

IBRACON - 42º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO

ENSAIOS ESPECIAIS REALIZADOS NAS ESTRUTURAS DAS LINHAS

1-AZUL E 3-VERMELHA DO METRÔ DE SÃO PAULO

Carlos Alberto M. Fernandes

Arnold Freedy Steiner

Cia. do Metropolitano de São Paulo

Luécio Scandiuzzi

Lucy Inês Olivan

Nelson Luiz M. Borelli

Manuel Alejandro C. Garces

Maubertec Engº e Projetos Ltda.

RESUMO:

O trabalho apresenta resultados de estudos e ensaios especiais, a sua análise, interpretação e comentários, executados em diversas estruturas de concreto das Linhas 1-Azul (Norte-Sul) e 3-Vermelha (Leste-Oeste) do METRÔ de São Paulo. Estes estudos tiveram como objetivo obter, através de inspeções visuais gerais e de ensaios com amostras coletadas ao longo das linhas, informações complementares sobre a qualidade do concreto, em regiões onde as inspeções visuais indicavam que os concretos ficaram ou estão submetidos a agressões, que podem comprometer sua durabilidade.

Para obtenção de parâmetros de comparação das propriedades dos concretos suspeitos, foram também extraídas algumas amostras de concretos vizinhos aos suspeitos, porém sem sinais de deterioração, para serem submetidos a ensaios comparativos.

Este estudo é complementar a um amplo trabalho de inspeções executado pela Maubertec durante aproximadamente 2 anos (1997 a 1999) nas Linhas 1 (Norte - Sul) e 3 (Leste - Oeste) do Metrô.

O comprometimento das propriedades do concreto foi verificado através de ensaios que visaram detectar:

- A existência e o desenvolvimento de reações do tipo alcalis-agregado;
- A qualidade e características das águas de sub-solo em contato com o concreto;
- O potencial de corrosão das armaduras correlacionado-o com o cobrimento e com a profundidade de carbonatação do concreto de cobrimento;
- A presença de combustíveis na água ou no solo de contato com estruturas vizinhas a postos de abastecimento de combustíveis;
- A perda de propriedades do concreto em função da lixiviação do $CA(OH_2)$.

1 - OBJETIVO

O programa de ensaios especiais teve como objetivo complementar as informações obtidas nas inspeções visuais, direcionando os trabalhos para as estruturas enterradas, sem se limitar a elas, pelas seguintes razões principais:

- Mais difíceis de serem inspecionadas de forma rotineira;
- Presença mais constante de água no subsolo;
- Temperaturas médias mais elevadas;
- Difícil acesso para intervenção corretiva;
- Constatação, nas inspeções, de maior incidência de anomalias.

Considerando os tipos de agressões mais prováveis de ocorrência nas estruturas do metrô, o programa foi direcionado objetivando verificar:

- A perda de propriedades do concreto endurecido em função da lixiviação, por água corrente, do hidróxido de cálcio, $\text{Ca}(\text{OH})_2$, liberado na hidratação do cimento;
- A presença e o desenvolvimento de reações expansivas do tipo álcalis-agregado;
- A qualidade da água de contato com as estruturas de concreto ou que percola através delas, para identificar o seu grau de agressividade e/ou sua origem;
- A presença de combustíveis na água e/ou no solo de contato com as estruturas e;
- O potencial de corrosão das armaduras, correlacionando-o com o valor do cobrimento real das armaduras e com a profundidade de carbonatação do concreto.

2 - CONSIDERAÇÕES SOBRE OS ENSAIOS PROPOSTOS E EXECUTADOS

2.1 - Reação Álcalis-Agregado

A reação álcalis-agregado manifesta-se por um panorama típico de fissuração, deformações das estruturas, exsudação de gel e bordas escuras ao redor dos agregados.

Durante as inspeções visuais observou-se estruturas com panoramas de fissuração típicos de fissuração provocados por reação alcalis-agregado (ver Foto 1).

Os concretos das estruturas do metrô são confeccionados em geral com agregados graúdos provenientes da serra da cantareira, com consumos de cimento relativamente elevados (para atender as necessidades de projeto) e quase sempre, sem a presença de materiais inibidores da reação (pozolanas ou escórias de alto forno).



Foto 1 - Panorama Típico de Fissuração da Reação Alcalis-Agregado

Os primeiros estudos com estes agregados, derivados de rochas graníticas, indicaram que poder-se-ia considerá-los inócuos frente aos álcalis.

Estudos recentes efetuados com técnicas e equipamentos modernos, aliados ao maior conhecimento dos mecanismos da reação álcalis-agregado, demonstram que há regiões do granito da Cantareira que são realmente inócuas. Há porém outras regiões que, devido ao tectonismo e à conseqüente presença de quartzo deformado, os tornaram reativos.

Portanto, a possibilidade de existir agregados reativos no concreto, o alto consumo de cimento (e portanto de álcalis), a ausência de inibidores da reação (pozolanas ou escorias) e a presença de água, principalmente nas estruturas enterradas, além da observação de estruturas com panorama típico de fissuração, é que levaram a se pesquisar a existência da reação álcalis-agregado em alguns trechos.

2.2 - Água como Agente de Deterioração

A água é o líquido com maior capacidade de dissolver substâncias, e esta propriedade responde pela presença de muitos íons e gases que podem causar deterioração do concreto. Complementarmente, as moléculas da água são muito pequenas e portanto capazes de penetrar com facilidade em poros extremamente pequenos.

O concreto, por seu lado, é um sólido poroso, com poros intercomunicáveis e em geral, com microfissuras em sua estrutura. E esses fatores explicam, por si só, a importância dos cuidados que devem ser tomados com estruturas em contato com água.

Portanto a percolação de águas correntes ou de infiltração por pressão, pode remover o hidróxido de cálcio - Ca(OH)_2 resultante da hidratação do cimento, provocando o desequilíbrio químico do cimento hidratado, propiciando assim condições de continuidade da hidrólise desses produtos e a conseqüente queda das propriedades do concreto.

A retirada hidróxido de cálcio contribui também para a depassivação das armaduras com o conseqüente aumento do perigo de corrosão das mesmas.

Além da ação lixiviante, a água pode conter produtos dissolvidos tais como sulfatos, cloretos, ácidos, e, no caso das obras enterradas do metrô, combustíveis oriundos de vazamentos de postos de combustíveis, que podem deteriorar o concreto.

O ataque por sulfatos manifesta-se por reações químicas expansivas com conseqüente fissuração e/ou perda progressiva de resistência do concreto devida à deterioração da coesão dos produtos de hidratação. Os cloretos agem na corrosão das armaduras e na conseqüente deterioração do concreto.

Em presença de ácidos o concreto de cimento portland não tem boa resistência, embora ácidos brandos sejam até tolerados. As águas de subsolo que possam ter contato com águas servidas de esgoto, ou industriais, podem conter substâncias ácidas ou que em contato com o ar se transformam em ácidos, que deterioram o concreto.

Há também evidências de que os sulfatos podem ter uma ação de deterioração puramente física (independente das reações químicas expansivas citadas) conseqüente da cristalização dos mesmos nos poros do concreto, como explicado a seguir.

“Quando um lado da estrutura está em contato com uma solução salina e o outro está sujeito à evaporação, os sais se cristalizarão no lado da evaporação. Em concretos mais porosos, a cristalização dos sais de soluções supersaturadas pode produzir pressões suficientemente grandes para provocar fissuração do concreto”.

2.3 - Presença de Combustíveis

Um outro tipo de ataque ao concreto, ainda pouco divulgado e estudado, refere-se ao ataque bacteriológico provocado por fungos ou bactérias.

Alguns fungos podem se alimentar de hidro-carbonetos e, no metabolismo de digestão e excreção, propiciar a produção de ácidos que atacam o concreto.

Portanto, a verificação da presença de combustíveis junto às estruturas do metrô teve por objetivos verificar mais uma possível fonte de ataque ao concreto, por incêndio e/ou explosão, ou como fonte de alimentos para bactérias.

2.4 - Potencial de Corrosão das Armaduras

Além dos ensaios de laboratório realizados sobre amostras, foi realizada uma série bastante representativa de ensaios “in loco” para se determinar, em locais suspeitos da ocorrência de corrosão das armaduras, o valor do cobrimento das mesmas, a profundidade de carbonatação do concreto e o potencial de corrosão das armaduras.

A corrosão das armaduras pode ser entendida como um processo preponderantemente eletroquímico, que ocorre em meio aquoso, e que pode levar à perda total de seção das armaduras. Para que ocorra a corrosão eletrolítica é necessário que exista um eletrólito, que exista uma diferença de potencial e que exista oxigênio:

Há uma técnica baseada na medida do potencial de corrosão das armaduras do concreto, que é uma ferramenta auxiliar, e que é útil no diagnóstico da propensão de uma determinada região de armaduras estar mais suscetível à corrosão do que outras.

A técnica não fornece indicações sobre a velocidade e a intensidade do processo corrosivo das armaduras, mas apenas indicações de zonas eletroquimicamente mais ativas, ou seja, com maior propensão à corrosão.

O método de ensaio é baseado na ASTM C 876-87 que estabelece:

Faixa de potencial (MV)	Probabilidade de ocorrência de corrosão
Mais positivo que -200	Menor que 10%
Entre -200 e -350	Íncerta
Mais negativo que -350	Maior que 90%

Para complementar essa informação e auxiliar no conhecimento das causas da corrosão e na tomada de decisões relacionadas à intervenção na área com suspeita de corrosão, foram também determinadas a profundidade de carbonatação e o cobrimento das armaduras.

3 - PROGRAMA DE ENSAIOS

3.1 - Em Testemunhos de Concreto

O programa de extração de testemunhos de concreto e de ensaios efetuados em laboratório é mostrado na Tabela 1.

Tabela 1

Ensaio	Local	Estação		Entre Estações			
		Anhangabaú	Itaquera	Ana Rosa e Paraíso	Liberdade e S. Joaquim	Saúde e Praça. da Árvore	Belém e Bresser
Perda das Propriedades por Lixiviação do CA(OH ₂)	Nº de Testemunhos	22	2	8	8	8	8
	Análise microscópica da matriz aglomerante			-	-	-	-
	- Microscopia Estereoscópica	2	-	-	-	-	-
	- Por Microscopia Eletrônica de Varredura	2	-	-	-	-	-
	Ultra Som	6	-	-	-	-	-
	Penetração de Água sob Pressão	4	-	-	-	-	-

(Continuação - Tabela 1)

Local		Estação		Entre Estações			
		Anhangabaú	Itaquera	Ana Rosa e Paraíso	Liberdade e S. Joaquim	Saúde e Praça. da Árvore	Belém e Bresser
Ensaio							
Perda das Propriedades por Lixiviação do CA(OH ₂)	Massa Específica; Absorção d'Água; Índice de Vazios	6	-	-	-	-	-
	Módulo de Deformação	6	-	-	-	-	-
	Resistência à Compressão Axial	6	-	-	-	-	-
Reação Alcalis-Agregados e Perda das Propriedades	Microscopia Estereoscópica	-	2	2	2	2	2
	Microscopia Eletrônica de Varredura	-	-	2	2	2	2
	Massa Específica; Absorção D'Água; Índice de Vazios	-	-	6	6	6	6
	Módulo de Deformação	-	-	6	6	6	6
	Resistência à Compressão Axial	-	-	6	6	6	6

3.2 -No Concreto e na Armadura, “In Loco”

Os locais, as quantidades e os tipos de ensaio por local de ensaio são mostrados na Tabela 2

Local	Quantidade de Ensaio		
	Cobr. Armadura	Prof. Carbonatação	Pot. Corrosão
Pátio Jabaquara	15	15	7
Est. Artur Alvim	9	9	3
Pátio Itaquera	5	5	7
Est. Penha	9	9	1
Est. Vila Matilde	9	9	5
Est. Guilhermina	6	6	1
Est. Patriarca	3	3	1
Pat. Belém I	3	3	-
Pat. Belém II	6	6	6
Estação Sé	10	10	2
Est. Santa Cruz	-	-	1
Est. República	3	3	1

Tabela 2

3.3 Em Amostas de Água

Foram realizados ensaios químicos com amostras de água, de acordo com a norma CETESB L1-007 tendo sido coletadas 08 amostras na Estação Sé, 01 na Estação Anhangabaú, 01 na Estação Patriarca e 01 na Estação Penha.

3.4 -Em Amostras para Verificação da Presença de Combustíveis

Foram coletadas 4 amostras de material escorrido pela junta de dilatação no marco 2186 + 1,30 na parede oeste da via 2, entre Estações Paraíso e Ana Rosa.

4 - RESULTADOS E COMENTÁRIOS

Nas Tabelas 3.1 e 3.2 apresentam-se os resultados dos ensaios físicos e mecânicos, individuais e médios, por local de extração dos testemunhos.

4.1 - Massa Específica, Absorção e Índice de Vazios

Os valores de massa específica aparente seca são normais para todos os locais de extração, variando de 2236 a 2277 kg/m³, com valores baixos de desvio padrão. Exceção é feita ao trecho Ana Rosa - Paraíso que apresentou vários valores médios de 2124 kg/m³ porém com baixa variabilidade, como mostrado na Tabela 4.

Local \ Massa (kg/m³) Específica	Aparente Seca	Aparente Saturada	Aparente Fervida	Absoluta
Ana Rosa - Paraíso	2124	2313	2326	2628
Demais Subtrechos	2236-2277	2380-2408	2385-2416	2606-2622

Tabela 4 - Valores de Massa Específica

Como o valor da massa específica absoluta do concreto do subtrecho Ana Rosa - Paraíso é coerente com a dos demais subtrechos, presume-se que o concreto desta região está mais poroso que os demais.

Coerentemente com a indicação dos valores de densidade aparente, os valores de absorção dos testemunhos extraídos do subtrecho Ana Rosa - Paraíso estão sensivelmente acima dos demais subtrechos amostrados, embora sejam ainda valores considerados normais para este tipo de concreto, conforme mostra a Tabela 5.

Local \ Absorção (%)	Após Saturação	Após Fervura
Ana Rosa - Paraíso	8,054	8,671
Demais Subtrechos	5,174 - 6,120	5,493 - 6,360

Tabela 5 - Absorção

Também para o Índice de Vazio o fato se repete como mostra a Tabela 6.

Local \ Índice de (%) Vazios	Após Saturação	Após Fervura
Ana Rosa-Paraíso	17,333	18,699
Demais Subtrechos	11,874 - 13,755	12,556- 14,302

Tabela 6 - Índice de Vazios

Tabela 3.1 - Ensaio Físicos e Mecânicos

Trecho	Nº Corpo Prova	Ensaio										
		Massa Específica (Kg/dm ³) NBR 9778				Absorção (%) NBR 9778		Índice Vazio (%) NBR 9778		Ultra som (m/s) (NBR 8802)	Módulo de Deformação (GPa)	Resistência à Compressão (MPa)
		Aparente seca	Aparente Saturada	Aparente Saturada e Fervida	Absoluta	Após Saturação	Após Fervura	Após Saturação	Após Fervura			
Árvore - Saúde	03	2,253	2,371	2,381	2,584	5,258	5,696	11,963	13,010	3,518	13,24	27,80
	04	2,277	2,402	2,410	2,627	5,503	5,852	12,630	13,440	3,540	13,24	25,50
	05	2,308	2,420	2,424	2,612	4,878	5,045	11,300	11,742	3,448	17,09	28,10
	06	2,284	2,394	2,401	2,587	4,803	5,111	11,050	11,788	3,613	15,15	31,90
	07	2,275	2,395	2,403	2,610	5,265	5,639	12,081	12,989	3,709	13,59	32,00
	08	2,266	2,387	2,397	2,607	5,339	5,768	12,217	13,228	2,650	*	27,70
	M	2,277	2,395	2,403	2,605	5,174	5,519	11,874	12,700	3,413	14,46	28,83
	σ	0,018	0,016	0,014	0,016	0,274	0,349	0,591	0,742	384	1,67	2,58
Ana Rosa - Paraíso	01	2,137	2,310	2,323	2,624	8,067	8,677	17,469	18,833	3,126	7,76	22,10
	03	2,123	2,293	2,304	2,593	8,045	8,550	17,260	18,472	3,304	7,30	22,90
	04	2,144	2,308	2,319	2,559	7,673	8,180	16,627	17,823	3,161	9,82	18,60
	06	2,106	2,280	2,296	2,600	8,271	9,023	17,699	19,308	3,136	*	17,00
	07	2,126	2,298	2,311	2,608	8,065	8,688	17,378	18,735	3,200	9,82	22,90
	08	2,109	2,282	2,297	2,597	8,204	8,906	17,563	19,021	3,139	8,27	18,90
	M	2,124	2,295	2,308	2,597	8,054	8,671	17,333	18,699	3,178	8,59	20,40
	σ	0,015	0,012	0,011	0,011	0,207	0,295	0,377	0,512	67	1,17	2,55
Liberdade - São Joaquim	01	2,288	2,409	2,412	2,612	5,281	5,419	12,124	12,441	3,645	11,76	38,30
	02	2,254	2,385	2,389	2,610	5,934	6,101	13,409	13,788	3,405	14,16	37,80
	03	2,266	2,391	2,395	2,601	5,498	5,684	12,511	12,933	3,483	11,76	37,80
	04	2,285	2,392	2,394	2,565	4,665	4,774	10,688	10,936	3,686	14,02	40,10
	07	2,276	2,499	2,402	2,605	5,384	5,550	12,301	12,758	3,473	*	33,40
	08	2,288	2,397	2,401	2,599	5,258	5,428	12,022	12,480	3,715	14,55	32,40
	M	2,276	2,412	2,399	2,599	5,337	5,493	12,176	12,556	3,568	13,25	36,60
	σ	0,014	0,043	0,008	0,017	0,411	0,433	0,882	0,932	130	1,37	3,02

Tabela 3.2 - Ensaio Físicos e Mecânicos

Trecho	Nº Corpo Prova	Ensaio										
		Massa Específica (Kg/dm³) NBR 9778				Absorção (%) NBR 9778		Índice Vazio (%) NBR 9778		Ultra som (m/s) (NBR 8802)	Módulo de Deformação (GPa)	Resistência à Compressão (MPa)
		Aparente seca	Aparente Saturada	Aparente Saturada e Fervida	Absoluta	Após Saturação	Após Fervura	Após Saturação	Após Fervura			
Belém - Bresser	01	2,226	2,364	2,371	2,604	6,195	6,512	13,891	14,601	3,588	11,30	25,80
	02	2,262	2,385	2,390	2,594	5,413	5,656	12,313	12,865	3,645	14,89	30,10
	03	2,252	2,387	2,392	2,619	6,017	6,228	13,615	14,104	3,591	12,90	30,10
	04	2,238	2,378	2,383	2,616	6,248	6,457	14,050	14,540	3,581	12,90	28,70
	06	2,231	2,370	2,376	2,610	6,272	6,522	14,069	14,628	3,538	12,67	27,50
	08	2,209	2,354	2,359	2,598	6,574	6,787	14,590	15,075	3,438	*	26,60
	M	2,236	2,373	2,379	2,607	6,120	6,360	13,755	14,302	3,564	12,93	28,13
	σ	0,019	0,013	0,012	0,010	0,390	0,388	0,775	0,769	70	1,28	1,80
Estação Anhangabaú (c/ lixiviação)	02	2,230	2,369	2,380	2,622	6,250	6,709	14,081	15,055	4,608	15,61	24,40
	06	2,168	2,335	2,347	2,642	7,712	8,268	16,924	18,130	4,608	12,42	18,20
	12	2,245	2,355	2,366	2,554	4,899	5,388	11,120	12,232	4,740	17,80	20,30
	18	2,326	2,433	2,451	2,660	5,244	5,363	12,241	12,595	4,494	*	21,60
	20	2,203	2,343	2,352	2,688	6,348	6,758	14,112	14,150	4,105	10,69	22,90
	21	2,326	2,427	2,431	2,600	4,339	4,536	10,139	10,591	4,895	15,09	24,10
	M	2,250	2,377	2,388	2,628	5,799	6,170	13,103	13,792	4,575	14,32	21,91
	σ	0,065	0,045	0,043	0,047	1,218	1,339	2,451	2,633	268	2,79	2,38
Estação Anhangabaú (s/ lixiviação)	01	2,232	2,353	2,364	2,572	5,437	5,919	12,267	12,971	4,781	15,16	23,30
	05	2,253	2,372	2,377	2,572	5,278	5,494	11,951	12,439	4,815	*	30,40
	11	2,237	2,366	2,371	2,582	5,769	5,972	12,964	13,399	4,017	10,99	22,80
	13	2,236	2,355	2,366	2,569	5,325	5,806	12,034	13,070	4,673	15,37	22,70
	15	2,307	2,416	2,419	2,598	4,721	4,857	10,928	11,260	4,804	27,80	22,70
	17	2,337	2,464	2,469	2,691	5,410	5,628	12,709	13,197	4,247	*	25,00
	M	2,267	2,388	2,394	2,597	5,323	5,613	12,142	12,723	4,556	17,33	24,48
	σ	0,044	0,044	0,042	0,047	0,342	0,411	0,712	0,785	340	7,26	3,02

4.2 - Ultra-Som

Sob o ponto de vista de resultados de ensaios de ultra-som, a qualidade do concreto é avaliada, de acordo com a NBR 8802, como abaixo indicado:

$V < 2000$	-----	péssimo	
$2000 < V < 3000$	-----	ruim	
$3000 < V < 3500$	-----	aceitável	Obs.: $V = \text{m/s}$
$3500 < V < 4500$	-----	bom	
$4500 < V$	-----	excelente	

Também neste ensaio constata-se pela tabela 3 que o subtrecho Ana Rosa - Paraíso apresenta valores de velocidade ultra-sônica da ordem de 3180 m/s, classificando o concreto apenas como aceitável e inferior aos demais subtrechos que alcançam valores acima de 3500 m/s (concretos classificadores como bons) e até superiores a 4500 m/s (concreto excelente).

4.3 - Resistência à Compressão e Módulo de Deformação

Para análise e interpretação dos resultados de resistência à compressão e de módulos de deformação, obtidos dos testemunhos de concreto extraídos e apresentados na **Tabela 3**, levou-se em consideração os seguintes aspectos:

- Os testemunhos referentes aos trechos Praça da Árvore-Saúde, Ana Rosa-Paraíso, Liberdade-São Joaquim e Belém-Bresser foram extraídos propositalmente de áreas muito fissuradas, com indícios de reação álcalis-agregado.
- É sabido, e citado pela bibliografia nacional e internacional, que a fissuração provocada pela reação álcalis-agregado afeta, de forma negativa e muito mais contundente, os valores de resistência à tração e módulo de deformação dos concretos do que a resistência à compressão. Os valores de módulo de deformação encontrados para os concretos analisados estão bastante abaixo dos valores normais encontrados para concretos convencionais com resistências superiores a 20,0 MPa. Era de se esperar para o módulo desses concretos, valores da ordem de 25,0 a 30,0 GPa. Deve-se considerar que os concretos extraídos de cada trecho podem não ser iguais do ponto de vista de dosagem e requerimento de resistência de projeto, como parece indicar as diferenças entre eles.
- Com relação aos resultados dos ensaios de módulo de deformação e resistência à compressão feitos com os testemunhos extraídos na Estação Anhangabaú há de considerar que:

- O concreto lixiviado apresenta porosidade muito maior do que o não lixiviado e portanto é mais deformável e possui módulo de deformação menor;
- O efeito negativo da porosidade provocada pela lixiviação do concreto é menos significativa do que a fissura provocada pela reação álcalis-agregado, tanto no valor do módulo quanto da resistência à compressão;

4.4 - Análise Química da Água

A análise dos resultados dos ensaios químicos das 13 amostras de água coletadas em diversos pontos da estrutura, feita com base na norma CETESB L1-007 é mostrado na Tabela 7, donde se conclui que o seu grau de agressividade é em geral nulo, chegando em alguns casos a ter agressividade fraca ou média.

Tipo de Agressividade	Grau de Agressividade										
	Estação Anhangabaú	Estação Patriarca	Estação Penha	Estação Sé - Amostra N°							
				1	2	3	4	5	6	7	8
Lixiviação incluindo a hidrólise dos compostos de cálcio do aglomerante	Nulo	Nulo	Nulo	Fraco	Nulo	Nulo	Fraco	Nulo	Fraco	Fraco	Médio
Lixiviação acompanhada de carbonatação ou troca iônica	Nulo	Nulo	Nulo	Nulo	Nulo	Médio	Fraco	Nulo	Médio	Nulo	Médio
Expansão por formação de gipsita ou etringita, e lixiviação	Nulo	Nulo	Nulo	Nulo	Nulo	Fraco	Fraco	Nulo	Fraco	Fraco	Nulo

Tabela 7 - Ensaios de Água

4.5 - Presença de Combustíveis

A análise das amostras colhidas para verificação da presença de combustíveis foi feita no Instituto de Pesquisas Tecnológicas - IPT, utilizando o método de cromatografia em fase gasosa acoplada a espectrometria de massas - procedimento DQ-LAQU-CG-013, que concluiu:.

“Da análise efetuada verificou-se a presença preponderante de hidrocarbonetos alifáticos (C₇ a C₁₁) e pequenas proporções de hidrocarbonetos aromáticos (C₈ H₁₀ ; C₉ H₁₂ e C₁₀ H₁₄). Não foi constatada a presença de etanol, benzeno e tolueno.

Comparando o perfil cromatográfico obtido na análise das amostras com o de alguns produtos derivados de petróleo, constatou-se semelhança dessas amostras com gasolina, após evaporação dos compostos mais voláteis”.

4.6 - Estudos Complementares sobre a Influência da Lixiviação nas Propriedades do Concreto

O estudo foi realizado sobre 02 dos testemunhos extraídos na estação Anhangabaú em área com lixiviação (nº 10) e sem lixiviação (nº 20) utilizando técnicas de reconstituição de traço, microscopias ótica e eletrônica de varredura e difratometria de raios x. Os resultados dos ensaios de reconstituição de traço são mostrados na Tabela 8.

Amostra	Traço - Proporção em Peso		
	Cimento	Areia	Brita
10 - com lixiviação	1	2	2
20 - sem lixiviação	1	2	4

Tabela 8 - Reconstituição de Traço

Os estudos microscópicos de luz refletida mostraram que os concretos são semelhantes, compatíveis com processos normais de dosagem, preparação e lançamento. Os agregados graúdos são granitos e quartzitos e a areia é natural. Reconhece-se, apenas na amostra com lixiviação, a presença de material branco (Foto 2) com aspecto porcelânico, maçico ou acicular, bem como grande quantidade de óxido e hidróxido de ferro (Foto 3) decorrentes de oxidação das armaduras.

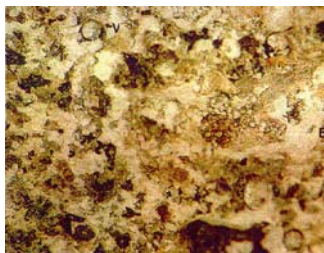


Foto 2 - Material branco (B) disperso na pasta (12x)

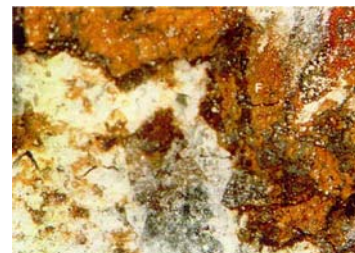


Foto 3 - Óxido e hidróxido de ferro - F (6x)

As análises feitas ao microscópio eletrônico mostram microestruturas distintas das duas amostras, no que se refere ao teor e tipo de hidratados presentes, sendo que no concreto sem lixiviação a microestrutura é densa, pouco porosa, com predominância de portlandita e C-S-H tipo III, típico de pastas mais evoluídas (Foto 4). No concreto com lixiviação reconheceu-se uma pasta mais porosa, e grande quantidade de gel sílico-cálcico-aluminoso, não expansivo, etringita e C-S-H tipo I,- Foto 5, correspondentes ao material branco da Foto 1.

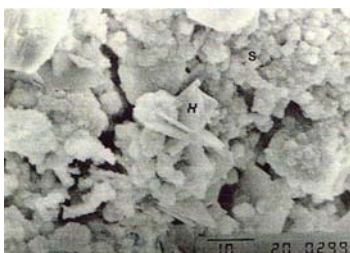


Foto 4 - Concreto sem lixiviação
(1500 x) C-S-H Tipo III (S) e
silicatos hidratados (H)

Foto 5 - Concreto com lixiviação
(3500 x) portlandita bem
cristalizada (P) e C-S-H Tipo I (S)

Os resultados dos estudos difratométricos são mostrados na Tabela 9.

Compostos Minerais	Distância Interplana Principal (a°)	Frequencia Relativa	
		Com lixiviação	Sem lixiviação
Quartzo	3.34	****	*****
Calcita	3.03	*****	***
Mica	9.98	*	< *
Feldspato	3.26	< *	< *
Portlandia	4.92	< *	< *
Etringita	9.73	< *	< *
Gipsita	7.56	< *	< *
Tricalcio Aluminato	8.43	< *	-

Tabela 9

Os difratogramas obtidos para os concretos mostram composições minerais essencialmente semelhantes, havendo entretanto algumas variações nos teores dos constituintes

4.7 - Presença da Reação Alcalis-Agregados

Foram feitos estudos de avaliação de petrográfica por microscopia ótica, estereoscópica e eletrônica de varredura com EDS, em 10 testemunhos de concretos de regiões suspeitas de ocorrência de reação alcalis-agregado extraídos dos locais indicados na Tabela 10.

N° do Testemunho	Origem
1 e 2	VCA Ana Rosa / Paraíso
3 e 4	VCA Liberdade / São Joaquim
5 e 6	VCA Saúde / Praça da Árvore
7 e 8	Estação Itaquera
9 e 10	VCA Belém / Bresser

**Tabela 10 - Local de Extração de Testemunhos para
Estudos de Reação Alcalis-Agregado**

Das análises macroscópicas e estereoscópicas feitas nos testemunhos extraídos concluiu-se tratar-se de concretos bem adensados, com baixa porosidade, sem fissurações, e não carbonatados. Observou-se também boa aderência do contato da argamassa com o agregado gráúdo.

Quanto aos aspectos macroscópicos relativos a reação alcalis-agregado observou-se:

- Há sugestões de bordas em torno dos agregados graúdos em todos os testemunhos, exceto para aqueles referentes ao trecho Belém-Bresser;
- Observou-se também que há poros parcialmente preenchidos com material branco em todos os testemunhos exceto para os do trecho Belém-Bresser;
- Não se observou micro fissurações em nenhum testemunho.

As fotos 6 e 7 ilustram essas observações nos testemunhos do Trecho Liberdade/S.Joaquim.



Foto 6 - Material Branco (B) sobre agregado

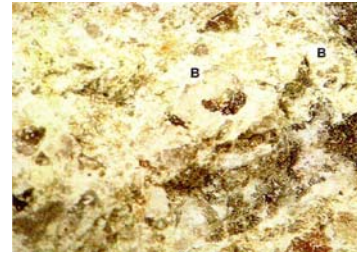


Foto 7 - Material Branco (B) disperso pela pasta e em bordas de agregado

Quanto aos agregados constituintes dos concretos concluiu-se tratar de areia natural como agregado miúdo e brita de rocha granítica potencialmente relativa, como agregado graúdo.

Os estudos feitos com microscopia eletrônica de varredura comprovaram a ocorrência de reações alcalis-agregado, através da identificação de gel expansivo sílico-cálcico-potássico, com relação $K/Ca < 1$ e seus produtos de cristalização como o ilustrado nas Fotos 8 e 9.



Foto 8 - Gel (G) e produtos expansivos (P) (A.Rosa -Paráíso)



Foto 9 - Produtos cristalizados (C) expansivos (Itaquera_)

4.8 - Potencial de Corrosão, Cobrimento e Carbonatação

Foram feitas ao longo das linhas 1 e 2, 78 determinações de cobrimento de armaduras e profundidade de carbonatação do concreto e, concomitantemente e nos mesmos locais, 49 ensaios de potencial de corrosão.

Constatou-se que há:

- 9,0 valores de cobrimento menores que 1,0 cm;
- 26,0 valores de cobrimento menores que 1,5 cm;
- 27,0 valores de profundidade de carbonatação superiores ao cobrimento.

Em geral, os concretos com maiores cobrimentos e menores profundidades de carbonatação apresentam potenciais de corrosão menores que 10%.

Os elementos estruturais com menores cobrimentos e profundidades de carbonatação superiores ao cobrimento apresentam potencial de corrosão acima de 90%.

Observou-se também que os valores médios de cobrimento das armaduras são da ordem de 2,50 cm, enquanto que os valores médios de profundidade de carbonatação são da ordem de 1,50 cm, indicando dessa forma que, a princípio, as armaduras estão bem protegidas tanto física como quimicamente. Chama-se no entanto atenção para o fato que, em valores absolutos, 30% dos resultados de profundidade de carbonatação são superiores ao cobrimento das armaduras e estão quase sempre relacionados a valores de cobrimento menores que 1,50 cm.

Não se observou nenhuma correlação dos resultados dos ensaios com o local da implantação da obra.

5 - COMENTÁRIOS

Da análise dos resultados de ensaios físicos e mecânicos executados para determinação da massa específica, absorção, índice de vazios e ultra-som, mostrados na **Tabela 3**, constata-se que os valores encontrados para os vários trechos amostrados são compatíveis com valores médios encontrados em bibliografia, obtidos para concretos convencionais.

Os valores dos resultados de ensaios do trecho Ana Rosa-Paraíso indicam porém, de forma consistente e coerente, tratar-se de um concreto mais poroso que os demais. Não se consegue apontar com segurança a causa do fato. Ressalta-se todavia que embora os valores das propriedades físicas e mecânicas comentadas sejam inferiores a todas as dos demais trechos

estudados, não fogem muito da normalidade de valores das mesmas propriedades encontradas em concretos convencionais.

Com relação aos valores de módulo de deformação e resistência à compressão dos testemunhos extraídos de regiões com suspeita da presença da reação álcalis-agregado, e confirmada pelos estudos petrográficos e microscópicos, confirma-se que o grau de fissuração tem influência marcante na diminuição do módulo de deformação do concreto, com menor influência nas demais propriedades ensaiadas.

Estas mesmas propriedades, estudadas na Estação Anhangabaú para verificar a influência da lixiviação do concreto por água corrente mostraram-se também afetadas pelo fenômeno, porém de forma menos significativa.

Os resultados dos ensaios feitos sobre amostras de água coletadas em vários pontos, ensaiadas e analisadas conforme Norma CETESB L1-007 e apresentados na Tabela 7, mostram que, em geral, a água em contato com as estruturas de concreto do Metrô é de agressividade fraca ou nula chegando porém, em alguns casos, a ter grau médio de agressividade.

A análise das amostras colhidas para verificação da presença de combustíveis em contato com o concreto constatou semelhança das mesmas com gasolina, através da comparação do perfil cromatográfico das mesmas com alguns produtos derivados do petróleo.

Com relação aos estudos de reconstituição de traço, microscópicos e difratométricos executados com as amostras de regiões com sintomas de lixiviação e carbonatadas, extraídas da Estação Anhangabaú, observou-se que embora os concretos estudados (com e sem suspeita de lixiviação) sejam semelhantes, a nível microscópico observam-se diferenças microestruturais entre eles, assim resumidas:

- No concreto sem lixiviação, a micro-estrutura é densa, pouco porosa, típica de pastas mais evoluídas ou com relações água/cimento mais baixas, ao passo que no concreto lixiviado a microestrutura é porosa com características de pastas menos evoluídas e/ou com relações água/cimento mais altas;
- Essa porosidade relativamente mais alta do concreto com lixiviação pode ter favorecido, e ao mesmo tempo, ter sido agravada pelo processo de lixiviação;
- Os ensaios de reconstituição de traço mostraram maior teor de cimento para o concreto com lixiviação em relação ao não lixiviado, contrariamente ao esperado.

Observa-se portanto que, com exceção dos resultados dos ensaios de reconstituição de traço, as conclusões dos estudos microscópicos e difratométricos são coerentes com os ensaios físicos e mecânicos, demonstrando a deterioração do concreto quando sujeito a lixiviação.

Ressalta-se ainda o efeito negativo da lixiviação e da carbonatação do concreto na despassivação das armaduras e o conseqüente aumento da propensão à corrosão.

Dos estudos e ensaios especiais realizados, confirmou-se também, através da investigação da ocorrência de reações expansivas por petrografia, as suspeitas da existência de reações expansivas do tipo álcalis-agregado, conforme conclusão dos estudos, transcrita a seguir:

“O conjunto de dados obtidos revela que os concretos estudados apresentam características estruturais e texturais próprias de concretos submetidos a processos normais de preparação e dosagem. Há porém registros incontestáveis da ocorrência de reação álcalis-agregado nos concretos das amostras extraídas da Via Ana Rosa-Paraíso e da Estação Itaquera, tendo sido identificados nas amostras citadas produtos expansivos em teores significativos”.

Com relação aos resultados dos ensaios de potencial de corrosão relacionados aos ensaios de determinação da profundidade de carbonatação e do cobrimento das armaduras, tirou-se as seguintes observações principais:

- Há uma razoável correlação (em torno de 75%) entre profundidade de carbonatação, cobrimento das armaduras e potencial de corrosão.
- Os valores médios de cobrimento das armaduras são da ordem de 2,5 cm e os valores médios de profundidade de carbonatação são da ordem de 1,5 cm. Em termos absolutos 30% dos valores de profundidade de carbonatação são superiores ao cobrimento das armaduras e estão geralmente relacionados a valores de cobrimento menores que 1,5 cm. Não se observou nenhuma correlação dos resultados dos ensaios com o local de implantação da obra.