

CONCRETO

& Construções



IBRACON

Instituto Brasileiro do Concreto

Ano XXXIV | Nº 43
Jun. • Jul. • Ago. | 2006
ISSN 1809-7197
www.ibracon.org.br

TECNOLOGIA



Navios de concreto

CONCRETO PROTENDIDO



Selantes para juntas
de barragens

HOMENAGEM IBRACON



70 anos
da ABCP

**PRÉ-FABRICADOS
DE CONCRETO:
RAPIDEZ, ECONOMIA
E SUSTENTABILIDADE
NA CONSTRUÇÃO**



Avaliação de Desempenho do Concreto Empregado nos Dormentes do Metrô da Região Metropolitana do Recife após 16 anos

Tibério Andrade
Universidade de Pernambuco
Paulo Helene
Universidade de São Paulo

Resumo

Este trabalho discute o desempenho mecânico e de durabilidade do concreto empregado na confecção dos dormentes protendidos utilizados na linha do Metrô da Região Metropolitana do município de Recife, em Pernambuco, Brasil. Após 16 anos de uso, e sem nenhuma avaliação de desempenho feita nesse período, foi estudado e analisado o concreto dos dormentes, tomando como informações dados existentes da época da fabricação, inspeção da linha e ensaios mecânico e relativo à durabilidade, realizados em corpos de prova extraídos e cortados dos dormentes em uso. O concreto empregado nos dormentes, por tudo que foi analisado no experimento, após 16 anos, sob condições específicas de tráfego do sistema de trens urbanos e ambientais, apresenta parâmetros de um CAD, com melhoria significativa de suas propriedades em relação aos 28 dias. Essa característica refletiu no excelente estado em que se encontram os dormentes, na atualidade, podendo ser feita uma previsão de que os 50 anos de vida útil proposto para essas peças em concreto, no caso particular desses dormentes, pode estar sendo subestimado.

Palavras-chave: Dormentes de concreto, concreto de alto desempenho; durabilidade.

Abstract

This paper discusses the effective concrete strength evolution over a 16 year-old High Performance Concrete, used on the pre-stressed dormant production for a railroad in the Metropolitan Area of the city of Recife, in Pernambuco, Brazil. The improvement of strength was analyzed according to the characteristics

of the materials used in the concrete as well as to the use of its thermal type fast curing and cement nature, as compared to the available models for improved strength in the bibliography, particularly in the Model Code 90 approved by fib(CEB-FIP). The results obtained showed no negative interference of cyclic or fatigue demands and no effect of long term compression of concrete (Rusch effect). An effective improvement of strength was found at the ratio of 1.28 and 1.42 times above the expected result on 28th day, therefore, much higher than the one usually accepted by the official coefficients founded in literature and unfortunately published by many critics of the HPC and HSC.

Keywords: High Performance Concrete; High Strength Concrete; evolution of compressive strength

1. Concreto e os dormentes do Metrô do Recife

Nos anos de 1983, 1984 e 1985 foi construído o Metrô de superfície da Região Metropolitana do Recife, com 20 quilômetros de extensão e 17 estações de embarque e desembarque de passageiros, envolvendo, investimentos da ordem de 300 milhões de dólares. O dormente utilizado na via dupla do metrô foi em concreto, do tipo protendido, utilizando o processo de fabricação denominado de "short line". O concreto foi especificado para atingir uma resistência característica à compressão, aos 28 dias, de 45MPa e resistência característica à tração na flexão, aos 7 dias, de 5MPa. Por uma necessidade de ordem financeira e de prazo, o concreto dos dormentes deveria atingir uma resistência mínima à compressão de 35MPa às 18h de idade, resistência esta necessária à transferência de protensão. Para isto, foi utilizado o sistema de cura a vapor. Foram

Tabela 1

Composição do traço de concreto utilizado nos dormentes

Traço unitário em massa seca						Consumo Cimento	Slump test	Vebe test
cimento	areia	brita 9,5	brita 25	a/c	aditivo	kg/m ³	(mm)	(s)
1,00	0,52	1,40	1,57	0,33	–	500	0	15 a 20

fabricados 79.103 dormentes de março de 1984 a janeiro de 1985, num processo atípico para o padrão normal de fabricação de concreto na região. O concreto possuía consistência quase seca, tipo "terra úmida", utilizando misturador de eixo vertical e mesa vibratória de alta potência com prensagem simultânea para o adensamento, sem uso de qualquer tipo de adição mineral ou aditivo.

Os dormentes têm seção trapezoidal (B=25cm, b=15cm, h=24cm), com 2,50m de comprimento (fig.01). Cada dormente possui 8 fios CP 160 RB, de diâmetro 7mm, que são tensionados no sistema de pré-tensão, sendo os esforços transmitidos às formas metálicas até que o concreto atinja a resistência necessária para transferência da protensão (35MPa). O cobrimento mínimo dos fios é de 20mm.

2. Dosagem e materiais empregados

Foi utilizado o método de dosagem proposto por Helene & Terzian sendo que aproximadamente 84% dos 79.103 dormentes fabricados utilizaram a proporção encontrada ideal e apresentada na Tabela 1. Em cada fôrma produzia-se, simultaneamente, 3 dormentes.

Para a confecção do concreto dos dormentes, procurou-se o cimento que possuía maior resistência inicial à compressão. Na época, não estava disponível na praça do Recife, nem o cimento de classe 40, nem o cimento de alta resistência inicial. A opção mais viável econômica e tecnicamente, foi a utilização do cimento de classe 32 fornecido pelo grupo Atol, fabricado em São Miguel dos Campos, município situado no Estado de Alagoas (CP I 32).

Este cimento, apesar de classificado como classe 32, apresentava resistência à compressão da classe 40 e comportamento tipo ARI. Este cimento foi empregado em todo o concreto dos dormentes, não tendo sido rejeitado nenhum lote de concreto no controle estatístico, realizado conforme as recomendações estabelecidas pela NBR 6118 (ABNT, 1980), para aceitação do concreto.

O agregado miúdo utilizado foi de origem quartzosa, extraído do rio Capibaribe, no município de Limoeiro, e os agregados graúdos, britados, ambos de origem gnaissiana, extraídos da jazida situada na região Metropolitana do município de Recife.

3. Controle tecnológico do concreto

Na época, foi montado um laboratório na fábrica onde eram realizados, diariamente, os ensaios físicos do cimento (fim e início de pega, finura, expansibilidade e resistência à compressão) e os ensaios físicos dos agregados. O controle do concreto baseou-se na resistência à compressão e a tração na flexão, com formação de lotes semanais, aprovados pela análise estatística recomendada pela NBR 6118 (ABNT, 1980).

Foram resgatados os relatórios mensais de acompanhamento da resistência à compressão, referentes aos meses de março/84 a dezembro/84. Nestes relatórios, encontravam-se os resultados do controle de aceitação dos lotes formados para liberação das peças. Nesses resultados, são descritos: o período de formação dos lotes, a média de resistência (μ), o desvio padrão (σ), o coeficiente de variação (V) e o valor estimado (f_{ckest}) de cada lote. A Tabela 2 está reproduzindo os resultados emitidos nos relatórios da época da construção, com exceção dos 2021 dormentes fabricados em janeiro de 1985, cujo relatório não foi encontrado.

A média das médias da resistência à compressão dos lotes formados para aceitação do concreto pode ser considerada, sob o ponto de vista estatístico, como a resistência média do concreto produzido ao longo da fabricação dos dormentes. Calculando a média ponderada das médias da resistência à compressão dos lotes, em função da estimativa de dormentes fabricados mensalmente, e distribuindo uniformemente estes dormentes nos lotes do mês, obteve-se um valor de 65,0MPa. Este valor pode ser considerado como a resistência à compressão média do concreto, obtida aos 28 dias de idade, correspondente aos 10 meses de fabricação dos dormentes.

Para estimativa da variabilidade aparente do processo de produção e ensaio da fabricação do concreto, foi utilizado o desvio padrão da resistência à compressão obtida nos 33 lotes individuais, empregando-se a expressão (1) proposta por HELENE; TERZIAN (1993).

$$S_c^2 = S_{c1}^2 \times (n_1 - 1) + S_{c2}^2 \times (n_2 - 1) + S_{c3}^2 \times (n_3 - 1) + \dots + S_{cp}^2 \times (n_p - 1) \quad (1)$$

$$(n_1 - 1) + (n_2 - 1) + (n_3 - 1) + \dots + (n_p - 1)$$

Onde:

S_c = desvio-padrão do processo de produção e ensaio do concreto;

S_{ci} = desvio-padrão do processo de produção e ensaio do concreto obtido para a amostra i ;

N_i = N° de exemplares do lote.

Com os dados da Tabela 2 e a expressão (1), obteve-se um desvio padrão do processo de produção e ensaio do concreto dos dormentes de 4,01MPa, conseguindo com estes dados, um coeficiente de variação de 6,1 %. O intervalo de confiança da resistência à compressão média do concreto dos dormentes, com um nível de significância de 95%, pode ser obtido a partir da teoria

das grandes amostras ($n > 30$), através da seguinte expressão (2).

$$X \pm z \times S_c / N^{1/2} \quad (2)$$

Onde:

$X = 65,0$ MPa;

$z = 1,96$ (tabelado para limite de confiança de 95%-distribuição normal);

$S_c = 4,01$ MPa (estimado); $N = 33$ (N° de lotes)

Aplicando os dados na expressão, obtém-se que a resistência média do concreto dos dormentes, aos 28 dias, esteve compreendida entre 63,6MPa e 66,4MPa, com 95% de probabilidade de acerto na afirmação.

Tabela 2

Resistência à compressão obtida no controle tecnológico aos 28 dias (1984)

Mês	Lote	Período	μ (MPa)	σ (MPa)	V %	$f_{ck,est}$ NBR 6118	Número peças produzidas
Março e Abril	01	28/02-12/03	62,1	10,40	16,8	46,4	949
	02	17/03-27/03	58,3	4,70	8,1	49,6	949
	03	03/04-13/04	58,6	3,87	6,6	49,8	950
	04	16/04-27/04	57,1	3,53	6,2	48,5	951
Maio	05	28/04-09/05	58,4	3,97	6,8	49,6	2501
	06	10/05-22/05	61,0	3,76	6,2	51,9	2501
	07	23/05-30/05	60,8	4,63	7,6	51,7	2501
Junho	08	01/06-08/06	61,6	4,73	7,7	52,4	1361
	09	09/06-16/06	65,6	4,50	6,8	55,8	1361
	10	19/06-26/06	59,6	2,80	4,7	50,6	1362
	11	27/06-30/06	59,4	3,90	4,7	50,6	1362
Julho	12	01/07-07/07	59,9	3,90	6,5	50,9	2658
	13	08/07-14/07	66,0	8,80	13,3	53,2	2658
	14	15/07-21/07	62,0	5,60	9,0	52,7	2659
	15	23/07-28/07	60,5	5,20	8,6	51,4	2660
Agosto	16	29/07-04/08	63,6	5,30	8,3	54,1	2767
	17	06/08-11/08	70,4	3,20	4,5	59,8	2767
	18	12/08-18/08	68,2	2,15	3,2	58,0	2767
	19	20/08-25/08	68,6	2,50	3,6	58,3	2767
	20	27/08-01/09	68,3	2,74	4,0	58,1	2767
Setembro	21	03/09-08/09	68,3	2,20	3,2	58,1	3195
	22	09/09-15/09	67,0	4,46	6,7	45,0	3195
	23	16/09-22/09	66,0	2,45	3,7	56,1	3195
	24	23/09-29/09	64,9	2,74	4,2	55,2	3195
Outubro	25	30/09-06/10	64,7	3,32	5,1	55,0	2614
	26	07/10-14/10	64,8	2,85	4,4	55,1	2614
	27	16/10-21/10	67,7	3,32	4,9	57,5	2614
	28	23/10-27/10	66,9	2,30	3,4	56,9	2613
	29	28/10-03/11	67,2	3,14	4,8	57,2	2613
Novembro	30	04/11-10/11	67,8	2,13	3,1	57,7	2480
	31	11/11-17/11	67,9	3,10	4,6	57,7	2480
	32	20/11-01/12	66,6	2,63	4,0	56,3	2480
Dezembro	33	04/12-12/12	68,6	2,90	2,9	58,3	2572

4. Experimento

A avaliação do concreto empregado na fabricação dos dormentes consistiu na realização de inspeção visual, juntamente com a equipe responsável pela manutenção da linha.

No laboratório foram realizados experimentos para determinação da resistência à compressão e para determinação de algumas propriedades relativas à durabilidade (Carbonatação natural e acelerada, frente de cloretos, resistência à penetração de cloretos e resistividade elétrica).



Figura 01 - Visão de dois dormentes estocados



Figura 02 - Detalhe do corte dos dormentes



Figura 03 - Detalhe da extração dos testemunhos



Figura 04 - Visão de 4 prismas com os cp's já extraídos

Para execução dos ensaios foram retirados da via 22 dormentes, de um total de aproximadamente 78.000 dormentes assentados, procurando-se cobrir parte da sua extensão, com objetivo de garantir a representatividade da amostragem em relação à produção dos dormentes, devido à impossibilidade da identificação das datas exatas de fabricação.

Cada dormente foi cortado em fatias (fig. 02), com auxílio de disco apropriado, obtendo-se entre os olhais de fixação dos trilhos, 05 prismas (B, C, D, E e F) de seção trapezoidal com comprimento de aproximadamente 25cm. Os 02 prismas restantes, situados nas duas extremidades, com, aproximadamente 62cm, os quais contêm os olhais de fixação

Tabela 3

Resumo dos ensaios realizados após 16 anos de serviço dos dormentes

Ensaio	Quant. de dorm.	Quant. cp/dorm.	Total de cp's	Normas
Resistência à compressão	20	02	40	NBR 5739/80
Carbonatação natural	04	01	04	RILEM C18
Carbonatação acelerada	04	01	04	-
Frente de cloretos e Def _{cl}	03	05	15	ASTMC1152-90
Resistência à penetração de íons cloretos	06	04	24	ASTMC.1202-94
Resistividade elétrica do concreto	04	03	12	ASTMC.G57-84

dos trilhos, foram denominados de A e G. De cada prisma, através de extratora, foi posteriormente extraídos testemunhos cilíndricos de 10 x 20cm, totalizando 05 corpos de prova por dormente. A extratora foi convenientemente centrada para evitar que os 8 fios de protensão de 7 mm de diâmetro (CP-160 RB), dispostos longitudinalmente ao dormente, não fossem incorporados aos testemunhos, inviabilizando os ensaios (fig. 03).

Os prismas com os testemunhos já extraídos podem ser visualizados na Figs. 04. A tabela 03 mostra o resumo dos ensaios realizados, com as quantidades e as normas de referência.



Fig 05 - Visão da linha na estação central

5. Inspeção e vistoria da via e dos dormentes

A inspeção e a vistoria da via foi realizada pelo autor do trabalho, conjuntamente com o engenheiro responsável pela manutenção da via permanente. A mesma consistiu de uma inspeção visual e levantamento fotográfico das condições dos dormentes em alguns trechos da linha do metrô, além de entrevistas com os responsáveis pela manutenção.

Segundo informações da equipe de manutenção, o metrô funciona das 5 horas às 23 horas, com intervalo de 6 minutos entre uma composição e outra, sendo esta intensidade de tráfego referente ao trecho da Estação Recife à Estação Coqueiral, sendo que após essa estação, o tráfego é reduzido pela metade. Essa frequência de tempo permitiu estimar que durante os 16 anos de uso do metrô, ocorreram, aproximadamente, 1.000.000 de passageiros de trem na via permanente de maior fluxo.

Segundo a equipe de manutenção, desde a inauguração do metrô, apenas um dormente foi substituído. Esta substituição foi devido aos danos causados pelo descarrilamento de uma composição, não tendo, até a realização desse trabalho, substituição de dormentes relacionados com a deterioração.

A inspeção visual foi realizada em 05 estações de passageiros: Estação Central, Mangueira, Tejipló, Curado e Cavaleiro. Em cada estação foi



Fig 06 - Detalhe da parte superior dos dormentes



Fig 07 - Visão do equip. nivelador, socador e alin de via



Fig 08 - Detalhe do desgaste superficial de um dormente

percorrido, a pé, aproximadamente 500m de linha (fig. 05).

Na inspeção, não foi possível visualizar o corpo dos dormentes, somente a superfície superior das peças, pois os mesmos apresentavam-se quase que cobertos pelo lastro de brita da linha (fig 06). Nessa superfície não foi observado qualquer tipo de sintoma que pudesse indicar um processo de deterioração dessas peças.

Além da inspeção na via, foi realizada inspeção visual minuciosa nos 20 dormentes retirados da via. Em nenhum dos dormentes foi observado qualquer estado de fissuração. No entanto, em alguns dormentes, foi detectado desgaste superficial nas laterais e no fundo (fig. 07). Esses desgastes ocorreram em maior intensidade nas extremidades das peças, tendo uma maior incidência na região inferior das superfícies laterais e da superfície de apoio (fundo).

Segundo os responsáveis pela manutenção, o desgaste superficial é proveniente do atrito entre o lastro de brita e o dormente, provocado durante a operação de socaria, realizado periodicamente pelo

equipamento denominado de nivelador, socador e alinhador de via (fig. 08).

Segundo o pessoal de manutenção, a região dos trilhos, próxima às juntas, sofre maior problema de fuga do lastro, devido à trepidação ocasionada pela descontinuidade do trilho, sendo que algumas juntas são mais problemáticas do que outras. Com frequência, nesses trechos, a equipe de manutenção é obrigada a realizar a operação de socaria, que consiste em comprimir a pedra do lastro de encontro ao dormente, recompondo o material embaixo destes, na região dos apoios dos trilhos. Essa operação, segundo a equipe, chega a triturar a pedra do lastro da via.

6. Resultados experimento e discussão

6.1. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Na Tabela 4 estão apresentados os resultados, da resistência à compressão, obtidos nos

Tabela 4

Resultados dos ensaios de resistência à compressão dos testemunhos extraídos

número de identificação	f_c (MPa)		número de identificação	f_c (MPa)	
	Individual	Média		Individual	Média
01	85,1/ 87,5	86,3	12	92,7/ 89,2	91,0
02	80,8/ 80,5	80,6	13	78,3/ 84,6	81,5
03	82,6/ 84,5	83,6	14	78,9/ 77,9	78,4
04	81,8/ 83,7	82,8	16	84,1/ 79,6	81,9
05	88,5/ 85,5	87,0	17	78,3/ 76,0	77,1
06	86,8/ 85,3	86,0	18	84,6/ 84,0	84,3
07	95,4/ 93,1	94,3	19	77,0/ 73,6	75,3
08	78,7/ 82,9	80,8	20	77,0/ 74,0	75,5
09	77,5/ 71,8	74,7	21	79,7/ 78,7	79,2
11	84,4/ 87,3	85,9	22	76,2/ 78,0	77,1
Média geral 82,2 MPa					
Desvio Padrão 5,26 MPa					

testemunhos extraídos dos 20 dormentes retirados da via férrea.

A resistência média obtida nos 20 exemplares ensaiados à compressão, nas condições de ensaio específicas do experimento, foi de 82,2MPa conforme mostrado na Tabela 4, após 16 anos idade, com desvio padrão de 5,26MPa, obtendo-se um coeficiente de variação de 6,2 %. O intervalo de confiança da média da resistência à compressão do concreto dos dormentes, com um nível de significância de 95 %, pode ser obtido a partir da teoria das pequenas amostras ($n < 30$), utilizando a distribuição de Student, através da expressão (1).

$$X \pm t \times S/(N-1)^{1/2} \quad (1)$$

Onde:

$X = 82,2$ MPa;

$t = 2,093$ (valor tabelado para limite de confiança de 95% – distribuição Student com $n - 1$ graus de liberdade (19));

$S = 5,26$ MPa; $N = 20$ (n° de corpos de prova)

Utilizando a expressão acima, obtém-se, a um nível de significância de 95 %, que a média da resistência à compressão do concreto dos dormentes, após 16 anos de idade, nas condições de ensaio experimental, está compreendida no intervalo de 79,7MPa a 84,7MPa.

O histograma mostrado na figura 09 permite visualizar a distribuição dos resultados e a dispersão obtida no ensaio. Como era de se esperar, o histograma confirma uma curva de distribuição normal para a resistência à compressão do concreto, com 85% das amostras compreendida no intervalo de $X \pm S$.

O crescimento da resistência à compressão com o tempo resultou em uma resistência à compressão média, após 16 anos, de 82,2MPa. Esse valor é

1,26 vezes superior a resistência obtida aos 28 dias de idade (65,0MPa) e 1,80 vezes superior ao f_{ck} de projeto (45,0MPa). Essa resistência à compressão alcançada após 15 anos de uso não pode ser negligenciada, permitindo não só uma melhoria significativa no desempenho mecânico dos dormentes, mas também nos aspectos relacionados à durabilidade.

6.2. Propriedades relativas à durabilidade

6.2.1. RESISTÊNCIA À CARBONATAÇÃO

6.2.1.1. NATURAL

Foram ensaiados 04 dormentes, sendo as determinações feitas na face cortada do prisma A de cada um dos dormentes, em cujas bordas da seção foram feitos cortes, à seco, ao longo de todo o seu perímetro. Esses cortes foram executados com espessuras e profundidade de 2cm. Em todo perímetro cortado, foi aspergida solução de fenolftaleína.

O ensaio de carbonatação natural realizado em 04 dormentes foi surpreendente. Nestes 16 anos de exposição, sob as condições climáticas da região, não foi observada nenhuma profundidade de carbonatação em qualquer uma das faces das peças dos prismas. A fig. 10 apresenta um dos dormentes ensaiados. Em uma tentativa de se obter uma medida, por menor que fosse, foi utilizado um fissurômetro da Mitutoyo com lupa de aumento e precisão de 0,1mm. Novamente não foi observada nenhuma espessura de concreto carbonatada.

Este resultado, obtido após 16 anos de exposição dos dormentes, reforça as afirmações de RICHARDSON (1988) PETTERSON, SANDEBERG (1997)

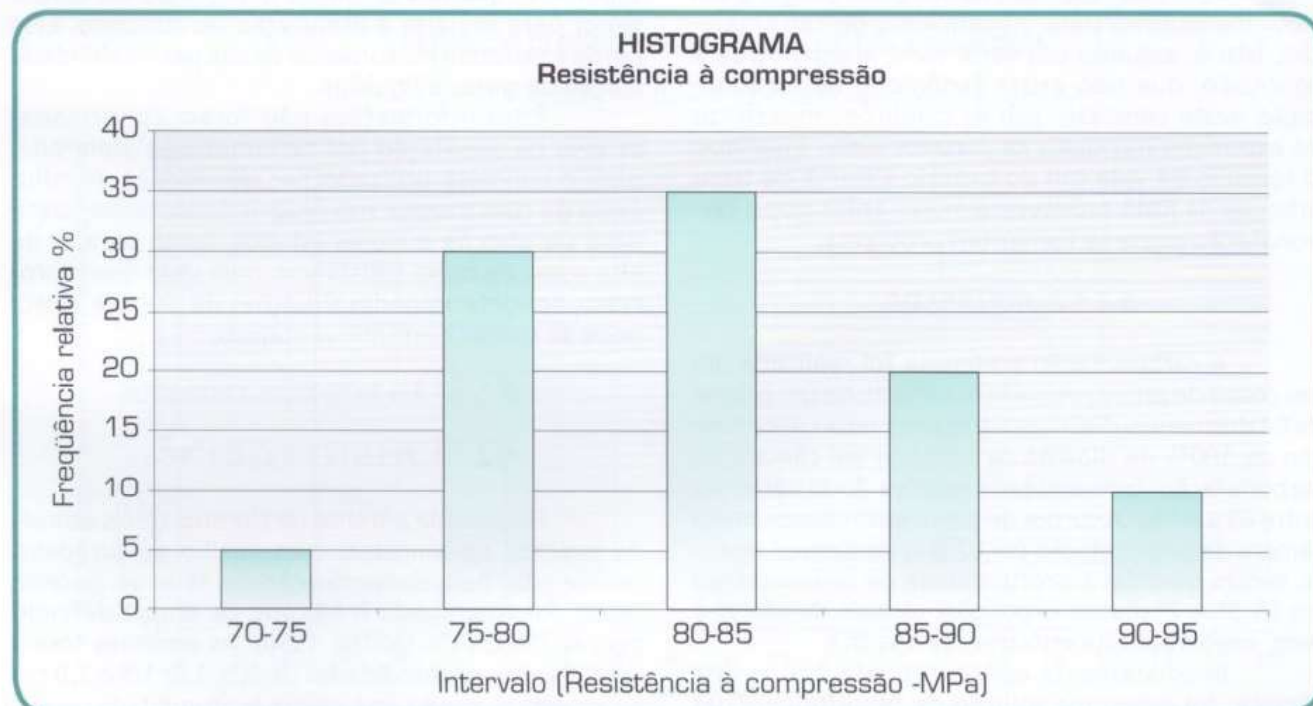


Figura 09 – Histograma dos resultados de resistência à compressão dos testemunhos extraídos



Fig. 10 - Cor vermelho carmim na superfície cortada do prisma A do dormente 11, indicando inexistência de carbonatação do concreto

de que o fenômeno de carbonatação geralmente não consiste em um problema para os Concretos de Alto Desempenho.

Com esse resultado não se pode chegar a um valor mensurável para o coeficiente de carbonatação, isto é, assumiu um valor nulo, chegando-se à conclusão, que não existe fenômeno de carbonatação neste concreto, sob as condições específicas de exposição nas quais os mesmos estão inseridos. O término da vida útil do próprio sistema de trens urbanos da RMR acontecerá muito antes que a carbonatação possa se tornar um problema.

6.2.1.2. ACELERADA

A carbonatação acelerada foi realizada em um corpo de prova prismático, cortado de um prisma de 04 dormentes distintos, utilizando uma concentração de 100% de dióxido de carbono em câmara de carbonatação, com umidade relativa do ar variando entre 65 a 80%. Os corpos de prova permaneceram na câmara de carbonatação por 07 dias ininterruptamente, sendo medidas a profundidade de carbonatação no 1º, 3º e 7º dia de exposição, através de cortes à seco, executados sucessivamente nos cp's.

Imediatamente após a retirada dos cp's da câmara, foi aspergida solução de fenolftaleína nas suas faces cortadas. A profundidade de carbonatação



Fig. 11 - Superfície cortada de 04 amostras de 04 dormentes distintos na cor vermelho carmim, que foram expostas a carbonatação acelerada

foi medida na superfície lateral que estava em contato com a fôrma metálica durante a cura a vapor, na superfície de concretagem que estava exposta a este vapor e na superfície interna do concreto.

No que se refere ao ensaio de carbonatação acelerada, os resultados também foram surpreendentes. Nas medidas efetuadas as idades de 01, 03 e 07 dias, não foi observada nenhuma espessura de concreto carbonatado em qualquer uma das faces expostas, estando o resultado aos 07 dias ilustrado na figura 11.

A carbonatação acelerada foi realizada, com o intuito de checar a possibilidade de uma variação da espessura carbonatada, em função das diferentes solicitações que estas superfícies sofreram durante o processo de cura a vapor na fabricação das peças.

Segundo HIGGINSON (1961) e AKMAN; GÜLSEREN (1994) existe uma perda de qualidade do concreto, principalmente nas proximidades da superfície, quando se utiliza o processo de cura a vapor para acelerar a maturação do concreto. Esta perda é refletida no aumento de sua permeabilidade à ação de gases e líquidos.

Estas informações não foram confirmadas através da solicitação por carbonatação acelerada, para o concreto utilizado nos dormentes. A influência da cura a vapor nas propriedades do concreto deve ser alvo de maiores estudos, tanto para os de alta como de baixa resistência, haja vista que o processo, em determinadas situações de prazo e custo, pode se tornar bastante vantajoso.

6.2.2. AÇÃO DOS ÍONS CLORETOS

6.2.2.1. FRENTE DE CLORETOS

Foi medida a frente de cloretos totais através da retirada de amostras com auxílio de furadeira apropriada. Para determinação do teor de cloretos totais, foi empregado o método de ensaio definido pela ASTM C.1152 (ASTM, 1990). As amostras foram retiradas nas profundidades de 0,5; 1,0; 1,5 e 2,0 cm da superfície, sendo essa última profundidade correspondente ao cobrimento do fio de protensão. Para

Tabela 5
Resultados dos perfis de íons cloreto totais

Dormente Nº	Distância ao litoral (m)	Percentual de íons cloretos totais em relação à massa de cimento				
		0,5 cm	1,0 cm	1,5 cm	2,0 cm	Centro
11	2.500	0,1976	0,0424	0,0080	0,000	0,000
16	5.100	0,1005	0,0286	0,0046	0,000	0,000
22	8.100	0,0634	0,0860	0,000	0,000	0,000

efeito de comparação, retirou-se amostra do centro do dormente para estimativa da contaminação inicial do concreto com íons cloretos proveniente dos insumos.

As amostras foram retiradas perpendicularmente às faces inclinadas de um dos prismas cortados do dormente, perfurando o concreto em 20 pontos aleatórios, sendo posteriormente, misturada as amostras relativas à mesma profundidade (fig. 12). Foi utilizada uma amostragem de 03 dormentes, distantes 2500m, 5100m e 8100m em relação ao litoral, com o objetivo de avaliar a frente de cloretos em função da proximidade com o mar.

Na Tabela 5 estão apresentados os resultados dos teores de íons cloreto totais, enquanto a figura 12 mostra os perfis nos 03 dormentes, situados a 2500m, 5100m e 8100m da orla marítima.

Pode se observar na figura 12, como era de se esperar, que a medida em que a linha se afasta do litoral o teor de cloretos totais nos dormentes é reduzido gradativamente.

Não ocorreu contaminação inicial significativa com íons cloretos nos dormentes ensaiados, isto é, a contaminação proveniente dos materiais empregados na fabricação do concreto. A figura 13

mostra que, a partir da profundidade de 17,5mm, não se encontra mais traços de íons cloretos.

A máxima contaminação de íons cloretos foi detectada no dormente nº 11, situado aproximadamente a 2500m da orla marítima, que corresponde à estação mais próxima da praia. Esta contaminação foi de 0,2% em relação à massa de cimento, a uma profundidade média de 2,5mm, enquanto a menor contaminação foi encontrada no dormente 22, com 0,06%.

A ACI 222R (ACI, 2001) recomenda, para concreto protendido, um valor máximo de contaminação inicial com cloretos totais de 0,08% em relação à massa de cimento.

Utilizando a equação simplificada, mostrada abaixo, a qual foi proposto por HELENE; TERZIAN (1993) substituição do modelo matemático da lei de fick, poderá ser obtido o coeficiente de penetração de cloretos, correspondente a uma concentração de 0,08%, definido pela ACI 222R (ACI, 2001). Esta concentração foi obtida a uma profundidade máxima de 6mm, no dormente mais próximo à orla, como se observa no gráfico da figura 15, em um intervalo de 16 anos.



Figura 12 – Perfil de cloretos totais nos dormentes em função da distância da orla marítima

Tabela 6
Resultados do ensaio de penetrabilidade a cloretos

Dormentes nº	Carga passante em Coulombs				Média
	Cp1	Cp2	Cp3	Cp4	
06	1386	469	1197	852	976
07	205	595	545	598	486
13	811	842	325	369	587
16	194	393	547	448	395
20	466	662	888	917	733

Tabela 7
Penetração de cloretos baseado na carga passante (ASTM C. 1202-94)

Carga passante em Coulombs	Percolação de cloretos
> 4000	Alta
2000 a 4000	Moderada
1000 a 2000	Baixa
100 a 1000	Muito Baixa
< 100	Desprezível

$$E_{cl0,08\%} = K_{cl0,08\%} \times t^{1/2} \quad (2)$$

Onde:

$E_{cl0,08\%}$ = profundidade da frente de cloretos com 0,08%, no tempo (t);

$K_{cl0,08\%}$ = Coeficiente de cloretos para uma concentração de 0,08%;

t = tempo em anos.

Apesar de possuir apenas um ponto como dado de referência, obtêm-se um tempo de aproximadamente 180 anos, a partir do início da exposição dos dormentes, para que a concentração de 0,08% de íons cloreto atinja a cordoalha a uma distância de 20mm da superfície do dormente de nº11. Tomando como parâmetro a concentração de 0,2% de íons cloretos, esta frente levaria mais de 1000 anos para atingir a profundidade de 20mm, nos dormentes mais próximos da orla marítima.

Com este tempo, pode-se afirmar que, com as condições de exposição a que os dormentes estão submetidos, a ação dos íons cloretos não será o fator limitante para a vida útil dos dormentes. Como no fenômeno de carbonatação, a obsolescência do próprio sistema de trens urbanos da RMR acontecerá muito antes que a ação dos íons cloretos possa despassivar a armadura.

6.2.2.2. RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO DE CLORETOS

Além da determinação da frente de cloretos, foi realizado o ensaio de resistência à penetração de íons cloreto utilizando procedimentos baseados na

Norma ASTM C.1202 (ASTM, 1994). Foram ensaiados em 05 dormentes, utilizando 04 corpos de prova para cada dormente (Fig 14). Os resultados estão mostrados na tabela 06.

Os resultados médios individuais dos dormentes variaram de 395 a 976 Coulombs, obtendo-se uma média de 634 Coloumbs. De todas as 20 amostras dos 05 dormentes, apenas duas deram acima de 1.000 Coulombs, referente ao dormente de nº 8, apresentando valores de 1.386 e 1197 Coulombs.

Estes valores qualificam o concreto dos dormentes de muito baixa percolação de cloretos, segundo a classificação sugerida pela ASTM C.1202 (ASTM, 1994), estando essa classificação mostrada na tabela 07.

A tabela 08 mostra variações encontradas na penetração de cloretos em concretos, empregando diferentes relações água/cimento, com e sem utilização de sílica ativa (AÍTCIN (1998)). A resistência à penetração de cloretos, encontrada no concreto dos dormentes, segundo a tabela 08, seria superior a um concreto de relação água/cimento de 0,25, sem adição de sílica ativa. Observa-se que os resultados estão acima do esperado para o concreto dos dormentes, que utilizou uma relação água/cimento de 0,33.

Esta resistência à penetração de cloretos, acima do previsto, pode ser creditada à melhoria da qualidade da pasta de cimento hidratada, ao longo dos 16 anos, refletindo não só no incremento da resistência mecânica, como já foi visto, mas também no refinamento dos poros, reduzindo a permeabilidade do concreto à ação de agentes agressivos.

Tabela 8

Variação da resistência à penetração de cloretos em função da relação água/cimento e sílica ativa (AÏTCIN;1998)

Relação a/c	Com sílica ativa		Sem sílica ativa	
	Limite inferior (Coulombs)	Limite superior (Coulombs)	Limite inferior (Coulombs)	Limite superior (Coulombs)
0,60	1.800	3.500	5.500	9.000
0,50	1.200	5.000	4.000	6.000
0,40	250	1.000	2.500	4.000
0,30	150	500	1.800	3.000
0,25	100	200	800	2.500

6.2.3. RESISTIVIDADE ELÉTRICA

O ensaio de resistividade elétrica foi realizado em 03 prismas de 04 dormentes, com 03 medidas para cada prisma. A resistividade elétrica foi medida através do sistema de 4 eletrodos, utilizando o método da ASTM C.G-57 (ASTM, 1992). No ensaio, a superfície dos prismas estava seca, entretanto, antes do ensaio, os prismas foram imersos em água por 48 horas, possuindo a condição mais desfavorável quanto à resistividade.

DURAR (DURAR, 1997) classifica os riscos de corrosão da armadura no concreto, em função da resistividade elétrica superficial, através dos limites de resistividade mostrada na tabela 09.

A resistividade elétrica encontrada nos 04 dormentes ensaiados, mostrados na tabela 10, variou de 200 a 263 Ωm , classificando esse concreto como de baixo risco de corrosão, como era de se esperar, com os dados já obtidos anteriormente.

6.3. Desempenho dos dormentes

O desempenho do concreto dos dormentes será discutido, tendo como roteiro, os mecanismos de envelhecimento e deterioração das estruturas de concreto citados na NBR 6118/03, quais sejam,

relativos ao concreto, à armadura e à estrutura propriamente dita.

6.3.1. MECANISMOS DE DETERIORAÇÃO RELATIVOS AO CONCRETO

Os mecanismos de deterioração relativos ao concreto, que foram encontrados em referências bibliográficas, associados a dormentes de concreto, são dois, reação álcali-agregado e a formação de etringita atrasada ou a ação conjunta de ambos os mecanismos.

A ação desses mecanismos provoca expansão do concreto, tendo como sintomatologia o aparecimento inicial fissuras e/ou microfissuras, cuja intensidade e orientação é extremamente dependendo do estado de tensão, a qual a peça está sujeita, bem como, a densidade e distribuição das armaduras. Para a propagação desses mecanismos, a umidade é essencial, e segundo bibliografias, os sintomas aparecem com no máximo 05 a 08 anos de uso das peças.

Os dormentes analisados já possuem 16 anos de uso, e nas inspeções realizadas nas peças extraídas, e na linha, bem como nas informações obtidas do setor de manutenção e nos ensaios mecânicos, não existe nenhum indício que estes mecanismos estejam atuando.

Apesar das incertezas que cercam estes fenômenos de deterioração do concreto, com estas

Tabela 9

Classificação do grau de risco de corrosão através da medida da resistividade elétrica do concreto DURAR (DURAR, 1997)

Resistividade elétrica Ωm	Risco de corrosão
$\rho > 200$	Baixo
$200 > \rho > 10$	Moderado
$\rho < 10$	Alto

Tabela 10
Resultados do ensaio de resistividade elétrica

Dormentes N ^o	Resistividade Elétrica Ωm			
	Cp1	Cp2	Cp3	Cp4
05	219	234	226	226
06	270	246	272	263
11	207	209	209	208
16	208	197	196	200

informações e dados, aliada a idade dos dormentes, pode-se afirmar que é muito improvável que o término da vida útil das peças estará associado a um desses mecanismos de ataque.

6.3.2. MECANISMOS DE DETERIORAÇÃO RELATIVOS À ARMADURA

A corrosão da armadura no concreto só ocorrerá após a sua despassivação, através do processo de carbonatação ou através do elevado percentual de cloretos na região da armadura.

Nos ensaios relativos à durabilidade, referentes a corrosão da armadura, o concreto dos dormentes, após 16 anos de exposição e sob

as condições ambientes do entorno, apresentou um desempenho bastante satisfatório, principalmente em relação à carbonatação, indicando um período de tempo bastante longo para a despassivação da armadura, não constituindo em um problema relativo à vida útil das peças.

Este bom desempenho está, sem dúvida, associada a baixa relação água/cimento empregada no concreto, no processo e no controle de produção.

6.3.3. MECANISMOS DE DETERIORAÇÃO RELATIVOS À ESTRUTURA PROPRIAMENTE DITA

Os mecanismos de deterioração relativos ao dormente propriamente dito estão associados às ações cíclicas de carregamento, impactos e desgaste superficial.

Na inspeção realizada nos dormentes extraídos das linhas, não foi observado nenhum indício de fissuração proveniente da ação cíclica de carregamento e de impacto, principalmente nos dormentes localizados próximo às juntas do trilho. Esta inspeção, aliada à informação que em 16 anos de uso, nenhum dormente foi substituído por problemas de perda de desempenho de qualquer procedência, indica que os dormentes até a presente idade, e sob as condições de tráfego do sistema, apresentam-se em excelente estado de integridade.

Na inspeção visual dos dormentes, foi constatado desgaste superficial de intensidade variada nas superfícies de apoio e lateral de alguns dormentes.



Fig 13 – Operação de furação e coleta das amostras para determinação do perfil de cloretos

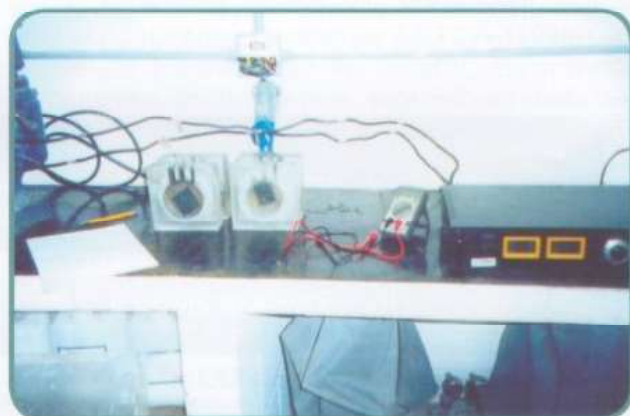


Fig 14 – Detalhe do ensaio de determinação da resistência à penetração de cloretos

Este desgaste, como já foi comentado, está associada a operação de manutenção da linha, em pontos isolados, onde existe ocorrência de fuga do lastro por trepidação das juntas problemáticas ao longo da linha.

Esta ocorrência não deve ser associada a um problema, pois esta se dá em poucos pontos isolados, e, além disso, mesmo após 16 anos de desgaste, estes dormentes estão desempenhando satisfatoriamente a sua função.

7. Conclusões

O concreto empregado nos dormentes, por tudo que foi analisado no experimento, não

só atendeu a uma classificação de resistência à compressão de 50 MPa aos 28 dias para ser potencialmente classificado como CAD, mas após 16 anos de uso, sob as condições específicas de tráfego do sistema de trens urbanos e ambientais, apresenta parâmetros de um CAD, com melhoria significativa de suas propriedades em relação aos 28 dias.

Esta característica refletiu no excelente estado em que se encontram os dormentes, na atualidade, podendo ser feita uma previsão de que os 50 anos de vida útil proposta para estas peças em concreto, no caso particular desses dormentes, pode estar sendo subestimado.♦

Referências Bibliográficas

- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Committee 222. Protection of metals in concrete against corrosion. ACI Manual of Concrete Practice. Detroit, 2001. 41p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Projeto de Estruturas de Concreto- NBR 6118. Rio de Janeiro, 1980.
- HELENE, P.; TERZIAN, P. Manual de Dosagem e Controle do Concreto. São Paulo, Pini, 1993. 349p.
- RICHARDSON, M.G. Carbonation of reinforced concrete – its causes and management. Dublin, CITIS, 1988. 205p.
- PETERSON, K.; SANDEBERG, P. Chloride threshold levels, corrosion rates and service life for cracked high-performance concrete. In Malhotra, V.M. In DURABILITY OF CONCRETE, 4., Sidney, Australia, 1997. Proceedings... Detroit CANMET, 1997. p. 451-78. (SP-170).
- HIGGINSON, E. C. Effect of Steam Curing on the important properties of concrete. Journal of the American Concrete Institute. V.58, n.3, Sept., p.281-98, 1961.
- AKMAN, M. S.; GÜLSEREN, H. The influence of heat treatment on the durability of concrete. In Malhotra, V.M.. In: INTERNACIONAL CONFERENCE DURABILITY OF CONCRETE, 3., Nice, France, 1994. Proceedings... Detroit, ACI, 1994. (SP-145).
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Test Method for Acid-Soluble chloride in Mortar and concrete: ASTM – C1152 – 90, Philadelphia, 1990.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Method of field Measurement of Soil Resistivity Using the Wenner four-Electrode Method: ASTM – C.657 – 84. Philadelphia, 1992.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Test Method for electrical indication of Concrete Ability to Resist Chloride Ion Penetration: ASTM – C.1202 – 94, Philadelphia, 1994.
- AİTCIN, P. –C. High Performance Concrete. 1ª ed. Londres, E & FN SPON, 1998.
- DURAR – Durabilidad de la Armadura. Manual de Inspeccion, Evaluacion y Diagnostico de corrosion em Estrcturas de Hormigón Armado. 1997. ISBN 980-296-541-3.