melhor a *resistência potencial* do concreto, que é o que interessa medir. Ou seja, ele é mais alto não porque as operações de ensaio tenham elevado o seu valor real, mas sim porque é a *máxima* resistência à compressão que esse concreto pode apresentar à idade do ensaio.

Essa parece ser a razão da recomendação da NB-1 (1978) quando indica que se deve tomar como valor de cada exemplar somente o maior dos dois resultados obtidos de corpos de prova irmãos.

Apesar de que fisicamente está justificado do ponto de vista estatístico, ao retirar somente um corpo de prova para representar o valor de um exemplar, estaremos aumentando intencionalmente a estimativa da variabilidade aparente do processo e consequentemente diminuindo a confiança dos resultados.

Fusco<sup>(8)</sup> apresenta interessantes considerações sobre isso, mostrando a importância do controle da variabilidade das operações

---

(8) FUSCO, Péricles Brasiliense. Estruturas de concreto. v. 2. Fundamentos estatísticos da segurança das estruturas. São Paulo, Ed. Universidade de São Paulo, 1977. p. 194.

de ensaio e sua influência na variabilidade aparente total ao se considerar somente um corpo de prova ou a média de dois, como o valor do exemplar, chegando à seguinte fórmula geral para o cálculo da variabilidade aparente dos resultados:

$$v_c^2 = v_{c \text{ real}}^2 + \frac{v_e^2}{m}$$

onde:  $v_c$  = coeficiente de variação ou variabilidade (aparente total) do processo de produção e ensaio avaliado a partir dos resultados de ensaio;

$v_{c \text{ real}}$  = coeficiente de variação ou variabilidade real devida somente ao processo de produção do concreto;

$v_e$  = coeficiente de variação ou variabilidade das operações de ensaio e controle;

$m$  = número de corpos de prova de uma mesma amassada, correspondentes portanto a um exemplar.

Com base nessa dedução pode-se verificar que para eficientes operações de controle onde o coeficiente de variação ( $v_e$ ) das operações de ensaio seja da ordem de 4%, a estimativa da variabilidade aparente total ( $v_c$ ) aumenta somente de 9,4% para 9,9% ao passarmos da consideração da média de 2 corpos de prova para apenas um qualquer quando a variabilidade real do concreto ( $v_{c \text{ real}}$ ) é apenas 9%, valor usual observado em centrais gravimétricas estacionárias.

No entanto, mantido o coeficiente de variação real do concreto ( $v_{c \text{ real}}$ ) em 9%, e considerando-se a variabilidade dentro do ensaio ( $v_e$ ) em 10%, a estimativa da variabilidade aparente total ( $v_c$ ) melhora de 13,5% para 11,4% ao se analisar a média de 2 corpos de prova ao invés de somente um qualquer.

Considerando que a estimativa da resistência característica  $f_{ckj,est}$ , pode ser feita através da seguinte equação:

$$f_{ckj,est} = f_{cmj} (1 - 1,65 v_c)$$

obter-se-ia, ao considerar apenas um dos resultados, um  $f_{ckj,est}$  aproximadamente igual a 0,96 do  $f_{ckj,est}$  obtido a partir da consideração do valor médio de 2 corpos de prova. Por exemplo,

pode-se encontrar um  $f_{ckj,est} = 18,0$  MPa ( $\sim 180$  kgf/cm<sup>2</sup>) quando se considera a média de 2 corpos de prova e um  $f_{ckj,est} = 17,2$  MPa ( $\sim 172$  kgf/cm<sup>2</sup>) no caso de examinar apenas *um qualquer* dos resultados de corpos de prova irmãos.

Portanto o problema pode ser analisado sob três aspectos:

- 1º) Do ponto de vista físico, o valor mais elevado de dois corpos de prova irmãos, é o que mais se aproxima da resistência potencial perseguida pelo controle. Isso ratifica o fato de se retirar dois corpos de prova e adotar sô o resultado mais alto;
- 2º) Do ponto de vista estatístico, é sempre preferível considerar a média dos resultados obtidos de corpos de prova irmãos, representativos de uma unidade homogênea de concreto, como sendo o valor do exemplar. No entanto a estatística deve sempre submeter-se ao fenômeno físico e não o inverso. Assim, entre *amostras* com *número n iguais de exem*plares, são preferíveis as que se obtenha a partir de resultados *mais altos* de corpos de prova irmãos do que amostras compostas por um único corpo de prova retirado ao acaso de cada unidade de produto;
- 3º) Combinando interesses econômicos com estatísticos é sempre preferível dispor-se de amostras com *2n exemplares* individuais de um lote do que amostras constituídas de *n exempla*res compostos de dois corpos de prova cada. Exemplificando temos que um lote de 100m<sup>3</sup> de concreto estará melhor representado por uma amostra constituída de 24 corpos de prova individuais retirados aleatoriamente de 24 amassadas, do que por uma amostra composta dos mesmos 24 corpos de prova, retirados dois a dois de apenas 12 amassadas. Da mesma forma é preferível uma amostra constituída de 12 exemplares obtidos a partir do resultado mais alto de cada par dos 24 corpos de prova, do que uma amostra constituída por apenas 12 corpos de prova individuais.

Isso tudo mostra a importância da eficiência das operações de ensaio e controle, principalmente quando se trata de concretos de boa qualidade e de alta resistência à compressão, onde o coeficiente de variação real  $v_c$  real for mantido próximo dos 10%.

Esta é certamente a razão porque a NB-1 (1978) ressalta que somente poderá ser moldado um corpo de prova quando as operações de ensaio e controle estiverem sob a responsabilidade de Laboratório idôneo que comprove regularmente sua eficiência.

O American Concrete Institute através do Comitê ACI-214/65, *Proposed Revision*, já citado, recomenda um critério de avaliação da uniformidade e eficiência das operações de ensaio e controle.

Trata-se de calcular o coeficiente de variação dessas operações, comparando-o com os padrões de controle sugeridos no quadro 3.2.1.

Tipo de serviço	Padrão de controle				
	Excelente	Muito bom	Bom	Razoável	Deficiente
Controle em canteiro de obras	< 3,0%	≥ 3,0% < 4,0%	≥ 4,0% < 5,0%	≥ 5,0% < 6,0%	≥ 6,0%
Misturas experimentais em laboratório	< 2,0%	≥ 2,0% < 3,0%	≥ 3,0% < 4,0%	≥ 4,0% < 5,0%	≥ 5,0%

É aconselhável sempre empregar essa metodologia citada no início do controle de qualidade das obras, e mantê-la até que seja assegurada a uniformidade do processo de produção e de controle do concreto. A partir daí sua aplicação deverá ser periódica para fins de aferição da qualidade das operações de ensaio e controle, ou quando houver qualquer fato que justifique essa avaliação, como por exemplo uma mudança qualquer nas etapas de ensaio tais como, mudança de pessoal, mudança de tipo de capeamento, de cura, de prensa, etc.

Para a determinação da variabilidade de ensaio e controle, emprega-se o estudo da distribuição por amostragem da amplitude de amostras conhecidas, recomendado no texto do ACI 214/65, *Proposed Revision*, conforme descrito a seguir.

Procedimento para avaliação da eficiência das operações de ensaio e controle:

1º) Cálculo do desvio padrão das operações de ensaio e controle:

$$s_e = \frac{\sum_{i=1}^m \cdot Ai}{m \cdot 1,128} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m \left[ x_1 - \frac{x_1+x_2}{2} + \left( x_2 - \frac{x_1+x_2}{2} \right)^2 \right]_i}{m-1}}$$

- onde:  $s_e$  = desvio padrão das operações de ensaio e controle;  
 $m$  = número de exemplares considerados compostos de 2 corpos de prova cada ( $x_1, x_2$ ); e,  
 $A$  = diferença entre o maior e o menor resultado obtido de cada par de corpo de prova que representa um mesmo exemplar ( $|x_1 - x_2|$ ).

2º) Cálculo do coeficiente de variação ou variabilidade das operações de ensaio e controle:

$$v_e = \frac{s_e}{f_{cmj}} \cdot 100$$

- onde:  $v_e$  = coeficiente de variação devido às operações de ensaio e controle; e,  
 $f_{cmj}$  = média dos  $2m$  resultados de corpos de prova utilizados, a  $j$  dias de idade.

Nos casos gerais, sempre que se desejar avaliar rapidamente as operações de ensaio pode-se admitir que se para  $m \geq 10$  resultar  $v_e \leq 5\%$  as operações de controle em canteiro de obras podem ser consideradas *eficientes* e não chegam a alterar significativamente a avaliação da resistência característica do concreto à compressão. Para valores superiores a este é necessário efetuar uma minuciosa investigação das causas que estão acarretando tal variabilidade pois esta já estará prejudicando a avaliação da uniformidade real do processo de produção do concreto.

### 3.3 Explicitação dos fatores que influem na qualidade final

Vários são os fatores que intervêm na resistência à compressão do concreto da estrutura; desde a heterogeneidade dos materiais, representados pelos agregados, o cimento, a água e eventualmente os aditivos, até o seu transporte, lançamento, adensamento e cura. No entanto o controle de qualidade da resistência do concreto se restringe à resistência *potencial* do concreto

to, medida na saída da betoneira ou caminhão betoneira, conforme pode-se ver esquematicamente no diagrama de blocos 3.3.1.

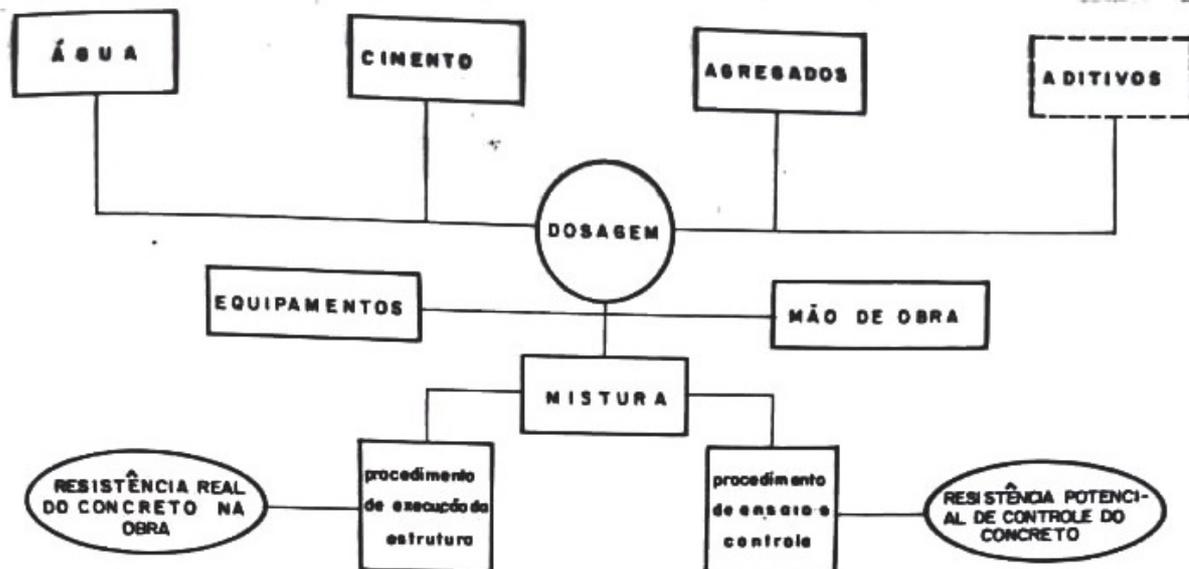


Diagrama 3.3.1 - Fatores que influem na qualidade do concreto. [a resistência obtida para fins de controle é diferente (em geral superior) à resistência real do concreto na obra].

Portanto os fatores que intervêm na resistência *potencial* do concreto são exclusivamente os relacionados aos materiais, à mistura e ao procedimento de ensaio.

A correlação com o concreto da estrutura (obra) deve ser garantida através do *controle tecnológico* dos serviços envolvidos e é independente dos ensaios. Os desconhecimentos relativos a essas variáveis são englobados pelo coeficiente de minoração da resistência à compressão do concreto,  $\gamma_c$ , desde que a execução obedeça às técnicas atuais de bem construir, expressas nos manuais e recomendações específicas e até mesmo na própria NB-1 (1978).

Se tal não ocorrer, fica evidente que *aceitar como bom um concreto* cuja resistência à compressão no ensaio de controle atende ao especificado, *nem sempre* significa *aceitar automaticamente o concreto* da estrutura. O controle tecnológico dos materiais e serviços e os cuidados na execução são indispensáveis à perfeita consecução dos objetivos propostos no projeto, tanto em relação à estética (prumo, alinhamento, etc.), quanto em relação à segurança e à durabilidade da obra.

Com relação à explicitação dos fatores que intervêm na resistência potencial do concreto Mercer<sup>(9)</sup> listou 60 causas de variação dos resultados de resistência à compressão do concreto. Sparkes<sup>(10)</sup>, mais simplista, reuniu essas 60 causas em apenas oito, por ele consideradas mais importantes. Basilio<sup>(11)</sup> apresenta e comenta uma série de pesquisas internacionais a esse respeito, analisando a variabilidade do cimento e ressaltando a importância do controle tecnológico dos agregados miúdos, principalmente sua granulometria.

A seguir, com base nessas publicações, apresenta-se um resumo dos fatores mais significativos, indicando quantitativamente a eventual influência de cada um deles, na resistência potencial do concreto à compressão.

#### 3.4 Quantificação dos fatores que influem na qualidade final

A uniformidade do concreto não pode resultar melhor do que a uniformidade apresentada pelos agregados, o cimento e os aditivos usados, uma vez que cada um tem sua contribuição na resistência final obtida. Além disso a mistura do concreto é derivada de um processo mecânico de dosagem dos materiais, passível de apresentar dispersão em torno de um valor médio. A própria betoneira utilizada e o tempo em que a mistura permanece em movimento no seu interior tem influência preponderante no resultado obtido. Há atualmente betoneiras sistema contra-corrente de alta rotação que conseguem alterar a reatividade dos grãos de cimento e aumentar em até 3,0 MPa ( $\sim 30 \text{ kgf/cm}^2$ ) a resistência média à compressão de um dado concreto, mantidos os mesmos materiais e traço.

Por outro lado, dispersões na coleta de exemplares, confecção,

- 
- (9) MERCER, L. Boyd. Ready-mixed concrete: quality control refinements. In: Symposium on Mix Design and Quality Control of Concrete, London, may 1954. Proceedings... Cement and Concrete Association-CCA, London, may 1954. p. 409-38.
- (10) SPARKES, F.N. The control of concrete quality: a review of the present position. In: Symposium on Mix Design and Quality Control of Concrete, London, may 1954. Proceedings... Cement and Concrete Association - CCA, London, may 1954, p. 211-27.
- (11) BASILIO, Francisco de Assis. Controle de qualidade do concreto em obras correntes. In: Colóquio sobre Controle da Qualidade do Concreto Estrutural, São Paulo, 1973. Anais... Instituto Brasileiro do Concreto - IBRACON, São Paulo, 1973. 27p.

cura, capeamento e ruptura dos corpos de prova podem introduzir variações na resistência que não correspondem a variações no concreto da estrutura.

As operações de controle devem ser rigorosamente constantes a fim de não prejudicar a avaliação da variabilidade real do processo de produção do concreto, objetivo primordial do controle.

Como vimos anteriormente, definidos os materiais, a mão de obra, o equipamento e os métodos de ensaio, são vários os fatores que influenciam a resistência obtida de cada exemplar representativo de um determinado volume de concreto produzido.

No quadro 3.4.1 apresenta-se a lista dos principais fatores responsáveis pela variabilidade da resistência à compressão indicando-se quantitativamente a máxima variação que cada um poderá causar na resistência de controle do concreto.

Causas de variação	Efeito máximo no resultado
A - <u>MATERIAIS</u> : - resistência do cimento - quantidade total de água - agregados (principalmente miúdos)	± 17% ± 10% ± 15%
B - <u>MÃO DE OBRA</u> : - tempo e procedimento de mistura	- 30%
C - <u>EQUIPAMENTO</u> : - mistura inicial, sobre e sub carregamento, correias, etc.	- 10%
D - <u>PROCEDIMENTO DE ENSAIO</u> : - coleta - adensamento manual - cura (efeito considerado a 28 dias ou mais) - remate dos topos - ruptura	- 10% - 50% ± 10% - 30% para concavidade - 50% para convexidade ± 10%

Quadro 3.4.1 - Principais fatores que influenciam o resultado de resistência à compressão potencial de concreto medida no ensaio de controle.

Apesar de que é bastante improvável que esses efeitos coincidam e possam ser somados, resulta que a variação da resistência do concreto, com o tempo, é dependente da variação de cada um desses fatores com o tempo.

Para efeito de controle é difícil considerar individualmente a influência de cada fator na resistência final do concreto. No entanto, há estudos mostrando que a influência conjunta desses fatores determina o processo de variação da resistência do concreto. Nessas pesquisas constatou-se que durante a produção do concreto, há a constante mudança da média, mantendo-se a resistência como variável gaussiana e estacionária somente durante um certo período<sup>(12)</sup>. Está claro no entanto que essa mudança no tempo é resultante da mudança da partida de cimento, da evaporação maior ou menor da água de amassamento, da variação das características dos agregados (impurezas, granulometria, umidade) etc. Sempre que essas variáveis efetivamente se modifiquem há a necessidade de separar-se os resultados para efeito de controle, conforme veremos a seguir nos critérios de separação de lotes. Em vista dessas considerações tem-se como resultado a mudança no tempo da média, com a manutenção da dispersão, medida pelo desvio padrão que representa para cada condição a variabilidade dos materiais, do equipamento e dos métodos de ensaio empregados. Esquemáticamente temos isso mostrado na fig. 3.4.2<sup>(13)</sup>.

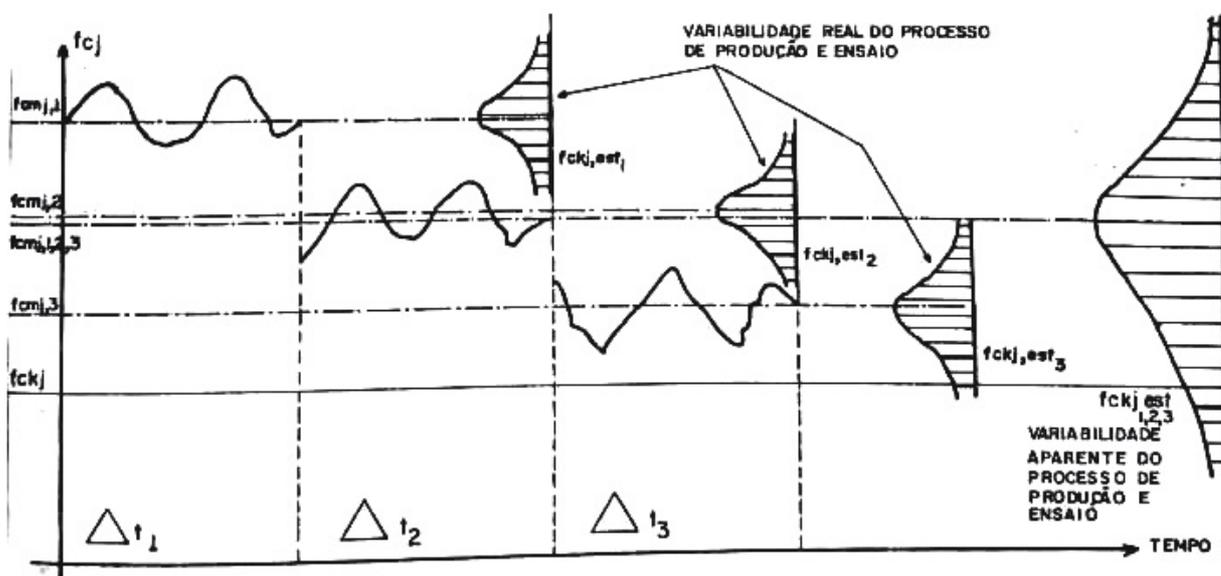


Fig. 3.4.2 - Mudança de centragem da média do processo de produção e ensaio do concreto em função do tempo, como decorrência da variação de alguns dos fatores que influem na resistência à compressão do concreto.

(12) FUSCO, Pêricles Brasiliense. Estruturas de concreto. v. 2. Fundamentos estatísticos da segurança das estruturas. São Paulo, Ed. Universidade de São Paulo, 1977.  
McINTOSH, J.D. Concrete and statistics. London, CR Books Limited, 1963.

(13) FUSCO, op. cit. p. 171.

Estes são alguns dos fatores que irão influir na definição do critério de separação de lotes. Além disso, esta constatação, é um dos motivos que invalida o controle de qualidade do concreto através de um número elevado de corpos de prova. Sempre que a este número elevado de exemplares de uma amostra, corresponda um grande volume de concreto, corremos o risco de medir a variabilidade aparente do processo e não a sua variabilidade real, que é o que efetivamente interessa.

### 3.5 Definição do lote a analisar

Como foi descrito anteriormente a resistência do concreto é variável com os materiais, o equipamento e o método de ensaio. Esta variação é traduzida no tempo com a mudança da média e manutenção da dispersão, avaliada através do desvio padrão. Por outro lado este concreto é aplicado na obra em lugares determinados da estrutura, havendo maior interesse em julgar as peças individualmente que a estrutura conjuntamente. É preferível condenar uma viga ou um andar, que todo um edifício, desde que se saiba que somente aquele concreto não atendeu ao especificado.

Por outro lado, para efeito de inferência estatística, onde a partir de uma amostra se julga um lote, é imprescindível que esse lote tenha as mesmas características, ou seja, mesmo traço, materiais de mesma partida, mesmo equipamento de mistura e mesma técnica de ensaio.

Se por exemplo estamos produzindo concreto em duas ou três centrais, os exemplares retirados de cada central, têm necessariamente que ser analisados separadamente, constituindo-se pelo menos duas amostras independentes. Na obra podem, e efetivamente são colocados juntos na mesma peça estrutural, no entanto para fins de análise estatística devem ser separados, para que não se cometa o engano de avaliar a variabilidade aparente do processo, quando se deseja saber a variabilidade real do processo de produção e ensaio.

A busca da definição de um lote homogêneo, onde se espera que sejam mantidas todas as condições, que permitam admitir a resistência à compressão como uma variável gaussiana e estacioná

ria, provavelmente levou a comissão da NB-1 (1978)<sup>(14)</sup> a recomendar os limites máximos orientativos de extensão do lote a analisar, conforme indicado no quadro 3.5.1.

Quadro 3.5.1 Extensão máxima de lotes a serem analisados		
Forma de identificar um lote	TIPO DE ESTRUTURA	
	Edifícios, pontes, pavimentos, muros, etc.	Grandes volumes
Por volume	≤ 100 m <sup>3</sup>	≤ 500 m <sup>3</sup>
Por superfície em planta	≤ 500 m <sup>3</sup>	-
Por tempo de concretagem	≤ 2 semanas	≤ 1 semana
Por andar quando for o caso	≤ um	-

Como se verifica, todas estas limitações, são tentativas de garantir que o volume a ser analisado seja o mais possível homogêneo. No entanto, apesar de necessárias não são suficientes, devendo-se principalmente considerar também a uniformidade dos fatores que influem na resistência à compressão do concreto, conforme descritos no item 3.3.

A identificação de lotes homogêneos não estava prevista no texto da NB-1 (1960) nem do ACI 214/65<sup>(15)</sup>. Apesar de lógica e conceitualmente necessária, somente o texto atual da NB-1 (1978) alerta para este fato.

Os critérios de controle eram estabelecidos para uma produção contínua sem observar a mudança de centragem da média nem os benefícios oriundos da possibilidade de se analisar um único trecho da estrutura e não obrigatoriamente esta como um todo.

Nos gráficos para *controle de produção* sugeridos, no capítulo IV inclue-se os novos conceitos expressos na NB-1(1978) de forma a aprimorar as conclusões que se possa obter do controle do

(14) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. NB-1 Projeto e execução de obras de concreto armado. Rio de Janeiro, 1978. Capítulo 15, item 15.1.1.1.

(15) ACI-COMMITTEE-214. Controle estatístico de resistência do concreto. Norma ACI-214/65 (Recommended Practice for Evaluation of Compression Test Results of Field Concrete) Trad. Antonio C. R. Laranjeiras. Salvador, Departamento de Estradas de Rodagem da Bahia - Serviço de Pesquisas Tecnológicas, 1969.

processo.

No sentido de quantificar a influência da variação da resistência do cimento, na resistência à compressão do concreto, apresenta-se na figura 3.5.2 a interdependência entre estes parâmetros, obtido através de estudo experimental efetuado no Laboratório de Concreto do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. Os dados apresentados resultam da análise da variação de resistência de 72 resultados correspondentes a três cimentos de fabricantes nacionais classificados como CP-320 durante 2 anos (1978 a 1979). Periodicamente foi retirada uma amostra representativa da produção. Parte deste cimento foi destinado ao ensaio de cimento MB-1 - Ensaio de Cimento Portland da ABNT e parte destinou-se à confecção de quatro concretos padrão, onde se manteve o fator água/cimento constante e igual a 0,45; 0,55; 0,62; e 0,73 o que correspondeu aos consumos médios de 350; 300; 270 e 240kg de cimento por  $m^3$  de concreto, dispondo-se então de 288 resultados.

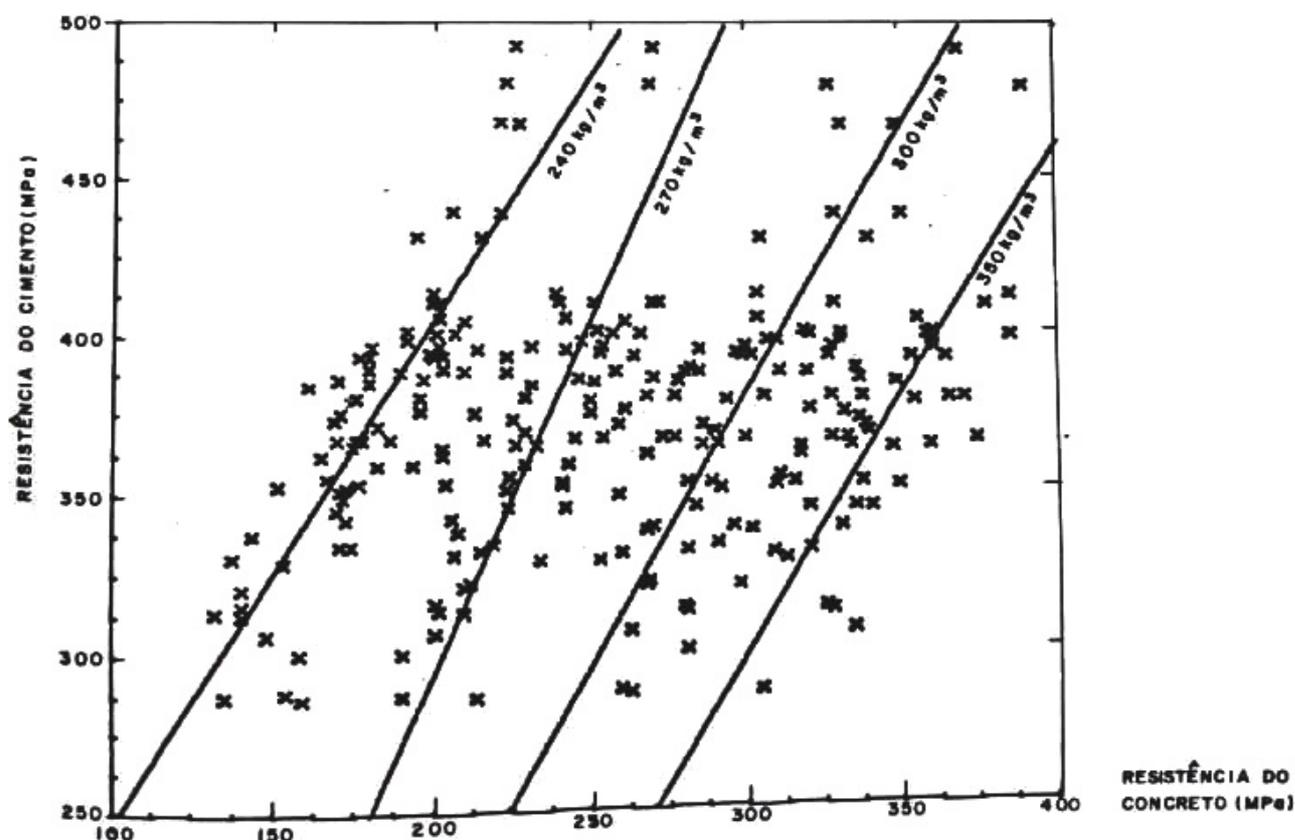


Figura 3.5.2 - Variação da resistência do concreto em função da resistência do cimento (28 dias).

Como se nota na figura 3.5.2, as retas *média* que passam pelos dados obtidos de cada traço citado são praticamente paralelas entre si e com inclinação de cerca de  $60^\circ$ . Isto parece indicar que a uma variação absoluta de uma unidade na resistência do cimento corresponde uma variação de meia unidade na resistência do concreto, ou seja, se o cimento baixar de uma partida a outra de 4,0 MPa — valor usual — a resistência do concreto poderá baixar de 2,0 MPa se considerarmos só este fator. Analisando os resultados de cimento obteve-se os valores indicados no quadro 3.5.3:

Quadro 3.5.3 Resultados de cimentos nacionais				
Parâmetro	Cimento A	Cimento B	Cimento C	Cimentos A, B, C
resistência média a 28 dias (MPa)	39,7	36,5	34,5	37,1
resistência mínima a 28 dias (MPa)	28,7	30,1	28,7	28,7
resistência máxima a 28 dias (MPa)	49,3	41,0	40,0	49,3
desvio padrão (MPa)	4,4	2,9	3,3	4,1
coeficiente de variação	11%	8%	10%	11%

Que corresponderam às variações na resistência dos concretos padrão, indicadas no quadro 3.5.4, apresentado na página seguinte.

Quadro 3.5.4 Variações na resistência do concreto em função do traço para três cimentos nacionais					
Parâmetros	Cimento	Traço com consumo em kg/m <sup>3</sup>			
		350	300	270	240
Resistência média a 28 dias (MPa)	A	36,0	30,9	24,6	19,3
	B	33,3	28,5	23,2	17,6
	C	33,5	28,3	22,3	16,1
	A,B,C	34,3	29,3	23,4	17,8
Resistência mínima a 28 dias (MPa)	A	31,0	24,9	21,1	15,1
	B	27,9	23,4	19,0	14,0
	C	28,7	24,6	19,0	13,2
	A,B,C	27,9	23,4	19,0	13,2
Resistência máxima a 28 dias (MPa)	A	39,5	36,8	27,6	22,5
	B	38,8	32,7	26,7	20,9
	C	38,5	33,2	26,9	20,2
	A,B,C	39,5	36,8	27,6	22,5
Desvio padrão (MPa)	A	2,5	2,8	2,1	1,9
	B	2,7	2,4	2,1	1,5
	C	2,7	2,4	2,6	2,3
	A,B,C	2,9	2,8	2,4	2,4
Coeficiente de variação em %	A	7	9	9	10
	B	8	8	9	8
	C	8	9	11	14
	A,B,C	8	10	10	12

### 3.6 O procedimento de retirada de exemplares

Stanton Walker<sup>(16)</sup> já em 1944 chamava atenção para o fato de que a dispersão dos resultados tem origem em duas causas bem distintas:

- 1.<sup>a</sup>) a variabilidade inerente à produção do concreto, devida às variações nos materiais, equipamento, mão de obra, etc., e,
- 2.<sup>a</sup>) a variabilidade extrínseca, originada pelas operações de ensaio e controle.

Daí se concluir que uma avaliação estatística dos resultados não pode ser melhor do que a amostragem na qual se baseia. Por

(16) Application of theory of probability to design of concrete for strength specifications. Chicago, Rock Products, mar. 1944.

outro lado, para assegurar uma boa amostragem é necessário fazer cumprir rigidamente os métodos de ensaio normalizados, tanto em relação aos ensaios propriamente ditos quanto principalmente em relação à retirada ou coleta de exemplares.

Sempre que se trate de concreto produzido em obras ou centrais fixas, adota-se o método MB-833 (1978) - *Amostragem de Concreto Fresco Produzido por Betoneiras Estacionárias* publicado pela ABNT. Em linhas gerais o texto recomenda que se tome, para a moldagem dos corpos de prova que formarão um exemplar, o concreto correspondente ao terço médio do volume total, da betoneira. Numa betoneira de eixo inclinado com  $300 \text{ dm}^3$  de capacidade útil, os  $100 \text{ dm}^3$  iniciais — geralmente com maior proporção de agregados graúdos — e os  $100 \text{ dm}^3$  finais — geralmente com maior proporção de argamassa — não devem ser tomados para fins de moldagem dos corpos de prova. Os  $100 \text{ dm}^3$  centrais — geralmente mais homogêneos — é que serão aproveitados nos ensaios e controle.

Para concreto fornecido por usina o procedimento de amostragem deve seguir o exposto na EB-136 - *Especificação de Concreto Prê-Misturado* <sup>(17)</sup> editado pela ABNT. O texto recomenda que se despreze — para fins de ensaio — o volume de concreto correspondente aos 10% iniciais e finais do volume total do caminhão betoneira. Dos 80% intermediários deve-se retirar porções em quantidade igual ou superior ao volume total entregue em  $\text{m}^3$ . Por exemplo, ao se receber um caminhão betoneira com capacidade útil de  $5 \text{ m}^3$ , o primeiro e o último  $0,5 \text{ m}^3$  deve ser enviado diretamente à obra. Dos  $4 \text{ m}^3$  restantes retira-se 5 porções de concreto uniformemente espaçadas. Esse concreto retirado é então homogeneizado e utilizado para a moldagem dos corpos de prova de controle.

A menor unidade de produto é uma amassada, ou seja, a menor quantidade de concreto produzido sob as mesmas condições. Desta forma a menor unidade de concreto que se admite como homogê

(17) O texto atual desta especificação deverá sofrer alterações a curto prazo, alterações estas que estão sendo discutidas na Comissão de Estudos CE 18:5.1 no âmbito do CB-18 Comitê Brasileiro de Cimento, Concreto e Agregados da ABNT.

nea é o volume contido em uma betoneira ou em um caminhão betoneira. O concreto aí contido, apesar de não o ser — como os próprios critérios de amostragem acima descritos reconhecem — é admitido homogêneo e de resistência constante e igual à dos corpos de prova que o representam.

Quando se aumenta o número de corpos de prova retirados de uma amassada, também se aumenta a informação sobre esta amassada; mas não se incrementa o conhecimento das demais amassadas. Portanto quando o que se deseja é conhecer ou avaliar o processo de produção do concreto, deve-se reduzir o número de corpos de prova retirados de cada amassada, em favor do aumento do número de amassadas representadas.

Desde que os corpos de prova que representam uma amassada tenham sido confeccionados com o concreto retirado e homogeneizado segundo os métodos descritos e que além disso o procedimento de ensaio tenha sido o mesmo, os resultados deverão ser iguais. Nem sempre o são e essa diferença observada é então imputada às diferenças na técnica de ensaio.

Como já visto no item 3.2, os resultados obtidos são sempre influenciados pela eficiência das operações de ensaio e controle. Caso estas não tenham sido rigorosamente observadas, a variabilidade total do processo de produção e ensaio pode ser significativamente alterada. Esse efeito pode ser facilmente notado desde que se admita que as fontes de variação são provenientes de fenômenos independentes. Pode-se então calcular a variância total como soma das variâncias parciais, ou seja:

$$s_c^2 = s_{c \text{ real}}^2 + s_e^2$$

onde:  $s_c^2$  = variância total decorrente do processo de produção e ensaio do concreto;

$s_{c \text{ real}}^2$  = variância real decorrente do processo de produção do concreto; e

$s_e^2$  = variância decorrente dos procedimentos de ensaio e controle.

Para se quantificar a influência das operações de ensaio e controle da variabilidade total do processo podemos considerar o

seguinte exemplo:

Em quanto será alterada a estimativa da resistência característica de um lote de concreto com  $f_{cm28} = 25,0$  MPa ( $\sim 250$  kgf/cm<sup>2</sup>) e  $s_c = 4,0$  MPa ( $\sim 40$  kgf/cm<sup>2</sup>) ao se passar de um coeficiente de variação devido às operações de ensaio e controle ( $v_e$ ) de 12% — operações ineficientes de controle — para 4% — operações eficientes e facilmente alcançada por Laboratórios idôneos?

Solução:

a) estimativa da resistência característica do concreto à compressão (estimador clássico)<sup>(18)</sup>:

$$f_{ck28, est1} = f_{cm28} - 1,65 \cdot s_{c1} = 25,0 - 1,65 \cdot 4,0 = 18,4 \text{ MPa } (\sim 184 \text{ kgf/cm}^2)$$

b) estimativa do desvio padrão inicial das operações de ensaio:

$$s_{e1} = v_{e1} \cdot f_{cm28} = 12\% \cdot 25,0 = 3,0 \text{ MPa } (\sim 30 \text{ kgf/cm}^2)$$

c) estimativa do desvio padrão real de produção do concreto:

$$s_{c \text{ real}} = \sqrt{s_c^2 - s_e^2} = 2,7 \text{ MPa } (\sim 27 \text{ kgf/cm}^2)$$

d) estimativa do novo desvio padrão, corrigido, das operações de ensaio:

$$s_{e2} = v_{e2} \cdot f_{cm28} = 4\% \cdot 25,0 = 1,0 \text{ MPa } (\sim 10 \text{ kgf/cm}^2)$$

e) estimativa do novo desvio padrão total do processo de produção e ensaio:

$$s_{c2} = \sqrt{s_{c \text{ real}}^2 + s_{e2}^2} = 2,9 \text{ MPa } (\sim 29 \text{ kgf/cm}^2)$$

f) estimativa da resistência característica do concreto à compressão:

$$f_{ck28, est2} = f_{cm28} - 1,65 \cdot s_{c2} = 20,2 \text{ MPa } (\sim 202 \text{ kgf/cm}^2)$$

Portanto a estimativa da resistência característica à compressão do concreto desse lote poderia melhorar de 18,4 MPa para

---

(18) Neste exemplo admite-se que a amostra do lote considerado é suficientemente acurada para permitir considerar o desvio padrão da amostra  $s_c$  como sendo o do lote  $\sigma$  e a média  $f_{cmjda}$  amostra como sendo a média do universo  $\mu$ .

20,2 MPa pelo simples fato de melhorar as operações de ensaio e controle.

Como se nota, todo produtor deve cuidar ou exigir mão de obra qualificada e equipamentos de ensaio adequados e periodicamente aferidos, sob pena de prejudicar indiretamente a avaliação da qualidade de seu próprio concreto. No quadro 3.6.1 apresenta-se a influência de alguns valores típicos de variabilidade de operação de ensaio e controle, na estimativa da resistência característica do concreto à compressão.

Quadro 3.6.1 Influência das operações de ensaio na estimativa da resistência característica

Coefficiente de variação real do processo de produção do concreto $v_{creal}$ (%)	Coefficiente de variação dos procedimentos de ensaio e controle $v_e$ (%)	Coefficiente de variação total do processo de produção e ensaio do concreto $v_c$ (%)	Resistência característica do concreto à compressão (estimador clássico) $f_{ckj,est}$
9 % usual em usinas gravimétricas	muito bom 3,0	9,5	$0,84f_{cmj}$
	razoável 6,0	10,8	$0,82f_{cmj}$
	deficiente 10,0	13,5	$0,78f_{cmj}$
12 % usual em canteiro de obras bem administrados	muito bom 3,0	12,4	$0,80f_{cmj}$
	razoável 6,0	13,4	$0,78f_{cmj}$
	deficiente 10,0	15,6	$0,74f_{cmj}$
16 % usual em canteiro de obras mal administrados	muito bom 3,0	16,3	$0,73f_{cmj}$
	razoável 6,0	17,1	$0,72f_{cmj}$
	deficiente 10,0	18,9	$0,69f_{cmj}$

### 3.7 A forma de constituição da amostra

A cada lote de concreto deverá corresponder uma amostra com  $n$  exemplares, função do índice de amostragem requerido para o caso. Estes exemplares devem ser retirados aleatoriamente do lote em exame, de modo a representá-lo corretamente. Cada exemplar será constituído de dois corpos de prova da mesma amassada e moldados no mesmo ato, observando-se os cuidados anteriormente citados.

Na amostragem do concreto é importante que as betonadas a fornecer exemplares sejam escolhidas inteiramente ao acaso, de modo

do que todas as betonadas tenham igual possibilidade de serem selecionadas.

Desta forma encontra-se que o concreto de algumas das betonadas tem resistência bem abaixo da média, enquanto outros estão bem acima, exatamente como previsto na lei normal de distribuição de Gauss. Em princípio não se deve excluir nenhuma betonada como possível fornecedora de exemplares, a não ser que também seja rejeitada para a estrutura.

Da mesma forma não se deve desprezar nenhum dos resultados obtidos por mais baixos ou altos que sejam, a não ser que haja sinais evidentes de que houve alteração intencional ou acidental ocorrida durante as operações de ensaio e controle e que portanto não pode ser imputada à qualidade potencial do concreto.

Sempre que se tratar de concreto pré-misturado, a amostra deverá conter um exemplar de cada caminhão betoneira recebido em obra.

Esta recomendação da NB-1 (1978) prende-se ao fato de que além da usina produzir eventualmente concretos diferentes, entre dois caminhões que chegam à obra, o trânsito, a temperatura e a umidade ambiente, assim como cada motorista, são capazes de modificar o concreto entregue.

Portanto cada volume de concreto contido em um caminhão betoneira necessita de um exemplar que o caracterize.

Quando a coleta, moldagem, cura inicial e o transporte dos corpos de prova forem realizados por pessoal especializado, de Laboratório idôneo, cada exemplar poderá ser constituído por um único corpo de prova. Nestes casos pode-se manter o mesmo número total de corpos de prova de tal forma que a amostragem tenha o dobro do número de exemplares, obtendo-se uma visão mais significativa da resistência do concreto que está sendo produzido.

#### IV. CONTROLE DE PRODUÇÃO DO CONCRETO

##### 4.1 Generalidades

O controle de produção compreende o conjunto de métodos que ajudam o fabricante do concreto a cumprir o especificado da forma mais econômica. Sendo o produtor o responsável pela qualidade da produção, deve também ter a responsabilidade de controlar esta da forma que lhe parecer mais indicada.

Será irrealista e inoperante, por exemplo, um controle de produção efetuado somente sobre as características finais do concreto, sem que de antemão tenha sido efetuado um controle da qualidade e uniformidade da matéria prima utilizada.

A primeira condição para se alcançar e manter uma dada resistência à compressão do concreto é assegurar a qualidade e a uniformidade do cimento, da água e dos agregados disponíveis. A seguir será necessário verificar o proporcionamento correto destes materiais por ocasião do amassamento, assim como a observância da ordem de lançamento dos materiais na betoneira e o tempo de mistura. Enfim, para que se obtenha um concreto com características homogêneas é necessário assegurar a uniformidade dos materiais, a regularidade do proporcionamento, a qualidade da mão de obra e a eficiência dos equipamentos.

Outro recurso que a equipe encarregada do controle de produção pode e deve utilizar é a verificação da uniformidade das características do concreto fresco. Normalmente a trabalhabilidade expressa pela consistência, a massa específica do concreto fresco e o teor de ar aprisionado dão boa informação sobre a manutenção das características finais do concreto endurecido, em especial a sua resistência à compressão.

Além destas verificações, efetuadas no concreto ainda fresco, é sempre interessante proceder ao controle da resistência à compressão. Em última instância todo concreto acabará sendo julgado através de sua qualidade final, que em geral é a sua resistência à compressão em uma idade prescrita. Daí o interesse em seu controle que, se não retifica, pelo menos ratifica a produção em termos de qualidade e fornece valiosas informações sobre esta.

Neste capítulo, será apresentada uma das formas de se efetuar o controle de produção do concreto, através do controle da resistência à compressão.

O sistema de controle de produção mais divulgado e aceito no Brasil é através das cartas de controle de produção recomendadas pelo *American Concrete Institute - ACI 214/57 Recommended Practice for Evaluation of Compression Test Results of Field Concrete*, texto que inclusive serviu de inspiração para a redação da NB-1 (1960), sendo largamente empregado até hoje. Propor-se-ã algumas modificações nesse sistema de controle com vistas à adaptação ao texto atual da NB-1 (1978).

Os gráficos ou cartas de controle de qualidade têm sido usados por muitos anos pelas indústrias manufatureiras como elemento auxiliar de controle da uniformidade e da eficiência da produção. Os métodos de representação de tais gráficos encontram-se reunidos no *ASTM Manual on Quality Control of Materials*<sup>(1)</sup>, publicado em 1951. Através deles, com base na configuração que foi observada em resultados anteriores e nos limites estabelecidos em função desses resultados, são estimadas as *tendências dos novos resultados* e conseqüentemente o andamento do processo. Os pontos que caem fora dos limites estabelecidos são indicativos de que houve *alteração na produção*.

#### 4.2 Carta de valores individuais

O gráfico ou carta de valores individuais, mostrado na figura 4.2.1, onde estão indicados todos os resultados obtidos de cada exemplar é o sistema de controle de produção mais comum e mais utilizado.

Tendo em vista as particularidades do processo de produção do concreto, no qual pode haver uma mudança de centragem para cada nova partida de materiais entregues na obra, esta carta facilita a visualização do andamento dos resultados, mesmo com amostras pequenas utilizadas para representar cada lote produzido.

---

(1) AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Prepared by ASTM Committee E-11, Special Technical Publication 15-C, Jan. 1951.

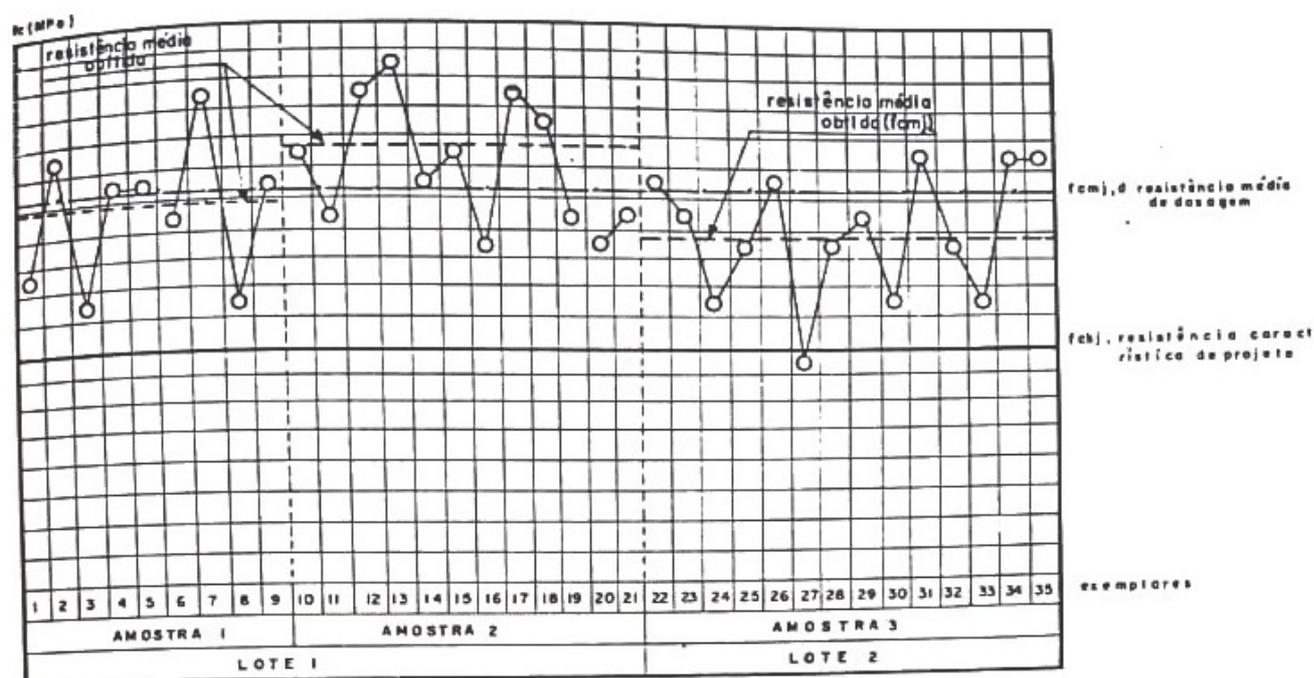


Fig. 4.2.1 - Carta de controle de produção com base em resultados individuais.

Como elementos auxiliares nesses gráficos podemos marcar:

- 1º) O valor da resistência característica especificada no projeto estrutural,  $f_{ckj}$ ;
- 2º) O valor da resistência média de dosagem  $f_{cmj,d}$  obtida em laboratório, que serviu de base para o estabelecimento do traço a ser produzido em obra.

Com esses valores marcados pode-se observar os seguintes aspectos<sup>(2)</sup>:

- a) Quando seis resultados consecutivos ficarem situados de um mesmo lado em relação ao valor médio, — tanto em relação à média esperada pela dosagem ou em relação a média dos  $m$  exemplares anteriores, — haverá grande probabilidade de que houve mudança de centragem do processo de produção;
- b) Quando em um conjunto de seis resultados consecutivos, dois

(2) Cf. FUSCO, Pêricles Brasiliense. Estruturas de concreto. v. 2. Fundamentos estatísticos da segurança das estruturas. São Paulo, Ed. Universidade de São Paulo, 1977. p. 174.

exemplares estiverem abaixo da resistência característica  $f_{ckj}$ , pode-se considerar que houve mudança nos parâmetros do processo de produção;

- c) Quando dois resultados consecutivos estiverem abaixo de  $f_{ckj}$ , haverá uma probabilidade de 99,75% de que o concreto produzido seja deficiente, isto é, de que houve mudança significativa no processo de produção. Segundo as recomendações do ACI 214/65, já citado, isso já seria motivo suficiente para se *rejeitar* o lote, caso se tratasse de *controle de aceitação*.

#### 4.3 Carta do desvio padrão

Sabendo-se que o desvio padrão é um parâmetro inerente e praticamente constante de um processo de produção, pode-se construir um gráfico onde se indique os resultados obtidos de cada lote através dos exemplares da ou das amostras que o representam, conforme indicado na figura 4.3.1.

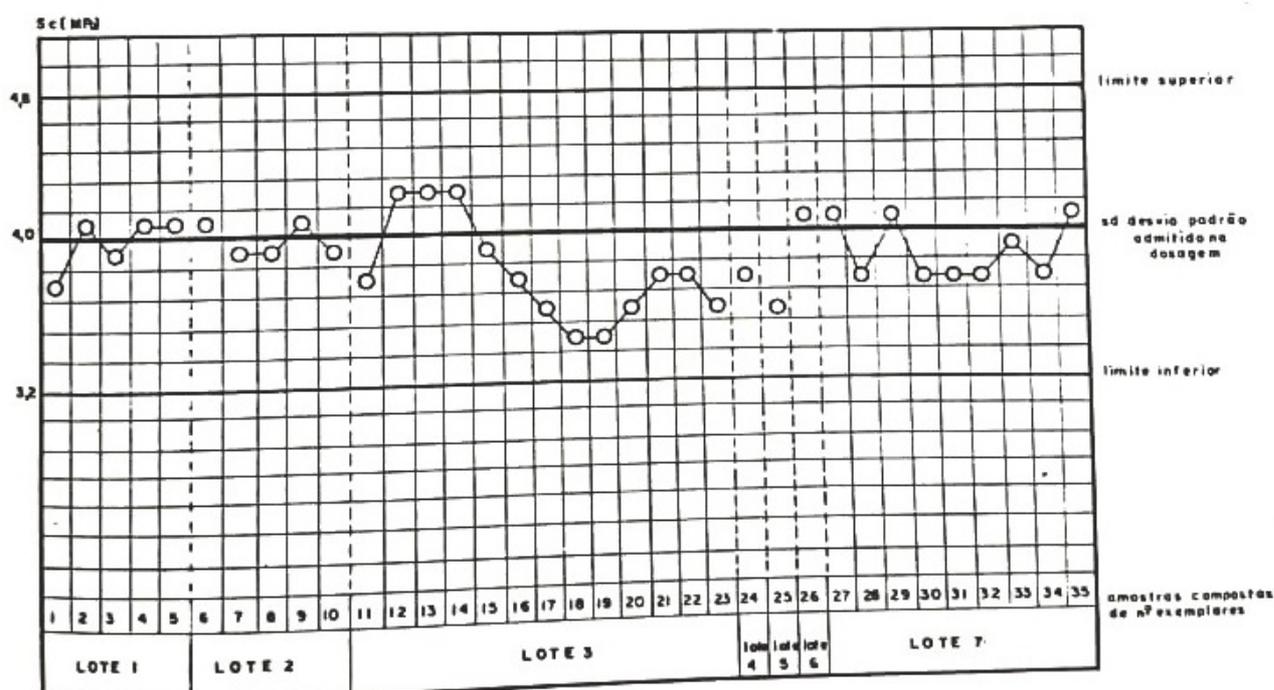


Fig. 4.3.1 - Carta de controle de produção com base no desvio padrão do processo de produção e ensaio.

É conveniente marcar nesta carta o valor admitido por ocasião da dosagem em laboratório ( $s_d$ ) de forma a permitir a comparação com os resultados que forem sendo obtidos. Pode-se indicar também o intervalo de confiança correspondente a uma probabilidade de 90%

de ocorrência. Desta forma é possível comprovar se cada valor obtido corresponde ao esperado ou está indicando mudança significativa dos parâmetros primordiais do processo de produção do concreto.

Como se verifica é um recurso que só tem aplicação prática em controle de grandes volumes de concreto onde se disponha de vários lotes e conseqüentemente de várias amostras. Pode-se adotar amostras com reduzido número de exemplares ( $n \geq 6$ ) de modo que seja possível obter rapidamente uma estimativa do desvio padrão  $s_c$  do processo de produção, apesar de que a fiabilidade dessa estimativa aumenta com o número de exemplares de uma mesma amostra ( $n \geq 35$ )<sup>(3)</sup>.

Nos valores limites do intervalo de confiança do desvio padrão, indicados a título de exemplo no gráfico 4.3.1, adotou-se  $n = 35$  para simples visualização. Sempre que se utilize amostras com número de exemplares inferior a esse o intervalo aumenta, o que do ponto de vista do controle de produção não é interessante. Portanto como sugestão recomenda-se adotar como limites  $s_d \pm 0,20s_d$ . Sempre que o desvio padrão de qualquer amostra superar sistematicamente o valor máximo previamente tolerado — no caso 4,8 MPa ( $\approx 48 \text{ kgf/cm}^2$ ) — deve-se admitir que houve alteração no processo de produção e ensaio do concreto.

Caso seja observado que o desvio padrão real, obtido a partir das amostras mantenha-se sistematicamente abaixo do admitido na do

- (3) O intervalo de confiança do desvio padrão é estabelecido em função de se tratar de grandes amostras, onde o número de exemplares seja igual ou superior a 35, ou pequenas amostras.

No caso de grandes amostras calcula-se por:  $s_d \pm 1,65 \frac{s_d}{\sqrt{2(n-1)}}$

No caso de pequenas amostras calcula-se por:  
limite superior =  $\sqrt{\frac{n-1}{\chi_{0,05}^2}} \cdot s_d$

limite inferior =  $\sqrt{\frac{n-1}{\chi_{0,95}^2}} \cdot s_d$

onde  $\chi^2$  (qui-quadrado) é obtido de tabelas em função do número  $n$  de exemplares da amostra tendo-se para:

$n = 6$	$\chi_{0,05}^2 = 1,15$	$\chi_{0,95}^2 = 11,1$
$n = 12$	$\chi_{0,05}^2 = 4,57$	$\chi_{0,95}^2 = 19,7$
$n = 18$	$\chi_{0,05}^2 = 8,67$	$\chi_{0,95}^2 = 27,6$
$n = 24$	$\chi_{0,05}^2 = 13,1$	$\chi_{0,95}^2 = 35,2$
$n = 30$	$\chi_{0,05}^2 = 17,1$	$\chi_{0,95}^2 = 42,6$

sagem, deve-se proceder a uma retificação da dosagem no sentido de reverter em economia para a obra, o fato de ter conseguido uma menor dispersão do processo de produção.

#### 4.4 Carta do coeficiente de variação das operações de ensaio e controle

Como já foi demonstrado no capítulo anterior, o desvio padrão das operações de ensaio e controle,  $s_e$ , pode afetar negativamente os resultados provocando a elevação da resistência média de dosagem,  $f_{cmj,d}$  e onerando conseqüentemente o custo do  $m^3$  de concreto produzido.

Uma boa maneira de se controlar a eficiência dessas operações é acompanhar graficamente a evolução do coeficiente de variação dentro do ensaio,  $v_e$ .

Segundo algumas considerações já apresentadas, para que as operações de ensaio e controle sejam consideradas eficientes devem apresentar variabilidade menor ou igual a 5%, ou seja,  $v_e \leq 5\%$ . Isso pode ser apreciado através da figura 4.4.1 onde se indicam os coeficientes de variação  $v_e$ , correspondentes a amostras compostas de pelo menos 10 exemplares.

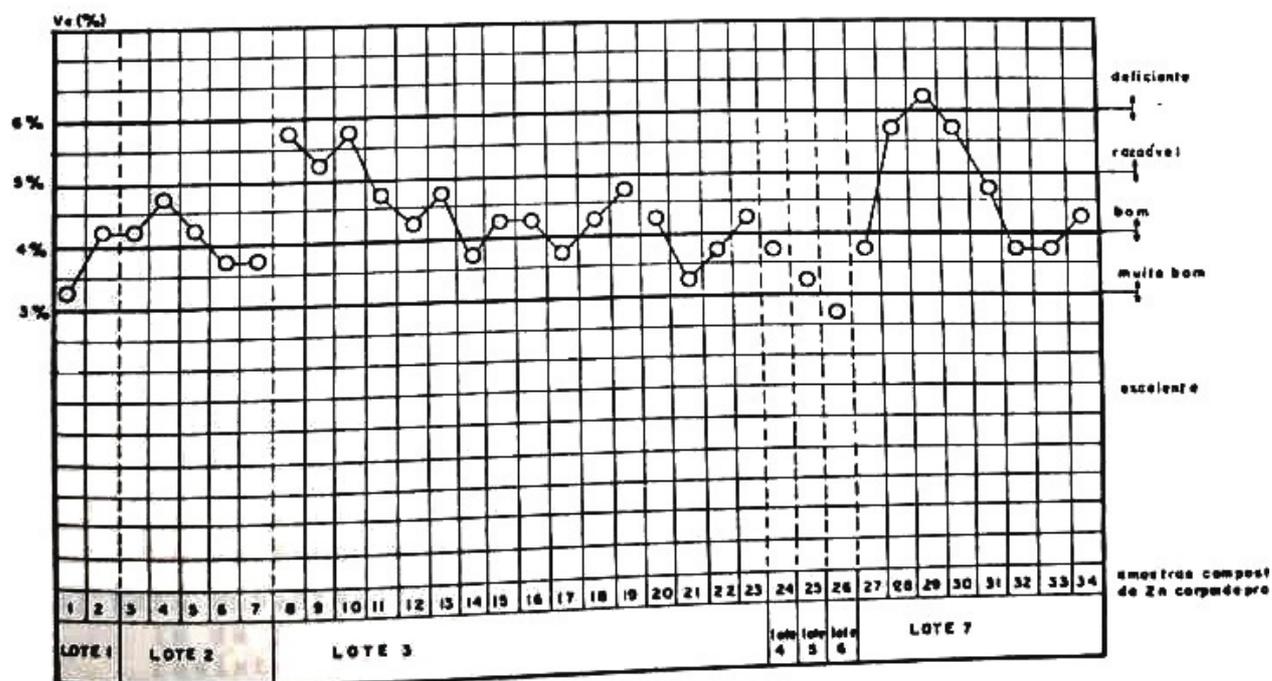


Fig. 4.4.1 - Carta de controle de produção com base no coeficiente de variação devido às operações de ensaio e controle.

Apesar da prática usual de se efetuar este cálculo continuamente, misturando diferentes lotes, não se recomenda esse procedimento pois ao se analisar exemplares pertencentes a lotes com médias distintas cabe a seguinte questão: que média deverá ser adotada?

Deve-se ter em conta que para a construção desta carta de controle é sempre necessário que cada exemplar seja constituído de pelo menos dois corpos de prova.

Além destas três cartas ou gráficos básicos pode-se empregar outros, tais como, o gráfico ou carta das médias móveis, o gráfico ou carta das máximas amplitudes observadas entre corpos de prova irmãos (representativos do mesmo exemplar), etc.<sup>(4)</sup>

No entanto esses gráficos não oferecem informações suficientemente rápidas e não acrescentam nada além do que pode oferecer os três já apresentados<sup>(5)</sup>.

Por outro lado, como foi visto no capítulo II, na maioria dos processos de controle de qualidade, um controle eficiente da produção exige uma rápida retro-alimentação das medidas das variáveis que estão sendo controladas, estabelecendo correlações com os requisitos exigidos. Dentro desse ponto de vista, a resistência à compressão à idade de 28 dias, não é uma variável interessante para o controle de produção do concreto. Quando se está de posse dos resultados — principalmente durante a produção de grandes volumes contínuos de concreto — na maioria das vezes não é mais possível intervir no processo, objetivo primordial do controle de produção.

---

(4) Cf. ACI-COMMITTEE-214. Controle estatístico de resistência de concreto. Norma ACI-214/65 (Recommended Practice for Evaluation of Compression Test Results of Field Concrete) Trad. Antonio C. R. Laranjeiras. Salvador, DER-BA, Serviço de Pesquisas Tecnológicas, 1969.

(5) Está subentendido nesta afirmativa que se trata do controle de produção de concretos especificados em função de uma resistência característica. Quando se desejar controlar a média, pode ser mais interessante empregar o processo de médias móveis. A escolha dos métodos mais adequados será sempre função do processo de produção do concreto, do processo de produção da estrutura e função do parâmetro que se deseja controlar, não existindo uma regra universal que seja a melhor para todas as situações.

Este tipo de controle pode tornar-se interessante na medida que se utilize resistências à compressão obtidas a baixas idades, em princípio antes dos 3 dias. Com resultados a 28 dias de idade, o controle proposto contribui muito pouco para a correção imediata das falhas de produção, não permitindo retificações rápidas do processo, servindo, na maior parte das vezes, tão somente como histórico do processo de produção.

Quando se dispuser de ensaios a baixa idade, cujos resultados estejam correlacionados com ensaios à idade especificada no projeto da estrutura, ou mesmo se dispuser de ensaios acelerados confiáveis, o acompanhamento da produção através da construção de cartas semelhantes às citadas é de extrema valia.

Para essa situação é salutar estabelecer diferentes frequências de constatação da qualidade, ou seja, adotar diferentes índices de amostragem. Quando o processo estiver mantendo-se sob controle, dentro das faixas esperadas, o índice de amostragem pode ser menos intenso. À medida que alguns resultados ultrapassarem os limites de advertência a amostragem é intensificada com o objetivo de melhor identificar as causas de variação. Como limites de advertência pode-se adotar:

- 1º) na carta de resultados individuais: a resistência característica de projeto  $f_{ckj}$ ;
- 2º) na carta de desvio padrão: os limites superior e inferior correspondentes ao intervalo de 90% de confiança;
- 3º) na carta do coeficiente de variação devido às operações de ensaio e controle: o limite corresponde a  $v_e = 5\%$ .

#### 4.5 Exemplo:

Vamos considerar a seguinte obra hipotética onde a produção de concreto estará vinculada às condições a seguir descritas.

Sabe-se que:

##### a) Materiais:

agregado miúdo é recebido contínua e regularmente de jazida uniforme. Pode-se admitir que suas características se mantenham constantes e ao mesmo tempo que atendam às especificações correspondentes;

- *agregado graúdo* é composto da mistura em peso de 40% de brita 1 e 60% de brita 2. É proveniente de jazida de granito são e uniforme, podendo-se admitir que suas características se mantenham constantes e dentro das especificações correspondentes;
  - *água de amassamento* atende às especificações e sendo do abas tecimento público, admite-se que se mantenha uniforme e cons tante;
  - *aditivos* não serão empregados;
  - *cimento AF-320* é proveniente de uma mesma fábrica. É entre gue em sacos fechados de 50kg. Cada fornecimento se compõe de duas carretas com 300 sacos cada uma, correspondendo a uma mesma partida de cimento produzida na fábrica. Cada en trega é defasada de 25 dias uma da outra. Atende às especi ficções correspondentes.
- b) Mão de obra:
- se compõe de turma acostumada às regras de bem construir e pode ser admitida como praticamente constante durante o pe ríodo de concretagem da estrutura.
- c) Equipamento:
- uma betoneira de eixo inclinado com capacidade nominal de 300 dm<sup>3</sup>, em bom estado de conservação;
  - proporcionamento dos materiais em peso (massa).
- d) Operações de ensaio:
- contará com assistência esporádica de tecnologista de con creto;
  - equipe de controle em obra variável, revezando-se com outras equipes;
  - equipamentos de ensaio aferidos e equipe de laboratório per manente e eficiente.
- e) Exigências de projeto:
- $f_{ckj} \geq 18,0$  MPa a 28 dias;

- $\gamma_c = 1,4$  (coeficiente de minoração da resistência do concreto).
- f) Característica da execução da estrutura:
  - volume total a ser lançado =  $400\text{m}^3$
  - concretagens em lances de aproximadamente  $80\text{m}^3$  cada, defasados de 25 dias;
  - o período máximo de concretagem tolerado é 5 dias consecutivos, para atender ao cronograma geral de execução.

Pede-se

Efetuar o controle de produção do concreto, mostrando sua eventual vantagem econômica.

Solução:

1º) O estudo de dosagem experimental em laboratório fornece:

$$C = \frac{1}{k_1 - k_2 \cdot \log f_{cm28}} = \frac{100}{0,82 - 0,36 \cdot \log f_{cm28}}$$

onde: C = consumo em kg de cimento por  $\text{m}^3$  de concreto adensado;

$f_{cm28}$  = resistência média à compressão a 28 dias de idade em MPa;

correlação experimental obtida:  $f_{cm14} = 0,8 \cdot f_{cm28}$

2º) Resistência média à compressão inicial de dosagem: NB - 1 (1978) (6)

$$f_{cm28,d} = f_{ck28} + 1,65 \cdot s_d = 18,0 + 1,65 \cdot 4,0 = 24,6 \text{ MPa}$$

---

(6) Op. cit., capítulo 8, item 8.3.1.2.

39) Traço inicial com consumo médio de cimento por  $m^3$  de concreto de:

$$C = \frac{100}{0,80 - 0,36 \cdot \log 24,6} = 334 \text{ kg}/m^3$$

49) Lotes de concreto praticamente homogêneo:

Conforme as informações anteriores pode-se admitir que cada concretagem de aproximadamente  $80m^3$ , será constituída por materiais, mão de obra e equipamentos iguais. Adotar-se-á então, com um lote de concreto homogêneo, o volume de  $80m^3$  correspondente a uma concretagem.

59) Índice de amostragem e forma de constituição da amostra:

Como se trata do início dos serviços onde não se sabe bem o que poderá acontecer, é conveniente dispor de número suficiente de exemplares ( $\geq 10$ ) para estimativa também do coeficiente de variação devido às operações de ensaio e controle, além dos parâmetros do próprio processo de produção do concreto. Vamos fixar em 12 exemplares compostos de 2 corpos de prova cada um, sendo que serão moldados ao todo 48 corpos de prova, 24 para romper aos 14 dias de idade, *controle de produção*, e 24 para romper aos 28 dias de idade que serão utilizados para o *controle de aceitação*;

Como o volume a ser concretado é de  $80m^3$  em 5 dias, será misturado  $16m^3$  em média diariamente. Lembrando que cada betonada se compõe de um saco de cimento ( $\sim 50kg$ ) serão necessários 107 betonadas por dia. Portanto a cada 45 betonadas, de uma delas deverá ser moldado 2 corpos de prova irmãos que representarão um exemplar a 14 dias de idade. Preferivelmente de outra, dentro do mesmo número de 45 betonadas deverá ser moldado outros 2 corpos de prova para ruptura a 28 dias.

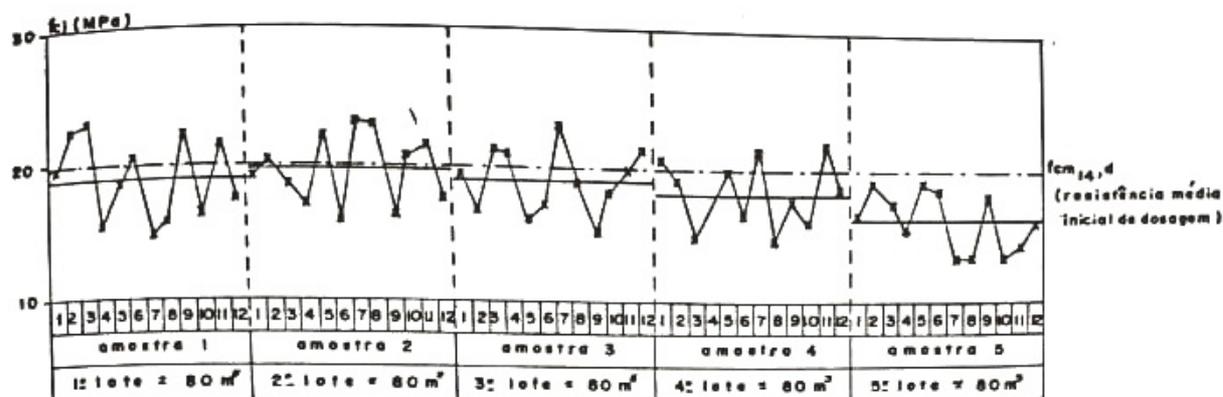
69) Resultados obtidos a 14 dias de idade, que serão utilizados para o controle de produção do concreto:

1º lote = 80m <sup>3</sup>		2º lote = 80m <sup>3</sup>		3º lote = 80m <sup>3</sup>	
Exemplar	Corpos de prova (MPa)	Exemplar	Corpos de prova (MPa)	Exemplar	Corpos de prova (MPa)
1	18,8	1	18,9	1	20,0
	19,8		18,9		18,2
2	22,9	2	21,1	2	16,5
	21,7		18,9		16,5
3	23,0	3	18,9	3	19,9
	22,8		17,9		22,1
4	15,9	4	17,7	4	21,0
	14,3		16,1		20,2
5	19,0	5	21,1	5	15,2
	17,2		22,9		16,0
6	21,5	6	15,6	6	17,6
	18,9		16,0		16,4
7	15,0	7	23,1	7	22,6
	14,0		23,1		22,6
8	16,8	8	22,5	8	19,0
	14,6		23,1		18,0
9	22,9	9	16,2	9	14,5
	20,5		16,2		15,5
10	17,0	10	21,5	10	17,0
	15,0		19,5		19,0
11	22,7	11	20,5	11	19,0
	20,1		22,3		20,2
12	18,1	12	18,5	12	21,5
	16,3		16,5		20,7
Amostra I		Amostra II		Amostra III	

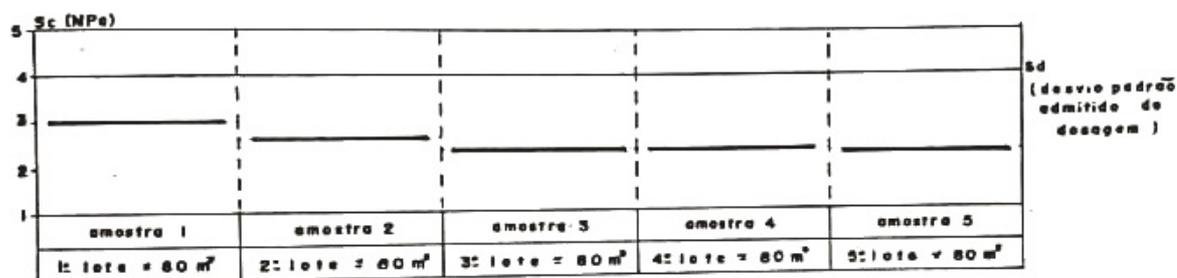
4º lote = 80m <sup>3</sup>		5º lote = 80m <sup>3</sup>	
Exemplar	Corpos de prova (MPa)	Exemplar	Corpos de prova (MPa)
1	20,6	1	16,2
	19,6		
2	19,0	2	18,9
	18,2		
3	14,6	3	17,0
	15,0		
4	17,1	4	15,0
	18,3		
5	19,1	5	19,0
	20,1		
6	16,5	6	18,2
	15,9		
7	20,9	7	13,0
	21,1		
8	14,1	8	13,4
	14,5		
9	16,7	9	18,0
	17,7		
10	15,7	10	13,1
	16,1		
11	21,4	11	14,0
	21,6		
12	18,7	12	15,8
	17,5		
Amostra IV		Amostra V	

## 79) Tratamento dos resultados

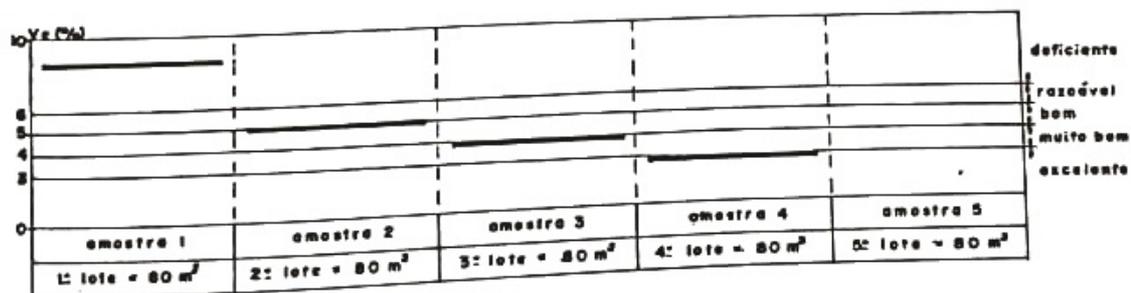
## a) Carta dos valores individuais:



## b) Carta do desvio padrão:



## c) Carta do coeficiente de variação das operações de ensaio e controle:



89) Análise do 1º lote: (comprovação dos valores previamente admitidos  $f_{cm28,d} = 24,6$  MPa,  $s_d = 4,0$  MPa e  $v_e \leq 5\%$ )

- média (calculada a partir da média de cada par de corpos de prova).

$$f_{cm14,est} = 18,7 \text{ MPa}$$

- desvio padrão do processo de produção e ensaio: (calculado

a partir da média de cada par de corpos de prova).

$$s_c = 3,0 \text{ MPa}$$

- desvio padrão das operações de ensaio:

$$s_e = 1,6 \text{ MPa}$$

- coeficiente de variação das operações de ensaio:

$$v_e = 9\%$$

- coeficiente de variação do processo de produção e ensaio (total):

$$v_c = 16\%$$

Como se verifica o coeficiente de variação das operações de ensaio e controle,  $v_e$ , é muito elevado revelando que se trata de operações deficientes. Se houver uma correção destas operações, tornando-as mais uniformes, será possível baixar também o coeficiente de variação total,  $v_c$ . Isto é comum acontecer no início de um processo de produção ou controle.

Por outro lado o desvio padrão do processo de produção e ensaio,  $s_c$ , mostrou ser menor que o inicialmente admitido;  $s_c = 3,0 \text{ MPa} < s_d = 4,0 \text{ MPa}$ , o que pode propiciar a mudança da resistência média inicial de dosagem ( $f_{cm28,d} = 24,6 \text{ MPa}$ ) para um valor mais baixo. Esta mudança só será segura no momento em que as operações de ensaio possam ser consideradas eficientes, ou seja,  $v_e \leq 5\%$ . Portanto o 1º passo deve ser corrigir as operações de ensaio, melhorando os procedimentos. Em relação à resistência média de dosagem,  $f_{cmj,d}$ , podemos observar que a produção obedeceu, pois a resistência média máxima obtida através da consideração dos resultados mais altos de cada par de corpos de prova representantes de cada exemplar, forneceu o valor  $f_{cm28,est} = 24,5 \text{ MPa}$  (obtida empregando-se a correlação  $f_{cm28} = 1,25 \cdot f_{cm14}$ ), bastante próximo ao esperado  $f_{cm28,d} = 24,6 \text{ MPa}$ .

Finalmente pode-se avaliar o desvio padrão real do processo de produção em

$$s_{c \text{ real}} = \sqrt{s_c^2 - s_e^2} = 2,5 \text{ MPa}$$

99) Análise do 2º lote; (verificação da eventual redução de  $v_e$  que parece exagerado e nova estimativa de  $s_c$ )

- média: (calculada a partir da média de cada par de corpos de prova)

$$f_{cm14,est} = 19,5 \text{ MPa}$$

- desvio padrão do processo de produção e ensaio: (calculado a partir da média de cada par de corpos de prova)

$$s_c = 2,6 \text{ MPa}$$

- desvio padrão das operações de ensaio:

$$s_e = 1,0 \text{ MPa}$$

- coeficiente de variação das operações de ensaio:

$$v_e = 5\%$$

- coeficiente de variação do processo de produção e ensaio (total):

$$v_c = 13\%$$

Como se nota, foi possível reduzir o coeficiente de variação das operações de ensaio,  $v_e$ , para níveis aceitáveis. Apenas esse fato já foi suficiente para melhorar a dispersão dos resultados, baixando o desvio padrão do processo de produção e ensaio para  $s_c = 2,6 \text{ MPa}$  em relação aos  $3,0 \text{ MPa}$  anteriores. A resistência média máxima manteve-se em  $f_{cm28,est} = 25,0 \text{ MPa}$ , muito próxima à resistência média inicial de dosagem  $f_{cm28,d} = 24,6 \text{ MPa}$ .

O desvio padrão real do processo de produção baixou para  $s_{c \text{ real}} = 2,4 \text{ MPa}$ .

109) Análise do 3º lote: (confirmação da estabilidade do processo  $f_{cm28}$ ,  $s_c$  e  $v_e$ )

- média:  $f_{cm14,est} = 18,7 \text{ MPa}$

- desvio padrão do processo de produção e ensaio:

$$s_c = 2,4 \text{ MPa}$$

- desvio padrão das operações de ensaio:

$$s_e = 0,8 \text{ MPa}$$

- coeficiente de variação das operações de ensaio:

$$v_e = 4\%$$

- coeficiente de variação do processo de produção e ensaio (total):

$$v_c = 13\%$$

- desvio padrão real do processo de produção:

$$s_{c \text{ real}} = 2,3 \text{ MPa}$$

A resistência média máxima manteve-se em  $f_{cm28,est} = 24,1 \text{ MPa}$ , praticamente igual a resistência média inicial de dosagem  $f_{cm28,d} = 24,6 \text{ MPa}$ . Portanto, após ter constatado uma aparente estabilização do processo e não tendo motivos para supor que isso deva se alterar, é possível fazer uma primeira correlação da resistência média inicial de dosagem, em função dos *parâmetros reais*<sup>(8)</sup> observados e não mais com base a critérios subjetivos:

Portanto o novo desvio padrão de dosagem a ser adotado poderá ser:

$$s_{c \text{ real}}^2 = \frac{s_{c \text{ real } 1}^2 (n_1 - 1) + s_{c \text{ real } 2}^2 (n_2 - 1) + s_{c \text{ real } 3}^2 (n_3 - 1)}{(n_1 - 1) + (n_2 - 1) + (n_3 - 1)} = 2,4 \text{ MPa}$$

onde  $v_e \leq 5\%$  vem  $s_e \leq 0,8 \text{ MPa}$  e:

$$s_c = \sqrt{s_{c \text{ real}}^2 + s_e^2} = 2,5 \text{ MPa (obtido de 72 corpos de prova)}$$

Então, segundo NB-1 (1978)<sup>(7)</sup>, temos a nova resistência média de dosagem:

(7) Op. cit., capítulo 8, item 8.3.1.2.

(8) O mais correto seria considerar parâmetros estimados que sem dúvida se aproximam mais dos reais do que os parâmetros subjetivos inicialmente adotados. Não foi empregada esta nomenclatura para evitar confusões com os valores estimados ao mesmo tempo que reforça o objetivo didático deste exemplo.

$f_{cm28,d} = f_{ck28} + 1,65 \cdot k_n \cdot s_{cn}$  sendo  $k_n$  fornecido de acordo com o número de ensaios conforme indicado a seguir:

n	20	25	30	50	$\geq 200$
$k_n$	1,35	1,30	1,25	1,20	1,10

$f_{cm28,d} = 18,0 + 1,65 \cdot 1,19 \cdot 2,5 = 23,0$  MPa (obtido para 72 ensaios conhecidos)

o que fornece o seguinte novo consumo médio de cimento por  $m^3$  de concreto:  $C = 324$  kg/ $m^3$ .

11º) Análise do 4º lote: (observação do comportamento do processo com o novo traço)

- média da amostra:  $f_{cm14,est} = 17,9$  MPa

- desvio padrão do processo de produção e ensaio:

$$s_c = 2,4 \text{ MPa}$$

- desvio padrão das operações de ensaio e controle:

$$s_e = 0,6 \text{ MPa}$$

- coeficiente de variação das operações de ensaio:

$$v_e = 3\%$$

- coeficiente de variação do processo de produção e ensaio (total):

$$v_c = 13\%$$

- desvio padrão real do processo de produção:

$$s_{c \text{ real}} = 2,3 \text{ MPa}$$

- resistência média obtida pela consideração do valor mais alto de cada par de corpos de prova de um mesmo exemplar, empregando-se a correlação  $f_{cm28} = 1,25 \cdot f_{cm14}$ :

$$f_{cm28,est} = 22,8 \text{ MPa}$$

Como se nota, tendo assegurado operações de ensaio e controle dentro do padrão bom, foi possível baixar a média e manter a uniformidade do processo.

Nesta etapa do procedimento o processo de controle poderia manter-se não fosse a observação de que a estrutura só iria ser posta em carga após 90 dias do término da última concretagem.

Procedeu-se então à correlação experimental  $f_{cm28}$  para  $f_{cm91}$  tendo-se encontrado  $f_{cm91} = 1,15 \cdot f_{cm28}$  e  $f_{cm14} = 1,44 \cdot f_{cm91}$ . Isto permitiu uma nova correção da resistência média de dosagem para:

$$f_{cm91,d} = f_{ck91} + 1,65 \cdot k_n \cdot s_{cn} = 18,0 + 1,65 \cdot 1,17 \cdot 2,5 = 22,8 \text{ MPa}$$

(obtidos para 96 ensaios conhecidos)

portanto  $f_{cm14,d} = 15,9 \text{ MPa}$  o que fornece o novo traço de concreto com consumo médio de cimento por  $m^3$  de:  $C = 300 \text{ kg/m}^3$

12º) Análise do 5º lote: (observação do comportamento do processo com o novo traço)

- média da amostra:  $f_{cm14,est} = 16,0 \text{ MPa}$
- desvio padrão do processo de produção e ensaio:

$$s_c = 2,3 \text{ MPa}$$

Como se verifica o processo de produção e ensaio encontra-se dentro do previsto, ou seja,  $s_c = 2,5 \text{ MPa}$  e  $f_{cm14,d} = 15,9 \text{ MPa}$ , com traço de consumo  $C = 300 \text{ kg/m}^3$ .

### Conclusão:

O controle de produção efetuado desta maneira permitiu que se alcançasse neste exemplo as seguintes vantagens:

- a) Redução do consumo de cimento por  $m^3$  de concreto de  $334 \text{ kg/m}^3$  inicialmente para  $300 \text{ kg/m}^3$  no final. Pode-se imaginar o que significaria uma redução de  $34 \text{ kg}$  de cimento por  $m^3$  de concreto numa grande obra onde os volumes totais de concreto sejam da ordem de  $10.000 m^3$ .
- b) Redução dos gastos com controle, passando da moldagem e ruptura inicial de 24 corpos de prova por lote, para apenas 12, graças ao aumento da eficiência das operações de ensaio e controle.

## V. CONTROLE DE ACEITAÇÃO DO CONCRETO

### 5.1 Generalidades

O controle de recepção do concreto, que envolve um juízo de aceitação ou rejeição difere do controle de produção em dois aspectos fundamentais. Primeiro porque a finalidade da decisão é julgar simplesmente a conformidade ou não de certa porção do concreto com relação ao que foi especificado. Não se trata portanto da análise da estabilidade do processo de produção, ou seja, não há o objetivo de analisar as variações que intervêm no processo de produção do concreto para se alcançar aquela qualidade.

Segundo porque não envolve, em princípio, aspectos econômicos da produção. Só importa aceitar um concreto com a resistência característica atendida, seja qual for a dispersão e a média de produção daquele concreto.

Daí o interesse em se limitar uma certa quantidade de concreto (lote) dentro da qual se fará uma amostragem aleatória. Para completar o círculo de interesses é necessário que sejam definidos também os elementos da estrutura que foram confeccionados com aquele lote de concreto, de modo que na época em que se dispuser dos resultados, seja possível decidir sobre sua adequação.

O critério da atual NB-1 (1978)<sup>(1)</sup> recomenda que se aceite o concreto lançado sempre que tenham sido satisfeitas as condições de projeto e execução da Norma, ou seja, somente quando resultar:

$$f_{ckj,est} \geq f_{ckj}$$

Esta condição, como se verá a seguir, é justa porém muito severa, pois quando se emprega um estimador centrado<sup>(2)</sup>, este leva à rejeição de 50% dos concretos estritamente conformes, penalizando em 50% das vezes o produtor.

(1) Op. cit., capítulo 16, item 16.1.

(2) Como é o caso da própria NB-1 (1978), capítulo 15, item 15.1.1.3.

Essa é a justificativa apresentada nas recomendações espanholas<sup>(3)</sup> quando aceitam concretos cuja resistência característica estimada resultou até 90% da especificada, ou seja,  $f_{ckj,est} \geq 0,9 f_{ckj}$ , o que pode corresponder a uma probabilidade de aceitação de 96%, para amostras com 12 exemplares, e não apenas 50%.

Desta forma um concreto estritamente conforme, com resistência característica real,  $f_{ckj,real}$ , igual à resistência característica de projeto  $f_{ckj}$  seria aceito 48 vezes em cada 50 que fosse julgado, quando se utilizar uma amostra com 12 exemplares e o coeficiente de variação do processo de produção e controle se mantiver em  $v_c = 15\%$ .

Em compensação o consumidor, no caso o projetista ou o proprietário teria 50% de chance de aceitar concretos com resistência característica real  $f_{ckj,real}$  igual a 0,9 da especificada no projeto estrutural, ou seja,  $f_{ckj,real} = 0,9 f_{ckj}$ , o que poderia eventualmente comprometer a segurança.

Como se vê é necessário estabelecer uma solução de compromisso entre os interesses econômicos (classe dos produtores de concreto) e os interesses técnicos relacionados à segurança da estrutura (classe dos projetistas e proprietários).

## 5.2 A fórmula matemática que a partir dos resultados obtidos estima o valor característico

Sempre que o controle seja feito através de uma propriedade mensurável, como é o caso da resistência à compressão onde podemos obter qualquer valor dentro de uma escala contínua, o controle denomina-se *controle por variáveis*.

Ao se adotar uma fórmula matemática que a partir de alguns resultados obtidos de uma amostra de tamanho finito, estime o valor característico real do lote todo, corre-se sempre o risco inevitável de cometer um engano. Sempre haverá a possibilidade de aceitar um *mau concreto* ou rejeitar um *concreto bom*.

Essa fórmula matemática, doravante denominada *estimador*, poderá ser definida de inúmeras maneiras, cada qual mais adequada

(3) Cf. COMISIÓN PERMANENTE DEL HORMIGÓN. Resistencia característica y control de calidad. Ministério de Obras Públicas, España, 1972.

a uma situação.

Uma das maneiras de se comparar diferentes estimadores é em função de suas curvas de eficiência, também chamadas curvas características de operação. Quanto maior a eficiência de um estimador, maior a sua capacidade de discriminação entre um concreto bom que pode ser aceito e um concreto de baixa qualidade que deve ser rejeitado.

Como se depreende das figuras 5.2.1 e 5.2.2, um estimador terá uma distribuição em torno ao valor real, representada por uma função de densidade de probabilidade do estimador utilizado. Um estimador perfeito, seria aquele capaz de identificar com absoluta certeza os lotes de concreto que possuem 5% ou menos de resistências reais abaixo da especificada, separando-os dos lotes nos quais a porcentagem de resistências reais inferiores ao valor especificado é maior que 5%. Desta forma a probabilidade de aceitação dos primeiros seria de 100%, e dos segundos nula o que levaria à sua rejeição incontestável. Nesta situação ideal, impossível de ser alcançada na prática pois sempre se dispõe de amostras de tamanho limitado, o risco do produtor (ver rejeitado um bom concreto) e o risco do consumidor (aceitar um concreto mau) seriam totalmente eliminados.

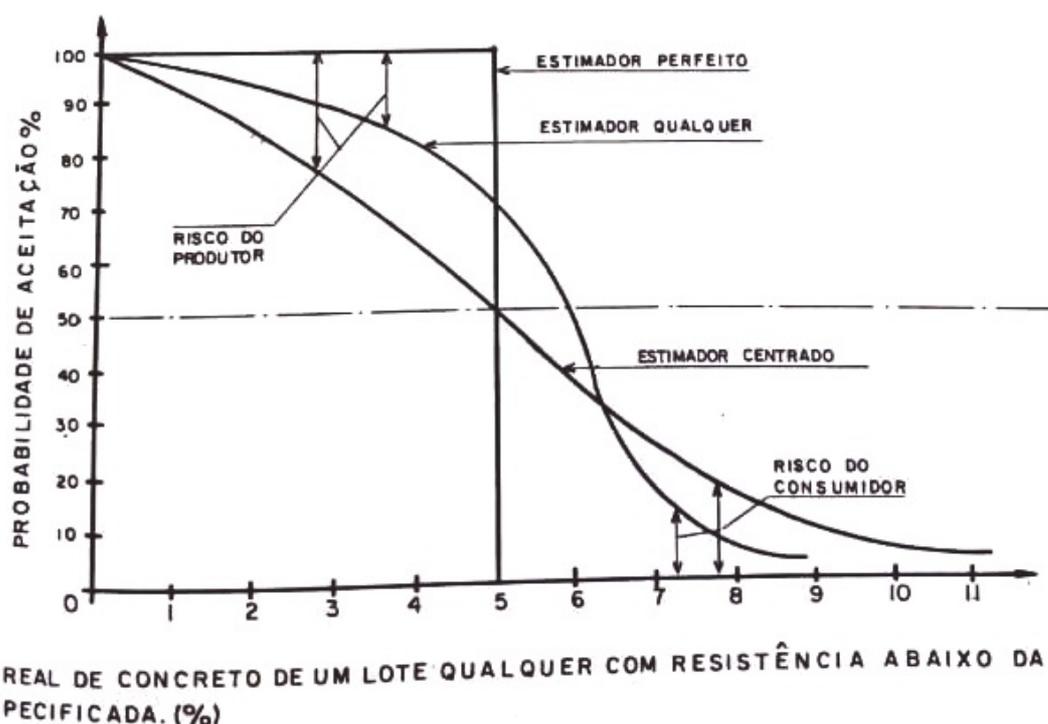


Fig. 5.2.1 - Esquema geral de curvas características de operação de um estimador.

Os estimadores podem ser ou não centrados em relação à resistência característica real,  $f_{ckj,real}$ , conforme se mostra na figura 5.2.2.

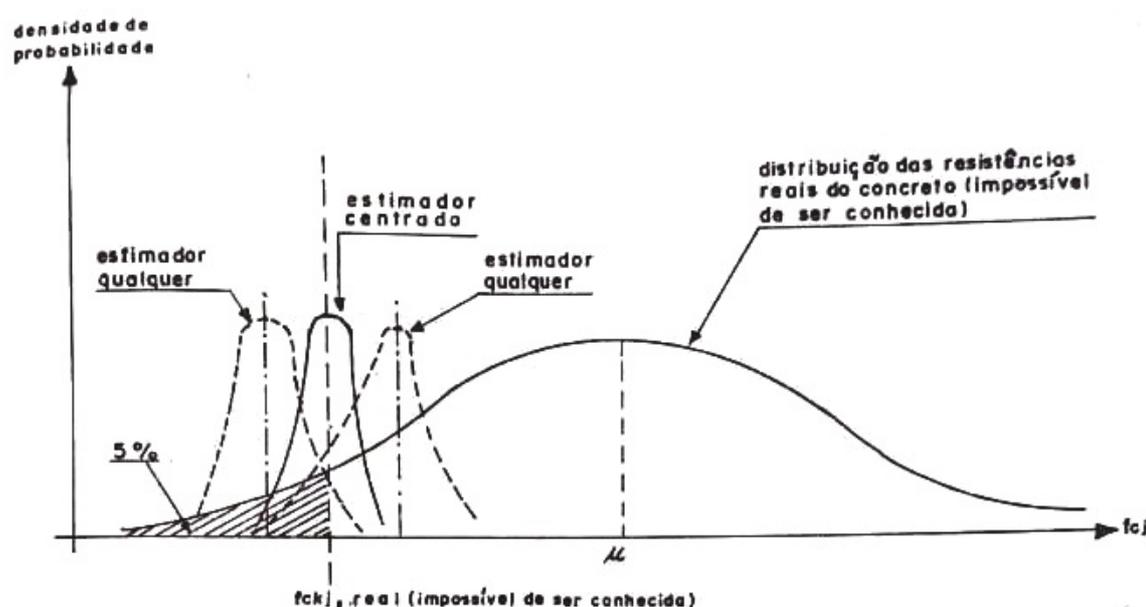


Fig. 5.2.2 - Posição relativa da média do estimador em relação ao valor real ( $f_{ckj,real}$ ) do lote.

Quando o estimador é centrado na resistência característica real do concreto à compressão, ou seja, sua média coincide com  $f_{ckj,real}$ , e por sua vez ele é aplicado a um concreto estritamente conforme que possui resistência característica real igual à resistência especificada,  $f_{ckj,real} = f_{ckj}$ , a probabilidade de que resulte  $f_{ckj,est} > f_{ckj}$  é 0,5. Desta forma haverá 50% de risco para o produtor e 50% de risco para o consumidor.

No entanto, um pouco que se melhore o concreto,  $f_{ckj,real} > f_{ckj}$  a probabilidade de que  $f_{ckj,est} > f_{ckj}$  pode crescer rapidamente conforme se verifica na figura 5.2.3<sup>(4)</sup>.

(4) JIMÉNEZ MONTOYA, P.; GARCIA MESEGUER, A.; MORAN CABRÉ, F. Hormigón armado. 8. ed. Barcelona, Ed. Gustavo Gili S.A., 1976. p. 193.

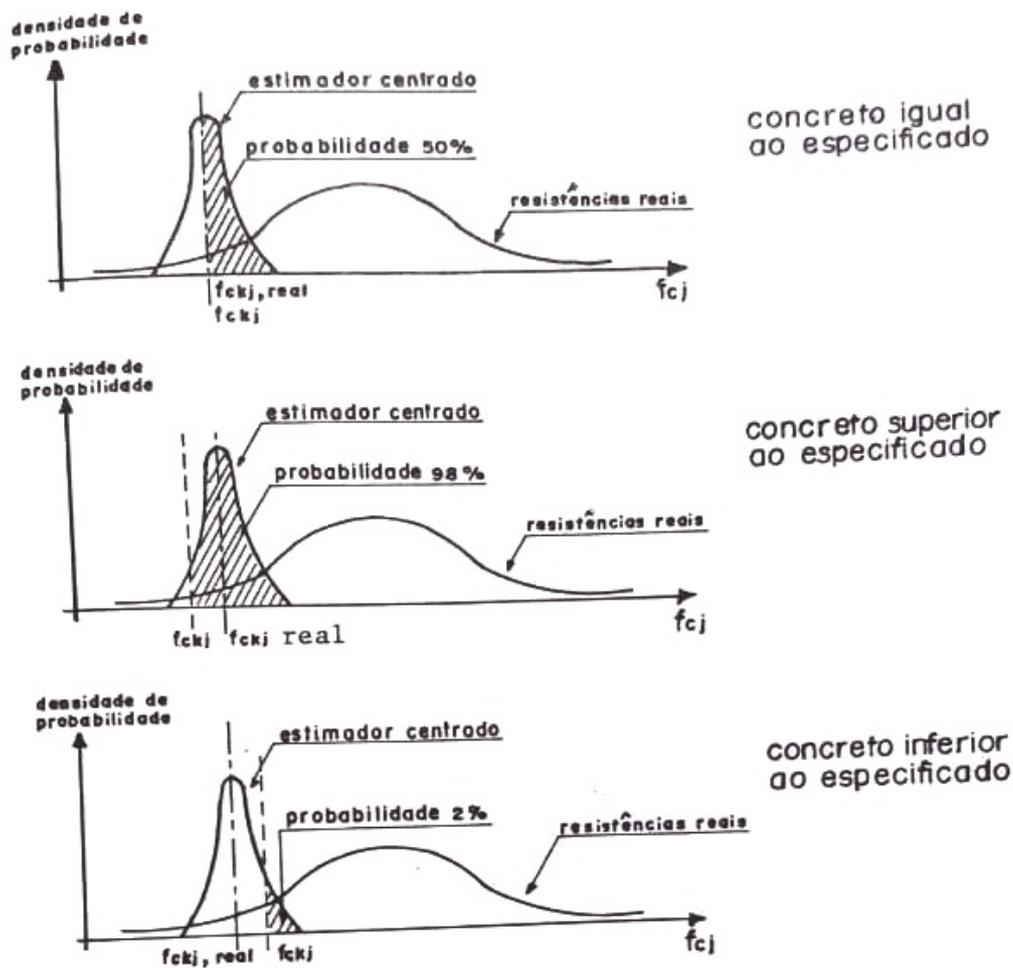


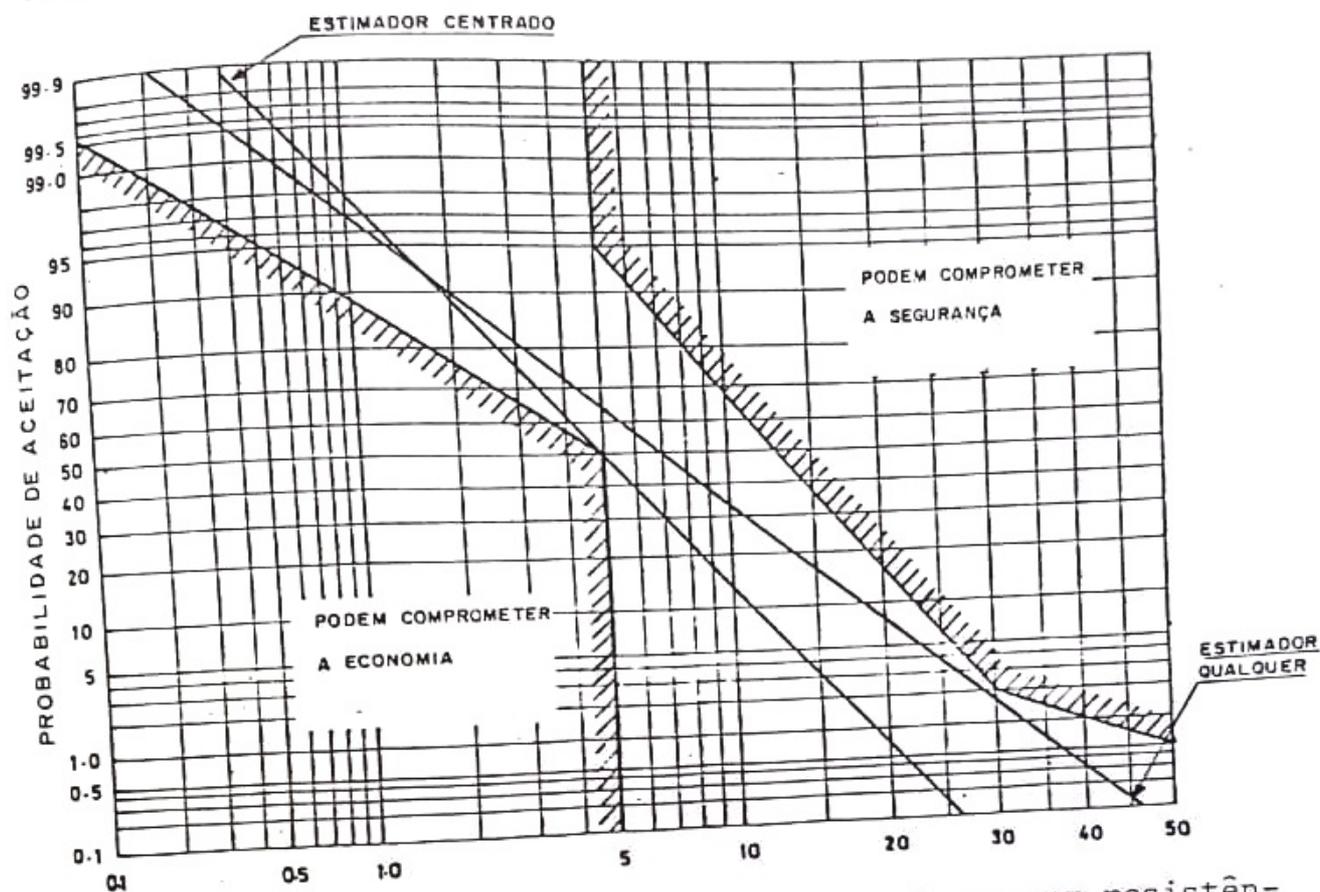
Fig. 5.2.3 - Posição relativa entre a resistência característica real  $f_{ckj,real}$  e a resistência característica estimada,  $f_{ckj,est}$ , em relação à resistência característica especificada ou de projeto,  $f_{ckj}$ .

As decisões que derivam do emprego de diferentes estimadores, podem ter na prática efeitos similares sobre a segurança e a economia da obra. Em vista disso não é possível apresentar um *estimador* como o mais recomendado. Cada país adota o estimador que considera mais apropriado para as suas condições.

Considerando esse fato a comissão mixta CEB/CIB/FYP/RILEM<sup>(5)</sup>, houve por bem apresentar fronteiras para a curva de eficiência dos estimadores conforme apresentado na figura 5.2.4, onde foi

(5) Recommended principles for the control of quality and the judgement of acceptability of concrete. Madrid, Instituto Eduardo Torroja - IET, Monografia n. 326, abr. 1975. p. 101.

utilizado papel de probabilidade bi-normal de tal forma que as curvas resultaram retas.



Porcentagem real de concreto de um lote qualquer com resistência abaixo da especificada (%).

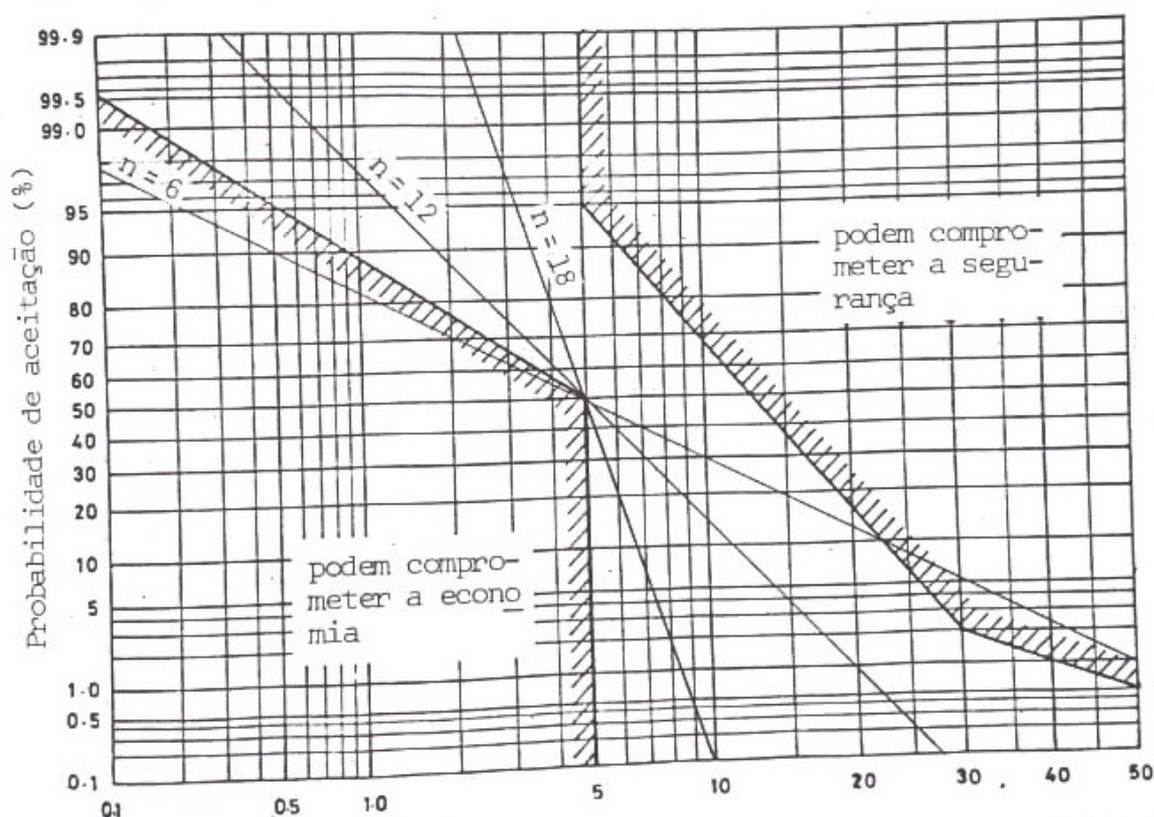
Fig. 5.2.4 - Proposta de fronteiras para a curva de eficiência do estimador.

Como se verifica na figura 5.2.4, considerações de segurança estrutural levaram a sugerir a definição de uma fronteira superior na região de qualidade inaceitável onde a porcentagem real de concreto de um lote qualquer, com resistência abaixo da especificada ultrapassa em muito os 5%. Com isto fica limitado superiormente o risco do consumidor, evitando que este tenha a probabilidade de aceitar um concreto de qualidade muito baixa.

Por outro lado, considerações de economia levaram à fixação de uma fronteira inferior na região de qualidade aceitável, onde a porcentagem real de concreto do lote com resistência abaixo da especificada não alcança os 5%. Com isso fica limitado inferiormente o risco do produtor, evitando que este tenha a probabilidade de ver rejeitado um concreto de qualidade muito alta.

No entanto a eficiência do estimador não depende tão somente da fórmula estatística adotada mas principalmente dos seguintes fatores<sup>(6)</sup>:

- Lei de distribuição das resistências: sempre assumida como sendo normal, podendo no entanto em casos especiais não ser esta a que melhor se ajuste à distribuição considerada.
- Número  $n$  de exemplares que compõem a amostra: em princípio, ao aumentar  $n$  aumentamos a eficiência de um mesmo estimador — figura 5.2.5 — fixada uma certa variabilidade do processo de produção e ensaio.



Porcentagem real de concreto de um lote qualquer com resistência abaixo da especificada (%).

Fig. 5.2.5 - Alteração da eficiência de um dado estimador em função do número de exemplares da amostra, mantendo um mesmo processo de produção e controle (desvio padrão e coeficiente de variação constantes).

- Permanência do caráter estacionário da média: é muito comum haver mistura de resultados de concretos com diferentes re-

(6) Cf. ANTON CORRALES, J. M. Teorias probabilistas de seguridad. Madrid, Instituto Eduardo Torroja - IET, Monografía n. 306, nov. 1972.

sistências médias, pois a centragem do processo de produção não permanece constante no tempo.

Caso extremo seria a mistura de dois lotes, um com resistência à compressão de 18 MPa ( $\sim 180 \text{ kgf/cm}^2$ ), outro com resistência igual a 20 MPa ( $\sim 20 \text{ kgf/cm}^2$ ), ambos sem dispersão de resultados. Obtem-se média  $\mu = 19 \text{ MPa}$  ( $\sim 190 \text{ kgf/cm}^2$ ), desvio padrão  $\sigma = 1,4 \text{ MPa}$  ( $\sim 14 \text{ kgf/cm}^2$ ), o que daria uma resistência característica de 17 MPa ( $\sim 170 \text{ kgf/cm}^2$ ). Portanto ao juntar a mistura um concreto mais resistente, aparentemente obtem-se uma mistura final menos resistente que as duas que lhe deram origem. Esse risco já foi visto e alertado no item 3.5, onde se mostra a necessidade e a importância da identificação de lotes homogêneos que evitem esses enganos grosseiros e inadmissíveis de tratamento de resultados.

- d) Da variabilidade do processo de produção e ensaio do concreto: em princípio ao aumentar a variabilidade ( $v_c$ ) diminui-se a eficiência de um mesmo estimador, figura 5.2.6, fixado um mesmo número  $n$  de exemplares da amostra.

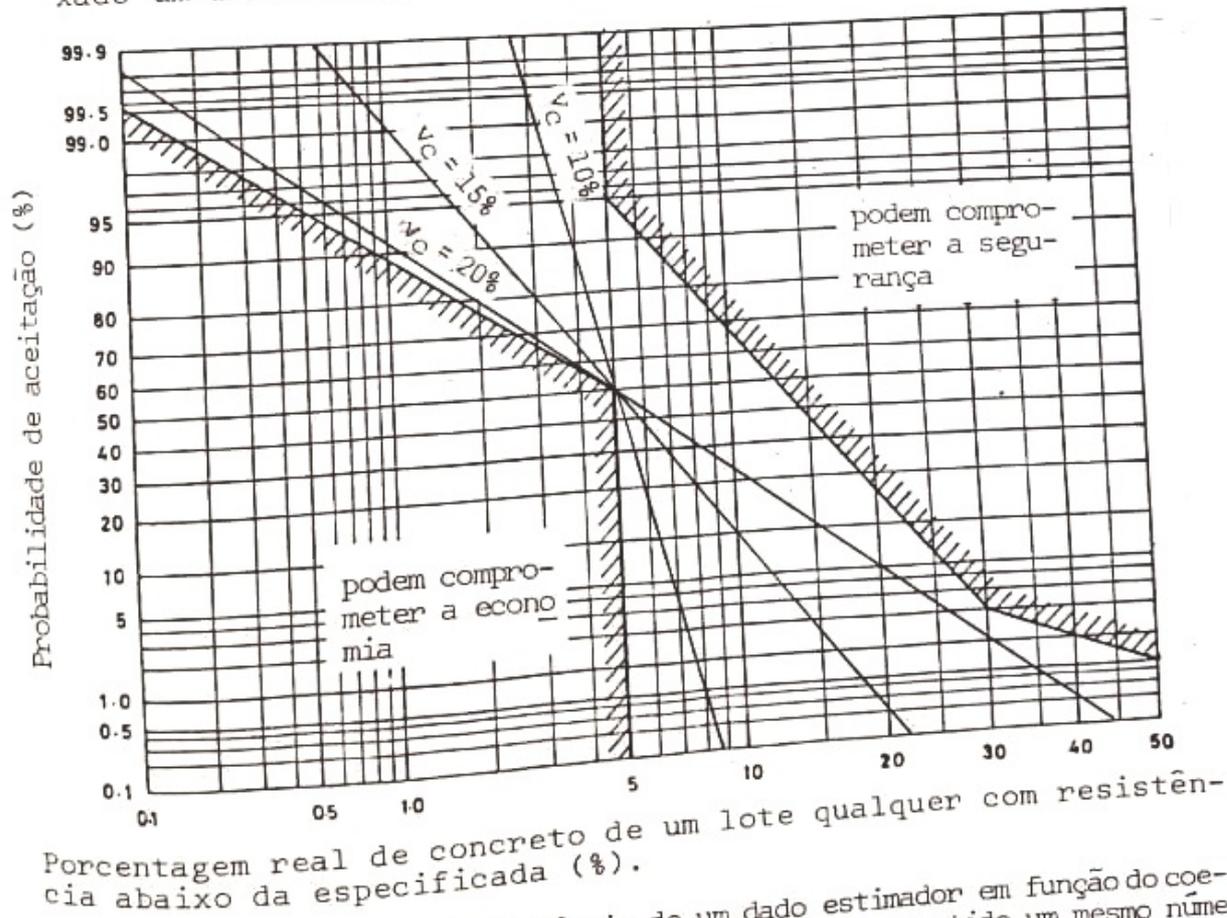


Fig. 5.2.6 - Alteração da eficiência de um dado estimador em função do coeficiente de variação do lote produzido, mantido um mesmo número  $n$  de exemplares da amostra.

A comissão mista CEB/CIB/FIP/RILEM, já citada, indica em suas recomendações o uso de estimadores do tipo clássico, onde se estima o valor da resistência característica a partir da fórmula:

$$f_{ckj,est} = f_{cmj} - \lambda \cdot s_c$$

onde:

$f_{ckj,est}$  = resistência característica estimada do concreto à compressão a j dias de idade;

$f_{cmj}$  = resistência média à compressão do concreto a j dias de idade, obtida dos n exemplares que compõe a amostra;

$\lambda$  = constante cujo valor depende do número n de exemplares e do quantil desejado. Normalmente para estimadores centrados pode-se adotar  $\lambda = 1,65$ , para  $n \rightarrow \infty$  e quantil de 5%. Quando o valor  $f_{ckj,est}$  é calculado a partir de uma amostra com número finito e às vezes até reduzido de exemplares, a constante  $\lambda$  pode ser substituída pelo t da distribuição de Student, ou pela introdução de um novo coeficiente que dá aproximadamente o valor do t de Student, a saber:

$$f_{ckj,est} = f_{cmj} - t \cdot s_c = f_{cmj} - 1,65 \cdot \sqrt{\frac{n+1}{n-1}} \cdot s_c$$

Esse procedimento era o adotado formalmente pela recomendação do ACI-214/65, já citada, e estava subentendido no texto da NB-1 (1960). Como se verá a seguir, esses critérios utilizados como recursos para resolver o problema de estimação a partir de pequenas amostras, não são os ideais. Há atualmente, métodos estatísticos especialmente desenvolvidos no final da década de 60 e início da de 70 que estimam diretamente o quantil de 5%<sup>(7)</sup>.

$s_c$  = desvio padrão obtido nos n exemplares da amostra segundo a fórmula:

(7) Cf. FUSCO, Péricles Brasiliense. Evolução dos conceitos de controle de concreto. São Paulo, Construção Pesada, fev. 1980. p. 55-8.

$$s_c = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (f_{cji} - f_{cmj})^2}{n-1}}$$

$f_{cji}$  = resistência à compressão, a  $j$  dias de idade, de um qualquer exemplar da amostra, sendo que  $i$  varia de 1 a  $n$ .

Esta fórmula tem o inconveniente de ser mais complexa que a atualmente recomendada pela NB-1 (1978) além de não evitar os eventuais erros por falta ou por excesso ocorridos em alguns exemplares da amostra, que poderiam aumentar exageradamente a estimativa de  $s_c$  e como consequência reduzir de modo significativo e indevido a estimativa da resistência característica  $f_{ckj,est}$ .

No caso de pequenas amostras, seria necessário utilizar os artifícios citados para estimar a resistência característica, já que uma boa estimativa do desvio padrão populacional,  $\sigma$ , a partir do desvio padrão amostral,  $s_c$ , só poderia ser feita com amostras, de um mesmo lote, compostas de um número elevado de exemplares.

Como se sabe o intervalo de confiança do desvio padrão populacional pode ser dado por:

$$s_c - \mu(\rho\%) \frac{s_c}{\sqrt{2(n-1)}} \leq \sigma \leq s_c + \mu(\rho\%) \frac{s_c}{\sqrt{2(n-1)}}$$

ou seja o erro relativo da estimativa de  $\sigma$  a partir de  $s_c$  é:

$$\frac{|s_c - \sigma|}{\sigma} \leq \frac{\mu(\rho\%)}{\sqrt{2(n-1)}}$$

Assim, impondo-se a condição de que com 90% de probabilidade o erro relativo da estimativa do desvio padrão populacional não supere 20%, tem-se:

$$\mu(90\%) = 1,645$$

$$\frac{|s_c - \sigma|}{\sigma} \leq \frac{1,645}{\sqrt{2(n-1)}} \leq 0,20$$

$\therefore n \geq 35$ , que define o tamanho mínimo da amostra para atender

a essa exigência.

No entanto esta precisão, quando a segurança da estrutura está em jogo, pode não ser considerada satisfatória, exigindo-se então amostras maiores, que permitam a aplicação pura e simples do estimador clássico, citado.

Continuando o raciocínio, se fosse exigido a mesma precisão para o erro relativo da estimativa da média  $\mu$  a partir de  $f_{cmj}$ , resultaria:

$$f_{cmj} - \mu (\rho\%) \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \leq \mu \leq f_{cmj} + \mu (\rho\%) \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

$$\frac{|f_{cmj} - \mu|}{\mu} \leq \frac{\mu (\rho\%) \cdot \sigma}{\sqrt{n} \mu} \leq 0,20$$

admitindo coeficiente de variação igual a 0,15 ter-se-ia:

$$n \geq 2 \text{ exemplares}$$

Note-se que neste caso está subentendido que se conhece o desvio padrão  $\sigma$  da população, o que nem sempre é possível, principalmente no caso de pequenos lotes onde uma amostra com número elevado de exemplares, que forneçam confiabilidade na estimativa de  $\sigma$  a partir de  $s_c$ , é inviável do ponto de vista prático e econômico.

Guedes e Souza<sup>(8)</sup> em 1978 através de complexo trabalho de simulações em computador, mostraram que apesar destas dificuldades conceituais este estimador clássico é bastante eficiente, conseguindo, na maioria dos casos, ter poder de discriminação superior ao estimador atualmente recomendado pela NB-1 (1978).

Nessa avaliação não foram considerados no entanto dois aspectos importantes:

- 19) O estimador clássico, não é um estimador operacional pois exige cálculos de desvio padrão e tabelas do tipo  $t$  de Student para consulta permanente;

(8) GUEDES, Quintiliano Mascarenhas & SOUZA, Miguel Oscar Leite. Estudo comparativo de duas funções características de operação do plano de inspeção por amostragem de lotes de concreto. São Paulo, Construção Pesada, nov. 1978. p. 84-100.

29) Também não leva em conta o fato muito comum da possibilidade de mistura de exemplares provenientes de centragens distintas em uma mesma amostra. Isso pode acarretar a rejeição de dois concretos bons já que ao serem analisados conjuntamente, tendo distintas médias, podem provocar um aumento indevido e aparente da variabilidade do processo de produção. Como veremos a seguir o estimador atualmente recomendado pela NB-1 (1978) não utiliza todos os resultados como o estimador clássico e sim somente a metade inferior. Este procedimento se coloca tanto a favor da segurança quanto ao lado da economia.

Foi provavelmente, considerando os fatores que influenciam a eficiência do estimador, as características de produção de concreto onde a média não permanece estacionária, a simplicidade de cálculo, o benefício econômico de uma avaliação a partir de amostra com número reduzido de exemplares e o risco de se efetuar uma estimativa falsa, que a comissão de redação da NB-1 (1978) estabeleceu três critérios simples, que devem ser atendidos simultaneamente, aumentando com isso a confiança no resultado estimado.

Estimador recomendado pela NB-1 (1978), capítulo 15:

- denominando-se  $f_{cj1} \leq f_{cj2} \leq f_{cj3} \dots \leq f_{cjn}$  os resultados ordenados da resistência à compressão axial dos  $n$  exemplares de uma amostra representativa de um lote, a resistência característica estimada à compressão do concreto deve atender simultaneamente a:

o maior entre:

$$f_{ckj,est} = 2 \cdot \frac{f_{cj1} + f_{cj2} + \dots + f_{cj} \left(\frac{n}{2} - 1\right)}{\frac{n}{2} - 1} - f_{cj} \left(\frac{n}{2}\right) \quad (I)$$

$$f_{ckj,est} = \psi_6 \cdot f_{cj1} \quad (II)$$

menor que:

$$f_{ckj,est} = 0,85 \cdot \frac{f_{cj1} + f_{cj2} + \dots + f_{cjn}}{n} \quad (III)$$

onde  $\psi_6$  assume os seguintes valores:

n	≤6	7	8	10	12	14	16	≥18
$\psi_6$	0,89	0,91	0,93	0,96	0,98	1,00	1,02	1,04

A fórmula (I) corresponde à de um estimador praticamente centrado na resistência característica real<sup>(9)</sup> e quando se tratar de lotes homogêneos sempre fornecerá resultados coerentes.

No entanto sempre que o concreto não tenha sido produzido em condições estacionárias ou que a população não seja normal, o estimador (I) pode fornecer resultados distorcidos. Para evitar tal distorção deve-se empregar também o estimador (II) que foi obtido com a propriedade de que a sua distribuição tenha a mediana coincidente com a resistência característica real do concreto.

O inconveniente que apresenta este estimador é a necessidade de que seja conhecido o coeficiente de variação  $v_c$  do processo de produção e ensaio do concreto para a correta fixação de  $\psi_6$ , conforme se mostra na tabela 5.2.7.

Número de exemplares da amostra	Coeficiente de variação $v_c$			
	0,10	0,15	0,20	0,25
6	0,953	0,924	0,890	0,850
7	0,962	0,938	0,910	0,877
8	0,970	0,951	0,928	0,900
10	0,983	0,972	0,958	0,942
12	0,993	0,989	0,984	0,976
14	1,002	1,004	1,005	1,008
16	1,009	1,016	1,024	1,035
18	1,016	1,027	1,041	1,059

Tabela 5.2.7 - Valores de  $\psi_6$  em função do coeficiente de variação do processo de produção e ensaio,  $v_c$ .

(9) COMISIÓN PERMANENTE DEL HORMIGÓN. Resistencia característica y control de calidad. Ministério de Obras Públicas, España, 1972.

Quando não se conhece o valor da variabilidade  $v_c$  da produção de concreto — situação aliás, muito frequente — pode-se adotar os seguintes valores:

$v_c = 0,10$  a  $0,20$  para concretos produzidos em obra por processos volumétricos; e,

$v_c = 0,08$  a  $0,15$  no caso de concretos produzidos por processos gravimétricos.

Portanto ao prevalecer este critério em concretos de pequena variabilidade, ou seja, em concretos de alta resistência e baixo desvio padrão, no momento em que se aplicar o estimador II com os coeficientes  $\psi_6$  recomendados pela NB-1 (1978) pode-se prejudicar a estimativa da resistência característica real desse concreto, como a seguir se mostra:

$f_{cjl} = 37$  MPa para  $v_c = 10\%$  e  $n = 6$  exemplares:

pela NB-1 (1978):  $f_{ckj,est} = 0,89 \cdot 37 = 33$  MPa

corretamente:  $f_{ckj,est} = 0,95 \cdot 37 = 35$  MPa

No entanto, apesar da aparente contradição, este estimador só prevalecerá ao indicado em (I) quando os resultados considerados contiverem informações falsas o que provavelmente acarretará uma variabilidade aparente superior a  $v_c = 20\%$ , sendo melhor portanto a estimativa feita a partir de II.

Por outro lado, os estimadores (I) e (II) abandonam os valores mais altos dos exemplares da amostra e portanto eliminam eventuais erros para mais cometidos durante as operações de ensaio e controle.

Finalmente, considerando que a variabilidade da produção de concreto está normalmente acima de  $10\%$ , a imposição (III) procura evitar que se aceite a partir do estimador (I), por eventual entrada de resultados não coerentes, concretos com coeficientes de variação  $v_c \leq 9\%$ . Esta limitação já existia na NB-1 de 1960, porém com o valor  $v_c \leq 12\%$ . Atualmente com a melhoria dos equipamentos, materiais e mão de obra, esse valor passou a ser excessivamente alto, freando inclusive o incentivo para a melhoria da uniformidade da produção. Parece lógico que tal

limitação deva alterar-se com o tempo refletindo a qualidade de produção alcançada em cada época.

No entanto esse limite é ainda hoje exagerado, apesar de ter apresentado evolução em relação ao anterior, na medida em que pune os concretos de elevada resistência média à compressão. A experiência tem demonstrado que justamente esses concretos são os produzidos com maior rigor, com menor dispersão. Por exemplo, não se admite pela NB-1 (1960), nem tampouco pela NB-1 (1978) que seja possível produzir concretos para  $f_{ckj} = 37,6$  MPa, com resistência média à compressão de  $f_{cmj} = 42,7$  MPa e desvio padrão de  $s_c = 3,3$  MPa, mesmo estando comprovado experimentalmente<sup>(10)</sup> ser isto possível. A tabela 5.2.8 indica os valores limites de resistência média máxima à compressão, tolerados pela NB-1 (1960) e NB-1 (1978) em função do desvio padrão do processo de produção e ensaio.

Desvio padrão do processo de produção e ensaio do concreto ( $s_c$ )	Resistência média máxima à compressão do concreto a partir da qual não se admite que seja possível produzir concretos com tal desvio padrão ( $f_{cmj}$ )	
	NB-1 (1960)	NB-1 (1978)
MPa	MPa	MPa
2,0	16,7	22,0
3,0	25,0	33,3
4,0	33,3	44,4
5,5	45,8	61,1
7,0	58,3	77,8

Tabela 5.2.8 - Valores limites de resistência média à compressão do concreto, em função do desvio padrão do processo de produção e ensaio. [restrições de Normas]

Essa restrição entra em conflito com o próprio texto da NB-1 (1978), capítulo 8, item 8.3.1.2, referente ao cálculo da resistência média inicial de dosagem. Por exemplo, supondo uma

(10) DANTAS, Francisco de Assis Souza. Aspectos do controle da execução de obra em concreto armado. São Paulo, Departamento de Engenharia de Construção Civil da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - EPUSP, 1979. Dissertação. p. 113.

obra com  $f_{ckj} = 45$  MPa e desvio padrão mínimo tolerado de 2,0 MPa, vem:

$$f_{cmj,d} = f_{ckj} + 1,65 \cdot s_d = 45 + 1,65 \cdot 2,0 = 48,3 \text{ MPa}$$

no entanto para atender ao estimador III, vem:

$$f_{cmj,d} \geq \frac{f_{ckj}}{0,85} = \frac{45}{0,85} = 52,9 \text{ MPa (!)}$$

De forma indireta o texto da NB-1 (1978), tal qual a NB-1 (1960), ainda recomenda que se diminua o rigor de produção dos concretos de alta resistência, aumentando intencionalmente sua dispersão. Esta colocação é frontalmente contra a economia.

O diagrama 5.2.9 mostra em linhas gerais o critério atual da estimativa da resistência característica do concreto à compressão segundo a NB-1 (1978).

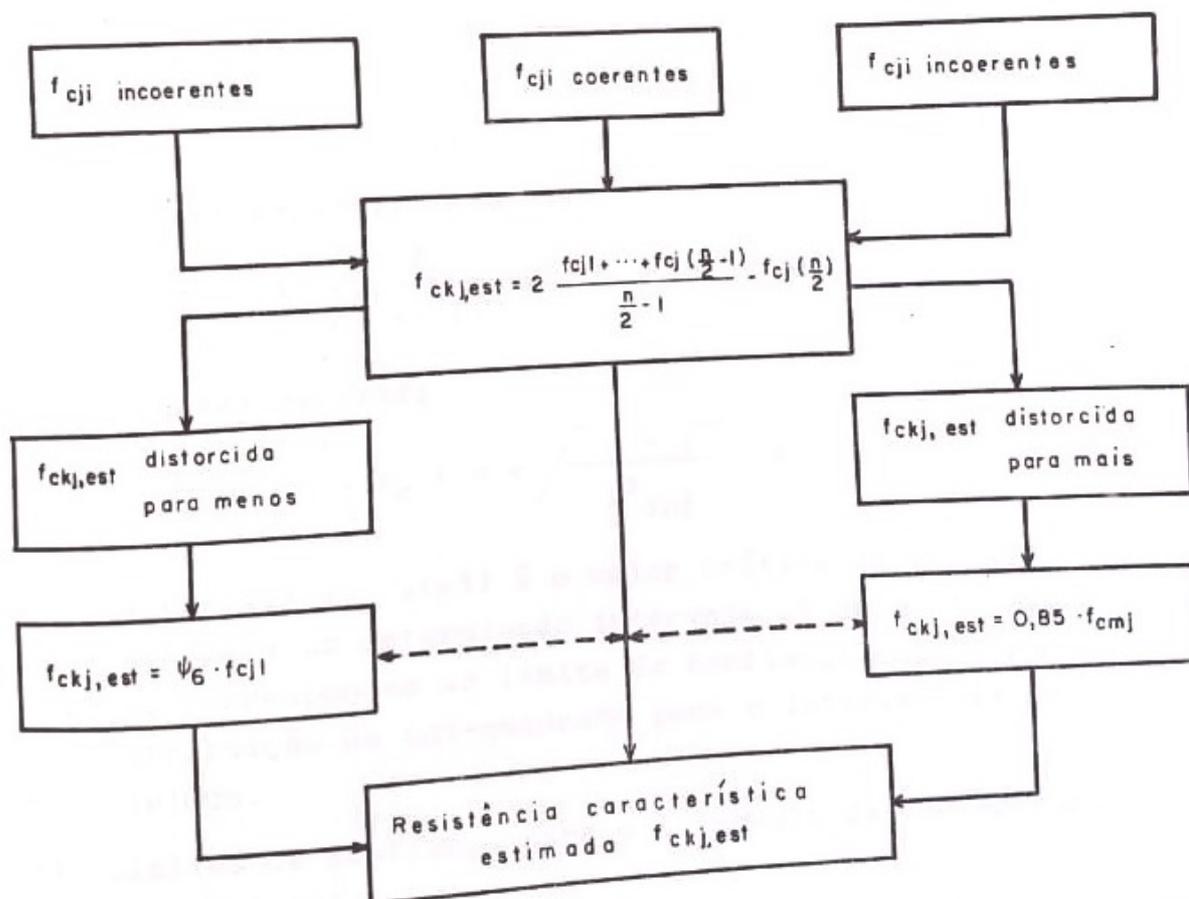


Diagrama 5.2.9 - Critério de estimativa da resistência característica do concreto à compressão segundo NB-1 (1978).

### 5.3 O problema da resistência média de dosagem

Todo produtor ao oferecer uma certa quantidade de concreto, corre o risco de vê-la rejeitada, mesmo que esta esteja absolutamente de acordo com o especificado. Esse risco será tanto menor, quanto mais acima da resistência exigida esteja a média e o valor característico de sua produção.

A cada lote ou partida homogênea de concreto produzido e submetido ao controle de aceitação, corresponderá uma amostra com  $n$  exemplares. Como o tamanho  $n$  da amostra jamais poderá atingir o tamanho  $n \rightarrow \infty$  da população correspondente, a média,  $f_{cmj}$ , e o desvio padrão,  $s_c$ , dos resultados serão sempre uma estimativa, mais ou menos precisa, da média,  $\mu$ , e do desvio padrão,  $\sigma$ , da população.

Os limites de confiança dos parâmetros populacionais  $\mu$  e  $\sigma$ , a partir do cálculo dos parâmetros amostrais  $f_{cmj}$  e  $s_c$ , para um dado intervalo  $\rho\%$  de confiança podem ser dados por:

a) Limites de confiança para o intervalo de variação do desvio padrão populacional:

a.1 *Grandes amostras* ( $n \geq 35$ ):

$$s_c - \mu(\rho\%) \frac{s_c}{\sqrt{2(n-1)}} \leq \sigma \leq s_c + \mu(\rho\%) \frac{s_c}{\sqrt{2(n-1)}}$$

a.2 *Pequenas amostras*

$$\sqrt{\frac{n-1}{\chi^2_{sup}}} \cdot s_c \leq \sigma \leq \sqrt{\frac{n-1}{\chi^2_{inf}}} \cdot s_c$$

Nestas expressões  $\mu(\rho\%)$  é o valor crítico da variável normal reduzida para um determinado intervalo  $\rho\%$  de confiança e  $\chi^2_{sup}$  e  $\chi^2_{inf}$  correspondem ao limite de confiança superior e inferior da distribuição de qui-quadrado para o intervalo  $\rho\%$  de confiança desejado.

b) Limites de confiança para o intervalo de variação da média populacional:

b.1 *Grandes amostras* ( $n \geq 35$ ):

$$f_{cmj} - \mu(\rho\%) \frac{s_c}{\sqrt{n}} \leq \mu \leq f_{cmj} + \mu(\rho\%) \frac{s_c}{\sqrt{n}}$$

## D.2 Pequenas amostras

$$f_{cmj} - t(\rho\%) \frac{s_c}{\sqrt{n}} \leq \mu \leq f_{cmj} + t(\rho\%) \frac{s_c}{\sqrt{n}}$$

onde  $t$  corresponde à variável da distribuição de Student.

Para efeitos de fixação da resistência média de dosagem,  $f_{cmj,d}$ , ou seja, a resistência média com a qual se pretende assegurar o  $f_{ckj}$  especificado no projeto estrutural, a NB-1 (1978), recomenda que seja empregado o limite superior do desvio padrão populacional com os seguintes graus de confiança:

19) Para grandes amostras:  $\rho\% = 95\%$

29) Para pequenas amostras:  $\rho\% = 90\%$

Esse valor, denominado desvio padrão de dosagem  $s_d$ , é então utilizado no cálculo da resistência média de dosagem:

$$f_{cmj,d} = f_{ckj} + 1,65 \cdot s_d$$

Na Norma, por simplificação o limite superior:

$$\sigma \leq s_c + \mu(\rho\%) \frac{s_c}{\sqrt{2(n-1)}} \quad \text{grandes amostras ou}$$

$$\sigma \leq \sqrt{\frac{n-1}{\chi^2_{inf}}} \cdot s_c \quad \text{pequenas amostras}$$

é apresentado como

$$\sigma \leq k_n \cdot s_n$$

Na tabela 5.3.1 estão relacionados os valores limites de confiança do desvio padrão.

Tabela 5.3.1 Valores limites de confiança do desvio padrão

Pequenas amostras ( $\rho = 90\%$ )			Grandes amostras ( $\rho = 95\%$ )	
Número (n) de exemplares	Limite inferior ( $-k_n$ )	limite superior ( $+k_n$ )	Número (n) de exemplares	Limite inferior e superior ( $\pm k_n$ )
4	0,52	2,92	30	1.26
5	0,65	2,37	31	1.25
6	0,67	2,09	32	1.25
7	0,69	1,91	33	1.25
8	0,71	1,80	34	1.24
9	0,72	1,71	35	1.24
10	0,73	1,64	36	1.23
11	0,74	1,59	37	1.23
12	0,75	1,55	38	1.23
13	0,76	1,52	39	1.23
14	0,76	1,49	40	1.22
15	0,77	1,46	45	1.21
16	0,78	1,44	50	1.20
17	0,78	1,42		
18	0,79	1,40	55	1.19
19	0,79	1,38	60	1.18
20	0,79	1,37	65	1.17
21	0,80	1,35	70	1.17
22	0,80	1,35	75	1.16
23	0,81	1,34	80	1.16
24	0,81	1,33		
25	0,81	1,32	90	1.15
26	0,81	1,31	100	1.14
27	0,82	1,30		
28	0,82	1,29	150	1.11
29	0,82	1,29	200	1.10
30	0,83	1,28	500	1.06
31	0,83	1,27	1000	1.04
32	0,83	1,27	2000	1.03
33	0,83	1,26	$\infty$	1.00
34	0,83	1,26		
35	0,84	1,25		

Assim como na NB-1 (1960) o texto atual da NB-1 (1978) permite dois processos de dosagem. A dosagem *empírica* ou não experimental e a dosagem *experimental*.

Na *dosagem empírica*, o traço de concreto a ser produzido, para alcançar uma resistência característica mínima  $f_{ckj} \geq 0,9$  MPa, é projetado arbitrariamente com base na experiência acumulada do produtor, em proporcionamentos anteriores com os mesmos materiais que vai utilizar.

É comum, tanto laboratórios regionais como grandes produtores de concreto disporem de valores médios tabelados, estatisticamente tratados e, portanto fiáveis, das características médias dos materiais de emprego frequente, assim como daqueles valores das proporções que interessam a um estudo de dosagem, tais como: % água/materiais secos, teor de argamassa, fator água/cimento vs resistência, etc.

Com estes precedentes a NB-1 (1978) admite a dosagem *empírica* ou não experimental para obras de pequeno vulto, desde que atendidas as seguintes condições:

"... a resistência característica para o cálculo será  $f_{ck} \leq 9,0$  MPa ( $\sim 90 \text{ kgf/cm}^2$ )".<sup>(11)</sup> — o que corresponde à fixação do valor máximo de projeto e valor mínimo de resistência característica real no concreto produzido.

- "... a) a quantidade mínima de cimento por metro cúbico de concreto será de 300kg;
- b) a proporção de agregado miúdo no volume total do agregado será fixada de maneira a obter-se um concreto de trabalhabilidade adequada a seu emprego, devendo estar entre 30% e 50%;
- c) a quantidade de água será a mínima compatível com a trabalhabilidade necessária."<sup>(12)</sup>

Nos concretos dosados empiricamente, a NB-1 (1978), dispensa o controle da produção pelo controle da resistência. Por razões de economia e segurança, no entanto, este controle será sempre

(11) Op. cit., capítulo 5, item 5.2.1.1.

(12) Op. cit., capítulo 8, item 8.3.2.

uma prática recomendável. O concreto para um grande volume de obras, ditas de menor responsabilidade, ainda é dosado empiricamente e o rompimento de um reduzido número de corpos de prova pode significar um melhor aproveitamento do material empregado e uma segurança de que a resistência, embora medíocre, está sendo alcançada. O valor  $f_{ckj} = 9,0$  MPa corresponde a valores médios em torno de 20 MPa, que podem não estar sendo alcançados. O rompimento de 3 séries de 2 corpos de prova, em traços mais ricos e mais pobres que o obtido empiricamente, pode permitir também uma razoável correlação de resistência e fator água/cimento.

No desenvolvimento de uma *dosagem experimental*, são normalmente realizadas experiências e ensaios tecnológicos de resistência, com diferentes alternativas de proporcionamento para o traço de concreto, antes do mesmo ser entregue à produção, daí sua denominação de *dosagem experimental*.

Como supõe ensaios prévios de qualificação dos materiais que serão utilizados, resulta da *dosagem experimental* um traço singular: especificamente projetado para aqueles materiais e para o atendimento das exigências de trabalhabilidade, resistência e durabilidade do concreto a ser produzido.

A *dosagem experimental* poderá ser conduzida por qualquer método desde que o mesmo esteja baseado na correlação entre a resistência à compressão e durabilidade do concreto e a relação água/cimento, levando-se em conta, necessariamente, a trabalhabilidade desejada.

Na *dosagem experimental* o traço de concreto a ser produzido é formulado para alcançar uma resistência média  $f_{cmj,d}$ , — a resistência de dosagem, — que assegure, com margem de segurança, a resistência característica,  $f_{ckj}$ , especificada no projeto. Portanto, por definição, a resistência de dosagem será:

$$f_{cmj,d} = f_{ckj} + 1,65 \cdot s_d$$

onde  $s_d$  é o desvio padrão, assumido para efeitos de dosagem, que contém, com razoável garantia, a margem de segurança para a realização da resistência  $f_{ckj}$  especificada. Desta forma a determinação do valor da resistência média de dosagem fica re-

duzida à determinação do desvio padrão ajustado à previsível variabilidade da resistência, provocada pelo processo de produção e ensaio a ser conduzido.

Como já foi visto, esta variabilidade da resistência, expressa em termos de desvios padrões amostrais, é consequência da variabilidade de proporcionamentos dos materiais na mistura, principalmente da proporção água/cimento, da heterogeneidade intrínseca da própria amassada e das discrepâncias inevitáveis durante a moldagem, o adensamento e a cura dos corpos de prova.

Nada impede, entretanto, que *dosagens iniciais* estejam baseadas em valores cautelosos de desvios padrões, precedentes de experiências anteriores, ainda que o mais adequado, seja, sempre que possível, a determinação experimental da variabilidade no canteiro de produção.

Estas duas alternativas para avaliar o desvio padrão da produção para efeitos do estudo de dosagem estão previstas na NB-1 (1978) a partir de valores consagrados, correspondentes aos três padrões de qualidade da execução ou a partir da determinação por via experimental na própria obra em andamento, ou em obra equivalente do mesmo produtor.

No primeiro caso, e apenas para efeitos de *dosagem inicial*, dispõe-se de três valores tradicionais de desvio padrão. Estes três valores, ditados pela experiência e referendados por normas congêneres, estão correlacionados aos padrões de qualidade segundo os quais se pretende executar a produção do concreto em obra.

São os seguintes os valores recomendados pelo texto da NB-1 (1978):

$$- \sigma_d = 4,0 \text{ MPa e } \sigma_{cmj,d} = \sigma_{ckj} + 6,60 \text{ (MPa)}$$

Quando houver assistência de profissional legalmente habilitado, especializado em tecnologia do concreto, todos os materiais forem medidos em peso, corrigindo-se as quantidades de agregado miúdo e de água em função de determinações frequentes e precisas do teor de umidade dos agregados, e houver garantia de manu-

tenção, no decorrer da obra, da homogeneidade dos materiais a serem empregados.

$$s_d = 5,5 \text{ MPa e } f_{cmj,d} = f_{ckj} + 9,1 \text{ (MPa)}$$

Quando houver assistência de profissional legalmente habilitado, especializado em tecnologia do concreto, o cimento for medido em peso e os agregados em volume, e houver medidor de água, com correção do volume do agregado miúdo e da quantidade de água em função de determinações frequentes e precisas do teor de umidade dos agregados.

$$s_d = 7,0 \text{ MPa e } f_{cmj,d} = f_{ckj} + 11,6 \text{ (MPa)}$$

Quando o cimento for medido em peso e os agregados em volume, e houver medidor de água, corrigindo-se a quantidade de água em função da umidade dos agregados simplesmente estimada."(13)

A determinação experimental do desvio padrão para efeitos de formulação, ou reformulação, de dosagens poderá ser conduzido sobre resultados de ensaios obtidos na obra, com a produção em andamento, ou em obra equivalente. Por obra equivalente entender-se-á aquela que emprega a mesma matéria prima, disponha de mesmo equipamento e adote a mesma organização e controle de qualidade.

No entanto, a consideração muito importante para a adequação, inclusive, do procedimento a ser conduzido na determinação experimental do desvio padrão de dosagens,  $s_d$ , é que, por regra de decisão, a NB-1 (1978) somente aceita como avaliação justa do mesmo, o valor limite extremo superior do intervalo de confiança do desvio padrão populacional, inferido a partir da amostra ensaiada, ou seja, aquele valor que, tratando-se de uma grande ( $n \geq 35$ ) ou pequena amostra, tem uma probabilidade respectivamente de 2,5% e 5% em ser desmentido.

(13) Op. cit., capítulo 8, item 8.3.1.2.

Com esta regra, a NB-1 (1978) está declarando a impossibilidade de ser aceito o desvio padrão da amostra,  $s_c$ , como estimativa suficientemente precisa do desvio padrão do universo  $\sigma$ , mesmo para amostras tão grandes quanto a de 200 exemplares.

Provavelmente, assim procedendo estará a Norma, enquanto julga ainda oportuno, tentando o aproveitamento do controle da variabilidade para assegurar uma resistência  $f_{ckj}$  com maiores probabilidades de aceitação. O valor de  $s_c$ , obtido sobre uma primeira amostra, ratificará a dosagem formulada, ou a retificará, ainda oportunamente, para novas partidas de produção.

Ocorre que a avaliação sobre pequenas amostras poderá conduzir a valores exagerados de  $s_c$ , devidos à imprecisão na estimativa da variabilidade da produção. Serão necessárias grandes amostras para uma determinação razoável de um valor limite extremo superior que compatibilize com a hipótese formulada na dosagem inicial.

As necessidades de formação de amostras razoavelmente grandes e de obtenção de resultados retificadores ainda oportunos são, praticamente, contraditórias.

Para resolver a primeira necessidade, na tentativa de ampliar a amostra pode-se aproveitar os resultados de todos os ensaios efetuados em uma obra.

No controle da uniformidade, ou da variabilidade da resistência, examina-se, a cada nova amostra, as flutuações dos desvios padrões amostrais, em relação a valores limites de um intervalo de confiança do correspondente desvio padrão populacional, conforme indicado na carta ou gráfico do desvio padrão, capítulo IV, item 4.3.

O aproveitamento somatório de resultados de várias pequenas amostras subsequentes, desde que pertençam todas a uma mesma produção é outro recurso para a obtenção de um valor razoável de  $s_c$ . Nestes casos, devem seus resultados parciais somarem-se ponderadamente, conforme a expressão:

$$s_c^2 = \frac{s_{c1}^2 (n_1 - 1) + s_{c2}^2 (n_2 - 1) + s_{c3}^2 (n_3 - 1)}{(n_1 - 1) + (n_2 - 1) + (n_3 - 1)}$$

A intenção de capitalizar os resultados, obtidos sobre amostras de tamanho compatível a uma avaliação aproveitável de  $s_c$ , para efeitos de reavaliação ou retificação de dosagem inicial, conduz diretamente, ao emprego dos ensaios acelerados. Esta medida, enquanto não estiver assegurada a aceitação dos resultados de ensaios acelerados também para o controle de aceitação, obrigará à confecção de dois pares de corpos de prova. O par ensaiado na idade prescrita confirmará a correlação adotada provisoriamente com os ensaios acelerados.

A reformulação do traço com vistas à economia de material, tradicional recompensa pelo controle de qualidade efetivo em todas as frentes, somente estará ao alcance do produtor quando sucessivas amostras confirmarem constância do desvio padrão, juntamente com resultados satisfatórios de  $f_{ckj,est}$ .

Suponhamos então uma situação onde se conheça o desvio padrão de um processo de produção. Esse parâmetro segundo McIntosh<sup>(14)</sup> é particular de cada processo, podendo ser obtido com confiança em grandes produções de concreto, do tipo centrais estacionárias de produção.

Nessas circunstâncias a resistência média inicial de dosagem, que em última instância é o parâmetro que define o proporcionamento, isto é, o traço dos materiais constituintes de uma mistura, pode ser dada por:

$$f_{cmj,d} = f_{ckj} + 1,65 \cdot s_c, \text{ onde } s_c = \text{desvio padrão avaliado através de amostras representativas.}$$

Nessas circunstâncias o produtor estaria, pelo menos teoricamente, fornecendo um concreto *estritamente conforme* com o especificado no projeto estrutural. No entanto poderia ter rejeitado seu concreto *uma* em cada duas vezes que apresenta-se ao controle de aceitação conforme recomendado pela NB-1 (1978).

Admitindo que esse risco seja muito elevado, qual seria então a resistência média a ser produzida de tal forma que fosse au-

(14) McINTOSH, J. D. Concrete and statistics. London, CR Books Limited, 1963.

mentada essa probabilidade de aceitação? Por exemplo, passar dos 50% atuais para 80%?

A *Comisión Permanente del Hormigón*<sup>(15)</sup>, com vistas a esse problema construiu as curvas de eficiência do estimador (I), a saber:

$$f_{ckj,est} = 2 \frac{f_{cj1} + f_{cj2} + \dots + f_{cj} \left(\frac{n}{2} - 1\right)}{\frac{n}{2} - 1} - f_{cj} \frac{n}{2} \quad (I)$$

conforme se mostra nas figuras 5.3.2, 5.3.3 e 5.3.4.

Nessas figuras estão indicados no eixo das abcissas a relação entre a resistência real,  $f_{ckj,real}$ , de uma população homogênea com diferentes coeficientes de variação,  $\delta$ , e a resistência característica,  $f_{ckj}$ , especificada no projeto estrutural. No eixo das ordenadas, usando papel de probabilidade, está indicada a probabilidade de aceitação de um lote com aquela resistência característica real,  $f_{ckj,real}$ . Por exemplo, tomando-se o gráfico 5.3.3, e considerando um certo lote de concreto com  $f_{ckj,real}$  igual a 17,6 MPa ( $\sim 176 \text{ kgf/cm}^2$ ). Se no projeto estrutural estivesse especificado  $f_{ckj} = 16 \text{ MPa}$  ( $\sim 160 \text{ kgf/cm}^2$ ) e o coeficiente de variação  $\delta = \frac{\sigma}{\mu}$  dessa produção fosse igual a 0,15, ao se retirar dessa população uma amostra composta de 12 exemplares aleatórios, haveria 80% de probabilidade de aceitação desse lote, ou seja, *quatro* de cada *cinco* vezes o concreto seria *aceito*.

Portanto quando o texto da NB-1 (1978)<sup>(16)</sup> recomenda que se majore com  $k_n$  o desvio padrão obtido dos resultados disponíveis da mesma obra ou obra semelhante, para fins do cálculo do desvio padrão de dosagem ( $s_d$ ), ela está nada mais, nada menos, que elevando propositalmente a resistência média de dosagem  $f_{cmj,d}$ , e com isto aumentando a probabilidade de aceitação do concreto assim produzido.

Quando um produtor de concreto desejar que seu produto seja aceito, por exemplo, 80% das vezes que seja submetido a um controle de aceitação, ele deverá utilizar-se das figuras 5.3.2,

(15) Resistencia característica y control de calidad. Ministério de Obras Públicas, España, 1972.

(16) Op. cit., capítulo 8, item 8.3.1.2.

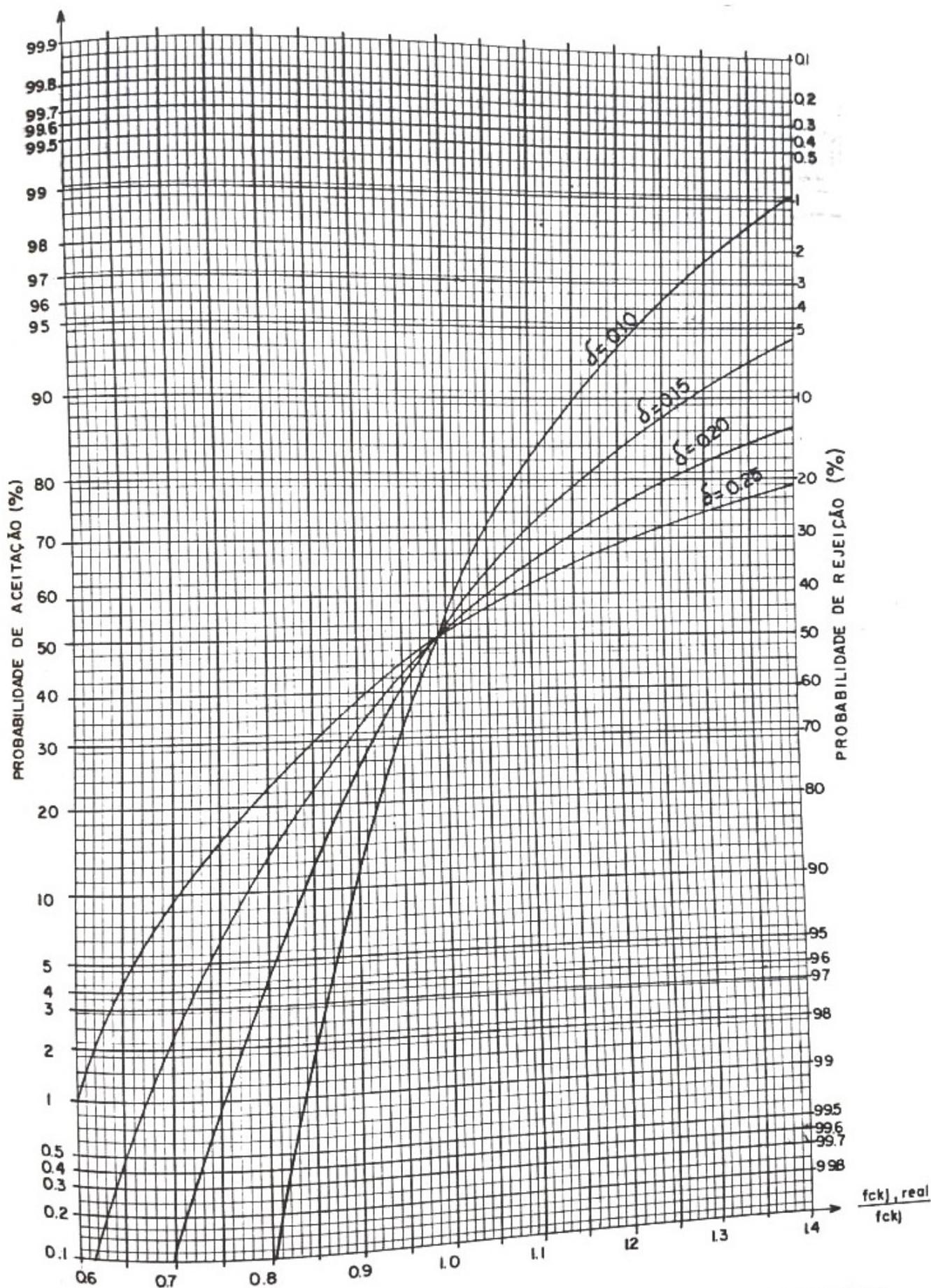


Fig. 5.3.2 - Curva de eficiência do estimador I para amostra com  $n = 6$  exemplares

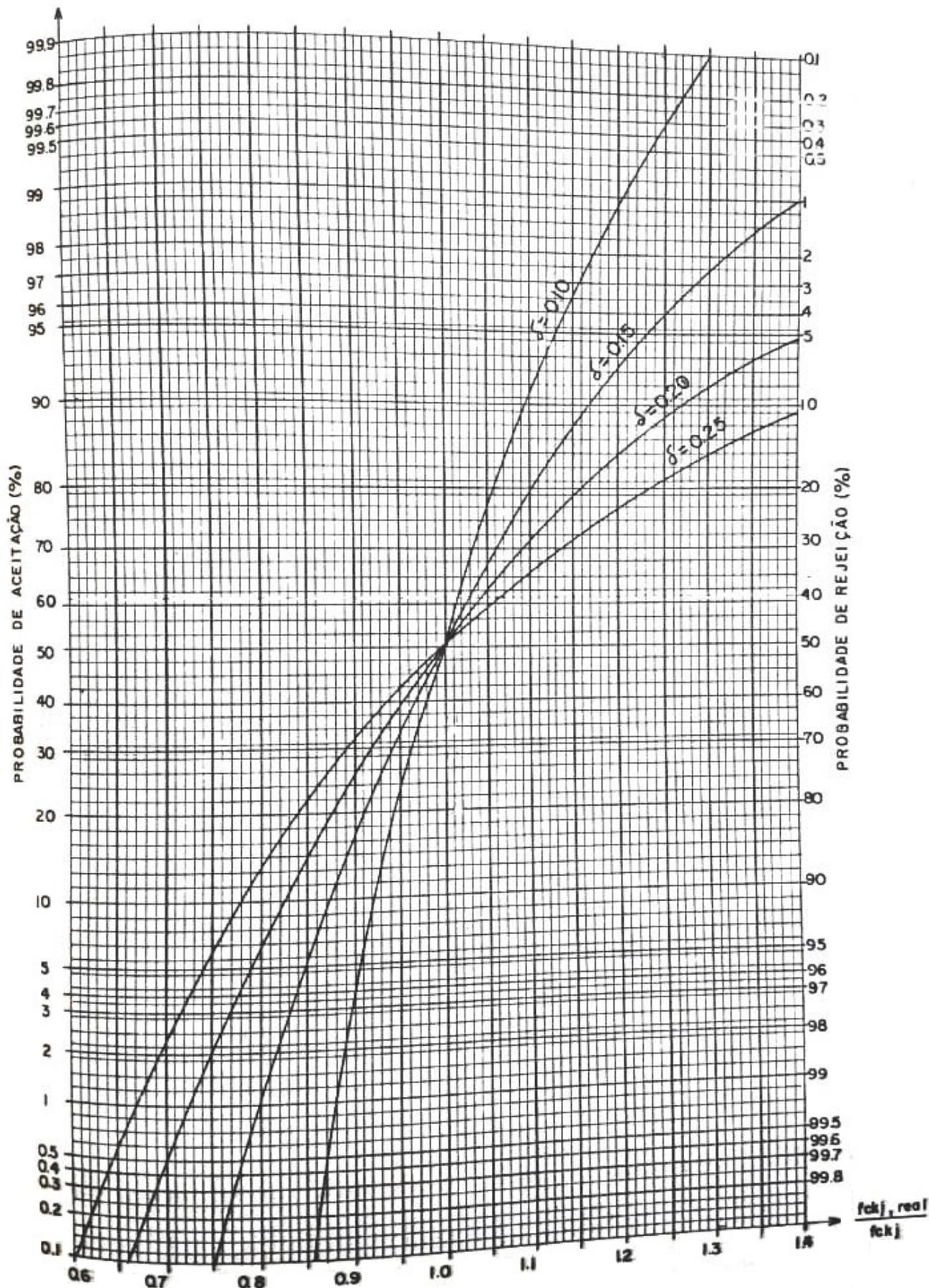


Fig. 5.3.3 - Curva de eficiência do estimador I para amostra com  $n = 12$  exemplares.

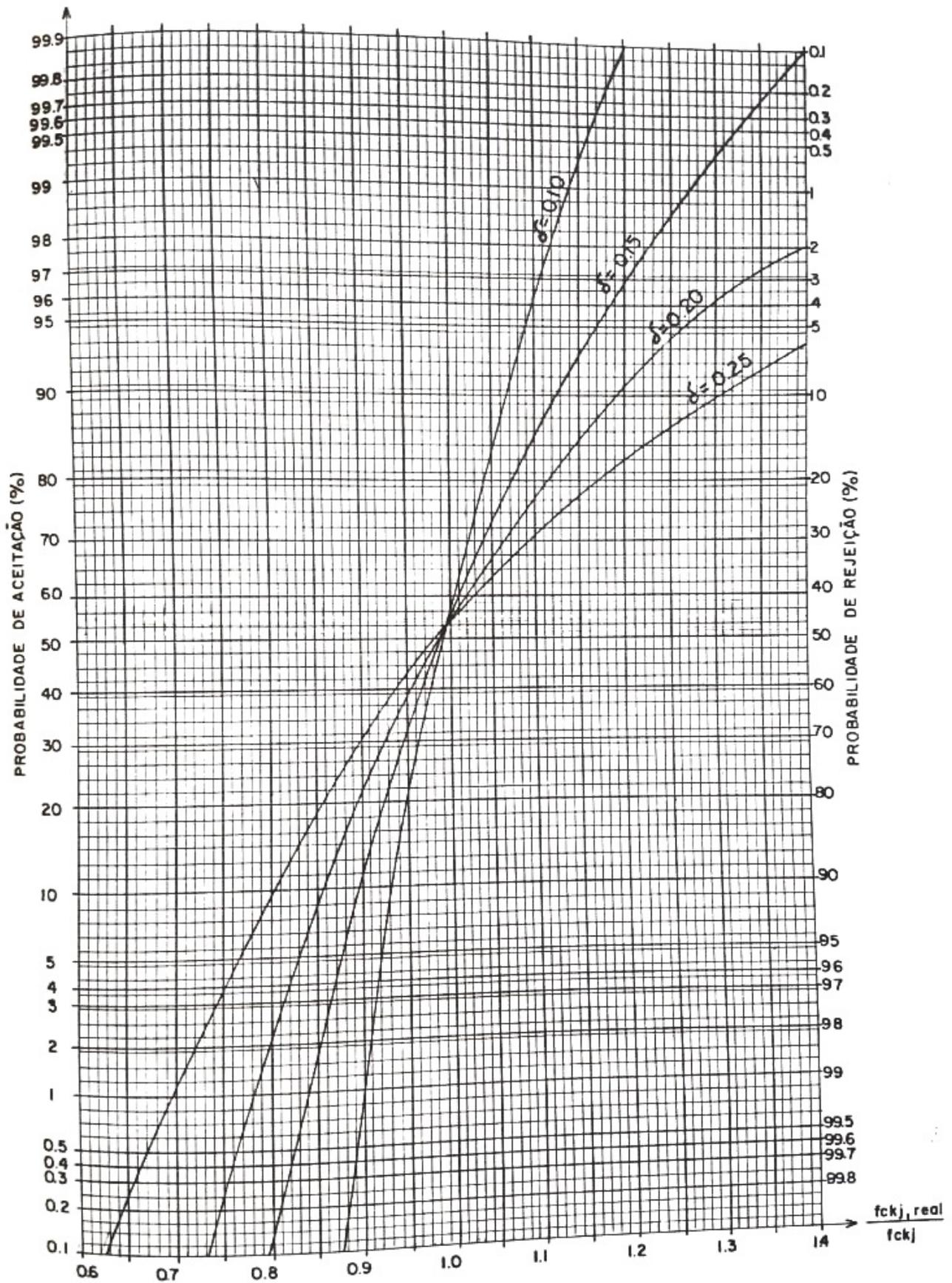


Fig. 5.3.4 - Curva de eficiência do estimador I para amostra com  $n = 18$  exemplares.

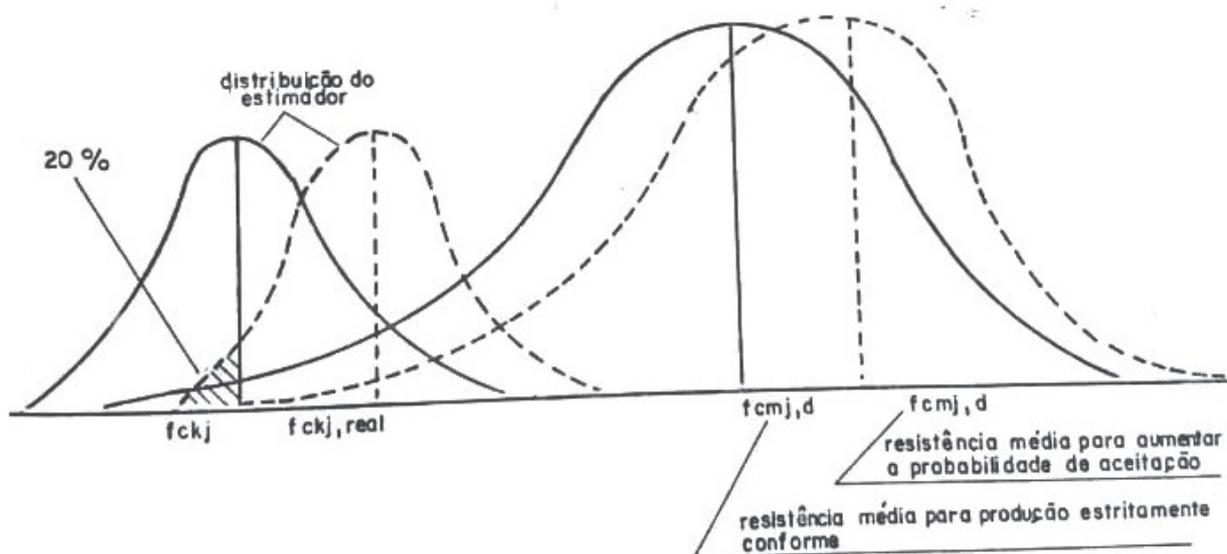
5.3.3 e 5.3.4, conforme o seguinte exemplo:

Sabe-se que:

- $f_{ckj} \geq 18,0$  MPa ( $\sim 180$  kgf/cm<sup>2</sup>)
- $\gamma_c = 1,4$
- o concreto será julgado por lotes de 100m<sup>3</sup> com amostras de 6, 12 ou 18 exemplares.
- o coeficiente de variação  $v_c$  para concretos desse nível de resistência e com os processos e controles disponíveis é 10%.

Deseja-se:

Saber qual a resistência média inicial de dosagem  $f_{cmj,d}$  para que haja 80% de probabilidade de aceitação do concreto, conforme esquema abaixo:



Solução:

a) Entrando nas figuras 5.3.2, 5.3.3 e 5.3.4, com 80% de probabilidade de aceitação, para controle efetuado com:

amostra composta com 6 exemplares vem:  $f_{ckj,real}/f_{ckj} = 1,09$

amostra composta com 12 exemplares vem:  $f_{ckj,real}/f_{ckj} = 1,06$

amostra composta com 18 exemplares vem:  $f_{ckj,real}/f_{ckj} = 1,04$

b) Devemos produzir concretos com resistência característica

real de:

se a amostra terá 6 exemplares:

$$f_{ckj,real} = 19,6 \text{ MPa } (\sim 196 \text{ kgf/cm}^2)$$

se a amostra terá 12 exemplares:

$$f_{ckj,real} = 19,1 \text{ MPa } (\sim 191 \text{ kgf/cm}^2)$$

se a amostra terá 18 exemplares:

$$f_{ckj,real} = 18,7 \text{ MPa } (\sim 187 \text{ kgf/cm}^2)$$

c) Resistência média com a qual deve ser produzido o concreto em obra:

para controle de aceitação com amostra de 6 exemplares:

$$f_{cmj,d} = f_{ckj,real} (1 - 1,65 \cdot v_c) = 23,5 \text{ MPa } (\sim 235 \text{ kgf/cm}^2)$$

para controle de aceitação com amostra de 12 exemplares:

$$f_{cmj,d} = f_{ckj,real} (1 - 1,65 \cdot v_c) = 22,9 \text{ MPa } (\sim 229 \text{ kgf/cm}^2)$$

para controle de aceitação com amostra de 18 exemplares:

$$f_{cmj,d} = f_{ckj,real} (1 - 1,65 \cdot v_c) = 22,4 \text{ MPa } (\sim 224 \text{ kgf/cm}^2)$$

Considerando o fato já consagrado e usual de que a cada redução de 1,0 MPa ( $\sim 10 \text{ kgf/cm}^2$ ) na resistência média corresponde uma redução de 6kg de cimento por metro cúbico de concreto, tem-se neste exemplo uma redução desta ordem, pelo simples fato de aumentar o número de exemplares da amostra que servirá para julgar a qualidade do concreto de cada lote.

Essa é apenas uma pequena prova de que em muitos casos o aumento do rigor das operações de controle pode, desde que inteligentemente aproveitado, contribuir para a redução dos custos totais.

#### 5.4 A frequência de constatação da qualidade

O controle sistemático de aceitação do concreto pela NB-1 (1978), capítulo 15, referente a um lote homogêneo de material, admite três índices de amostragem que definem em última instância a frequência de constatação da qualidade.

reduzido: amostra com seis exemplares;  
normal: amostra com doze exemplares;  
rigoroso: amostra com dezoito exemplares.

Inicia-se geralmente o controle retirando amostras com doze exemplares que correspondem ao índice normal de amostragem. O índice será mantido ou alterado no prosseguimento da produção de acordo com as indicações do quadro 5.4.1.

Valor estimado da resistência característica	Índice de amostragem empregado no lote em exame		
	Reduzido (n = 6)	Normal (n=12)	Rigoroso (n = 18)
	Índice a adotar no lote seguinte		
$f_{ckj,est} \geq 1,1 f_{ckj}$	manter o reduzido	passar para o reduzido +	passar para o normal +
$1,1 f_{ckj} > f_{ckj,est} \geq f_{ckj}$	passar para o normal +	manter o normal	passar para o normal +
$f_{ckj,est} < f_{ckj}$	passar para o normal +	passar para o rigoroso +	manter o rigoroso

Quadro 5.4.1 - Índices de amostragem para controle sistemático de aceitação do concreto.

Este critério, quando se trata de ensaios efetuados a baixa idade, é bastante interessante pois à medida em que o concreto produzido tenha resistência acima da especificada, é permitida a redução do ritmo de controle, com natural benefício econômico.

Por outro lado, à proporção que a resistência característica estimada se aproxima do mínimo especificado, o controle é intensificado com o objetivo de melhor identificar as causas de variação e estimar a resistência característica do concreto de forma mais precisa.

Na realidade, resulta mais prático manter um só índice de amostragem, por exemplo o normal e, ao invés de reduzir ou aumen-

tar a frequência de controle, alterar o traço de concreto para mais rico ou mais pobre. Normalmente este teve como referência de dosagem inicial valores aproximados que necessitam ser corrigidos e atualizados durante a produção, adequando-se à qualidade dos materiais, equipamentos e mão de obra locais.

No caso de controle assistemático a amostra deverá ser composta de pelo menos 6 exemplares sendo no mínimo um por semana e para cada  $30m^3$  de concreto.

Em casos especiais de pequenos volumes de até  $6m^3$ , fabricados em condições homogêneas, a amostra poderá compor-se de menos de 6 exemplares, no mínimo um, sendo que será adotado nestes casos somente o estimador II, fazendo-se  $\psi_6 = 0,89$ .

No caso de se tratar de resultado de apenas uma amassada, não há necessidade de multiplicar por coeficiente nenhum, visto ser uma amassada, betonada ou caminhão betoneira, a menor unidade de produto, convencionada para fins de controle.

## CONCLUSÃO

Como vimos, a utilização das técnicas de controle de qualidade para o controle da resistência do concreto auxiliou e tem auxiliado o aprimoramento da forma de considerar a variabilidade do comportamento dos materiais nos métodos de introdução da segurança no projeto das estruturas.

A evolução ocorrida no texto das normas brasileiras para projeto e execução de estruturas de concreto armado, além de tecnicamente mais coerente, incentivou também a busca do aprimoramento da qualidade da produção de concreto, na medida em que como recompensa permite a economia de materiais na dosagem, sem prejuízo da segurança.

Como sugestão, caberia ainda substituir algumas das incertezas e desconhecimentos ainda presentes no projeto estrutural, incluídos em apenas dois coeficientes de ponderação, por distribuições estatísticas que também incentivassem — do ponto de vista econômico — a melhoria da qualidade da execução. Por exemplo, metodologia semelhante à analisada nesta dissertação, poderia e certamente será aplicada ao controle das variações dimensionais e posições relativas de formas e armaduras assim como o controle das ações que atuam na estrutura durante sua construção e após seu término.

Mostrou-se no capítulo II a diferença entre o controle de produção e o controle de aceitação do concreto. A nosso ver isso ainda é grande motivo de enganos na aplicação das técnicas de controle levando alguns profissionais à não utilização de todas as informações normalmente obtidas de um controle eficiente.

A pragmática de controle de qualidade do concreto, descrita, criticada e sugerida nos capítulos III, IV e V, não pretende esgotar o assunto mas tão somente ressaltar alguns pontos nem sempre claros. Muito há ainda por ser feito, devido à multiplicidade e complexidade das variáveis envolvidas. E, por serem de natureza aleatória, imperioso se torna o tratamento estatístico dos fenômenos a partir de pesquisas e levantamen-

tos orientados.

O controle de produção do concreto por exemplo, é variável com a natureza da produção. Não podem ser os mesmos, os critérios adotados num canteiro de obras de edificação — onde a produção é em média de  $10\text{m}^3/\text{dia}$  — em relação ao canteiro de uma barragem de gravidade em concreto onde a produção chega aos  $5000\text{m}^3$  diários. Além disso os próprios critérios de segurança podem, — e efetivamente são — diferentes para cada caso. Neste trabalho procurou-se mostrar a interação projeto ( $f_{ckj}$ )/laboratório ( $f_{cmj,d}$ )/canteiro ( $f_{ckj,est}$ ), nos casos gerais de obras em concreto onde certas hipóteses foram assumidas. Por exemplo está claro que o controle de aceitação se refere a elementos onde a ruptura pode se dar em uma seção, envolvendo portanto um pequeno volume de concreto. Não é o caso de ruptura de grandes massas onde talvez, desde que se prove não ser um fenômeno progressivo, não haverá interesse em valores característicos, singulares, mas tão somente em valores médios.

Acreditamos que o controle de produção de concreto ora sugerido pela NB-1 (1978) teria melhor resultado com a mudança da variável de controle. Por exemplo poderia ser adotada como variável de controle o fator água/cimento, a consistência, a densidade ou até mesmo todas elas em conjunto. O sistema nesse caso poderia ser do tipo controle por atributos associado a um determinado nível de confiança. Desta forma a intervenção e correção do processo de produção seria mais efetiva e imediata. Sabe-se que atualmente alguns laboratórios de controle utilizam estas variáveis, porém ainda o fazem de maneira desordenada, às vezes até encarecendo o controle sem proveito dos resultados obtidos. Uma pesquisa sistemática poderia fornecer valiosos subsídios para tal empreendimento.

O texto atual da NB-1 (1978) veio trazer importantes simplificações e benefícios para o controle de aceitação do concreto, passe as ainda pequenas deficiências levantadas e comentadas nesta dissertação.

Acreditamos que somente com a divulgação e o exercício dessas novas técnicas de controle colocadas à disposição do setor é que o controle de qualidade poderá estender-se a todas as etapas de uma construção, desempenhando seu importante papel de instrumento de conhecimento e avaliação do produto fabricado.

As técnicas de controle de qualidade, desde que estendidas a todos os elementos e componentes construtivos poderão no futuro contribuir para o estabelecimento de um nível de qualidade mínimo que seria atendido em todos os serviços, materiais e componentes, permitindo que a qualidade final da construção seja mais homogênea e menos dispersa do que atualmente o é.

## BIBLIOGRAFIA

- ABRAMS, Duff A. Design of concrete mixtures. Chicago, Structures Materials Research Laboratories, Lewis Institute, dec. 1918. Bulletin 1.
- ACI - COMMITTEE - 214. Recommended practice for evaluation of compression test results of field concrete. American Concrete Institute - ACI, Journal, n. 1, v. 29, jul. 1957.
- . Controle estatístico de resistência do concreto. Norma ACI-214/65 [Recommended Practice for Evaluation of Compression Test Results of Field Concrete] Trad. Antonio C. R. Laranjeiras. Salvador, Departamento de Estradas de Rodagem da Bahia - Serviço de Pesquisas Tecnológicas, 1969.
- . Controle estatístico de concreto. ACI-214/65. Proposed Revision of ACI-214/65 [Recommended Practice for Evaluation of Strength Test Results of Concrete] Trad. Eduardo Santos Basilio. São Paulo, Associação Brasileira de Cimento Portland - ABCP, 1978.
- AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE - ANSI. ANSI - N - 45.2 Quality Assurance Program Requirements for Nuclear Facilities. Washington, 1977.
- AMERICAN SOCIETY FOR QUALITY CONTROL - ASQC. ASQC - C.1 Specifications of General Requirements for a Quality Program. New York, 1968.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM Manual on Quality Control of Materials. Prepared by ASTM Committee E-11, Special Technical Publication 15-C, jan. 1951.
- ANTON CORRALES, J.M. Teorias probabilistas de seguridad. Madrid, Instituto Eduardo Torroja - IET, Monografia n. 306, nov. 1972.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND - ABCP. Normas para execução e cálculo de concreto armado. Cimento e Concreto, São Paulo, Boletim de Informações da ABCP, 1937, 18p. Número especial.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CONCRETO - ABC. Regulamento para as construções em concreto armado. São Paulo, Cimento Armado, Órgão oficial da ABC, n. 13, v. 13, 3 jul. 1931. p. 7-21.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NB-1 Cálculo e execução de obras de concreto armado. Rio de Janeiro, 1940.

— — . 1943.

— — . 1950.

— — . 1960.

— . NB-1 Projeto e execução de obras de concreto armado. Rio de Janeiro, 1978. 76p.

— . NB-5 Cargas para cálculo de estruturas de edifício. Rio de Janeiro, 1961.

— — . 1978.

— . NB-585 Controle Tecnológico de materiais destinados a estruturas de concreto. Rio de Janeiro, 1976.

— . NB-586 Controle tecnológico de serviços em estruturas de concreto. Rio de Janeiro, 1976.

— . P-EB-136 Especificação de concreto pré-misturado. Rio de Janeiro, 1959.

— . MB-2 Confecção e cura de corpos de prova de concreto, cilíndricos ou prismáticos. Rio de Janeiro, 1974.

- . MB-3 Ensaio à compressão de corpos de prova cilíndricos de concreto. Rio de Janeiro, 1974.
- . MB-833 Amostragem de concreto fresco produzido por betoneiras estacionárias. Rio de Janeiro, 1972.
- . TB-16 Materiais de pedra e agregados naturais. Rio de Janeiro, 1955.
- . NB-309 Guia para inspeção por amostragem no controle e certificação de qualidade. Partes 01, 02, 03, 04, 05 e 06. Rio de Janeiro, 1965.

BASILIO, Eduardo Santos. Controle estatístico do concreto. In: Seminário sobre Controle da Resistência do Concreto, São Paulo, 1980. Anais... Instituto Brasileiro do Concreto-IBRACON, Comitê Técnico CT-201, São Paulo, maio 1980. 34p.

BASILIO, Francisco de Assis. Controle de qualidade do concreto em obras correntes. In: Colóquio sobre Controle de Qualidade do Concreto Estrutural, São Paulo, 1973. Anais... Instituto Brasileiro do Concreto-IBRACON, set. 1973, 27p.

BRITISH READY MIXED CONCRETE ASSOCIATION-BRMCA. Code for ready mixed concrete. London, may 1975.

CALAVERA RUIZ, José. El propietario y el control de la calidad. In: Colloque Européen sur le Contrôle de la Qualité dans la Construction, Madrid, mayo 1976. Anais... European Organization for Quality Control-EOQC, 1976. p. 263-4.

COMISIÓN PERMANENTE DEL HORMIGÓN. Resistencia característica y control de calidad. Ministério de Obras Públicas, España, 1972.

COMITÉ EUROPEÉN DU BÉTON - CEB. Recommandations international les CEB/FIP pour le calcul et l'execution des ouvrages en béton: version française definitive, avec introduction des notations nouvelles. Bulletin d'Information n. 84. Paris, 1972.

- DANTAS, Francisco de Assis Souza. Aspectos do controle da execução de obra em concreto armado. São Paulo, Departamento de Engenharia de Construção Civil da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - EPUSP, 1979. Dissertação.
- FUSCO, Péricles Brasiliense. Estruturas de concreto. v.1. Fundamentos do projeto estrutural. São Paulo, Ed. Universidade de São Paulo, 1976.
- . Estruturas de concreto. v.2. Fundamentos estatísticos da segurança das estruturas. São Paulo, Ed. Universidade de São Paulo, 1977.
- . Evolução dos conceitos do controle de concreto. São Paulo, Construção Pesada, fev. 1980. p. 55-8.
- GARCIA MESEGUER, Alvaro. Quality control of concrete. Lisboa, CEB International Course on Structural Concrete, Laboratório Nacional de Engenharia Civil - LENE, 1973.
- . Control de la calidad. In: 1<sup>er</sup> Colloque Européen sur le Contrôle de la Qualité dans la Construction, Madrid, mayo 1976. Anais... European Organization for Quality Control-EOQC, 1976. p. 361-3.
- GITAHY, Heraldo de Souza. Controle estatístico da qualidade do concreto. São Paulo, Instituto de Pesquisas Tecnológicas - IPT, Boletim 49, 1960. 39p.
- GUEDES, Quintiliano Mascarenhas & SOUZA, Miguel Oscar Leite. Estudo comparativo de duas funções características de operação do plano de inspeção por amostragem de lotes de concreto. São Paulo, Construção Pesada, nov. 1978. p. 84-100.
- HACHICH, Waldemar Coelho. Sobre a segurança nos projetos de geotécnica. São Paulo, Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo-EPUSP, 1978. Dissertação.

JIMÉNEZ MONTOYA, P.; GARCIA MESEGUER, A.; MORÁN CABRÉ, F. Hormigón armado. 8.ed. Barcelona, Ed. Gustavo Gili S.A., 1976.

JOINT COMMITTEE CEB/CIB/FIP/RILEM. Recommended principles for the control of quality and the judgement of acceptability of concrete. Comité Euro-International du Béton - CEB, Conseil International du Bâtiment - CIB, Fédération Internationale de la Précontrainte - FIP, Réunion Internationale des Laboratoires d'Essais et de Recherches sur les Matériaux et les Constructions - RILEM. Madrid, Instituto Eduardo Torroja - IET, Monografia n. 326, abr. 1975. 109 p.

JURAN, J.M. Quality Control Handbook. New York, McGraw - Hill Book Company, 1974.

LANGENDONCK, Telemaco van. Os novos métodos de dimensionamento das peças flectidas de concreto armado. São Paulo, Boletim do Instituto de Engenharia, 25(6): 125-144, jun. 1937.

— . A noção do coeficiente de segurança e o cálculo do concreto armado no estágio III. São Paulo, Separata de Engenharia, fev./abr. 1945. 23 p.

— . Cálculo de concreto armado. Comentários a Norma Brasileira NB-1. Itens 1 a 13. São Paulo, Associação Brasileira de Cimento Portland - ABCP, 1962.

LOBO CARNEIRO, Fernando Luiz. Os coeficientes de segurança e as tensões admissíveis em peças de concreto simples e de concreto armado. In: Symposium de Estruturas, Rio de Janeiro, v.2, jul. 1944. Anais... Instituto Nacional de Tecnologia - INT, 1944.

— . Comentários sobre o projeto de revisão da norma brasileira NB-1. Salvador, 2º Simpósio de Estruturas, Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT, 1958.