

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOTECNIA,
MECÂNICA DAS ESTRUTURAS E CONTRUÇÃO CIVIL

**CONCRETO PROJETADO COMO
REVESTIMENTO DE TÚNEIS NA FERROVIA
NORTE-SUL**

Análise segundo parâmetros de durabilidade

ANTÔNIO DAVI BARBOSA DE MENESES

D0029C10
GOIÂNIA
2010

ANTÔNIO DAVI BARBOSA DE MENESES

**CONCRETO PROJETADO COMO
REVESTIMENTO DE TÚNEIS NA FERROVIA
NORTE-SUL**

Análise segundo parâmetros de durabilidade

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Mecânica das Estruturas e Construção Civil da Universidade Federal de Goiás para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Construção Civil

Orientador: Oswaldo Cascudo

D0029C10
GOIÂNIA
2010

Dados Internacionais de Catalogação e Publicação (CIP)
(GPT/BC/UFG)

M543c Meneses, Antônio Davi Barbosa.
Concreto projetado como revestimento de túneis na Ferrovia Norte-Sul [manuscrito]: análise segundo parâmetros de durabilidade/Antônio Davi Barbosa de Meneses. -2010.
xviii, 146 f.: il, figs, tabs.

Orientador: Prof. Dr. Oswaldo Cascudo.
Dissertação Mestrado Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil, 2010.
Bibliografia.
Inclui lista de figuras, abreviaturas, siglas e tabelas.
Anexos.

1. Concreto 2. Durabilidade 3. Túneis – Concreto Projetado – Via seca – Via úmida. I. Título.

CDU:624

Autorizamos a reprodução total ou parcial deste trabalho, para fins de estudo e pesquisa.

Goiânia, ____/____/____

Assinatura:

e-mail: antoniodavi@gmail.com

ANTÔNIO DAVI BARBOSA DE MENESES

**CONCRETO PROJETADO COMO REVESTIMENTO DE TÚNEIS NA
FERROVIA NORTE-SUL**

Análise segundo parâmetros de durabilidade

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Mecânica das Estruturas e Construção Civil da Universidade Federal de Goiás para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Aprovada em ____/____/____.

Prof. Dr. Oswaldo Cascudo

(Presidente)

Universidade Federal de Goiás

Prof. Dr. Daniel de Lima Araújo

(Membro interno)

Universidade Federal de Goiás

Prof. Dr. Luiz Roberto Prudêncio Júnior

(Membro externo)

Universidade Federal de Santa Catarina

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus todo poderoso, de onde tudo vem e para onde tudo vai. Ao Divino Pai Eterno criador de todas as coisas.

Ao meu orientador Prof. Dr. Oswaldo Cascudo, pelo apoio, incentivo, sugestões e contribuições ao longo desta pesquisa. Pelos inestimáveis ensinamentos e orientações na busca do caminho correto nesta dissertação. Sem suas orientações preciosas não haveria como realizar este programa experimental.

Ao Centro Tecnológico de Engenharia Civil de FURNAS Centrais Elétricas S.A. a quem gostaria de agradecer na pessoa do Engenheiro Civil Ricardo Ferreira Barbosa pela viabilização da realização do trabalho experimental. Sem deixar de mencionar os funcionários e técnicos do Centro Tecnológico, que contribuíram com dedicação, seriedade e competência durante a realização deste estudo.

Ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), pelo indispensável apoio a minha pesquisa com estudo experimental, bem como pelo financiamento dos ensaios de reconstituição de traço realizados no laboratório de materiais de construção civil do Centro de Tecnologias de Obras de Infraestrutura do IPT – SP.

À VALEC Engenharia Construções e Ferrovias S.A na pessoa do Presidente Eng. José Francisco das Neves, por ter me dado a oportunidade de fazer parte deste sonho de construir a Ferrovia Norte–Sul. Aos Engenheiros Francisco de Souza Amorim, Wagner Correia e Ezequias Pereira Nogueira, pela contribuição preciosa e pelos ensinamentos dispensados a minha pessoa.

Aos meus pais, toda a minha gratidão, por terem moldado meu caráter pautado em princípios de honestidade, respeito, amor, humildade e dignidade. Neles busco inspiração e motivação para tornar-me, a cada dia, um ser humano melhor e merecedor de ser seu filho.

Aos meus familiares que sempre estiveram ao meu lado. As minhas queridas irmãs Hélia Barbosa de Meneses e Yara Beatriz Barbosa de Meneses pelo apoio e incentivo, ao meu irmão Javé Barbosa de Meneses pelos conselhos e instruções.

A minha esposa Paula Pires Pereira Barbosa pelo incentivo, apoio e sem a qual certamente não teria obtido êxito nesta empreitada. Uma mulher sempre presente ao meu lado, dedicando carinho, atenção e amor nos momentos mais difíceis que precisei. Paula, eu te amo.

Aos mestres e doutores do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia e Construção Civil (PPGECON) da Universidade Federal de Goiás (UFG), pelos conhecimentos

transmitidos e valiosos ensinamentos ao longo de todo o curso de mestrado, e à Coordenação do PPGECON pelo apoio institucional e pela qualidade do ambiente educacional oferecido.

A Eng^a Daiane Ramos pelo apoio e incentivo neste programa experimental pela colaboração técnica inicial no assunto de concreto projetado para túneis e na disposição de bibliografias técnicas na área.

Aos meus queridos amigos e companheiros de jornada, Wesley Damasceno, Alessandro Gonzaga, Idalêncio Crescêncio, Domingos Neto, Fabio, Bertimar, Daniel, Rocha, Rubi e em especial ao laboratorista Agnaldo Mendanha, que não mediram esforços para tornar real nosso objetivo comum. Tenham certeza que, durante o nosso convívio quase que diário, aprendi a respeitá-los e admirá-los pelos profissionais e pessoas maravilhosas que são. A empresa supervisora Concremat Engenharia e Tecnologia S.A. do lote 01 da Ferrovia Norte-Sul, pela oportunidade de estar acompanhando e supervisionando tecnicamente uma obra tão importante, dando a possibilidade da realização deste estudo experimental.

Ao Eng. Hideraldo Caron, Adv. Marinês Chiele e Eng^a Nadja Monteiro do DNIT – Departamento Nacional em Infra-Estrutura de Transportes, sem o qual não seria possível a conclusão desta monografia, meu muito obrigado.

A empresa Construtora Queiroz Galvão Engenharia SA, através de todos os seus funcionários que me apoiaram e incentivaram neste programa experimental, através do qual não seria possível a realização deste, aos Engenheiros Fábio Figueiredo Silva e Reinaldo Maluf, responsáveis pelo lote 01 da Ferrovia Norte-Sul em Goiás que me permitiram e apoiaram na realização desta dissertação.

A Deus pelo milagre da vida e aos amigos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho, um sonho sonhado sozinho é somente um sonho, mas um sonho sonhado em conjunto torna-se realidade. Muito obrigado também, a todos os colegas e amigos do mestrado.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	01
1.1 JUSTIFICATIVA E IMPORTÂNCIA DO TEMA	08
1.2 OBJETIVOS	14
1.2.1 Objetivo geral	14
1.2.2 Objetivos específicos	14
CAPÍTULO 2 - CONCRETO PROJETADO PARA REVESTIMENTO DE	
TÚNEIS	15
2.1 SISTEMA VIA SECA E VIA ÚMIDA	19
2.2 RECOMENDAÇÕES PARA OS MATERIAIS EMPREGADOS NO	
CONCRETO PROJETADO VIA ÚMIDA	23
2.2.1 Aglomerantes	24
2.2.2 Agregado	25
2.2.3 Aditivos	26
2.2.4 Telas metálicas	26
2.3 SISTEMA DE SUPORTE E O USO DO CONCRETO PROJETADO	26
2.4 O NOVO MÉTODO AUSTRIACO DE CONSTRUÇÃO DE TÚNEIS	
(NATM)	29
2.5 DURABILIDADE DO CONCRETO PROJETADO PARA O NATM	33
CAPÍTULO 3 - METODOLOGIA DO TRABALHO EXPERIMENTAL	37
3.1 VARIÁVEIS DO TRABALHO	37
3.1.1 Variáveis independentes	37
3.2 MATERIAIS EMPREGADOS	38
3.2.1 Cimento	38
3.2.2 Agregados	39
3.2.3 Aditivos	40
3.2.4 Concretos estudados	41
3.3 MÉTODOS	41
3.3.1 Moldagem de placas	41
3.3.2 Processo e equipamentos de projeção	43
3.3.3 Extração dos corpos-de-prova	44
3.3.4 Ensaaios	45

3.3.4.1	Condições fixas.....	47
a)	Idade	47
b)	Forma de armazenamento e cura	47
c)	Amostragem	49
3.3.4.2	Ensaio de durabilidade	53
a)	Absorção de água por capilaridade	53
b)	Absorção de água por imersão	55
c)	Penetração de água sob pressão	57
d)	Resistividade elétrica superficial	61
e)	Penetrabilidade de íons cloreto	63
3.3.4.3	Outros ensaios e estudos complementares	67
a)	Resistência à compressão	67
b)	Reconstituição de traço	69
c)	Estudos da reflexão durante a projeção	69
CAPÍTULO 4 - APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS		71
4.1	APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS	71
4.1.1	Estudo de reflexão e reconstituição de traço	71
4.1.1.1	Estudo de Reflexão	71
4.1.1.2	Reconstituição de traço	74
4.1.2	Resistência à compressão	77
4.1.3	Ensaio associado à durabilidade	83
4.1.3.1	Absorção de água por capilaridade	83
4.1.3.2	Absorção de água por imersão	90
4.1.3.3	Penetração de água sob pressão	96
4.1.3.4	Resistividade elétrica superficial	99
4.1.3.5	Penetrabilidade de íons cloreto	103
4.1.4	Parâmetros associados à durabilidade	109
4.1.5	Discussão final dos resultados	110
CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS		115
ANEXOS		120
ANEXO A		121
ANEXO B		131
ANEXO C		136

REFERÊNCIAS	138
BIBLIOGRAFIA	142

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – A máquina “plastergun” utilizada por Akeley em 1907 (GASPARIM, 2007)	2
Figura 1.2 – Emboque norte túnel 1 Ferrovia Norte Sul – trecho Anápolis - Porto Seco Novembro/2008	6
Figura 1.3 – Escavação túnel 1 Ferrovia Norte Sul – trecho Anápolis Novembro/2008	6
Figura 1.4 – Emboque norte túnel 1 Ferrovia Norte Sul – trecho Anápolis - Porto Seco Agosto/2009.....	7
Figura 1.5 – Projeto moderno de revestimento de túneis – vista em corte do túnel 1, lote 1, Ferrovia Norte-Sul - método NATM – detalhe das cambotas e do invert...	11
Figura 2.1 – Projeção no túnel 1 Ferrovia Norte-Sul – trecho Anápolis - Porto Seco	16
Figura 2.2 – Projeção em placas no túnel 01 – emboque norte – sistema via úmida.	17
Figura 2.3 – Projeção do concreto – emboque norte – túnel 1 Utilização de gaiola de sustentação em escavadeira	17
Figura 2.4 – Detalhe da cambota – armação - túnel 01 ferrovia norte sul – trecho Anápolis - Porto Seco	18
Figura 2.5 – Enfilagens no túnel 01 ferrovia norte sul (trecho 01) – suportes superficiais ou contínuos – projetos da obra	18
Figura 2.6 – Diagrama do processo de projeção via seca (BARBOSA, 2001).....	19
Figura 2.7 – Processo de fluxo aerado para concreto projetado via seca (SCHLUMPF; HÖFLER, 2004)	20
Figura 2.8 – Diagrama do processo de projeção via úmida (BARBOSA, 2001)	21
Figura 2.9 – Processo de fluxo aerado para concreto projetado via úmida (SCHLUMPF; HÖFLER, 2004)	22
Figura 2.10 – Processo de fluxo denso para concreto projetado via úmida (SCHLUMPF; HÖFLER, 2004)	22
Figura 2.11 – Carregamento na casca de concreto - túnel 01 do trecho 01 da Ferrovia Norte Sul	27
Figura 2.12 – Esforços de compressão na casca de concreto - $p=5,8 \text{ tf/m}^2$ e $p_R=43,28 \text{ tf/m}$	28
Figura 2.13 – Método Austríaco Moderno – NATM. A numeração indica a sequência de escavação do maciço, sendo a numeração em romanos indicam a instalação de suportes (PALERMO, 1997)	30
Figura 2.14 – Seqüência Construtiva do Método NATM (PALERMO, 1997)	31
Figura 3.1 – Fluxograma das variáveis do trabalho experimental	38
Figura 3.2 – Placa metálica (esquerda) e placa de madeira (direita) para moldagem para retirada de corpos-de-prova	42
Figura 3.3 – Alimentação de concreto no emboque sul do túnel 1. Sistema via úmida - Bomba injetora <i>Schwing</i>	43
Figura 3.4 – Alimentação de cimento e agregados no emboque sul do túnel 2. Sistema via seca – Bomba injetora <i>Sheikan Ancor Jet</i>	44
Figura 3.5 – Extração de corpos-de-prova da placa. Local: canteiro de obra da Queiroz Galvão Construtora S.A	45

Figura 3.6 – Conjunto de placas produzidas numa seqüência de moldagem com proteção de capa plástica	48
Figura 3.7 – Conjunto de corpos de prova retirados das placas e dos túneis em condições de armazenamento e cura em câmara úmida	48
Figura 3.8 – Extração de testemunho na estrutura do túnel 01 – emboque norte Detalhe da colocação de balde acima do nível da extratora	49
Figura 3.9 – Extração de testemunho na estrutura do túnel 01 – emboque norte Placa parafusada na base e no túnel – lado de cima	50
Figura 3.10 – Extração de testemunho na estrutura do túnel 01 – emboque norte Placa parafusada na base e no túnel – lado de baixo (inversão da placa da base)	50
Figura 3.11 – Extração de testemunho na estrutura do túnel 01 – emboque norte Retirada do corpo de prova – lado de baixo – detalhe com arame armado facilita remoção	51
Figura 3.12 – Extração de testemunho na estrutura do túnel 01 – emboque sul Placa parafusada na base e no túnel – lado de baixo – detalhe balde	51
Figura 3.13 – Realização do ensaio de absorção por capilaridade – detalhe do anel metálico como regulador da altura do nível da água nos corpos-de-prova - Furnas Centrais Elétricas S.A.....	54
Figura 3.14 – Rompimento dos corpos-de-prova para medição do nível de penetração nos ensaios de absorção capilar	54
Figura 3.15 – Medição com paquímetro da altura de penetração da umidade no corpo-de-prova, por absorção capilar	55
Figura 3.16 – Realização do ensaio de absorção por imersão – detalhe realização da fervura - Furnas Centrais Elétricas S.A	56
Figura 3.17 – Determinação da massa imersa em água no ensaio de absorção por imersão, utilizando-se balança hidrostática	56
Figura 3.18 – Detalhe de disco de liga de aço, confeccionado para este programa experimental para adaptação às dimensões dos corpos de prova – ensaio de penetrabilidade de água sob pressão	58
Figura 3.19 – Realização de ensaio de penetrabilidade de água sob pressão – detalhe do aparelho com pressão de 0,7 MPa – NBR 10787:1994 – ABNT	59
Figura 3.20 – Rompimento diametral dos corpos-de-prova do ensaio de penetrabilidade de água sob pressão - Furnas Centrais Elétricas S.A	59
Figura 3.21 – Detalhe do nível de penetração da água nos corpos-de-prova após rompimento no ensaio de penetrabilidade de água sob pressão	60
Figura 3.22 – Medição, no corpo-de-prova, da altura de penetração da frente de umidade com paquímetro Digital	60
Figura 3.23 – Aparelho de medição de resistividade elétrica – modelo RESI, marca Proceq - detalhe da saturação em água das esponjas posicionadas nas extremidades dos eletrodos, previamente ao início das medições	61
Figura 3.24 - Medição da resistividade elétrica superficial em corpo de prova de concreto projetado	62
Figura 3.25 – Capeamento lateral dos corpos-de-prova de 75 mm com liga asfáltica dentro do tubo de PVC de 100 mm.....	64
Figura 3.26 – Processo de saturação a vácuo das amostras para ensaio de penetrabilidade de íons cloreto.....	65
Figura 3.27 – Amostra colada e vedada com silicone transparente nas semi-células em acrílico.....	65
Figura 3.28 – Disposição esquemática do ensaio de penetrabilidade de íons cloreto	66

Figura 3.29 – Leitura das medições das correntes no ensaio de penetrabilidade de íons cloreto	66
Figura 3.30 – Realização de ensaio de compressão axial aos 28 dias dos corpos-de-prova das placas e extraídos dos túneis	68
Figura 3.31 – Realização de ensaio de compressão axial aos 28 dias dos corpos-de-prova das placas e extraídos dos túneis	68
Figura 4.1 – Resultados médios (com desvio padrão) de resistência à compressão dos corpos-de-prova extraídos das placas por sistema de projeção	78
Figura 4.2 – Resistência à compressão comparando os sistemas via seca e via úmida para os concretos projetados nas placas e extraídos dos túneis	79
Figura 4.3 – Resistência à compressão (valores médios com os seus desvios-padrão) comparando os sistemas via seca e via úmida para os concretos projetados nas placas e extraídos dos túneis, aos 28 dias	79
Figura 4.4 – Absorção de água por capilaridade - altura de penetração, comparando os sistemas via seca e via úmida, para os concretos projetados nas placas e extraídos dos túneis.	84
Figura 4.5 – Absorção de água por capilaridade - índice de absorção de água, comparando os sistemas via seca e via úmida, para os concretos projetados nas placas e extraídos dos túneis	84
Figura 4.6 – Estrutura porosa do concreto (MEHTA; MONTEIRO, 1994)	86
Figura 4.7 – Diferença entre porosidade e permeabilidade (FERREIRA, 2000 <i>apud</i> MENDES, 2009)	87
Figura 4.8 – Influência da relação a/c na porosidade total e capilar (NEVILLE, 1997)	88
Figura 4.9 – Correlação entre absorção de água após imersão e fervura, comparando os sistemas via seca e via úmida, para os concretos projetados nas placas e extraídos dos túneis.	92
Figura 4.10 – Correlação entre índice de vazios após saturação e fervura, comparando os sistemas via seca e via úmida, para os concretos projetados nas placas e extraídos dos túneis.	92
Figura 4.11 – Correlação entre a absorção por imersão e fervura e o volume de pasta presente no concreto projetado (FIGUEIREDO, 2005)	94
Figura 4.12 – Penetração de água sob pressão, comparando os sistemas via seca e via úmida, para os concretos projetados nas placas e extraídos dos túneis.....	97
Figura 4.13 – Resistividade elétrica superficial para os concretos projetados nas placas e extraídos dos túneis	100
Figura 4. 14 – Penetrabilidade de íons cloreto, comparando os sistemas via seca e via úmida, para os concretos projetados nas placas e extraídos dos túneis.....	106
Figura 4.15 – Formas de penetração de cloretos em concretos (Adaptado de BORGES <i>et al.</i> ; ANDRADE, 2001 <i>apud</i> MENDES, 2009)	108
Figura 4.16 – Nível de porosidade do concreto em função da fração hidratada do cimento e o tempo de cura do concreto projetado (PALERMO, 1997). Detalhe: curvas de relação a/c ascendentes correlacionadas com o aumento da porosidade capilar	114
Figura B 1 – Emboque norte túnel 2 ferrovia norte sul – trecho Anápolis - Porto SecoAbril/2009.....	132
Figura B 2 – Emboque norte túnel 01 ferrovia norte sul – trecho Anápolis - Porto Seco Abril/2009	132
Figura B.3 – Emboque sul túnel 1 ferrovia norte sul – trecho Anápolis – Porto Seco Abril/2009	133

Figura B 4 – Instalação da extratora na gaiola da escavadeira (tentativa de extração no túnel 1)	133
Figura B 5 – Corpos-de-prova retirados da placa – separados por sistema de projeção (via seca e via úmida)	134
Figura B 6 – Emboque norte túnel 1 ferrovia norte sul – trecho Anápolis - Porto Seco Abril/2009	134
Figura B 7 – Emboque norte túnel 1 Ferrovia Norte sul – trecho Anápolis - Porto Seco Abril/2009 – colocação de enfilagens	135
Figura B 8 – Emboque norte túnel 2 Ferrovia Norte sul – trecho Anápolis - Porto Seco Abril/2009 – colocação de telas no túnel	135
Figura C 1 – Máquina de corte de concreto para corpos de prova para o tamanho de realização dos ensaios - Centro Tecnológico de Engenharia Civil de Furnas Centrais Elétricas.....	137

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 - Fatores de comparação entre métodos de via seca e úmida (FIGUEIREDO, 1992 apud BARBOSA, 2001)	4
Tabela 1.2 – Vantagens do sistema via seca e via úmida (CÁNOVAS, 1998).....	5
Tabela 1.3 – Dados obtidos a partir do projeto da obra ferrovia norte sul, túneis 01 e 02 – trecho 01, e dados da produção da obra.....	7
Tabela 2.1 – Porcentagens típicas de reflexão nos 2 sistemas de projeção (NEVILLE, 1997)	24
Tabela 2.2 – Limites das graduações para a combinação de agregados (ACI 506R-90, 1995)	25
Tabela 3.1 – Caracterização do cimento CP II F-32	39
Tabela 3.2 – Caracterização dos agregados graúdo e miúdo.....	40
Tabela 3.3 – Caracterização dos aditivos.....	40
Tabela 3.4 – Critérios de avaliação de absorção de água do concreto de acordo com o <i>Comité Eurointernational du Béton</i> (CEB) 192 (CASCUDO, 1997).....	57
Tabela 3.5 - Avaliação de resistividade elétrica superficial do concreto de acordo com o <i>Comité Eurointernational du Béton</i> (CEB) 192 (CASCUDO, 1997).....	63
Tabela 3.6 – Correspondência entre o risco de penetrabilidade de íons cloreto no concreto e a carga elétrica passante, conforme ASTM C 1202:1992 (ASTM, 2009).....	67
Tabela 4.1 – Resultados de análise química de reconstituição de traço dos testemunhos extraídos dos túneis.....	74
Tabela 4.2 – Resultados de reconstituição de traço e consumo de cimento dos testemunhos extraídos dos túneis.....	75
Tabela 4.3 – Análise química do cimento de referência.....	75
Tabela 4.4 – Resultados gerais de resistência à compressão aos 3, 7 e 28 dias de todas as placas.	77
Tabela 4.5 – Resultados de resistência à compressão aos 3, 7 e 28 dias das placas do sistema via úmida.....	77
Tabela 4.6 – Resultados de resistência à compressão aos 3, 7 e 28 dias das placas do sistema via seca.....	78
Tabela 4.7 – Resultados de resistência à compressão aos 28 dias dos testemunhos extraídos dos túneis.	78
Tabela 4.8 – Resultado dos ensaios de absorção por capilaridade das placas	83
Tabela 4.9 – Resultado dos ensaios de absorção de água por capilaridade dos testemunhos extraídos do túnel.....	83
Tabela 4.10 – Leitura de medição em massa dos ensaios de absorção de água por imersão dos corpos-de-prova extraídos das placas e dos túneis.....	90
Tabela 4.11 – Resultados de ensaios de absorção, índice de vazios e massa específica.....	91
Tabela 4.12 – Resultado dos ensaios de penetração de água sob pressão dos corpos-de-prova das placas e dos testemunhos extraídos dos túneis.....	96
Tabela 4.13 - Resumo dos resultados de permeabilidade obtidos por Dantas e Tango (1990) e Armelin et al (1994 <i>apud</i> FIGUEIREDO, 2005).....	99

Tabela 4.14 – Resultado dos ensaios de resistividade elétrica das placas e dos túneis.....	100
Tabela 4.15 - Resultado dos ensaios de penetrabilidade de íons cloreto dos corpos-de-prova das placas e dos testemunhos extraídos dos túneis.....	104
Tabela 4.16 – Correlação do risco de penetrabilidade de íons cloreto no concreto com a carga elétrica passante, conforme ASTM C 1202:1992 (ASTM, 2009).....	106
Tabela 4.17 – Comparação entre os resultados das placas de controle e os testemunhos extraídos dos túneis para os sistemas via úmida e via seca (%).....	111
Tabela 4.18 – Comparação entre os resultados dos sistemas via úmida e via seca (%).....	112
Tabela A 1 – Data das moldagens das placas.....	122

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A – ampéres.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

ACI - American Concrete Institute.

ASTM - American Society for Testing and Materials.

bar – unidade de pressão.

BR 060 – Rodovia Brasileira nº. 060.

CEB - Comité Eurointernational du Béton.

CP – corpo-de-prova.

CP II F-32 - Cimento Portland Tipo II, com adição de Filler calcário, com resistência à compressão característica de 32 MPa.

d/D – menor tamanho.

fc – resistência à compressão.

fc_k – Resistência à compressão característica do concreto aos 28 dias.

IBRACON – Instituto Brasileiro do Concreto.

MPa – Mega Pascal.

N – normal.

NaCl – Cloreto de sódio.

NATM - New Austrian Tunnelling Method.

NBR – Norma Brasileira.

NM – Normas e Métodos de ensaio.

NaOH – Hidróxido de sódio.

OECD - Organisation for Economic Co-operation and Development.

p – esforço de pressão.

pR – esforço de pressão resultante.

psi – (medida de pressão) ou libra por polegada quadrada, é a unidade de pressão no sistema inglês/americano: psi x 0.07 = bar; bar x 14.5 = psi.

RILEM – Réunion Internationale des Laboratoires d'Essais et de Recherches sur lês Matériaux et lês Constuctions (França).

tf – tonelada força.

UFG – Universidade Federal de Goiás.

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo analisar os parâmetros de durabilidade do concreto projetado, comparando os sistemas de projeção via seca e via úmida, dos concretos resultantes da projeção em placas e dos testemunhos extraídos das estruturas dos túneis da Ferrovia Norte-Sul, trecho 01, em Anápolis-GO.

Este trabalho contempla um estudo experimental de análise do comportamento de concretos projetados por via seca e úmida, através de ensaios indicadores dos principais parâmetros de durabilidade, constantes das especificações nacionais e internacionais. O programa experimental envolve, portanto, a avaliação entre os sistemas de projeção de uso corrente em concreto projetado, considerando a análise comparativa entre as placas projetadas (de controle) e os testemunhos extraídos dos túneis, no que se refere ao atendimento aos requisitos relativos à durabilidade.

Para tanto, o programa experimental teve como variáveis independentes: tipo de sistema de projeção (se por via seca ou por via úmida) e a extração dos corpos-de-prova de concreto (da placa ou do túnel). Para cada tipo de projeção (via seca e via úmida) foram moldadas três placas (normalmente utilizadas para os fins de controle tecnológico do concreto) em condições similares às da obra, tendo-se em seguida, nas idades preestabelecidas, executado-se a extração de corpos-de-prova. Foram também extraídos oito testemunhos dos túneis executados, gerando, assim, corpos-de-prova submetidos aos ensaios balizadores dos parâmetros de durabilidade adotados neste estudo, a saber: absorção de água por capilaridade, absorção por imersão e fervura, resistividade elétrica, penetração de água sob pressão, penetrabilidade de íons cloreto e resistência à compressão axial. Contribuíram também para a caracterização do material os corpos-de-prova extraídos dos túneis e das placas, que foram submetidos a ensaios de resistência à compressão axial e de reconstituição de traço.

Os concretos extraídos dos túneis mostraram resultados abaixo dos parâmetros para os resultados esperados dos requisitos de concreto projetado para os túneis rodo-ferroviários, e ainda com resultados inferiores aos resultados obtidos das placas. Numa avaliação geral, constatou-se perdas de propriedades de durabilidade do concreto projetado extraídos dos túneis em referência aos das placas projetadas.

Palavras-chave: concreto, durabilidade, túneis, concreto projetado, via seca e via úmida.

ABSTRACT

The present work aims to analyse the durability parameters of the shotcrete, comparing the dry and wet projection systems, of the concrete resulting from the projection in plates and from the test specimens extracted from the tunnels structures of the North-South Railway, tract 01, in Anápolis-GO.

This work considers an experimental research concerning the shotcrete behavior for dry-mix and wet-mix projection systems, by using testing indicators of the main durability parameters coming from national and international specifications. So, the experimental program involves a comparative assessment among the projection systems of current use in shotcrete, considering the comparative analysis between projected plates (control) and extracted test specimens from the tunnels on what refers to meeting the requirements related to durability.

Therefore, the experimental program showed as independent variables: type of projection system (whether by means of dry-mix or wet-mix shotcrete) and the extraction of test specimen (from the control plates or from the tunnels structure). For each type of projection (dry-mix and wet-mix shotcrete), three plates were cast (normally used for concrete technological control) in conditions similar to the work-site, with the test specimens extraction been carried out according to pre-established ages. Eight test specimens were extracted from the just-built tunnels generating thus samples to the durability associated tests, such as: capillary water absorption, immersion water absorption, concrete electric resistivity, water penetration under pressure, penetrability of chloride ions and concrete compressive strength. Test specimens extracted from the tunnels and the from the plates were also submitted to testings of compressive strength and mix-proportion reconstruction.

The concrete extracted from tunnels showed worse results comparing to the parameters expected from the projected concrete requirements for road and rail tunnels, and it also demonstrated results which were inferior to the ones obtained from the plates. From a general assessment view, we could verify losses of durability properties of the shotcrete extracted from tunnels in reference to the projected plates.

Key words: concrete, durability, tunnels, sprayed concrete, shotcrete, dry-mix and wet-mix shotcrete.



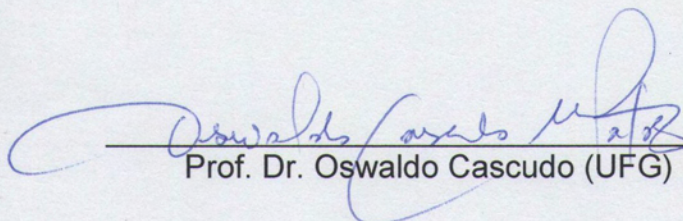
Universidade Federal de Goiás
Escola de Engenharia Civil
Programa de Pós-Graduação em Geotecnia e Construção Civil

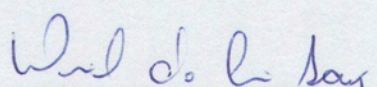
FOLHA DE APROVAÇÃO

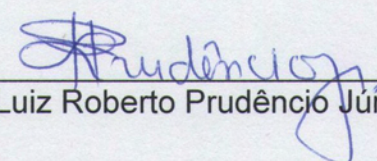
“CONCRETO PROJETADO COMO REVESTIMENTO DE TÚNEIS NA FERROVIA NORTE-SUL: ANÁLISE SEGUNDO PARÂMETROS DE DURABILIDADE”

Antônio Davi Barbosa de Meneses

Dissertação defendida e aprovada pela banca constituída pelos senhores:


Prof. Dr. Oswaldo Cascudo (UFG)


Prof. Dr. Daniel de Lima Araújo (UFG)


Prof. Dr. Luiz Roberto Prudêncio Júnior (UFSC)

Goiânia, 24 de setembro de 2010.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

O concreto projetado é a denominação dada ao concreto transportado por uma tubulação e projetado sob pressão, em elevada velocidade, sobre uma superfície, sendo compactado simultaneamente. Ele é usado principalmente no revestimento de obras subterrâneas, taludes e no reparo de estruturas, por dispensar o uso de forma e proporcionar grande velocidade nas operações de lançamento e adensamento do concreto.

Nos cerca de seus 100 anos de existência, o concreto projetado tem sido empregado em milhares de obras com distintas finalidades. Aliado às qualidades do material, um fator preponderante que justifica o seu uso intensivo é a possibilidade de executar estruturas de difícil geometria e a economia de tempo e recursos gerada.

Uma característica particular desse tipo de concreto é que a composição do concreto aplicado difere da que abasteceu a máquina de projeção, devido ao fenômeno conhecido como reflexão. A reflexão pode ser definida como a relação em massa do concreto que não adere e a massa total lançada à superfície de projeção (PRUDÊNCIO JÚNIOR, 2005).

A invenção do processo do concreto projetado é creditada a Carl Ethan Akeley, um naturalista que trabalhava no *Field Museum of Natural History* de Chicago, que concebeu o primeiro equipamento em 1907, então chamado de “*plastergun*” (Figura 1.1), para construir réplicas de animais pré-históricos e revestir rapidamente a fachada do museu, fazendo sua patente em 1909. O invento em questão tratava-se de um equipamento via seca de uma única câmara (GASPARIM, 2007).



Figura 1.1 – A máquina “*plastergun*” utilizada por Akeley em 1907 (GASPARIM, 2007).

Posteriormente, a companhia *Parsons Manufacturing* comprou os direitos da máquina de Akeley e mudou o nome para *Cement Gun Company*. Em 1912 o termo *gunite* passou a ser utilizado para designar a argamassa projetada (GASPARIM, 2007).

O início da era do concreto projetado na tecnologia da construção civil se deu em 1912, quando a *Los Angeles Cement Gun Company* construiu um reservatório de água de 24 m de diâmetro (LORMAN, 1968 apud PRUDÊNCIO JÚNIOR, 2005).

Há registros de que, em 1920, nos Estados Unidos da América (EUA), foi feita a primeira aplicação de projeção em túneis.

Inicialmente o NATM¹ se restringiu à Europa Central, Itália e Suécia. Difundiu-se a partir de 1965. No Brasil ele surgiu em 1970, na Rodovia dos Imigrantes (SILVA, 1997).

Os primeiros equipamentos, de pequena capacidade, eram construídos por uma única câmara, que era abastecida com uma mistura de cimento e areia úmida e, em seguida, pressurizada. Uma comporta na parte inferior da câmara era aberta para descarga do material e uma mangueira abastecida por um compressor de ar. O material era, na seqüência, conduzido até o bico onde recebia água imediatamente antes de ser lançado contra a superfície de projeção. O inconveniente desse tipo de equipamento era o fato de sua produção ser intermitente. Uma evolução no processo foi a introdução, nesse equipamento, de uma antecâmara que podia ser abastecida e pressurizada enquanto a câmara principal inferior era descarregada.

¹ NATM – *New Austrian Tunneling Method* é o Novo Método Austríaco de construção de túneis, método atualmente mais utilizado na construção de túneis em concreto projetado, descrito no capítulo 2, item 2.4, na pág. 30.

Por volta de 1947, foram introduzidas no mercado as primeiras máquinas a rotor, com concepção similar a dos equipamentos atuais. Nessa época, surgiram os primeiros equipamentos via úmida, em que o concreto é pré-misturado com a água e, após, projetado. Entretanto, esse processo só foi reconhecido pelo *American Concrete Institute* (ACI) em 1962. A partir daí, a evolução do concreto projetado se deu em duas vertentes: materiais e equipamentos. Com relação aos materiais, pode-se destacar o uso de adições tais como a sílica ativa e o metacaulim, as fibras de aço e sintéticas (náilon e polipropileno), os cimentos de alta reatividade, os aditivos aceleradores e os aditivos redutores de água. Quanto aos equipamentos, a evolução se deu na automação da projeção com a introdução de braços mecânicos (robôs) e sistemas computadorizados para seu acionamento, permitindo controles mais precisos das espessuras projetadas (PRUDÊNCIO JÚNIOR, 2005).

Quanto ao processo de projeção empregado, o concreto projetado se divide em dois tipos: via seca e via úmida. No processo via seca, aglomerante e agregados são misturados e lançados na máquina de projeção e a introdução de água acontece junto ao bico de projeção. No processo via úmida, aglomerante, agregados e água são misturados previamente ao abastecimento da máquina de projeção.

O concreto projetado possui vantagens e desvantagens quanto ao seu uso e suas propriedades, indicando a melhor adequação à sua utilização. Constituem vantagens em usar o sistema via seca: possibilidade de projetar a longa distância em relação à máquina de projeção; facilidade de logística em seu abastecimento, principalmente em locais de difícil acesso; tendência a produzir um material mais resistente e compacto; possibilidade de controlar a quantidade de água da mistura durante o processo de aplicação; melhor adequação na execução de primeiro suporte nas escavações (revestimento primário) e no reparo das estruturas danificadas pelo processo de corrosão. São desvantagens em utilizar o sistema via seca: um maior nível de reflexão; formação de poeira; sua qualidade está muito ligada à qualidade da mão-de-obra e o material é mais heterogêneo do que o produzido por via úmida.

Já no sistema via úmida, as vantagens desse sistema são: obtenção de concretos de grande compacidade e resistência à compressão; baixas reflexões e alta produtividade. Suas desvantagens são: difícil regulagem do fluxo do concreto no bico de projeção; o comprimento do mangote não pode ser superior a 30 metros para máquina de projeção a rotor; não permite trajetos muito sinuosos no percurso do mangote; maior possibilidade de entupimentos e pulsações no

fluxo do concreto e as centrais de produção de concreto não podem ser muito distantes das frentes de utilização, em decorrência do tempo relativamente curto da ação dos superplastificantes no concreto, podendo ser minimizados se adicionados na obra (Tabela 1.1 - Fatores de comparação entre métodos de via seca e úmida e Tabela 1.2 – Vantagens do sistema via seca e via úmida).

Nos últimos anos, a demanda por obras subterrâneas para diversos fins tem crescido, especialmente em centros urbanos densamente povoados, com intuito de liberar a superfície para utilizações mais nobres. As obras subterrâneas são empregadas na construção de minas, cavernas, barragens e túneis, quer seja rodoviário, ferroviário, metroviário ou de adução. Atualmente, a maior necessidade deste tipo de obra se concentra na construção de túneis de tráfego (RAMOS, 2005).

Tabela 1.1 - Fatores de comparação entre métodos de via seca e úmida (FIGUEIREDO, 1992 apud BARBOSA, 2001)

FATORES	PROCESSO DE VIA SECA	PROCESSO DE VIA ÚMIDA
Equipamento	Menor investimento total. Manutenção simples e pouco freqüente. Fácil operação.	Menor equipamento no local de trabalho. Menor desgaste do bico de projeção, mangueira e bomba para um mesmo volume de produção. Consumo de ar até 60% menor.
Mistura	Na obra ou na usina. Possibilidade de utilização de misturas pré-dosadas. Desempenho alterado pela umidade da areia.	Na usina e mais precisa. A umidade da areia não interfere no processo.
Produção e Alcance	Raramente ultrapassa os 5 m ³ /h no campo. Transporta materiais a maiores distâncias.	Capacidade de 2 à 10 m ³ /h de projeção. Capacidade de 20 m ³ /h na projeção (robô).
Reflexão	15 à 40% para paredes verticais. 20 à 50% para o teto. Ocorre a formação de bolsões do material refletido. Projeção gera perda grande de agregado.	Baixa reflexão, que pode ser inferior à 10%. Não ocorre a formação de bolsões do material refletido. Pequena perda de agregado.
Velocidade de Impacto	Maior velocidade de projeção com melhor adesão e facilidade de aplicação no teto. Maior auto-compactação do material em função da maior energia.	Geralmente adequada para emprego em túneis e minas. Material menos compacto.
Qualidade	Alta resistência mecânica devido à baixa relação água/cimento. Menor homogeneidade do material. Depende da experiência da mão de obra do mangoteiro.	Maior dificuldade de obter altas resistências mecânicas. Maior homogeneidade do material.
Aditivos	Em pó adicionados na betoneira ou antes da cuba de alimentação (dificuldades de uma dosagem	Utiliza-se apenas os aditivos líquidos.

	precisa) Líquidos adicionados junto ao bico de projeção.	
Poeira e Névoa	Grande produção de poeira. Dificuldade de visualização de frente de projeção. Ambiente insalubre em túneis (precisa de ventilação).	Muito pouca formação de poeira. Melhor visibilidade da frente de projeção. Névoa de aditivo (ventilação).
Flexibilidade	Facilidade de interrupção de projeção com pouca ou nenhuma perda de material. Ajustável às condições de superfície (em presença de água).	Exige planejamento cuidadoso para minimizar perdas de material com a interrupção do trabalho. Apresenta dificuldade de operação em superfície molhada (exige maiores teores de aditivos aceleradores).
Versatilidade	Pode ser utilizado para jateamento de areia, projeção de argamassas e materiais refratários e recobrimentos.	Pode ser utilizada como sistema de bombeamento convencional de concreto.

Tabela 1.2 – Vantagens do sistema via seca e via úmida (CÁNOVAS, 1988).

MISTURA A SECO	MISTURA ÚMIDA
1 Tem-se no bico, o controle da água e da consistência da mistura. 2 Mais adequado para o manuseio da mistura que contenham agregados porosos e leves. 3 Permite maior comprimento do mangote.	1 A adição da água se controla na máquina e pode-se medir exatamente. 2 Maior certeza de que a água se mistura totalmente com os outros componentes do concreto. 3 Dá menores perdas por reflexão. 4 Produz-se menos pó durante as operações.

Especificamente em relação ao programa experimental desta dissertação, destaca-se uma obra viária de grande importância e relevância para o país atualmente, que é a execução da Ferrovia Norte-Sul, com sua maior parte em construção no estado de Goiás (veja Figuras 1.2, 1.3 e 1.4). Em um dos seus trechos estão sendo construídos dois túneis, no município de Anápolis, a aproximadamente 60 km da capital Goiânia. Este trabalho abrange o estudo desses túneis (Tabela 1.3 e Figuras B1 e B2, em anexo), analisando parâmetros de durabilidade para o concreto projetado, tendo assim dois sistemas em execução: o sistema via seca e o via úmida. Há que se ressaltar que esses túneis em concreto projetado, construídos pelo sistema NATM, são os primeiros a fazerem parte do sistema viário de Goiás (e do Centro-Oeste), sendo executados no modal ferroviário, mostrando a sua grande importância e o seu valor para o estudo precursor aqui no estado de Goiás.



Figura 1.2 – Emboque norte túnel 1 ferrovia norte sul – trecho Anápolis - Porto Seco
Novembro/2008



Figura 1.3 – Escavação túnel 1 ferrovia norte sul – trecho Anápolis
Novembro/2008



Figura 1.4 – Emboque norte túnel 1 ferrovia norte sul – trecho Anápolis - Porto Seco
Agosto/2009

Tabela 1.3 – Dados obtidos a partir do projeto da obra ferrovia norte sul, túneis 01 e 02 – trecho 01, e dados da produção da obra.

	Túnel 01		Túnel 02	
	Emboque Sul	Emboque Norte	Emboque Sul	Emboque Norte
Extensão Total	388,80 m (do km 1+429,211 ao 1+813,845)		479,20 m (do km 7+041,002 ao 7+517,825)	
Altura Final do Túnel	9,70 m	9,70 m	9,70 m	9,70 m
Altura 1ª Escavação	5,75 m	5,75 m	5,75 m	5,75 m
Sistema de Projeção	Via seca	Via úmida	Via seca	Via úmida
Velocidade Média do Avanço	1,60 m/dia (02 cambotas/dia)	2,40 m/dia (03 cambotas/dia)	1,60 m/dia (02 cambotas/dia)	2,40 m/dia (03 cambotas/dia)

1.1 JUSTIFICATIVA E IMPORTÂNCIA DO TEMA

A importância da análise de durabilidade do concreto projetado é inegável, uma vez que está associada a uma estrutura cuja vida útil esperada é muito grande, da ordem de 100 anos. A durabilidade do concreto projetado no revestimento primário, no entanto, não precisaria ser tão elevada quanto a da estrutura como um todo. O revestimento primário é normalmente desprezado nas considerações de dimensionamento final e também em termos de durabilidade, normalmente atuando como uma camada de sacrifício que servirá apenas para diminuir o ataque direto dos agentes agressivos à estrutura. Assim, deve-se levar em conta na análise da durabilidade do concreto projetado o papel que ele vai desenvolver durante a vida útil da estrutura e as suas peculiaridades intrínsecas à sua reologia.

As propriedades do concreto projetado não diferem das propriedades do concreto com iguais proporções lançadas pelos métodos usuais; é o processo de aplicação que confere ao concreto projetado vantagens significativas em muitos casos. Ao mesmo tempo, são necessários muito treinamento e experiência na aplicação do concreto projetado, já que a qualidade depende em grande parte do desempenho dos operadores, especialmente no controle da aplicação com o bico (NEVILLE, 1997).

As propriedades do concreto projetado são dependentes do processo de projeção utilizado. Dessa forma, para se controlar a qualidade do material é importante ter o conhecimento do seu processo de produção, se por via seca ou úmida, bem como interessa saber sobre a qualidade dos equipamentos e mão-de-obra e, por fim, é necessário ter o controle de características específicas do concreto projetado, tais como: a reflexão, a propensão ao deslocamento, a produção de poeira ou névoa.

O emprego de túneis para a solução de vários problemas urbanos vem crescendo nos últimos 30 anos. A conferência da *Organisation for Economic Co-operation and Development* (OECD) de 1969, para os sistemas subterrâneos de trânsito rápido, em Washington, estimou em 1730 km para o período de 1970-1980 e mais de 2000 km na década de 80, contra os 664 km construídos no período de 1950-1960. Na década de 90, grandes obras já foram realizadas, como os túneis submarinos de *Seikan* no Japão, com mais de 53 km, e o Eurotúnel que ligou a Inglaterra à França (RAMOS, 2005).

Sempre houve discussão entre o empreendimento em nível e o subterrâneo. Levantamentos realizados pelos britânicos na década de 70 demonstraram que o empreendimento subterrâneo geralmente custa 8% mais caro que o em nível. Mas são unânimes em dizer que quando for possível a construção de um empreendimento enterrado, este deve ser adotado pois as vantagens sociais são enormes. É claro que a escolha depende da topografia, desvios dos serviços existentes, tipo de terreno, geometria horizontal e vertical. Por exemplo, o metrô de Paris apresentou custos de desvio de tráfego correspondente a 20 % do custo da obra civil.

A partir de 1970 surge um método revolucionário na construção de túneis urbanos; trata-se do *New Austrian Tunnelling Method* (NATM) (Figura 1.5), que na verdade é uma adaptação de métodos mineiros de construção de túneis. Hoje sua aplicação encontra-se em crescimento em todo o mundo, mesmo nos países industrializados onde existe uma maior disponibilidade de equipamentos tipo “*shield*”. O seu crescimento levará a um incremento do consumo do concreto projetado, o que exigirá um conhecimento cada vez maior das suas propriedades.

Os métodos de escavações mecanizadas são baseados na utilização de um equipamento, o “*shield*”, destinado a execução de túneis de maneira protegida por uma couraça cilíndrica à frente da escavação e pelo revestimento definitivo na sua parte traseira. A escavação é feita por ferramenta de corte localizada na frente do equipamento. O avanço é feito através de macacos hidráulicos, que se apóiam nos anéis do revestimento. Estes anéis são montados na parte traseira, ainda dentro da couraça é preenchido com uma argamassa de cimento. Para cada avanço é montado um anel do revestimento e desta forma o túnel está finalizado. Existem atualmente, “*shields*” equipados com os mais diversos tipos de ferramentas, acessórios e processo de execução para as mais variadas condições geológicas, portanto a definição anterior é geral.

Segundo Palermo (1997), os equipamentos tipo “*shield*” podem ser classificados em: manual, frente aberta, empregado acima do nível de água em material consistente e estável e frente fechada, empregado abaixo do nível de água em áreas instáveis. Existem vários tipos de frentes em função das condições geológicas. Neste caso os materiais de contenção da frente de escavação poderão ser: ar comprimido, o próprio solo, água, lamas, produtos químicos, espuma e outros, túnel pressurizado empregando câmaras e eclusas.

Os “*shields*” também podem ter uma classificação em função do revestimento empregado pelo equipamento onde os aspectos de vedação, estratégia de fabricação e estocagem, e transporte

e montagem são fundamentais para o sucesso do empreendimento: anéis metálicos, anéis de concreto pré-moldado parafusados ou expandidos e moldados “*in loco*”.

Os tipos de “*shield*” e o seu campo de utilização é bastante amplo, e poderia ser subdividido da seguinte maneira: micro e mini “*shield*”, que são os “*shields*” não tripulado, “*pipe-jacking*”, que são os tubos cravados, “*blade-shield*”, que são os shields de lâminas, “*slurry shield*”, são aqueles que empregam lama betonítica, “*poly ou mix shield*”, que são os processos mistos dos anteriores, “*shield*” com pressões de terra equilibradas, “*shieldão*”, que são os que fazem a via dupla em uma única etapa, “*dot-double-o-tunnel*”, trata-se dos equipamentos que fazem um túnel duplo e “*tunneling machines*”, fresas para escavação pelo desgaste ou quebra das rochas (PALERMO, 1997).

As vantagens de se empregar o “*shield*” podem ser assim resumidas: escavação mecanizada e de alta produtividade, escavação exata do túnel, interferência mínima com a superfície, trabalho com segurança aos operadores, emprego de pouca mão de obra, não é poluente, o revestimento é homogêneo e de boa qualidade e exige somente um poço de acesso e um de retirada.

As principais desvantagens podem ser assim relacionadas: exige longo tempo de planejamento, preparação e fabricação, requer um aprendizado específico e experiência na operação, equipamentos de alto custo e inclui diversos auxiliares e acessórios indispensáveis, somente se torna econômico para grandes extensões, pode ter grandes alterações de produtividade em função da variação da geologia, predomina a forma circular e permite somente pequenas variações, mudanças no diâmetro e expansões têm normalmente um custo muito alto, o revestimento necessita ser dimensionado pelas maiores cargas de todo o trecho e aos esforços de apoio do “*shield*” e a fabricação dos anéis deve ser de produção industrial.

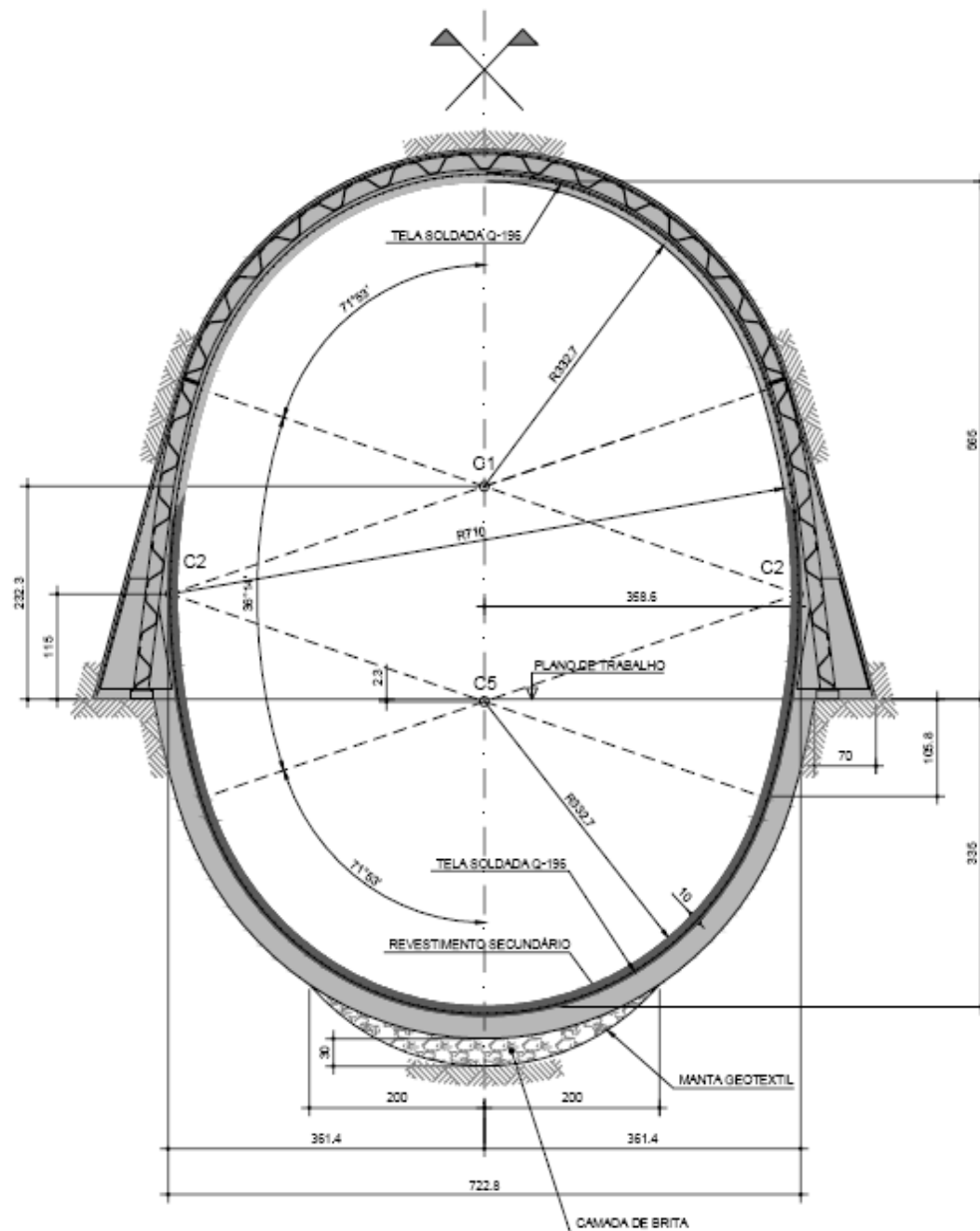


Figura 1.5 – Projeto moderno de revestimento de túneis – vista em corte do túnel 1, lote 1, Ferrovia Norte-Sul - método NATM – detalhe das cambotas e do invert.

Muito ainda há que se aprender sobre esse versátil material, pois propriedades como módulo de elasticidade, efeito Rush e deformação lenta são ainda uma grande incógnita técnica, de modo que o avanço no conhecimento desses parâmetros poderia trazer grandes benefícios para o setor de dimensionamento dos revestimentos e para a previsão dos coeficientes de segurança

dos túneis. Hoje, pela insuficiência de conhecimento os projetos podem estar muito conservadores ou muito arrojados. No primeiro caso, ter-se-ia um amplo campo para minimizar custos e, no segundo, poder-se-ia investir na melhoria dos coeficientes de segurança e na durabilidade da obra.

Não se deve esquecer que o revestimento definitivo em concreto moldado “in loco” prescinde da colaboração do maciço, enquanto que o revestimento de concreto projetado tem que contar com ela. Este aspecto é polêmico para túneis urbanos, pois, no futuro, há uma tendência de rígidos limites de utilização do espaço urbano subterrâneo. Tem-se aqui mais um bom motivo para se estudar com maior profundidade a interação concreto projetado com o maciço, dentro da filosofia construtiva de durabilidade do NATM.

O Novo Método Austríaco de Túneis – NATM vem nos últimos anos se estabelecendo como um método de importante papel na construção de túneis, seja pelo seu menor custo seja pela simplicidade envolvida. Associado a esse ganho de importância do NATM está a do concreto projetado, que tem seu lugar assegurado como principal elemento de viabilização do método.

É de fundamental importância o registro dos passos do desenvolvimento e fixação da tecnologia envolvida, a análise crítica do estado do conhecimento atual, a avaliação das especificações que nortearam a construção das obras existentes, a observação criteriosa dos ensaios e resultados obtidos, e da condição de operação das obras executadas. Somente com esse panorama e com a constatação atual e futura da “qualidade” das obras construídas, no seu sentido mais amplo, é possível reavaliar diretrizes e parâmetros e aferir conceitos e conhecimentos, de forma a nortear os passos seguintes, possibilitando com isso o desenvolvimento da tecnologia para a viabilização de obras de melhor qualidade a um menor custo (PALERMO, 1997).

O NATM que em seus primórdios foi utilizado praticamente de forma empírica, empregando o concreto projetado com os mesmos parâmetros, ensaios e técnicas que norteavam a análise do concreto convencional, teve nos últimos anos, apesar de insuficientes, muito conhecimento incorporado sobre o material concreto e sua interação com o processo NATM (PALERMO, 1997).

Para maciços adequados ao emprego do NATM na execução de um túnel, deve-se empregar o concreto projetado como revestimento definitivo, o que tem apresentado custos extremamente vantajosos com relação a outros métodos (PALERMO, 1997).

Uma solução adotada como em Anápolis-GO, que atravessa o centro urbano da cidade, sob bairros, ruas e avenidas movimentadas, e uma rodovia (BR 060), que liga Goiânia a Brasília, justifica o emprego de túneis com revestimentos em concreto projetado. A sua implantação diminui os custos e as logísticas para suplantarem ou desviarem o eixo de uma grande ferrovia como a Norte-Sul, para situações atuais mais viáveis, que não causam tantos transtornos e problemas às populações que necessitam desses túneis urbanos.

Considerando que o concreto projetado é usualmente armado com telas de aço soldadas, as exigências de durabilidade que incidem sobre ele seguem novos conceitos que estudam de maneira separada a ação do meio ambiente no concreto e na armadura (HELENE, 1997 *apud* BARBOSA, 2001). Esta separação se respalda no conceito de que qualquer um dos dois elementos (concreto e armadura) que se deteriore comprometerá a estrutura como um todo.

Nesse sentido, a incidência de água no concreto é o fator mais importante e que inicia os mecanismos de deterioração das estruturas de obras subterrâneas. A medida de sua penetração é uma forma de avaliar o ingresso de materiais agressivos, ou seja, trata-se de uma forma indireta de avaliação da durabilidade potencial do concreto (PALERMO, 1997).

Garantir a durabilidade é de suma importância, pois as estruturas de túneis devem oferecer considerável vida útil e, assim sendo, tão ou mais importante do que a resistência mecânica do material que as compõe é o atendimento aos requisitos de durabilidade, já que eventuais intervenções nessas obras, para reparos e recuperações prematuras, traduziriam-se em elevados custos, não somente financeiros como também sociais.

A deterioração prematura das estruturas de concreto, em geral, representa uma das maiores preocupações da indústria da construção civil no mundo. Cerca de 40% dos atuais investimentos na construção civil são direcionados à manutenção e reparos, e somente 60% a construções novas (GASPARIM, 2007).

Este trabalho, portanto, visa uma comparação entre os dois sistemas de projeção (via seca e via úmida), avaliando principalmente aspectos e propriedades relacionados à durabilidade do concreto projetado, sobretudo aqueles ligados à penetração da água.

Apesar da importância do concreto projetado, são relativamente escassas as informações disponíveis sobre o assunto. Em decorrência dessa carência de informações, este trabalho pretende oferecer uma contribuição no sentido de reduzi-la e apresentar um incentivo a um melhor desenvolvimento tecnológico do produto, a partir da divulgação da análise de parâmetros

de durabilidade dos concretos projetados elaborados nos dois sistemas de projeção referidos, comparando-os frente às extrações de corpos-de-prova das placas moldadas para controle tecnológico e às extrações de testemunhos reais da estrutura de túneis.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo geral desta dissertação é analisar os parâmetros de durabilidade do concreto projetado, comparando os sistemas de projeção via seca e via úmida, de concretos resultantes da projeção em placas e dos testemunhos extraídos das estruturas dos túneis da Ferrovia Norte-Sul, trecho 1, em Anápolis-GO.

1.2.2 Objetivos específicos

Constituem-se objetivos específicos do presente trabalho:

- analisar a evolução da resistência à compressão axial em função do tempo comparando os dois sistemas de projeção, via seca e via úmida;
- proceder uma avaliação das propriedades associadas à durabilidade por meio dos ensaios de: absorção de água por capilaridade, absorção de água por imersão, penetração de água sob pressão, resistividade elétrica e penetrabilidade de íons cloreto, assim como a resistência mecânica, considerando a comparação dos corpos-de-prova moldados em placas com os testemunhos extraídos dos túneis para os dois sistemas de projeção;
- avaliar comparativamente a reflexão do concreto projetado nos dois sistemas de projeções, via seca e via úmida.
- avaliar o proporcionamento dos concretos reais projetados nos túneis, obtido mediante reconstituição de traço, verificando assim o impacto que cada um dos sistemas de projeção ocasiona no concreto aplicado.

CAPÍTULO 2

CONCRETO PROJETADO PARA REVESTIMENTO DE TÚNEIS

O concreto projetado é o concreto com dimensão máxima de agregado superior a 4,8 mm (PRUDÊNCIO JÚNIOR, 2005). É um material muito versátil e apresenta excelentes propriedades mecânicas e de durabilidade quando bem executado. Hoje é possível se especificar este material como responsável por obras de saneamento e até mesmo marítimas, apesar da alta agressividade do meio. Um trecho do túnel de Vereina na Suíça foi executado empregando-se concreto projetado de f_{ck} de 80 MPa. Entretanto, a execução por pessoas inexperientes pode trazer grandes transtornos, como problemas com a incorporação da reflexão, baixa compacidade, baixa resistência, porosidade com infiltrações, fissuras com lixiviação, etc, que podem deteriorar rapidamente o material (PALERMO, 1997).

É importante lembrar que ainda hoje, na Europa e nos Estados Unidos, emprega-se o concreto projetado como revestimento provisório, quando se trata de túneis em maciços diferentes de rocha auto-portante. Neste caso, o revestimento primário em concreto será provisório e caberá ao revestimento secundário, em concreto convencional, suportar a carga total do maciço “caso o concreto projetado se degrade”.

O maior agente causador de danos dos túneis é a água, pois além de causar problemas durante a escavação, ela não permite que se confeccione um revestimento de concreto compacto e íntegro; é ela que inicia os diversos mecanismos de deterioração do revestimento de concreto e das instalações dentro do túnel. Pode-se concluir que a arte de fazer túneis nada mais é que a arte de controlar a água (PALERMO, 1997).

Quando um túnel é executado pelo método NATM, o concreto projetado invariavelmente desempenha um papel de revestimento primário. Este revestimento é aquele que desempenha o primeiro papel de impermeabilização do túnel, servindo ele próprio como barreira de proteção frente à passagem de água e de agentes agressivos pela estrutura. Quando não existe nenhum sistema específico de impermeabilização, o concreto projetado deverá estar em contato direto com o maciço sendo assim, também, responsável pela durabilidade da estrutura, pois sofrerá primeiro com os ataques dos agentes agressivos. Neste caso, deve-se

especificá-lo de maneira adequada, estabelecendo relações água/cimento máximas, para atender às exigências de elevada vida útil normalmente associadas a esse tipo de estrutura.

Em qualquer que seja a situação para a qual se concebeu a estrutura de um túnel NATM, é fundamental se garantir a correta especificação de requisitos de desempenho e um baixo nível de fissuração do concreto projetado no revestimento primário, de modo a aumentar a eficiência do sistema de impermeabilização.

A especificação do concreto projetado está intimamente ligada ao processo construtivo, que é função do tipo de maciço a ser escavado e dos equipamentos disponíveis para realizar esta escavação (PRUDÊNCIO JÚNIOR, 1993).

O princípio básico do NATM é fazer com que o terreno, em vez de atuar somente como carga sobre o revestimento do túnel, ele próprio atue como um elemento colaborante da resistência da estrutura. Para se conseguir isso a superfície escavada deve ser imediatamente revestida com material relativamente flexível, que permita a sua deformação e, conseqüentemente, a distribuição de tensões ao longo do seu perímetro. Esse revestimento flexível é o concreto projetado (Figuras 2.1, 2.2, 2.3), associado a cambotas de aço (Figura 2.4), ou malhas de aço, ou chumbadores e tirantes (Figura 2.5), ou fibras de aço ou a combinação de dois ou mais deles (CAMPANHÃ; BOSCOV, 2008).



Figura 2.1 – Projeção no túnel 1 Ferrovia Norte-Sul – trecho Anápolis - Porto Seco.



Figura 2.2 – Projeção em placas no túnel 01 – emboque sul – sistema via seca



Figura 2.3 – Projeção do concreto – emboque sul – túnel 1
Utilização de gaiola de sustentação em escavadeira



Figura 2.4 – Detalhe da cambota – armadura - túnel 01 ferrovia norte sul – trecho Anápolis - Porto Seco.

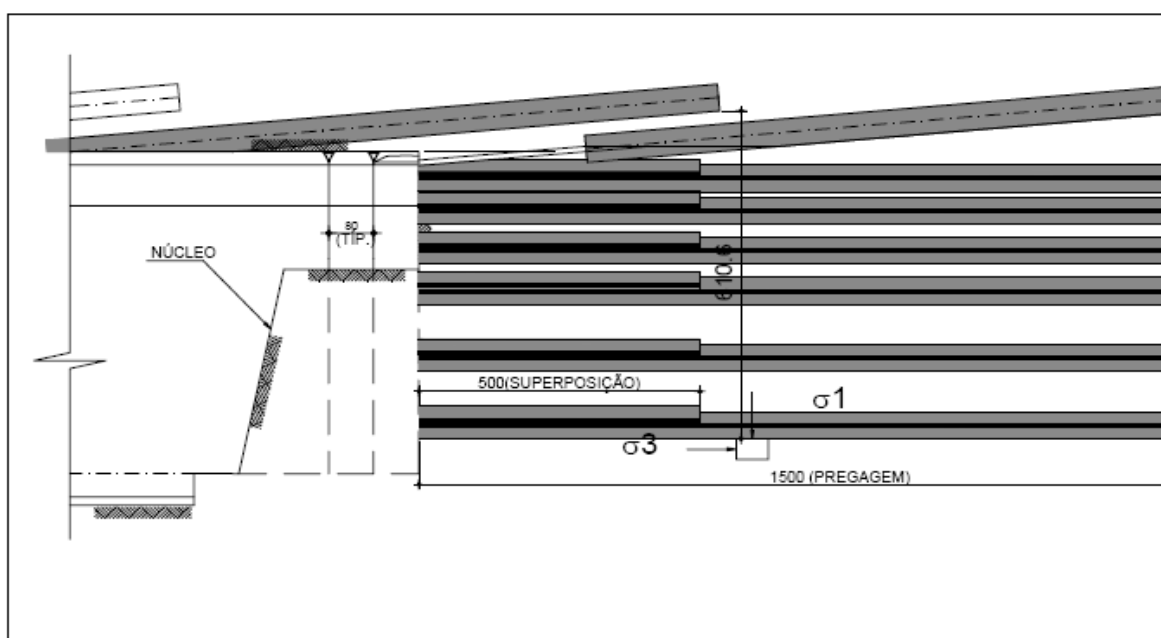


Figura 2.5 – Enfilagens no túnel 01 ferrovia norte sul (trecho 01) – suportes superficiais ou contínuos – projetos da obra

Segundo Prudêncio Júnior (1993), o concreto projetado usado na estabilização de aberturas subterrâneas deve apresentar as seguintes características:

- Altas resistências iniciais para prevenir desabamentos do maciço escavado;
- Boa aderência ao solo ou rocha envolventes;

-Flexibilidade suficiente para acomodar deformações e proporcionar uma redistribuição de cargas;

- Baixa permeabilidade para conter infiltrações de água do solo;

- Pega rápida para evitar deslocamentos e acidentes.

2.1 SISTEMAS VIA SECA E VIA ÚMIDA

Há dois processos básicos de aplicação do concreto projetado: o via seca e o via úmida. No processo via seca, o cimento e o agregado com pouca umidade são bem misturados e introduzidos em um alimentador mecânico, ou bomba, conforme Figuras 2.6 e 2.7. A mistura é transferida por um alimentador, a uma velocidade determinada para uma corrente de ar comprimido em uma mangueira até o bico de projeção. O bico é montado com uma câmara perfurada no seu interior através da qual a água é introduzida sob pressão e misturada com os componentes sólidos. A mistura é, então, projetada a alta velocidade sobre a superfície onde será aplicada. O aditivo acelerador pode ser colocado na máquina de projeção junto com a mistura seca ou no bico de projeção.

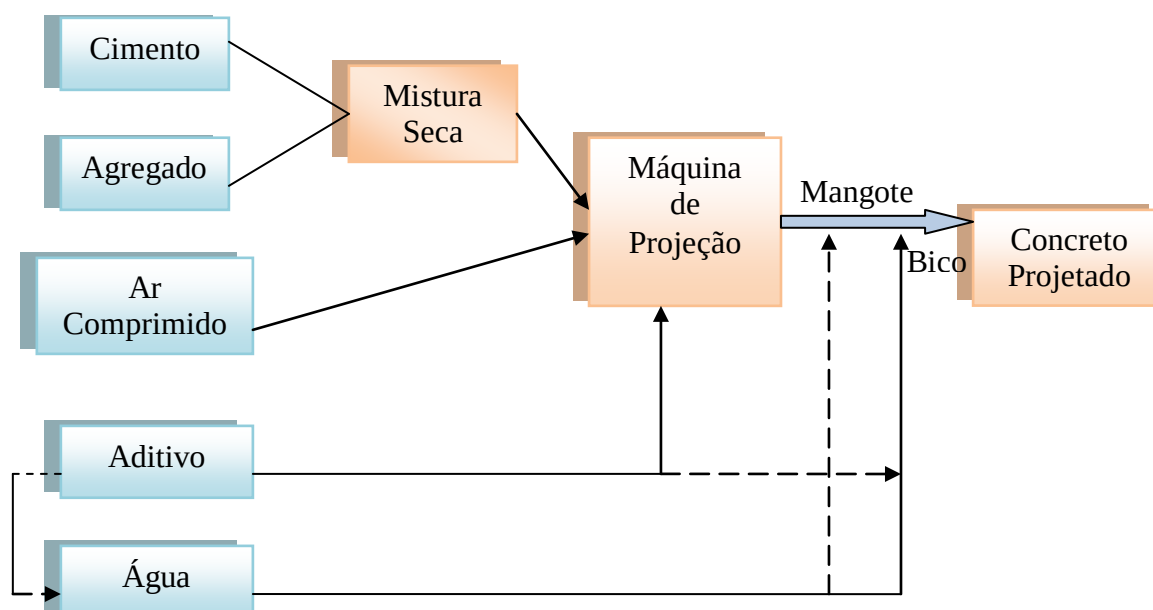


Figura 2.6 – Diagrama do processo de projeção via seca (BARBOSA, 2001).

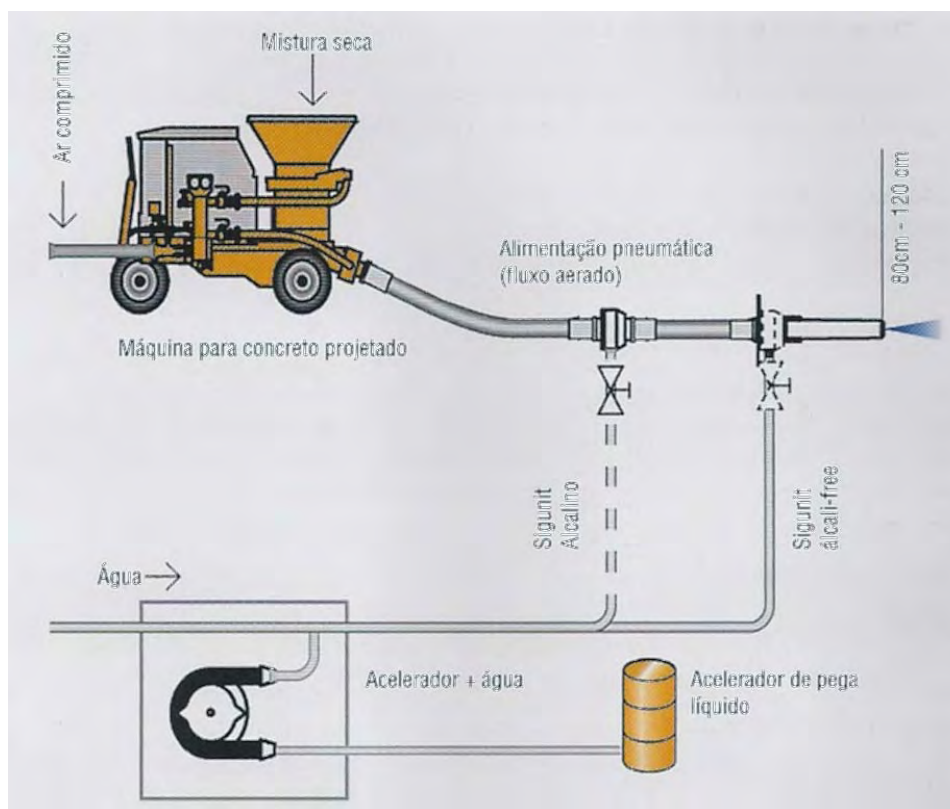


Figura 2.7 – Processo de fluxo aerado para concreto projetado via seca (SCHLUMPF; HÖFLER, 2004).

O sistema via semi-úmida é um caso especial do via seca, onde a água é adicionada, por meio de um anel umidificador, no mangote antes do bico de projeção.

A característica fundamental do processo via úmida é a de que todos os componentes, inclusive a água de mistura, são misturados inicialmente, conforme a Figura 2.8. A mistura é introduzida na câmara do equipamento de projeção e transportada pneumáticamente ou por bomba de pistão. Injeta-se ar comprimido ou, no caso de transporte pneumático, ar de outro compressor, no bico e o material é projetado a alta velocidade. O aditivo acelerador é adicionado no bico assim como todo o ar para promover a compactação do concreto para que este seja durável.

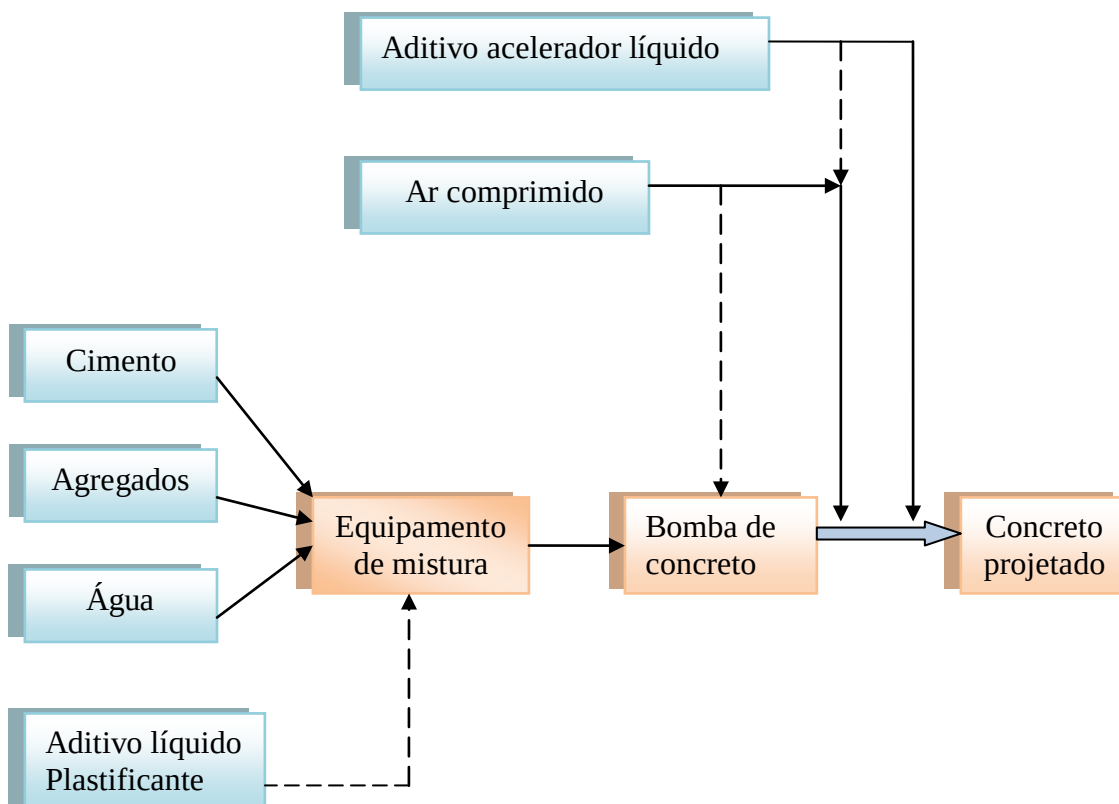


Figura 2.8 – Diagrama do processo de projeção via úmida (BARBOSA, 2001).

O processo via úmida pode ser subdividido em dois grupos: fluxo fino (ou fluxo aerado) e o fluxo denso (PALERMO, 1997). No fluxo fino (Figura 2.9) o concreto é enviado para o bico de projeção via ar comprimido. No caso do fluxo denso (Figura 2.10) o concreto é enviado através do sistema de pistões, similar ao concreto convencional bombeado. O fluxo denso passou a ser muito usado devido à necessidade do traço apresentar boas características de bombeabilidade, diminuindo o consumo de cimento e água, devido à sua eficiência na homogeneização dos aditivos aceleradores, a capacidade do compressor necessária à projeção é inferior à do fluxo aerado, o comprimento do mangote poderá ser da ordem de 80 a 100 metros e o controle da velocidade do jato na saída do mangote é facilitado porque o ar comprimido é utilizado somente para esta finalidade. Com isso a reflexão do concreto situa-se na faixa de 5 %, enquanto que no de fluxo aerado pode ultrapassar os 10 % (PRUDÊNCIO JÚNIOR, 2005).

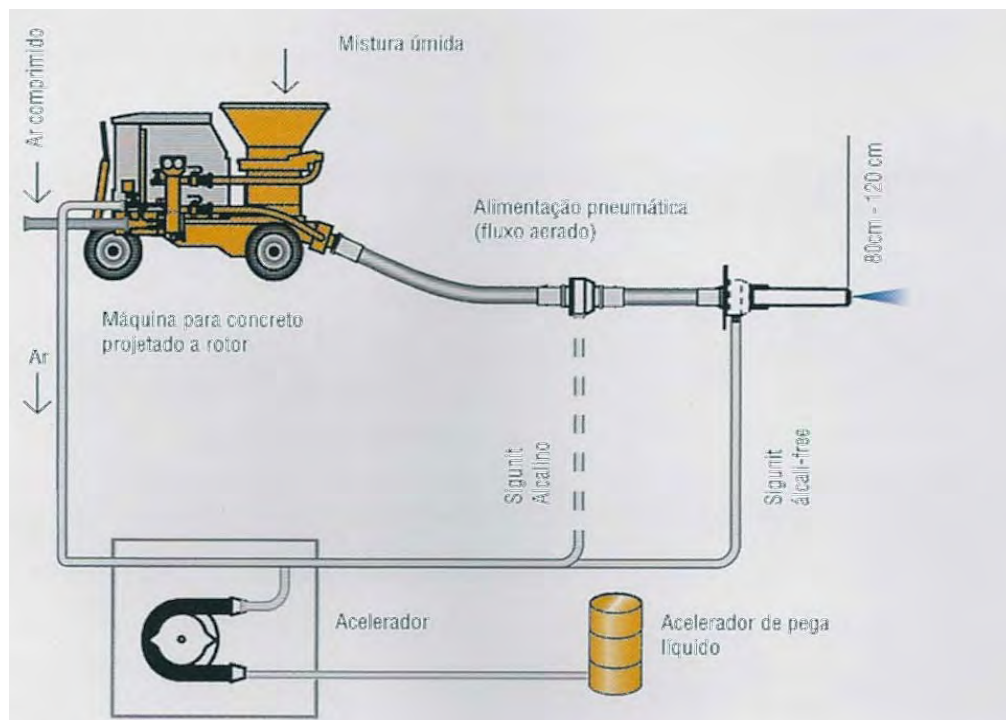


Figura 2.9 – Processo de fluxo aerado para concreto projetado via úmida (SCHLUMPF; HÖFLER, 2004).

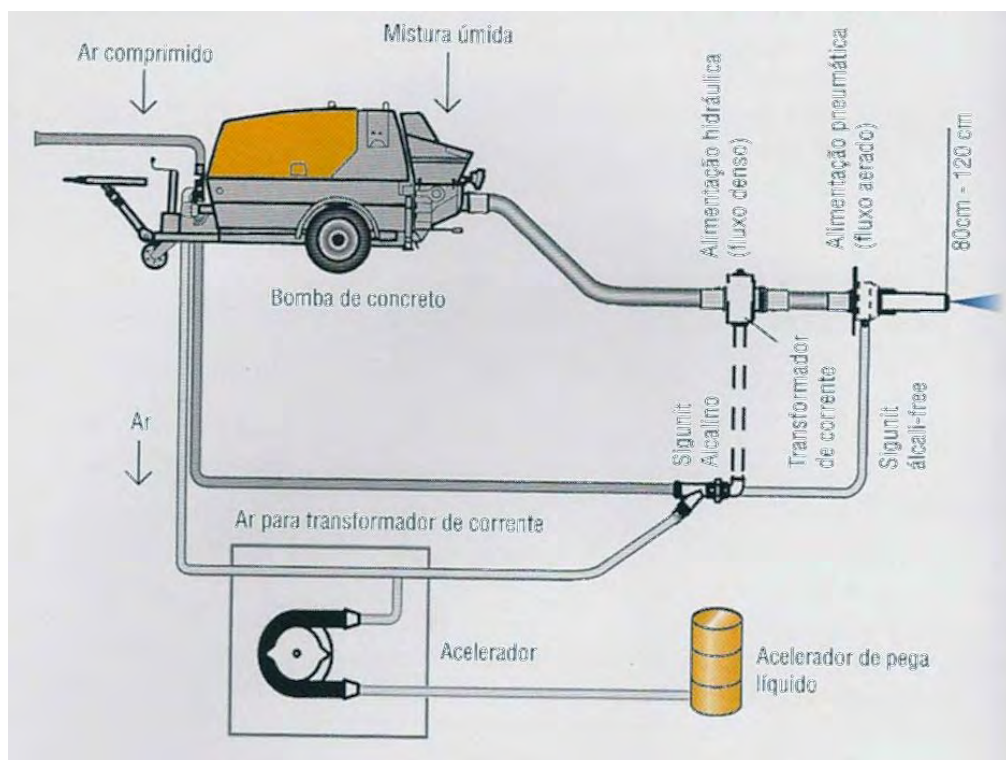


Figura 2.10 – Processo de fluxo denso para concreto projetado via úmida (SCHLUMPF; HÖFLER, 2004).

Entretanto, como ressaltado por Prudêncio Júnior (1993), a diferença entre os dois processos não está somente na forma como se adiciona a água, mas também na reologia do

concreto fresco. Enquanto o concreto projetado por via úmida apresenta uma reologia plástica, o concreto projetado via seca tem consistência não plástica, assemelhando-se às misturas empregadas na confecção de blocos e tubos de concreto.

O uso do processo via úmida, em substituição ao via seca, é uma tendência mundial e deve-se principalmente às seguintes razões: maior controle da composição da mistura, especialmente na quantidade de água; menor reflexão; maior produtividade e menor geração de poeira (GARSHOL *et al.*, 2005).

Devido à alta velocidade de impacto do jato, nem todo o concreto projetado permanece na posição: ocorre reflexão de parte do material. O material de reflexão é formado principalmente pelas partículas maiores da mistura, de modo que o concreto projetado existente no local fica mais rico do que seria de se esperar com as proporções com as quais a mistura foi preparada. Isso pode resultar um pequeno aumento de retração (NEVILLE, 1997). O rebote é maior nas primeiras camadas e decresce à medida que aumenta a espessura de material depositado. As porcentagens típicas de reflexão são mostradas na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Porcentagens típicas de reflexão nos dois sistemas de projeção (NEVILLE, 1997).

	Via seca	Via úmida
Pisos e lajes	5% a 15%	0% a 5%
Superfícies inclinadas ou verticais	15% a 30%	5% a 10%
Tetos	25% a 50%	10% a 20%

O concreto projetado deve ter uma consistência relativamente seca, para que o material permaneça onde foi aplicado, ao mesmo tempo a mistura deve ser suficientemente úmida para possibilitar o adensamento sem rebote excessivo. O intervalo usual das relações água/cimento é de 0,30 a 0,50, para via seca e 0,40 a 0,55 para via úmida. A cura do concreto projetado é de particular importância porque o elevado valor da relação área/volume pode resultar uma secagem rápida (NEVILLE, 1997).

2.2 RECOMENDAÇÕES PARA OS MATERIAIS EMPREGADOS NO CONCRETO PROJETADO VIA ÚMIDA

No que tange aos parâmetros de dosagem, recomenda-se a utilização de uma relação água/cimento inferior a 0,55 (RAMOS, 2005) ou entre 0,40 a 0,55 conforme o ACI 506R-90

(1995), sendo normalmente utilizada no Japão relação a/c variando entre 0,55-0,66 (GARSHOL et al, 2005). Já a Associação de Concreto Projetado do Reino Unido recomenda uma relação a/c inferior a 0,45.

Com relação ao abatimento, faz-se necessário verificar as recomendações do fabricante do equipamento de projeção. Entretanto, Prudêncio Júnior (2005) considera que para o caso do fluxo aerado, existe uma tendência de se empregarem concretos com abatimento mais elevado, principalmente quando são empregados aditivos superplastificantes, para facilitar o preenchimento das câmaras do rotor da máquina de projeção – abatimento entre 14 e 22 cm. Já quando se utilizam bombas a pistão, a propriedade fundamental é a coesão para evitar a segregação do concreto dentro do mangote durante o bombeamento, responsável por entupimentos. Assim, o teor de argamassa da mistura, a presença de adições, a curva granulométrica e forma dos grãos dos agregados passam a ser determinantes para a obtenção de um bom concreto. Em contrapartida, é possível trabalhar-se com concretos de menor abatimento, se necessário (abatimento entre 8 e 12 cm). Como já mencionado, essas características de trabalhabilidade do material, principalmente da necessidade de abatimentos superiores a 8 cm, tornam quase indispensável o uso de aceleradores de pega de grande eficiência para permitir sua utilização em situações mais desfavoráveis (como, por exemplo, projeção em tetos de túnel). Segundo o ACI 506R-90 (1995), o abatimento deve ser o mínimo capaz de ser bombeado pelo equipamento de projeção, devendo variar entre 40 mm e 75 mm.

2.2.1 Aglomerantes

A princípio qualquer tipo de cimento pode ser utilizado, desde que atenda à sua norma de especificação correspondente (SILVA, 1997). No caso do concreto projetado que pode vir a ser exposto a meios ricos em sulfato, existe restrição quanto ao teor máximo de C_3A presente no cimento. Se o teor de SO_4^{2-} na água do meio for superior a 400 mg/l, um cimento com C_3A superior a 3% não deve ser utilizado. Se a concentração de SO_4^{2-} for superior a 1000 mg/l, o teor de C_3A deve ser o mais baixo possível (PRUDÊNCIO JÚNIOR, 1993).

Quanto ao consumo de cimento, a *European Federation of National Associations Representing producers and applicators of specialist building products for Concrete* - EFNARC sugere um valor mínimo de 300 kg/m³. Já a Associação de Concreto Projetado (*The Sprayed Concrete Association* - SCA) recomenda que a quantidade desse material esteja entre 350 kg/m³ e 450 kg/m³ (RAMOS, 2005). Prudêncio Júnior (1993) ressalta que o consumo de cimento está extremamente relacionado com o tipo de fluxo do equipamento, sendo comum o emprego de valores dentro da faixa de 400 kg/m³ a 500 kg/m³.

Melbye e Garshol (2000) recomendam a utilização de 5% a 10% de microssílica, em relação à massa do aglomerante total, com o intuito de melhorar a bombeabilidade, aumentar a resistência de aderência ao diversos substratos, melhorar a resistência, reduzir a reflexão. Silva (1997) recomenda a adoção de teores entre 5% a 8%.

2.2.2 Agregado

A *European Federation of National Associations Representing producers and applicators of specialist building products for Concrete* – EFNARC, a *European Specification for Sprayed Concrete* e a *Sprayed Concrete Association* - SCA trazem recomendações quanto à curva granulométrica dos agregados, sendo que a mais utilizada é a proposta pelo ACI 506R-90 (1995). Nesta recomendação constam 3 faixas granulométricas a serem empregadas em concreto projetado, como mostrado na Tabela 2.2. A Graduação 1 pode conduzir a uma maior retração por secagem e a Graduação 3 pode proporcionar maiores valores de reflexão (ACI 506R-90, 1995). Segundo Morgan (1990 apud PRUDÊNCIO JÚNIOR, 2005), a Graduação 2 tem sido a mais utilizada.

Tabela 2.2 – Limites das graduações para a combinação de agregados (ACI 506R-90, 1995)

Abertura da peneira (mm)	Porcentagem Acumulada de Material Passante, em massa		
	Graduação N.º 1	Graduação N.º 2	Graduação N.º 3
19	-	-	100
12	-	100	80 – 95
10	100	90 – 100	70 – 90
4,75	95 – 100	70 – 85	50 – 70
2,4	80 – 100	50 – 70	35 – 55
1,2	50 – 85	35 – 55	20 – 40
0,6	25 – 60	20 – 35	10 – 30
0,3	10 – 30	8 – 20	5 – 17
0,15	2 – 10	2 – 10	2 – 10

No que tange à dimensão máxima característica do agregado graúdo, é comum a utilização de valores entre 8 mm a 10 mm (SILVA, 1997; MELBYE; GARSHOL, 2000). No caso de concretos contendo fibras o tamanho do agregado deve ser limitado em 10 mm (RAMOS, 2005). Quanto às areias, seu módulo de finura deve estar dentro do intervalo de 2,35 a 2,75 (SILVA, 1997) ou entre 2,4 a 3,2 (PRUDÊNCIO JÚNIOR, 2005).

2.2.3 Aditivos

A NBR 14026 (1997) especifica a utilização de qualquer tipo de aditivo, desde que atendidos os requisitos da NBR 11768 (1992). Os aditivos normalmente empregados em concreto projetado são os aditivos plastificantes, superplastificante e, dependendo do tipo de cimento, os aceleradores de pega (MELBYE; GARSHOL, 2000). O ACI 506R-90 (1995) permite a utilização dos aditivos incorporadores de ar, com o intuito de aumentar a resistência à ação do gelo-desgelo, melhorar a trabalhabilidade e reduzir a reflexão, sendo desejável valores da ordem de 5% a 8% de incorporação de ar no concreto fresco.

2.2.4 Telas metálicas

A *Sprayed Concrete Association* - SCA recomenda o emprego de malhas cuja dimensão varie entre 50 mm a 150 mm e que a bitola não seja superior a 10 mm. A distância entre duas camadas de armadura deve ser superior a 5 cm, sendo sempre preferível a utilização de malhas de pequenos diâmetros (3 mm no mínimo) e dimensão da malha maior ou igual a 100 mm. A SCA ainda recomenda que o cobrimento deve ser de no mínimo 20 mm (RAMOS, 2005).

2.3 SISTEMA DE SUPORTE E O USO DO CONCRETO PROJETADO

O sistema de suporte de uma obra subterrânea pode ser dividido em três categorias: suportes pontuais ou isolados, suportes lineares e suportes superficiais ou contínuos. O primeiro tipo é representado pelos tirantes ativos e chumbadores, o segundo, pelas cambotas e treliças metálicas, além das enfilagens cravadas ou injetadas (veja Figura 2.5 e Figuras B6, B7 e B8, no Anexo B). Já os suportes contínuos podem ser de concreto pré-moldado, concreto moldado *in loco* e concreto projetado (FOÁ; ASSIS, 2002 apud RAMOS, 2005).

A seleção do sistema de suporte a ser utilizado está relacionada com fatores como: custo, cronograma, geologia do terreno, além do tipo de processo de escavação. No caso de obras que utilizam o método *New Austrian Tunnelling Method* (NATM) e seus derivados (métodos de escavação seqüencial), o concreto projetado vem sendo largamente empregado, uma vez que se adapta perfeitamente à sua filosofia.

O concreto a ser utilizado como suporte contínuo deve apresentar características que garantam a vida útil dessas obras. Nesse enfoque, têm sido feitas algumas pesquisas com o intuito de avaliar o comportamento do concreto projetado, em relação à permeabilidade à água (DANTAS; TANGO, 1990 apud RAMOS, 2005), em relação à durabilidade frente a agentes agressivos como cloretos e sulfatos (PRUDÊNCIO JÚNIOR, 1993) e em relação à deterioração de origem microbiológica (PALERMO, 1997), entre outras.

Tratando-se do concreto projetado, chama atenção o fato de que ele recebe carga ao mesmo tempo em que estão ocorrendo as reações de hidratação do cimento e o desenvolvimento de suas propriedades mecânicas (Figuras 2.11 e 2.12). Nesse caso, a condição mais crítica à estabilidade de um túnel poderia ocorrer antes mesmo do concreto atingir sua resistência projetada (RAMOS, 2005). Conforme a norma de execução e acabamento do concreto projetado – Especificação de Serviço DNIT 087 (2006), para os túneis executados em solo, o concreto ou a argamassa projetada deve ter uma resistência, pelo menos, 20% maior que a resistência do substrato.

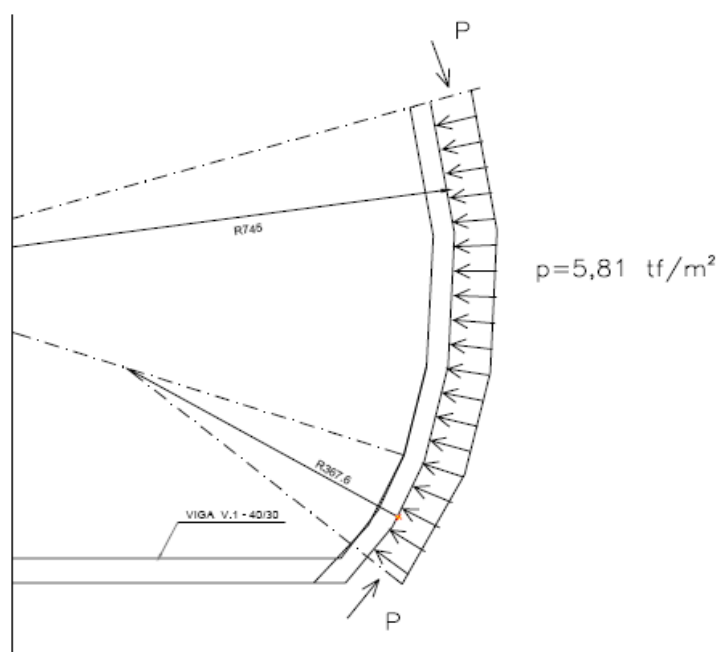
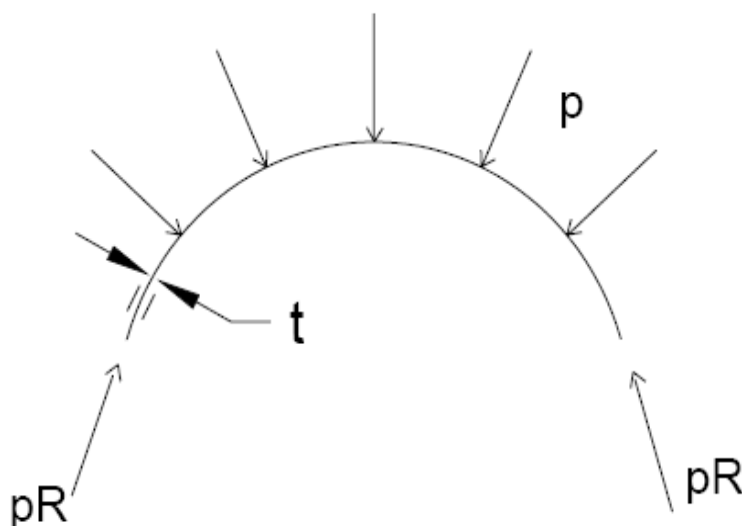


Figura 2.11 – Carregamento na casca de concreto - túnel 01 do trecho 01 da Ferrovia Norte Sul



COMPRESSÃO NA CASCA DE CONCRETO

Figura 2.12 – Esforços de compressão na casca de concreto no túnel 01 do trecho 01 da Ferrovia Norte Sul - $p=5,8 \text{ tf/m}^2$ e $pR=43,28 \text{ tf/m}$

O concreto projetado desempenha o papel de revestimento primário, que possibilita a abertura no maciço e, em muitos casos, de revestimento secundário, que também pode ser executado com concreto convencional. De qualquer modo, o concreto projetado estará em contato direto com o maciço e deverá ser o primeiro responsável pela impermeabilização da estrutura e também sofrerá primeiro com o ataque dos agentes agressivos. Em muitos casos de túneis executados no Brasil e no exterior, o concreto projetado tem sido o único responsável por desempenhar o papel de elemento de impermeabilização da estrutura, devendo protegê-la dos agentes agressivos e da penetração de água oriunda do lençol freático. No entanto, mesmo que o concreto projetado não seja utilizado no revestimento secundário e que não seja dado a ele o papel de elemento de impermeabilização, é impossível realizar esse serviço por meio da aplicação de uma manta ou membrana, sem que haja um substrato de concreto projetado onde este referido sistema tenha condições de ser aplicado com garantias mínimas de qualidade. Assim, qualquer que seja o papel: principal ou secundário, o concreto projetado acaba por intervir na qualidade final do sistema de impermeabilização do túnel. Por isso, é importante que ele não seja ignorado nos processos de concepção de projeto e execução dos túneis pelo

método NATM, com análises de aspectos importantes de durabilidade levados em conta, como os de requisitos da norma brasileira de especificação do concreto projetado - NBR 13354:1997 (ABNT, 1997).

2.4 O NOVO MÉTODO AUSTRIACO DE CONSTRUÇÃO DE TÚNEIS (NATM)

O “*New Österreichische Tunnelbauweise*” (Novo Método Austríaco de Abertura de Túneis – NATM), assim denominado por Rabcewiz em 1963, teve significativo desenvolvimento entre 1957 a 1965, a partir da experiência adquirida em minas de carvão.

Observou-se que os escoramentos de madeira colocados nas galerias de minas, após a ruptura dos primeiros suportes provisórios, devido a esforços do maciço, podiam ser mais leves que aqueles rompidos em consequência do alívio de tensões instalados (PALERMO, 1997).

O NATM é um método que logo após a escavação parcial da face é colocado o suporte. O suporte é constituído de concreto projetado e complementado por tirantes, telas, cambotas ou treliças. Nesta metodologia, que a princípio parece simples, estão embutidos muitos conceitos fundamentais que extrapolam o cálculo.

O sucesso do NATM depende fundamentalmente desses conceitos e da experiência das pessoas nele envolvidas.

O processo de abertura do túnel é progressivo, com contínuos alargamentos na geometria de escavação da seção até alcançar a seção projetada (veja Figuras 2.13 e 2.14). Também é contínuo o avanço longitudinal da escavação (é possível a abertura da seção em uma única etapa). O suporte do túnel é constituído de concreto projetado associado a cambotas metálicas, com tirantes e enfilagens conforme necessário. Nota-se que o revestimento de concreto deve apresentar flexibilidade de instalação para se compatibilizar com essa versatilidade de escavação. Evidencia-se aqui o concreto projetado pela sua rapidez e facilidade de aplicação de camadas adicionais como reforço, pela facilidade de emendas e pelo baixo módulo e resistência mecânicas nas primeiras idades permitindo a deformação do maciço.

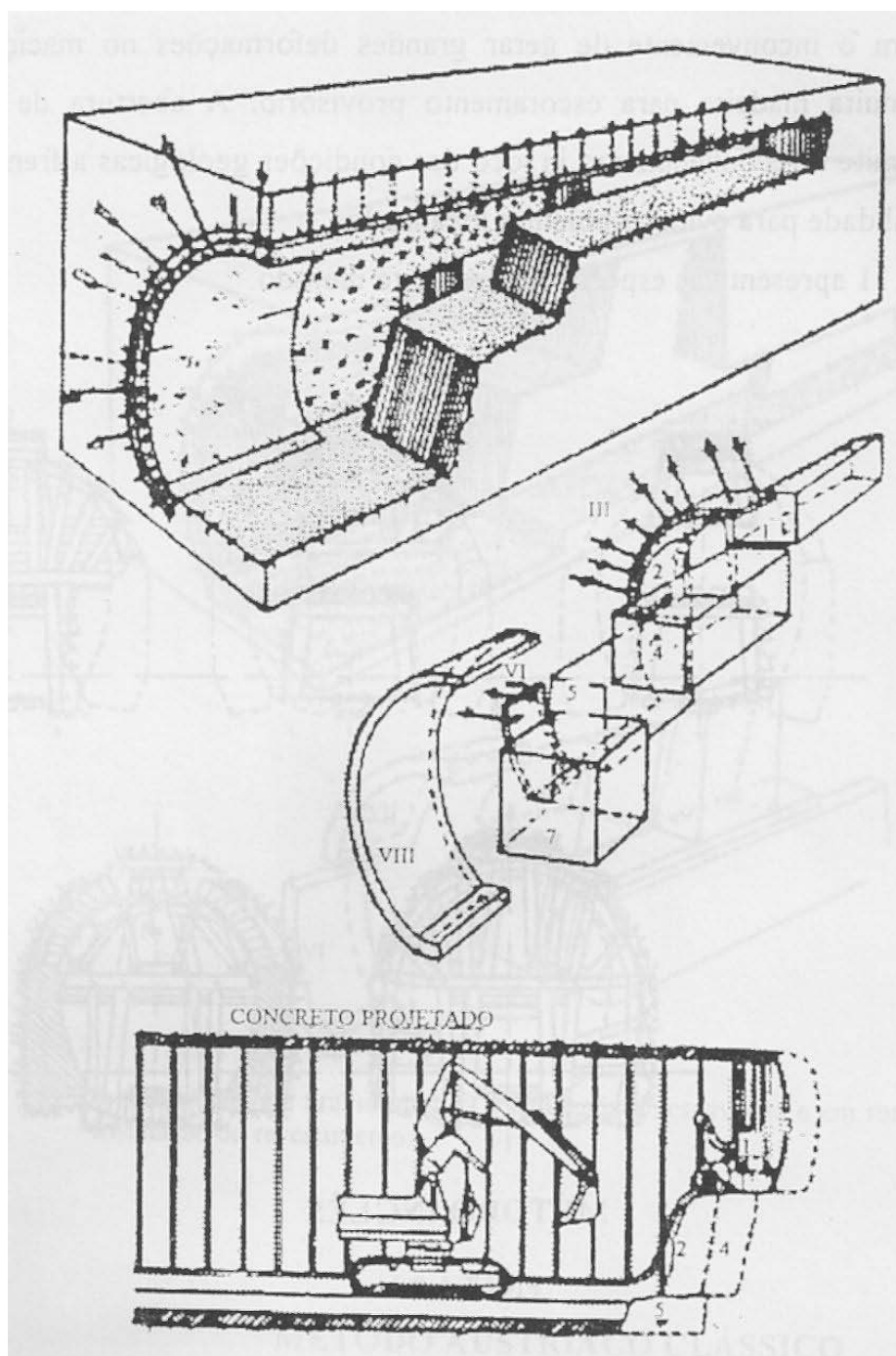


Figura 2.13 – Método Austríaco Moderno – NATM. A numeração indica a seqüência de escavação do maciço, sendo que a numeração em romanos indicam a instalação de suportes (PALERMO, 1997).

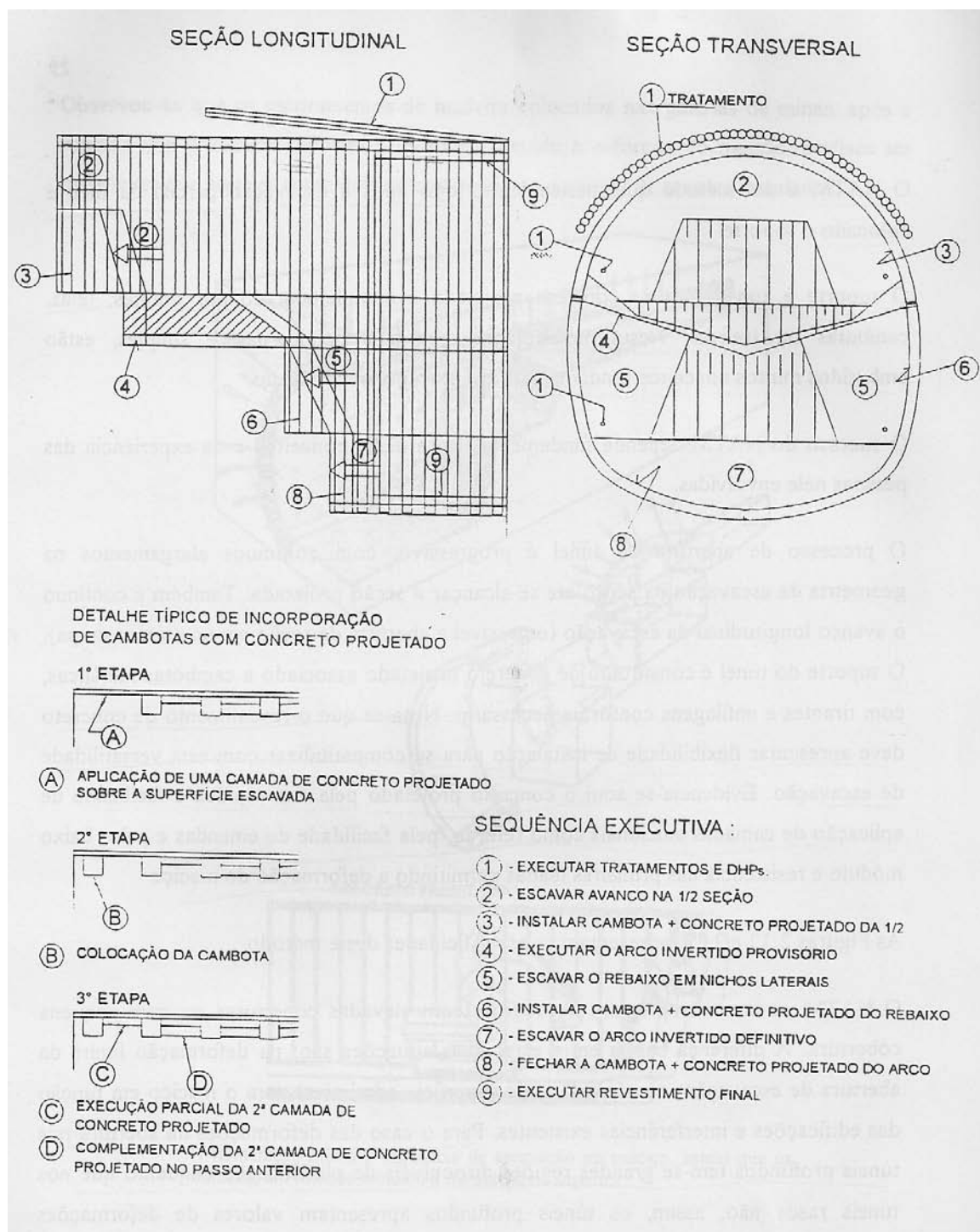


Figura 2.14 – Sequência Construtiva do Método NATM (PALERMO, 1997).

O NATM pode ser empregado em regiões com elevadas coberturas ou com pequena cobertura. A diferença básica entre essas duas situações são: na deformação limite da abertura de escavação e no recalque de superfície admissível para o maciço em função das edificações e interferências existentes. Para o caso das deformações da abertura nos túneis profundos,

têm-se valores de deformações admissíveis maiores antes de atingir o ponto de ruptura ou desagregação total do material. Para o caso de recalques admissíveis de superfície, os túneis rasos impõem valores muito inferiores quando comparados com túneis profundos devido à rápida comunicação entre a deformação da escavação e o recalque de superfície. Nestes casos os túneis rasos apresentam seqüência executiva que impõem menor perturbação do maciço (PALERMO, 1997).

O método austríaco foi originalmente desenvolvido para maciços rochosos e depois adaptados para solos. Trata-se de um método que conduz a uma estabilidade pelo alívio controlado de pressão. O alívio de tensões é efetuado intencionalmente; os valores das deformações e tensões são rigorosamente medidos e controlados de acordo com as necessidades (SILVA, 1997). O NATM tem como característica principal controlar as deformações do maciço visando minimizar a solicitação do sistema de estabilização. É importante lembrar que a evolução da pressão com deslocamento é bastante pelo fator tempo em maciços com comportamento viscosos (PALERMO, 1997).

Desenvolvido na década de 1940/50, o NATM cresceu a partir da observação e experiência de campo. Hoje o método é internacionalmente reconhecido e cientificamente baseado na teoria e em ensaios de modelos, o que tem levado a obter muita aceitação e êxito no contexto mundial. O seu princípio básico repousa na seguinte “filosofia”: “abertura de túneis suportada pelo próprio maciço”, diferente do princípio do método norte americano que prevê a “abertura de túneis suportada por revestimento de aço”. Evitando qualquer expansão excessiva da rocha (ou solo), o revestimento age como superfície resistente, forçando a rocha (ou solo) a se auto-suportar ao invés de ele mesmo suportar o carregamento como uma estrutura independente.

Quando uma cavidade é aberta num processo de abertura de túnel, as tensões resultantes no material circundante (solo ou rocha) mudam de um chamado estado primário de tensões para um estado secundário. As tensões radiais na fronteira aumentam de maneira a suportar o carregamento, que antes era suportado pelo material escavado. O rearranjo de tensões é acompanhado de deformações para dentro da abertura do túnel (PALERMO, 1997).

O anel de suporte do túnel de concreto projetado (cambota mais concreto projetado) combina com a massa rochosa circundante. Isto obtém uma alta integração e contribuição total com a massa rochosa, maximizando o seu efeito de suporte (YAO, 2009).

A seguir são resumidas as regras e preceitos fundamentais do método NATM, como apresentados por Palermo (1997):

- O maciço circundante participa como suporte;
- Há preservação da qualidade do maciço circundante;
- O afrouxamento interior do maciço é prejudicial;
- Deve haver caracterização geológica e geotécnica minuciosa do maciço;
- Deve-se promover adequação da parcialização da seção;
- O emprego do suporte deve ser adequado, no momento certo;
- Deve-se garantir a eliminação de vazios na interface maciço-suporte;
- É necessário o emprego de ancoragem, cambotas ou treliças, e telas de aço;
- É necessário o fechamento do piso inferior (“invert”);
- Deve ocorrer redução da seção escavada ao mínimo necessário – parcialização;
- Deve haver preferência por seções arredondadas;
- É necessário o acompanhamento da construção através de leituras intensivas da instrumentação de campo;
- Deve haver estabilização das deformações do conjunto maciço-suporte;
- Deve-se prover minimização das pressões neutras empregando a drenagem.

2.5 DURABILIDADE DO CONCRETO PROJETADO PARA O NATM

O que se deseja do concreto é que este mantenha por longo tempo as propriedades de resistência e estabilidade, sem a necessidade de “grandes” manutenções ou recuperações precoces, ou seja, deseja-se que as estruturas sejam duráveis (PALERMO, 1997).

Os métodos de ensaios devem ser idealizados e/ou selecionados para medir ou pelo menos avaliar a durabilidade. Para isso, é necessário se conhecer os mecanismos de perda de durabilidade do concreto projetado. Os mecanismos de deterioração do concreto de obras subterrâneas podem ser explicados, fora os problemas de resistência mecânica, pelos processos de penetração de agentes agressivos no interior do concreto conduzidos pelas águas do lençóis subterrâneos através da permeabilidade do concreto.

Palermo (1997) em consulta à *Association Française des Travaux em Souterrain* (AFTES) em 5 de setembro de 1980, respondida pelo Dr. J. Pera, obteve as seguintes considerações:

- o revestimento talvez possa ser considerado durável se não existir água proveniente do maciço;
- se existir água, tem-se um risco de circulação preferencial da água entre a armadura constituída de tela metálica e o concreto projetado. A corrosão poderá então romper o concreto projetado. A recomendação do AFTES, que fixa um cobrimento mínimo de 2 cm, deveria ser interpretada de maneira mais rigorosa. Seriam necessários pelo menos 10 cm de cobrimento;
- se as águas são agressivas (presença de sulfatos, sulfúricos, de ácidos, etc.), as telas ou os tirantes de aço não terão a durabilidade adequada. É necessário então recorrer a um revestimento definitivo em concreto convencional moldado, ou mesmo empregar um sistema de impermeabilização.

A durabilidade das estruturas pode ser traduzida por uma necessidade real de impermeabilidade à água do material concreto que irá compor essas estruturas. Os mecanismos de degradação, com base no conhecimento dos processos de deterioração das estruturas, podem ser classificados em:

- químicos: ataques por ácidos, sais e álcalis;
- biológicos, que freqüentemente ocorrem em túneis de esgotos;
- corrosão do aço: devido a carbonatação e à ação dos cloretos; e
- corrosão do aço por correntes de fuga.

O efeito real de agressividade da água sobre o concreto depende de um conjunto de fatores, que podem ser divididos em dois grande grupos (PALERMO, 1997):

- fatores do ambiente circundante:
 - pressão da água subterrânea, e o seu nível, e a faixa de variação deste;
 - natureza e permeabilidade do solo; movimento (direção e velocidade) da água subterrânea;
 - conteúdo de agentes agressivos da água; e efeito “potencial” de futuras agressividades dentro da vida útil da obra;
- fatores do concreto e da obra:
 - superfície da estrutura exposta a água;
 - forma e dimensão da seção transversal dos elementos estruturais;
 - coeficiente de permeabilidade do concreto;

- superfície específica dos poros abertos em cm^2/cm^3 , ou seja, superfície efetiva pela qual a água agressiva pode atuar sobre o concreto; composição da pasta de cimento endurecida e resistência química dos agregados; e
- idade em que a obra entre em carga referente a agressividade do meio.

Na realidade os fatores de ambos os grupos determinarão conjuntamente a amplitude da ação das águas agressivas sobre o concreto. Note que tratam-se de relações quantitativas dependentes do tempo, isto é, os parâmetros de porosidade do concreto e de nível de agressividade no meio se alteram com o tempo. Cabe lembrar que a vida útil estimada para as estruturas gira em entre 50 a 100 anos.

Os mecanismos que se constatarem no interior da estrutura interna do concreto e que podem ocorrer todos de forma simultânea são:

- penetração de água nos capilares do concreto trazendo íons agressivos por absorção (entrada de água sem pressão), através da imersão e/ou capilaridade;
- permeabilidade (entrada de água por gradiente de pressão diferencial);
- difusão (gradiente de concentração) – difusão de íons do meio para o interior do concreto através dos capilares existente, e também uma difusão em sentido inverso de íons do concreto para o exterior; e
- reações químicas dos íons agressivos com os constituintes do concreto, que afetam a qualidade desse.

Para um adequado conhecimento dos mecanismos de deterioração fica evidente a importância do conhecimento da estrutura interna do concreto, para se compreender as leis de penetração dos líquidos e dos íons agressivos na porosidade deste.

Segundo Mehta e Monteiro (2008), na estrutura interna do concreto os vazios e poros surgem devido a:

- granulometria dos inertes;
- antes da pega, tem-se o fenômeno de segregação por exsudação, que pelo excesso de água à hidratação do cimento geralmente empregada na prática para a obtenção da trabalhabilidade pra facilitar a compactação. Este excesso de água ao sair por evaporação deixa vazios, produzindo uma porosidade capilar na pasta de cimento endurecida. Ainda antes da pega, tem-se a segregação por sedimentação dos sólidos, principalmente da parte fina;
- o ar retido durante as operações de compactação;
- depois do final da pega, quando o concreto passou do estado líquido para o estado sólido, tem-se que o volume absoluto dos componentes hidratados do cimento é

inferior a soma do volume dos componentes anidros com a água, e o espaço ocupado pela pasta de cimento hidratado é inferior ao da pasta antes do endurecimento, seja qual for a relação água/cimento; e

- os cristais formados próximos aos agregados são grandes formando uma estrutura mais porosa do que na matriz de pasta de cimento ou na matriz da argamassa, pois ao redor dos agregados a relação água/cimento é maior já que sempre se forma um filme de água ao redor dos agregados. É considerado o elo mais fraco do concreto, denominada zona de transição. Este fato explica o comportamento elasto-plástico do concreto, mesmo que os materiais constituintes sejam elásticos. A existência de microfissuras nesta zona de transição na interface com a armadura e/ou agregado gráudo é a razão principal do concreto ser mais permeável do que a pasta ou a argamassa correspondente.

Com respeito à importância da determinação da resistência à compressão para a durabilidade, o comportamento da resistência mecânica está relacionado à porosidade da pasta ou à qualidade da interface dessa pasta com o agregado, para um determinado grau de hidratação, na idade considerada. Como esses fatores são os mesmos que governam a durabilidade, que depende dos mecanismos de transporte de soluções, agressivas ou não, pelos poros intersticiais, depreende-se que essas duas propriedades (resistência e porosidade) são interligadas e interdependentes, cuja importância relativa, de uma ou outra, dependerá das condições de projeto e do meio ambiente (FERREIRA, 2003).

CAPÍTULO 3

METODOLOGIA DO TRABALHO EXPERIMENTAL

O programa experimental desta dissertação, parte realizado no laboratório de concreto no canteiro de obras da Ferrovia Norte-Sul (do trecho 1, em Anápolis-GO), parte realizado nos laboratórios de Centro Tecnológico de Engenharia Civil de Furnas Centrais Elétricas S.A. e parte realizado no laboratório de Materiais de Construção Civil - Área de Química do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A. - IPT, foi elaborado com o intuito de verificar algumas características e propriedades associadas à durabilidade constituinte de elementos estruturais armados, em túneis construídos pelo método NATM.

Este trabalho está sendo desenvolvido em campo, nos túneis da Ferrovia Norte Sul – Trecho 01 – Anápolis ao Porto Seco, com a obtenção de dados de produção e da confecção do concreto projetado, assim como a amostragem *in loco* (extração de testemunhos da estrutura dos túneis) e pela projeção em placas.

3.1 VARIÁVEIS DO TRABALHO

3.1.1 Variáveis independentes

As variáveis independentes estudadas neste programa experimental, com vistas a atingir os objetivos do trabalho, foram as seguintes:

- Tipo de sistema de projeção: via seca e via úmida.
- Extração dos testemunhos de concreto (pelo local de projeção): das placas de controle tecnológico e da estrutura real (do túnel).

Essas variáveis são mostradas, conforme fluxograma demonstrativo, na Figura 3.1.



Figura 3.1 – Fluxograma das variáveis do trabalho experimental.

3.2 MATERIAIS EMPREGADOS

Para confeccionar os concretos utilizados neste trabalho utilizou-se cimento Portland composto, agregados miúdos e graúdos e aditivos. A descrição e a caracterização preliminar desses materiais empregados encontram-se nos subitens a seguir.

3.2.1 Cimento

O cimento utilizado foi o cimento Portland composto CP II F-32 (ABNT NBR 11578:1991), de procedência de Cimpor Cimentos do Brasil Ltda - Cezarina-GO, muito utilizado nos canteiros de obras da cidade de Goiânia-GO. Este cimento é constituído de 90% a 94% de clínquer e gipsita e de 6% a 10% de material carbonático. Suas características físicas e mecânicas estão dispostas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Caracterização do cimento CP II F-32.

Método de ensaio	Propriedade avaliada		Resultado	Limites NBR 11578:1991
NBR NM 23:2000	Massa específica (kg/dm ³)		2,98	N.E.
NBR 11579:1991	Finura	Resíduo na peneira 200 (75 µm) (%)	0,8	≤ 12
NBR NM 43:2002	Índice de consistência normal (mm)	Obs.: obtida com 161,2 g de água	6,0	N.E.
NBR NM 65:2002	Tempos de pega	Início de pega (h:min)	2:15	≥ 1:00
		Fim de pega (h:min)	5:10	≤ 10:00
NBR 7215 : 1996	Resistência à compressão (MPa)	1 dia	18,3	N.E.
		3 dias	29,5	≥ 10
		7 dias	35,5	≥ 20
		28 dias	41,5	≥ 32

N.E.: não especificado

3.2.2 Agregados

Como agregado miúdo utilizou-se areia artificial de britagem de rocha metamórfica micaxisto de procedência da Pedreira Anhanguera em Anápolis-GO, classificada como areia média de acordo com a norma brasileira de especificação ABNT NBR 7211:1983 (ABNT, 1997) e, conforme a ABNT NBR 7211:2005 (ABNT, 2005), classificada dentro dos limites especificados de zona utilizável. O agregado graúdo utilizado foi uma pedra britada de rocha metamórfica micaxisto de procedência da Pedreira Anhanguera em Anápolis-GO, classificado como número 0, de acordo com a norma brasileira de especificação ABNT NBR 7211:1983 (ABNT, 1997) e, conforme a ABNT NBR 7211:2005 (ABNT, 2005), está classificado nos limites especificados na relação $d/D=9,5/25$ (menor tamanho do agregado/menor tamanho do

agregado). As principais características do agregado graúdo e miúdo estão dispostas na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Caracterização dos agregados graúdo e miúdo.

Método	Propriedade avaliada	Pedra Britada	Areia Artificial
NBR 7217:1992	Módulo de Finura	5,86	3,24
NBR 7217:1992	Dimensão máxima característica (mm)	12,5	4,8
NBR 9776:1994	Massa Específica – Chapman Picnômetro (kg/dm ³)	2,63	2,64
NBR 7251:1982	Massa Unitária – Estado Solto Seco (kg/dm ³)	1,41	1,67

3.2.3 Aditivos

Foram empregados três aditivos para o sistema via úmida: um primeiro aditivo plastificante, um superplastificante e redutor de água, e um aditivo acelerador de pega. No sistema via seca utilizou-se somente um aditivo acelerador de pega. As principais características dos aditivos estão na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Caracterização dos aditivos.

Tipo de Aditivo	Base	Sistema	Consumo (l/m ³)	Densidade (g/cm ³)	Nome Comercial
Plastificante	lignosulfonatos	via úmida	2,4	1,16 a 1,20	Mastermix 390 N
Superplastificante e redutor de água	melamina	via úmida	2,3	1,16	MC Bauchimie (Muraplast FK 22)
Acelerador de pega	Sulfato de Alumínio hidratado (álcali-free)	via úmida	17,5	1,37 a 1,41	MC Bauchimie (Centrament 640 rápido)
Acelerador de pega	Sulfato de Alumínio hidratado (álcali-free)	via seca	22,5	1,37 a 1,41	MC Bauchimie (Centrament 640 rápido)

3.2.4 Concretos Estudados

Os concretos estudados tiveram o proporcionamento dos materiais definidos a partir de estudos de dosagem desenvolvidos pela empresa executora da obra, a Queiroz Galvão Engenharia S.A., conjuntamente à empresa responsável pelo projeto, a Maffei Engenharia, e também à Valec Engenharia, Construções e Ferrovias S.A., empresa estatal federal proprietária da obra, responsável pela fiscalização das obras de artes especiais do trecho 1 da Ferrovia Norte Sul. Os estudos de dosagem envolveram o desenvolvimento experimental de diversas combinações entre os agregados (alterando o módulo de finura da mistura), de forma a minimizar o consumo de cimento sem prejuízo da resistência mecânica e da trabalhabilidade do concreto. Os estudos de dosagem que se obtiveram os proporcionamentos dos concretos via seca e via úmida utilizados na obra se basearam na metodologia de dosagem do Eng. Amorim (AMORIM, 2006).

O estudo de dosagem resultou em dois traços (unitários em massa) definidos dos concretos utilizados na obra: um para o sistema de projeção via úmida de 1:2,34:2,25 (cimento:areia:pedra), com consumo de cimento de 400 kg/m^3 e relação água/cimento de 0,45; e outro para o sistema de projeção via seca de 1:1,84:1,99 (cimento:areia:pedra), com consumo de cimento previsto de 450 kg/m^3 e relação água/cimento esperado de 0,45 (após projeção). A resistência característica à compressão (f_{ck}) aos 28 dias estipulado para projeto foi de 20 MPa. A consistência do concreto via úmida, dada pelo abatimento do tronco de cone (ABNT NBR NM 67:1998 (ABNT, 1998)), foi especificado previamente de $(18 \pm 2) \text{ cm}$, tendo sido obedecida na etapa de dosagem. Os dados de consistência e resistência do concreto via úmida estão presentes nas Tabelas de Dosagem Experimental do Concreto da Valec Engenharia, Construções e Ferrovias S.A. e Estudo de Dosagem – Redimix do Brasil, no Anexo A.

3.3 MÉTODOS

3.3.1 Moldagem das Placas

Com o intuito de melhor representar o concreto projetado em estruturas de concreto armado em túneis, placas prismáticas foram moldadas por meio de projeção, de acordo com a ABNT NBR 13070:1994 (ABNT, 1998), utilizando-se formas metálicas e de madeira tipo "caixa", com seção transversal tronco-piramidal (65 cm x 65 cm na face aberta, 40 cm x 40

cm no fundo e 17 cm de profundidade - Figura 3.2). Foram projetadas três placas (Figura 2.2) para cada traço e consumo de cimento, especificados; dessas placas, foram extraídos testemunhos cilíndricos (Figura 3.5) e, a partir destes, obtidos os corpos-de-prova com 75 mm de diâmetro por 150 mm de altura, destinados aos vários ensaios. Esta metodologia constitui-se na forma mais confiável para a verificação das propriedades do concreto projetado, considerando que a posterior extração de testemunhos da placas reproduz, com bastante similaridade, as condições existentes nas situações práticas, ao contrário de corpos-de-prova moldados que não reproduziriam o comportamento do concreto projetado (GASPARIM, 2007).



Figura 3.2 – Placa metálica (esquerda) e placa de madeira (direita) para moldagem de corpos-de-prova.

As condições de cura, na obra, das placas e dos corpos-de-prova são semelhantes às mesmas condições impostas ao revestimento dos túneis. As amostras retiradas da obra, em seguida, foram levadas ao Laboratório de Concreto do Centro Tecnológico de Engenharia Civil de Furnas Centrais Elétricas S.A., onde permaneceram em condições de cura também semelhantes às condições de cura realizadas na obra, dentro de câmaras úmidas, por um período variável entre 28 a 92 dias, dependendo das especificações necessárias de lapso temporal para a realização dos ensaios, preconizados para cada norma atinente a cada ensaio. Todos os corpos-de-prova tiveram o mesmo período de cura (em condições iguais) e mesma data para realização de ensaios. As datas das moldagens das placas estão especificadas na Tabela A 1, em anexo.

3.3.2 Processo e equipamentos de projeção

Neste programa experimental foi utilizado o processo de projeção via seca e via úmida. No sistema via seca utilizou-se equipamento composto por uma máquina de projeção a rotor de câmaras, da empresa Queiroz Galvão Engenharia S.A., com bomba injetora *Sheikan Ancor Jet* – linha de ar comprimido – com pressão de trabalho de 0,4 a 0,9 MPa (Figura 3.4). Tomou-se a precaução de manter o mesmo mangoteiro no mesmo procedimento, para minimizar as variações pertinentes as variações manuais do sistema, e, com isso, reduzir o efeito das variáveis intervenientes. No sistema via úmida, utilizou-se o equipamento composto por uma máquina de projeção a pistão, da empresa Queiroz Galvão Engenharia S.A., com bomba injetora *Schwing* (Diesel) (Figura 3.3), com lançador de aditivo elétrico com pressão de trabalho de até 4 bar (58 psi) e bomba de injeção Live 262 de diâmetro 2 ½” (com alimentação por meio de caminhões betoneira).



Figura 3.3 – Alimentação de concreto no emboque sul do túnel 1.
Sistema via úmida - Bomba injetora *Schwing*.



Figura 3.4 – Alimentação de cimento e agregados no emboque sul do túnel 2.
Sistema via seca - Bomba injetora *Sheikan Ancor Jet*.

3.3.3 Extração dos corpos-de-prova

As dimensões finais dos corpos-de-prova foram definidas de acordo com os métodos de ensaio empregados (veja Figura C 1, em anexo), sendo os testemunhos extraídos cilíndricos de: 75 mm de diâmetro por 150 mm de altura. Foram extraídos corpos-de-prova das placas de projeção para a realização dos diversos ensaios da pesquisa (veja Figura B 5, em anexo) na idade de 28 dias, observando o tempo de cura e condições de similaridade da obra. Os testemunhos extraídos da estrutura do túnel nos emboques sul e norte (via úmida e via seca) foram retirados com idade mínima de 28 dias para a obtenção de condições similares aos corpos-de-prova obtidos através das placas moldadas.

O equipamento de extração utilizado em todo o processo - tanto nas placas, quanto na estrutura do túnel - foi a máquina extratora rotativa de marca *Hilt* – modelo DD 120 (conforme a Figura 3.5), com velocidade de rotação de 650 a 1380 rpm, potência igual a 1600 W e frequência de 50 a 60 Hz, com diâmetro máximo de 132 mm (extraíu-se com diâmetro de 75 mm), empregando-se copo com vídia diamantada.

As extrações dos testemunhos de concreto no túnel obedeceram às prescrições da NBR 7680:1983 (ABNT, 2007), garantindo a representatividade das amostras.



Figura 3.5 – Extração de corpos-de-prova da placa.
Local: canteiro de obra da Queiroz Galvão Construtora S.A.

3.3.4 Ensaios

Os principais ensaios realizados, considerados como balizadores do potencial de durabilidade do material, que normalmente constam das especificações brasileiras e internacionais, utilizados neste trabalho, são os seguintes:

- Absorção de água por capilaridade, de acordo com a NBR 9779:1995 (ABNT, 1995), com três corpos-de-prova, com dimensões de 75 mm de diâmetro por 150 mm de altura, por placa;
- Absorção de água por imersão, de acordo com a NBR 9778:1995 (ABNT, 1995), com três corpos-de-prova, com dimensões de 75 mm de diâmetro por 150 mm de altura, por placa;
- Penetração de água sob pressão, conforme a NBR 10787:1994 (ABNT, 1994), sendo adaptada para os testemunhos extraídos, com três corpos-de-prova, com dimensões de 75 mm de diâmetro por 75 mm de altura, por traço ou ainda conforme a disponibilidade de equipamento para aplicação de pressão (método de Furnas);
- Resistividade elétrica superficial, de acordo com a ASTM G57:1995 (ASTM, 2006) – método de Wenner, em três corpos-de-prova, com dimensões de 75 mm de diâmetro por 150 mm de altura, por placa.
- Penetrabilidade de íons cloreto, de acordo com a ASTM C 1202:1992 (ASTM, 2005), em três corpos-de-prova, com dimensões de 75 mm de diâmetro por 50 mm de altura, por placa e também dos testemunhos extraídos dos túneis.

- Resistência à compressão axial ², conforme a norma NBR 5739:1994 (ABNT, 1994), utilizando três corpos-de-prova por placa, com dimensões de 75 mm de diâmetro por 150 mm de altura, em 03 dias, 07 dias e 28 dias.
- Reconstituição de traço, conforme a NBR 13044:1993 (ABNT, 1993), a partir de 2,50 kg de material de amostra recém-coletada após a projeção em diversos pontos e diversas profundidades do concreto projetado da obra (*in loco*).

Uma consideração importante sobre os ensaios de durabilidade é que, embora a resistência à compressão axial seja importante dentro desse contexto, não há uma correlação direta com parâmetros de durabilidade, de modo que não é possível haver garantia da qualidade ou da vida útil de uma estrutura apenas com o controle da resistência à compressão (GASPARIM, 2007).

Silva (1997) afirma que uma das propriedades mais estudadas para avaliar a durabilidade do concreto projetado é a permeabilidade. Permeabilidade refere-se ao escoamento de um fluido através de um meio poroso por gradiente de pressão. No caso do concreto, o transporte de fluidos no seu interior dá-se por absorção, difusão e/ou escoamento através de seu meio, o que ressalta a importância da porosidade no que tange à penetração dos fluidos.

Os agentes agressivos, presentes no meio em que está a estrutura, se introduzem no concreto através de sua rede de poros. Mehta e Monteiro (2008) são enfáticos em afirmar que a durabilidade do concreto é grandemente influenciada por sua porosidade.

Fenômenos como carbonatação, penetração de cloretos, lixiviação e corrosão de armaduras, dentre outros mecanismos deletérios, estão atrelados à permeabilidade do concreto, ou seja, dependem da porosidade, do arranjo e interligação do sistema de poros.

A seguir, são apresentadas maiores informações sobre a idade, forma de armazenamento, cura e amostragem dos corpos-de-prova, bem como sobre os ensaios empregados na presente pesquisa.

² A realização dos ensaios de resistência mecânica para os corpos-de-prova extraídos do túnel foi viabilizado por reaproveitamento de corpos-de-prova dos ensaios anteriores relativos a durabilidade, este ensaio também contribuiu para caracterização do material.

3.3.4.1 Condições fixas

Nas alíneas a seguir são apresentados a idade, a forma de armazenamento e cura dos corpos-de-prova e a amostragem.

a) Idade

Os ensaios deste programa experimental foram realizados com idade mínima de 28 dias, por ser esta a idade de referência de praticamente todas as especificações de projeto e controle para o concreto projetado. Somente há exceção para o ensaio de resistência à compressão axial, que foi realizado também aos 3 e 7 dias. A idade máxima para a realização dos ensaios foi de 120 dias para este programa experimental, observando o período da data inicial de moldagem ou extração dos corpos-de-prova com o tempo requerido para cada ensaio.

b) Forma de armazenamento e cura

Em sequência à moldagem, as superfícies das placas foram protegidas com lona plástica preta, conforme ilustra a Figura 3.6, para minimizar a perda de água, produzir a cura uniforme e também propiciar condições de similaridade entre as amostras. As placas foram mantidas por 28 dias nessas condições de cura, em local semi-aberto, junto ao laboratório de campo próximo ao emboque sul do túnel 02, de modo a simular as condições de obra. Os corpos-de-prova extraídos do túnel 01 (testemunhos da estrutura) também foram protegidos com lona plástica preta, em local semi-aberto, para minimizar a perda de água, produzir a cura uniforme e também propiciar condições de similaridade entre as amostras.



Figura 3.6 – Conjunto de placas produzidas numa sequência de moldagem com proteção de capa plástica.

Após 28 dias, os corpos de prova foram levados ao Laboratório de Concreto do Centro Tecnológico de Engenharia Civil de Furnas Centrais Elétricas S.A. para a câmara úmida (temperatura de $(23\pm 2)^{\circ}\text{C}$ e umidade superior a 90%), conforme ilustra a Figura 3.7, onde permaneceram até a sua retirada para a realização dos ensaios, isto conforme a necessidade para cada tipo de ensaio.



Figura 3.7 – Conjunto de corpos-de-prova retirados das placas e dos túneis em condições de armazenamento e cura em câmara úmida.

c) Amostragem

- Placas

Foram moldadas três placas para cada sistema de projeção (via seca e via úmida) e destas foram extraídas, no mínimo, três testemunhos, aleatoriamente, para cada ensaio. Assim, cada determinação realizada em laboratório ocorreu por meio do ensaio de três corpos-de-prova obtidos a partir dos testemunhos extraídos. Em alguns casos, foram utilizados dois corpos-de-prova, quando a variabilidade do ensaio assim o permitiu. Nestes casos, a opção de utilização de dois corpos-de-prova está indicada junto às descrições dos procedimentos de ensaio (subitem 3.3.4.2) e na tabulação dos resultados. Eram extraídos, no mínimo, doze corpos-de-prova para cada placa, mas em média eram retirados dezesseis corpos-de-prova para cada placa visando eventuais necessidades em ensaios posteriores. No total, 96 corpos-de-prova foram extraídos das placas moldadas.

- Dos testemunhos extraídos da estrutura do túnel

Para os testemunhos obtidos pela extração na estrutura do túnel 01, foram extraídos quatro do sistema de projeção via seca, no emboque norte, sendo dois do lado direito e dois do lado esquerdo do túnel (Figuras 3.8, 3.9, 3.10 e 3.11). As posições das extrações dentro dos túneis foram variadas, tendo em vista a heterogeneidade do material projetado, os diferentes tipos de projeção e a influência da reflexão no material projetado. Portanto, foram extraídas amostras dos dois lados, em várias alturas e em diversos pontos aleatórios dos dois túneis.



Figura 3.8 – Extração de testemunho na estrutura do túnel 01 – emboque norte. Detalhe da colocação de balde acima do nível da extratora.



Figura 3.9 – Extração de testemunho na estrutura do túnel 01 – emboque norte.
Placa aparafusada na base do equipamento e no túnel – lado de cima.



Figura 3.10 – Extração de testemunho na estrutura do túnel 01 – emboque norte.
Placa aparafusada na base do equipamento e no túnel – lado de baixo
(inversão da placa da base).



Figura 3.11 – Extração de testemunho na estrutura do túnel 01 – emboque norte. Retirada do corpo-de-prova – lado de baixo – detalhe arame amarrado facilita remoção.

Foram extraídos também quatro do sistema via úmida, no emboque sul, dois do lado direito e dois do lado esquerdo do túnel (Figura 3.12). No total, oito corpos-de-prova da estrutura do túnel foram extraídos.



Figura 3.12 – Extração de testemunho na estrutura do túnel 01 – emboque sul. Placa aparafusada na base do equipamento e no túnel – lado de baixo – detalhe balde.

A obtenção dos corpos-de-prova no túnel foi feita no mesmo local antes e após a projeção, ou seja, foram projetadas as placas e extraídos os concretos do túnel, no mesmo local onde foi feita a projeção inicial. Foi obedecido rigorosamente o local, para não se compararem concretos projetados em locais diferentes da extração com o concreto projetado na placa, para isso utilizou-se marcações dentro do túnel e a equipe de topografia da empresa supervisora da obra, indicando com precisão a localização geográfica do ponto de projeção para extração. O túnel 1, do trecho 1, da Ferrovia Norte-Sul, onde o concreto projetado é objeto deste estudo, localiza em local densamente povoado, com edificações situadas acima do eixo de perfuração do túnel, com área de influência significativa no lençol freático do local, havendo rebaixamento do nível de água dos poços rasos construídos pela população destas edificações. A forma de produção do concreto projetado: para o sistema via seca foi realizada no canteiro de obras no emboque sul do túnel 1, onde próximo a estocagem dos materiais de composição do concreto, foi instalado o misturador e a máquina de projeção que envia o material de mistura seca até o bico de projeção dentro do túnel, através de ar comprimido, e neste ponto adiciona-se a água e para o sistema via úmida o concreto era usinado na concreteira Redimix do Brasil, localizado a aproximadamente 6 Km de distância do túnel e transportado até o emboque norte do túnel 1, onde era bombeado, com tempo de transporte aproximado de 15 minutos (com alguma variação devido ao transporte se realizado pelo trecho da própria ferrovia ou pelas vias da cidade). A forma de ataque do túnel era com abertura de comprimento: de 1,60 m, duas cambotas por dia para o sistema via seca e de 2,40 m, três cambotas por dia para o sistema via úmida, deixando uma “alma” (recuo de solo - veja Figura 1.3) para evitar escorregamentos no avanço e possibilitar melhor a execução dos trabalhos; foi executado a abertura primeiramente do primeiro plano de trabalho com altura de 5,65 m e após término de toda escavação do túnel foi executado a escavação do “invert” de 3,35 m abaixo do plano de trabalho inicial. O número de testemunhos extraídos dos túneis ficou condicionado às inúmeras dificuldades encontradas e condicionantes da obra, tais como: a de proibição, por parte da construtora, de interrupção da produção da obra para podermos realizar a extração, a impossibilidade temporária de retirada da extratora da base pela não autorização também por parte da construtora, a resistência da empresa executora em colaborar para a realização das extrações no início das obras e etc, sendo assim somente quatro corpos-de-prova foram extraídos para cada sistema de projeção, gerando poucos resultados dos ensaios realizados no túnel, outra condicionante foi que as obras dos túneis sofreram paralisações pela empresa executora da obra impedindo a continuidade de retirada de mais corpos-de-prova no túnel. As determinações para o estudo da reflexão também foram

influenciados diretamente pelas dificuldades (anteriormente citadas) encontradas na obra, onde foi possível somente a determinação de uma medição para cada sistema de projeção.

3.3.4.2 Ensaios Associados à Durabilidade

A durabilidade do concreto depende da facilidade com que os fluidos, sejam líquidos ou gasosos, ingressam no material e se deslocam no seu interior, dependendo do volume e tamanho de poros, bem como de sua continuidade, ou seja, de sua interligação.

Fenômenos como carbonatação, penetração de cloretos, lixiviação e conseqüente corrosão de armaduras, dentre outros mecanismos deletérios, estão atrelados à permeabilidade do concreto, ou seja, dependem da porosidade e do arranjo e interligação do sistema de poros.

A caracterização no estado endurecido do potencial de durabilidade do concreto envolveu a determinação da absorção de água por capilaridade, absorção de água por imersão, penetrabilidade de água sob pressão, resistividade elétrica superficial e penetrabilidade de íons cloreto, conforme descrição mais detalhada a seguir.

a) Absorção de água por capilaridade

Os ensaios de absorção de água por capilaridade, conforme a NBR 9779:1995 (ABNT, 1995), foram realizados utilizando-se três corpos-de-prova (75 mm de diâmetro por 150 mm de altura) por placa, correspondentes a nove corpos-de-prova por proporcionamento e/ou tipo de sistema de projeção.

O ensaio, de acordo com a NBR 9779:1995 (ABNT, 1995), consiste em submeter uma das faces planas dos corpos-de-prova ao contato com uma lâmina de água de espessura permanente igual a (5 ± 1) mm, por 72 horas, e verificar o acréscimo de massa, de acordo com a Figura 3.13.



Figura 3.13 – Realização do ensaio de absorção por capilaridade – detalhe do anel metálico como regulador da altura do nível da água nos corpos-de-prova - Furnas Centrais Elétricas S.A.

Após o ensaio, os corpos-de-prova eram rompidos diametralmente para que a conformação e a altura de penetração pudessem ser observadas, como demonstram as Figuras 3.14 e 3.15.



Figura 3.14 – Rompimento dos corpos-de-prova para medição do nível de penetração nos ensaios de absorção capilar

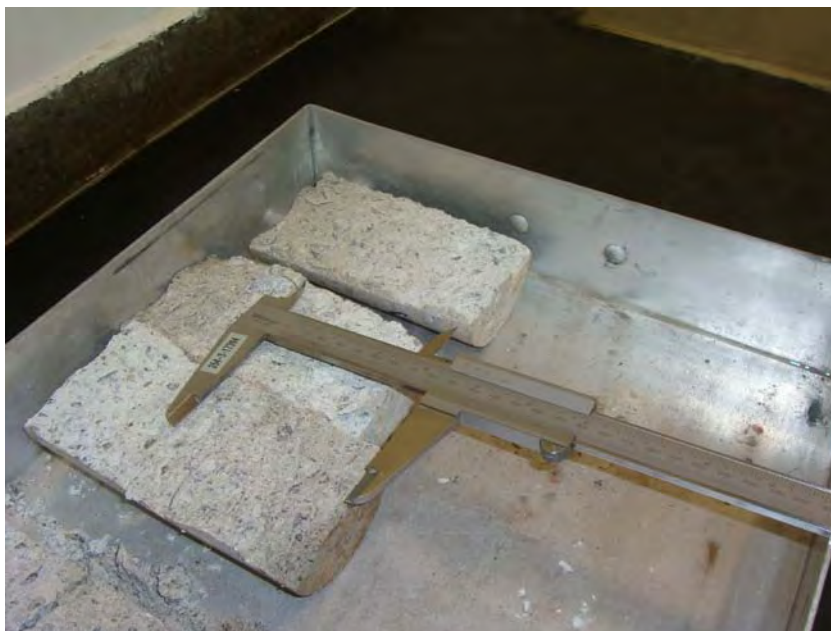


Figura 3.15 – Medição com paquímetro da altura de penetração da umidade no corpo-de-prova, por absorção capilar

O concreto apresenta maior potencial de durabilidade quanto menor for a absorção, pois, na prática, quando em contato com água, estará menos suscetível ao ataque de agentes agressivos nela contidos (GASPARIM, 2007).

Segundo Prudêncio (1993), os ensaios de absorção são inadequados para estimar a durabilidade do concreto projetado, no tocante à penetração de cloretos e sulfatos, uma vez que a migração ou difusão desses elementos ocorrem no meio fluido, independentemente da capacidade de sucção. Por isso, este programa experimental realizou também o ensaio de penetração de cloretos.

b) Absorção de água por imersão

Os ensaios de absorção após imersão e fervura, índice de vazios e massa específica real foram realizados de acordo com a NBR 9778:1995 (ABNT, 1995), empregando-se três corpos-de-prova por placa, correspondentes a nove corpos-de-prova por proporcionamento e/ou tipo de sistema de projeção. O ensaio consiste em secar os corpos-de-prova em estufa e depois submetê-los à imersão parcial, imersão total, saturação, fervura por cinco horas (Figura 3.16) e determinação do teor de absorção, índice de vazios e massa específica real (Figura 3.17).



Figura 3.16 – Realização do ensaio de absorção por imersão – detalhe realização da fervura - Furnas Centrais Elétricas S.A.



Figura 3.17 – Determinação da massa imersa em água no ensaio de absorção por imersão, utilizando-se balança hidrostática.

A permeabilidade à água e a absorção de água de um concreto são características que refletem a sua qualidade. Um concreto será de mais baixa qualidade quando ele apresentar maiores índices de permeabilidade e absorção (CASCUDO, 1997). A Tabela 3.4 mostra dados do CEB 192 sobre absorção de água relacionando com a qualidade do concreto.

Tabela 3.4 – Critérios de avaliação de absorção de água do concreto de acordo com o *Comité Eurointernational du Béton* (CEB) 192 (CASCUDO, 1997).

Absorção (%)	Absorção do Concreto	Qualidade do Concreto
< 3,0	baixa	boa
3,0 a 5,0	média	média
> 5,0	alta	pobre

c) Penetração de água sob pressão

Os ensaios de penetração de água sob pressão, conforme a NBR 10787:1994 (ABNT, 1994), prescreve o uso de corpos-de-prova prismáticos, por isso foi feita uma adaptação para ensaios utilizando os testemunhos cilíndricos extraídos das placas e dos túneis (Figura 3.18). Os ensaios, então, foram realizados empregando-se três corpos-de-prova (75 mm de diâmetro por 75 mm de altura – uma vez o diâmetro) por placa, correspondentes a nove corpos-de-prova por proporcionamento e/ou tipo de sistema de projeção.



Figura 3.18 – Detalhe do disco de liga de aço, confeccionado para este programa experimental visando a adaptação às dimensões dos corpos-de-prova – ensaio de penetrabilidade de água sob pressão.

A relevância desse ensaio justifica-se em função de uma provável exposição das estruturas de concreto projetado de túneis ao contato com aquíferos sob pressão piezométrica (GASPARIM, 2007), o qual se assemelha à situação real dos túneis da Ferrovia Norte Sul, lote 01, em Anápolis-GO, onde foram extraídos os testemunhos e moldadas as placas objetos de estudo deste programa experimental.

O ensaio, segundo a NBR 10787:1994 (ABNT, 1994), consiste em submeter os corpos-de-prova ao contato de uma coluna de água sob pressão de ar comprimido por abertura inferior do equipamento para aplicação de pressão, conforme a Figura 3.19, e verificar a percolação, medindo-se, após a ruptura diametral dos corpos-de-prova, a altura do nível de água observando a profundidade de penetração da superfície saturada de cada um deles (Figuras 3.20, 3.21 e 3.22).



Figura 3.19 – Realização de ensaio de penetrabilidade de água sob pressão – detalhe do aparelho com pressão de 0,7 MPa – NBR 10787:1994 (ABNT, 1994).



Figura 3.20 – Rompimento diametral dos corpos-de-prova do ensaio de penetrabilidade de água sob pressão - Furnas Centrais Elétricas S.A.



Figura 3.21 – Detalhe do nível de penetração da água nos corpos-de-prova após rompimento no ensaio de penetrabilidade de água sob pressão.



Figura 3.22 – Medição, no corpo-de-prova, da altura de penetração da frente de umidade com paquímetro digital.

As pressões utilizadas no ensaio são de 0,1 MPa, nas primeiras 48 horas, 0,3 MPa nas 24 horas seguintes e 0,7 MPa nas últimas 24 horas, com tolerância máxima de 1%.

d) Resistividade elétrica superficial

Para avaliar a resistividade elétrica superficial do concreto empregou-se o método Wenner - ASTM G 57: 1995 (ASTM, 2006). Este método, também conhecido como método dos quatro eletrodos, consiste em medir a resistividade elétrica superficial do concreto a partir da aplicação direta de uma diferença de potencial elétrico, entre os eletrodos internos do aparelho, e a partir da corrente gerada entre os eletrodos externos. Mede-se a resistividade elétrica superficial do concreto, empregando-se a primeira lei de Ohm.

Neste programa experimental empregou-se o equipamento de modelo *Resistivity Meter* – RESI, marca Proceq S.A., dotado de quatro pólos (Figura 3.23), conforme TC-154 (RILEM, 2001), em três corpos-de-prova (75 mm de diâmetro por 150 mm de altura) por placa, correspondentes a nove corpos de prova por proporcionamento e/ou tipo de sistema de projeção. No ensaio, os pinos do equipamento, colocados em contato com a superfície do corpo-de-prova saturado (Figura 3.24), medem, diretamente, a resistividade do concreto em kohm.cm, que é indicada no mostrador digital do equipamento.



Figura 3.23 – Aparelho de medição da resistividade elétrica – modelo RESI, marca Proceq – detalhe da saturação em água das esponjas posicionadas nas extremidades dos eletrodos, previamente ao início das medições.



Figura 3.24 - Medição da resistividade elétrica superficial em corpo-de-prova de concreto projetado.

O concreto será tanto mais durável quanto maior for sua resistividade elétrica, pois a resistividade é inversamente proporcional à condutividade, esta responsável pela ação de eletrólitos no concreto, responsáveis pela formação de pilhas eletroquímicas e conseqüente corrosão de armaduras (GASPARIM, 2007), como ilustrado na Tabela 3.5.

A resistividade elétrica é um parâmetro que depende do teor de umidade, da permeabilidade e do grau de ionização do eletrólito do concreto. Há uma direta proporcionalidade entre a taxa de corrosão e a condutividade elétrica do concreto, sendo esta o inverso da resistividade. A resistividade é um dos fatores controladores da função eletroquímica (CASCUDO, 1997). As velocidades de corrosão máximas ocorrem em concretos com altos teores de umidade (os quais apresentam uma baixa resistividade), porém sem saturação dos poros (para não dificultar o acesso de oxigênio) (FELIU, S.; ANDRADE, C., 1988 *apud* CASCUDO, 1997)

Tabela 3.5 - Avaliação de resistividade elétrica superficial do concreto de acordo com o *Comité Eurointernational du Béton (CEB) 192 (CASCUDO, 1997)*.

Resistividade elétrica do concreto (k Ω .cm)	Indicação de probabilidade de corrosão
>20	Desprezível
10 a 20	Baixa
5 a 10	Alta
<5	Muito alta

e) Penetrabilidade de íons cloreto

O concreto como material poroso, em contato com águas de ambientes marinhos, ou mesmo de aquíferos subterrâneos – como é o caso de túneis, está sujeito à penetração de cloretos nela contidos. Os cloretos, no interior do concreto, migram e se concentram em regiões anódicas formando pilhas eletroquímicas, que geram potencial de corrosão das armaduras. Esse tipo de corrosão suscita um movimento de elétrons ao longo de trechos da armadura e um movimento iônico através do eletrólito, permitindo a despassivação da armadura e a continuação do processo corrosivo. Logo, a durabilidade de uma estrutura de concreto armado depende da baixa penetrabilidade e migração de íons cloreto no concreto (CASCUDO, 1997; GASPARIM, 2007).

Depois de cortados, os corpos-de-prova passaram por um processo de preparação para o ensaio que se iniciou por selar a superfície lateral com liga asfáltica. Os ensaios foram realizados utilizando-se três corpos-de-prova (75 mm de diâmetro por 50 mm de altura) por placa e por extração dos túneis (três no sistema via seca e três no sistema via úmida). Os corpos-de-prova foram capeados lateralmente por liga asfáltica, dentro de um tubo de PVC de diâmetro de 100 mm com 50 mm de altura, para adaptarem às semi-células de acrílico que são de 100 mm de diâmetro, haja vista que o diâmetro dos corpos-de-prova era igual a 75 mm (Figura 3.25). O asfalto é impermeável à solução de íons cloreto na realização dos ensaios. Após o tempo de secagem da liga asfáltica, procedeu-se a saturação a vácuo por quatro horas, sendo que depois de decorridas três horas, ela foi submersa em água desaerada, permanecendo nessa condição por 19 horas; só então a amostra foi colada às semi-células por meio de borracha de silicone (Figura 3.27). O processo de saturação a vácuo está ilustrado na Figura 3.26.

A migração de íons cloreto pode ser acelerada pela passagem de uma corrente elétrica, portanto, pode-se realizar ensaio acelerado de migração de íons cloreto, mediante esse princípio. Assim o ensaio, segundo a norma ASTM C 1202 (ASTM, 2009), consiste em instalar cada corpo-de-prova entre duas semi-células de acrílico, uma com solução de NaCl a 3% e outra com solução de NaOH 0,3 N (ambas soluções à base de água deionizada e desaerada). Após instalado o corpo-de-prova, faz-se passar entre as células uma diferença de potencial de 60 V (corrente contínua) para acelerar a migração de íons (Figura 3.28).

A corrente passante é medida em intervalos regulares de tempo correspondentes a 30 minutos, durante seis horas ininterruptas (Figura 3.29). O somatório do produto da corrente pelo tempo é a carga total que atravessa o corpo-de-prova (em Coulomb), que é proporcional à penetrabilidade dos íons.



Figura 3.25 – Capeamento lateral dos corpos-de-prova de 75 mm com liga asfáltica, dentro do tubo de PVC de 100 mm.



Figura 3.26 – Processo de saturação a vácuo das amostras para o ensaio de penetrabilidade de íons cloreto.



Figura 3.27 – Amostra colada e vedada com silicone transparente nas semi-células em acrílico.



Figura 3.28 – Disposição esquemática do ensaio de penetrabilidade de íons cloreto.



Figura 3.29 – Leitura das medições das correntes no ensaio de penetrabilidade de íons cloreto.

A norma ASTM C 1202 (ASTM, 2009) traz uma correlação do risco de penetrabilidade de íons cloreto no concreto com a carga elétrica passante. O resultado da carga total passante, em Coulomb, representa dessa forma a maior ou menor resistência do concreto à penetração dos íons cloreto, como disposto na Tabela 3.6.

Tabela 3.6 – Correspondência entre o risco de penetrabilidade de íons cloreto no concreto e a carga elétrica passante, conforme a ASTM C 1202:1992 (ASTM, 2009).

CARGA PASSANTE (Coulomb)	PENETRABILIDADE DE CLORETOS
>4.0000	Alta
2.000 a 4.000	Moderada
1.000 a 2.000	Baixa
100 a 1.000	Muito Baixa
< 100	Desprezível

Os ensaios foram realizados em ambiente climatizado com temperatura de $(23\pm 2)^{\circ}\text{C}$ e umidade relativa de $(55\pm 5)\%$. Para a leitura dos valores de corrente em função do tempo, utilizou-se um multímetro com resolução ao nível de miliampére.

3.3.4.3 Outros ensaios e estudos complementares

a) Resistência à compressão

Com respeito à importância da determinação da resistência à compressão para a durabilidade, Isaia (1995) apud Ferreira (2003) afirma que o comportamento da resistência mecânica está relacionado à porosidade da pasta ou à interface do agregado, para um determinado grau de hidratação, na idade considerada. Como esses fatores são os mesmos que governam a durabilidade, que depende dos mecanismos de transporte de soluções, agressivas ou não, pelos poros intersticiais, depreende-se que essas duas propriedades são interligadas e interdependentes, cuja importância relativa, de uma ou outra, dependerá das condições de projeto e do meio ambiente.

Os ensaios de resistência à compressão (veja Figuras 3.30 e 3.31) dos corpos de prova obtidos por extração das placas e no túnel são caracterizados no estado endurecido, para os ensaios dos corpos-de-prova obtidos da extração das placas foram realizados em 3, 7 e 28

dias, conforme a NBR 5739:1994 (ABNT, 1994) e para os testemunhos extraídos dos túneis foram realizados somente aos 28 dias.



Figura 3.30 – Realização de ensaio de compressão axial aos 28 dias dos corpos-de-prova das placas e extraídos dos túneis.



Figura 3.31 - Realização de ensaio de compressão axial aos 28 dias dos corpos-de-prova das placas e extraídos dos túneis.

b) Reconstituição de traço

A reconstituição dos traços das amostras extraídas da estrutura dos túneis foi realizado segundo o método normalizado pela NBR 13044:1993 (Concreto projetado – Reconstituição da mistura recém-projetada) (ABNT, 1993). No caso do traço de entrada utilizou-se o valor do traço resultante da dosagem. O cálculo consiste em um método químico e matemático, que leva em consideração à pasta de cimento no traço do concreto projetado, a proporção de agregados em relação a pasta de cimento e a quantidade de água consumida (onde, a relação água/cimento se mantém constante no traço). O ensaio de reconstituição de traço foi realizado no Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A. – IPT, no laboratório de Materiais de Construção Civil - Área de Química /CT – Obras. Os resultados obtidos do cálculo do traço, foram: a porcentagem do cimento, a porcentagem do agregado, o traço em massa (cimento : agregado) e o consumo de cimento em kg/m^3 . Os resultados da reconstituição do traço foram obtidos a partir do resíduo insolúvel (RI), do anidrido silícico (SiO_2) e do óxido de cálcio (CaO). Os métodos utilizados para a realização dos ensaios pertinentes à determinação da reconstituição de traço, tais como: umidade, perda ao fogo, resíduo insolúvel, anidrido silícico (SiO_2), óxidos de ferro e alumínio (R_2O_3), óxido de cálcio (CaO), óxido de magnésio (MgO) e anidrido sulfúrico (SO_3) foram pautados pelo Procedimento do IPT: CT-OBRAS-LMCC-Q-PE-042 (Concreto e Argamassa – Reconstituição de traço), com base em diretrizes gerais do método de ensaio apresentado por Quarcioni (1998) e pelo IPT (1940). O método de reconstituição de traço utilizando o anidrido carbônico (CO_2) utilizou o Procedimento IPT: CT-OBRAS-LMCC-Q-PE-011 (Determinação de anidrido carbônico (CO_2) por gasometria), com base em diretrizes gerais da NBR NM 20:2009 (ABNT, 2009). A partir dos traços incorporados (finais), obtidos por reconstituição, pôde-se calcular o índice de reflexão (FIGUEIREDO, 1997).

c) Estudo da reflexão durante a projeção

Ao longo da execução do concreto projetado nos túneis da Ferrovia Norte-Sul, trecho 1, em Anápolis-GO, realizou-se um o estudo da reflexão durante a projeção, em conjunto com a empresa Queiroz Galvão Engenharia S.A., onde a determinação da reflexão obedeceu ao recomendado na norma NBR 13317:1995 (Concreto projetado – Determinação do índice de reflexão por determinação direta) (ABNT, 1995). O índice de reflexão foi determinado pela medição da massa de concreto que refletiu (utilizando lona previamente estendida ao longo de todo o túnel no local da projeção, durante um ciclo de projeção) em relação à massa do

concreto projetado (massa total dos caminhões-betoneira, se por via úmida, ou a massa do material utilizado, se por via seca) na unidade de tempo, para um ciclo total, ou seja, para toda a projeção de uma área pré-estabelecida (por exemplo: uma ou duas cambotas). O material utilizado nas medições foi: uma lona de caminhão limpa, uma balança de plataforma com capacidade de 100 kg e resolução de 100 g, uma padiola de 50 l, uma pá e um cronômetro.

A reflexão é constituída majoritariamente pelos agregados. Com isso, constata-se normalmente uma alteração do traço do concreto projetado, que se torna em geral mais rico em aglomerantes do que o da mistura inicial, num comportamento inverso ao da composição resultante do material refletido. (FIGUEIREDO, 1997).

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÃO

No presente capítulo estão apresentados e discutidos os resultados obtidos no programa experimental; estes resultados estão ordenados e agrupados de forma a facilitar a sua leitura e compreensão. Inicialmente, apresenta-se uma avaliação dos concretos obtidos pelos dois sistemas de projeção por meio de análises de reconstituição de traço, observando os efeitos da reflexão (rebote) sobre os concretos estudados e os resultados de resistência à compressão; em seguida, estão contemplados os resultados associados à durabilidade do concreto, a saber: absorção por capilaridade, absorção por imersão, penetração de água sob pressão, resistividade elétrica e penetração de íons cloreto. Ao final, são apresentados alguns parâmetros associados à durabilidade e uma avaliação e discussão final dos resultados obtidos.

4.1 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

4.1.1 Estudo de reflexão e reconstituição de traço

4.1.1.1 Estudo de Reflexão

Os resultados das determinações em campo do índice de reflexão por medição direta foram obtidos para um volume de um ciclo total de projeção dos túneis, ciclo este estabelecido pelas características executivas da obra, determinado em campo pela extensão completa de 2 cambotas (1,60 m de avanço de escavação de túnel) e considerando uma camada de concreto suficiente para cobrir totalmente a espessura indicada de 15 cm (com a ferragem de cambota e tela já instalada) da primeira camada do túnel.

Conforme a NBR 13317:1995 (ABNT, 2005), no seu item 4.3.1, a determinação da massa de concreto a ser projetada, pelo processo via úmida (dosado em massa), é obtida da seguinte forma: $MC = (1 + m + a/c) \times V \times C$, onde MC é a massa de concreto a ser projetada; “m” é a proporção em massa de agregados miúdo e graúdo (massa total de agregados) no

traço do concreto ($m = a+b$); “a/c” é a relação água/cimento; V o volume de concreto a ser projetado e C o consumo de cimento por m^3 de concreto. Então, $MC = (1 + 4,59 + 0,45) \times 8 \times 400 = 19\,328$ kg/ciclo. A quantidade de concreto usinado para cada ciclo é de dois caminhões betoneira, perfazendo assim $8\,m^3$ de consumo; dessa maneira, considerando a massa específica do concreto igual a $2400\,kg/m^3$, a massa de concreto a ser projetada é de $19\,200$ kg. Por ocasião da medição da reflexão, a massa refletida do concreto projetado (MR) foi igual a 4845 kg. Assim sendo, o índice de reflexão (IR) por medição direta obtido pela NBR 13317:1995 foi de 25,06% ($MR/MC \times 100$), ao passo que o mesmo índice obtido pela massa específica do concreto resultou igual a 25,23%. Portanto, o resultado do índice de reflexão para o sistema via úmida é da ordem de **25%**.

O traço para $1\,m^3$ de concreto projetado via seca é de: 450 kg de cimento, 828 kg de areia artificial (dimensão máxima característica igual a 4,8 mm), 895 kg de pedra britada de 12,5 mm de dimensão máxima característica (“brita 0”), 202 litros de água e $22,5\,l/m^3$ de aditivo acelerador (*Centrament 640 rápido*). Conforme a NBR 13317:1995 (ABNT, 2005), no seu item 4.3.2, a determinação da massa de concreto a ser projetada, pelo processo via seca (dosado em massa), é obtida da seguinte forma: $MC = (1 + h/100) \times (1+m) \times V \times C$, onde “h” é a relação água/materiais secos da mistura projetada e os demais parâmetros são os mesmos definidos no parágrafo anterior. Então, $MC = (1 + 0,092/100) \times (1 + 3,83) \times 8 \times 450 = 17\,404$ kg/ciclo. A massa do concreto projetado refletida (MR), obtida por medição, foi igual a 2615 kg. Dessa forma, o índice de reflexão (IR) por medição direta obtido pela NBR 13317:1995 resultou igual a 15,02% ($MR/MC \times 100$). Assim, o resultado do índice de reflexão para o sistema via seca foi da ordem de **15%**.

Complementando a análise anteriormente realizada, além dos resultados descritos, foram obtidos os dados da empresa executora da obra Queiroz Galvão Engenharia S.A., onde os resultados de reflexão observados são que: os índices de reflexão (efeito rebote) permaneceram para o sistema via úmida de 15% a 30% e para o sistema via seca de 10% a 15%, não sendo observado variação considerável fora destes valores medidos. A medição da reflexão produziu índices da ordem de 25% para o sistema via úmida e de 15% para o sistema via seca. Considera-se que a regularidade dos valores encontrados nos índices de reflexão permite que as análises dos resultados possam ser feitas com referência ao consumo teórico de cimento.

A causa mais provável para o índice de reflexão do sistema via úmida ter resultado maior que o sistema via seca é que, pela alta presença de umidade no substrato de projeção do túnel, isto propiciou ao concreto via úmida uma menor aderência ao substrato, já que ele

possuía relação água-cimento pré-definida e ajustada para um sistema de projeção via úmida, com substrato seco. Em função disso, ocorreu para o sistema via úmida um maior deslocamento, decorrente de uma provável incorporação de água ao concreto plástico pós-projeção, acarretando também uma ação de carreamento (“lavagem”) do cimento no concreto, o que contribuiu também para a diminuição do potencial de aderência do concreto. A água livre no substrato associada ao fenômeno de carreamento do cimento no concreto do sistema via úmida propiciou uma elevada fuga de material fluído do concreto (“escorrimientos”), constituído de água rica em partículas de cimento e pequenos agregados (principalmente agregado miúdo) – água com volume de pasta em suspensão, que, com a presença de corpos hídricos próximos aos emboques do Túnel 1, foi necessária a construção de tanques de decantação em série (Veja Figura B3, no Anexo B) visando a retenção desse material que escorria, em função da ocorrência de risco de contaminação das águas presentes nos pequenos riachos que alimentam o Córrego das Antas, principal corpo hídrico que alimenta o sistema de abastecimento de água da população de Anápolis-GO. O sistema via seca, por sua vez, possui o fornecimento da água regulável pelo mangoteiro, no ato da projeção. Assim sendo, com a presença da alta umidade da base, o mangoteiro tende a fechar mais o registro de água, de modo a ajustar as características reológicas do concreto objetivando sua menor reflexão. O resultado disso foi a aderência do concreto via seca (ao substrato) ter sido significativamente maior do que aquela verificada para o sistema via úmida, haja vista que mesmo com a provável presença de água livre incorporada ao material projetado (como se acredita ter ocorrido também com o concreto via úmida), como o sistema via seca possui um menor teor de umidade controlado pelo mangoteiro, obtém-se assim uma quantidade de água na mistura muito mais adequada para se obter uma melhor aderência do concreto ao substrato (solo do terreno) e para que a pega inicial do concreto se desenvolva como planejada nas etapas prévias da concepção do concreto, tudo isso contribuindo para se obter um índice de reflexão mais baixo.

4.1.1.2 Reconstituição de traço

A determinação da proporção dos materiais componentes do concreto projetado incorporado na estrutura dos túneis foi obtida por meio dos ensaios realizados no IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas, que permitiram a reconstituição da mistura projetada. Os resultados obtidos nos ensaios de reconstituição de traço estão apresentados nas Tabelas 4.1 e 4.2. A amostra 01 corresponde ao testemunho extraído do túnel de sistema via úmida e a amostra 02 corresponde ao testemunho extraído do túnel de sistema via seca. O relatório de ensaio completo do IPT, de reconstituição de traço, consta no anexo A.

Tabela 4.1 – Resultados de análise química de reconstituição de traço dos testemunhos extraídos dos túneis.

Determinações	Resultados, em %			
	Concreto projetado		Concreto projetado	
	(Amostra 01)		(Amostra 02)	
	Base original	Base não volátil	Base original	Base não volátil
Umidade	2,82	-	2,57	-
Perda ao fogo	6,23	-	6,47	-
Resíduo insolúvel	73,3	80,6	73,7	81,0
Anidrido silícico (SiO ₂)	3,29	3,62	3,22	3,54
Óxidos de ferro e alumínio (R ₂ O ₃)	1,76	1,94	1,49	1,64
Óxido de cálcio (CaO)	11,3	12,4	12,0	13,2
Óxido de magnésio (MgO)	0,19	0,21	0,19	0,21
Anidrido sulfúrico (SO ₃)	0,95	1,04	0,59	0,65
Anidrido carbônico (CO ₃)	2,29	-	2,35	-

Tabela 4.2 – Resultados de reconstituição de traço e consumo de cimento dos testemunhos extraídos dos túneis.

Parâmetros calculados (em massa)		Concreto projetado Via úmida (Amostra 01)	Concreto projetado Via seca (Amostra 02)
Cálculo do traço a partir do resíduo insolúvel (RI)	Cimento (%)	19,4	19,0
	Agregado (%)	80,6	81,0
	Traço (cimento : agregado)	1 : 4,2	1 : 4,3
	Consumo de cimento (kg/m ³)	407	400
Cálculo do traço a partir do anidrido silícico (SiO ₂)	Cimento (%)	20,8	20,4
	Agregado (%)	80,6	81,0
	Traço (cimento : agregado)	1 : 3,9	1 : 4,0
	Consumo de cimento (kg/m ³)	426	419
Cálculo do traço a partir do óxido de cálcio (CaO)	Cimento (%)	19,8	21,0
	Agregado (%)	80,6	81,0
	Traço (cimento : agregado)	1 : 4,1	1 : 3,9
	Consumo de cimento (kg/m ³)	413	428
Valores médios	Cimento (%)	20,0	20,1
	Agregado (%)	80,6	81,0
	Traço (cimento : agregado)	1 : 4,0	1 : 4,0
	Consumo de cimento (kg/m³)	416	416

A tabela 4.3 apresenta os constituintes químicos do cimento considerado nos cálculos dos traços dos concretos ensaiados.

Tabela 4.3 – Análise química do cimento de referência.

Cimento	Base original (%)					Base anidra (%)			
	PF	SiO ₂ -RI	CaO	MgO	SO ₃	SiO ₂	CaO	MgO	SO ₃
CP II-F	5,27	16,5	59,4	5,96	3,17	17,4	62,7	6,29	3,35

Conforme os resultados de reconstituição de traço obtidos do IPT (constantes na íntegra no Anexo A), o valor médio do traço foi calculado a partir de três parâmetros, a saber: resíduo insolúvel, anidrido silícico e óxido de cálcio. Esse valor médio deve ser tomado como valor característico do concreto ensaiado, desde que haja concordância entre os valores individuais calculados; eventualmente, na falta de concordância dos valores, eles podem ser interpretados como valores limites. Quarcione (1998) ressalta que o valor médio obtido de uma boa convergência entre esses três valores é um índice bastante seguro e com boas garantias de que o concreto não contém materiais que interferem negativamente na reconstituição de traço, sendo, portanto, o traço reconstituído merecedor de confiança.

Sendo assim, o traço considerado para as duas amostras extraídas dos túneis da Ferrovia Norte-Sul, lote 01, nos sistemas via úmida e via seca, é o mesmo: 1:4,0 (cimento:agregado). O consumo médio de cimento é de 416 kg/m^3 , tendo uma proporção média de 20 % de cimento e 80 % de agregados.

Os resultados obtidos nos ensaios de reconstituição de traço propiciaram a seguinte consideração: para o sistema de projeção via seca observa-se um decréscimo no traço, onde o traço de partida de valor 1:3,83 para 1:4,00 de traço reconstituído, proporcionando ao traço ficar mais “pobre” no consumo de cimento. Para o sistema de projeção via úmida observa-se um acréscimo no traço, onde o traço de partida de valor 1:4,59 para 1:4,00 de traço reconstituído, indicando que o traço ficou mais “rico” no consumo de cimento.

Ressalta-se também que nos ensaios de reconstituição de traço, não foi possível resgatar o parâmetro “relação a/c”, que certamente foi mais alto para o sistema via úmida, em função da alta umidade da base de projeção (como comentado inicialmente), considerado um parâmetro indesejável para o sistema via úmida. A possibilidade de resgatar o parâmetro “relação a/c” final ou real da estrutura é muito importante para o estudo de durabilidade do concreto projetado, sendo muito necessário para a comparação das relações a/c de partida e do concreto projetado na estrutura dos túneis.

4.1.2 Resistência à compressão

O resultado apresentado para os dois ensaios de resistência à compressão dos corpos-de-prova (fc_{n-1} e fc_{n-2}) obtidos por extração das placas e no túnel foi definido como o resultado de maior valor por série (fc_{n-R}), onde n é a data de realização do ensaio (3, 7 ou 28 dias); neste caso, desprezou-se sempre o menor valor, conforme o princípio da resistência potencial de acordo com a NBR 12655:1996, no seu item 7.2.2. As Tabelas 4.4 a 4.7 apresentam os resultados de resistência à compressão.

Tabela 4.4 – Resultados gerais de resistência à compressão aos 3, 7 e 28 dias de todas as placas

Sistema de Projeção	Placa	03 dias			07 dias			28 dias		
		fc_{3-1}	fc_{3-2}	fc_{3-R}	fc_{7-1}	fc_{7-2}	fc_{7-R}	fc_{28-1}	fc_{28-2}	fc_{28-R}
Via úmida	1	18,6	22,0	22,0	26,7	24,6	26,7	29,0	29,5	29,5
Via seca	2	13,6	17,3	17,3	27,7	30,8	30,8	___*	___*	___*
Via úmida	3	21,1	24,1	24,1	29,5	24,7	29,5	29,6	31,6	31,6
Via seca	4	15,8	16,2	16,2	20,5	20,9	20,9	27,0	26,9	27,0
Via úmida	6	19,2	17,2	19,2	23,0	22,4	23,0	25,1	25,7	25,7
Via seca	5	14,4	13,6	14,4	21,3	19,2	21,3	28,9	27,3	28,9

* Resultado comprometido em função da extração dos testemunhos.

Tabela 4.5 – Resultados de resistência à compressão aos 3, 7 e 28 dias das placas do sistema via úmida.

Placa	Via Úmida - 03 dias			Via Úmida - 07 dias			Via Úmida - 28 dias		
	fc_{3-1}	fc_{3-2}	fc_{3-R}	fc_{7-1}	fc_{7-2}	fc_{7-R}	fc_{28-1}	fc_{28-2}	fc_{28-R}
1	18,6	22,0	22,0	26,7	24,6	26,7	29,0	29,5	29,5
3	21,1	24,1	24,1	29,5	24,7	29,5	29,6	31,6	31,6
6	19,2	17,2	19,2	23,0	22,4	23,0	25,1	25,7	25,7

Tabela 4.6 – Resultados de resistência à compressão aos 3, 7 e 28 dias das placas do sistema via seca

Placa	Via Seca - 03 dias			Via Seca - 07 dias			Via Seca - 28 dias		
	fc_{3-1}	fc_{3-2}	fc_{3-R}	fc_{7-1}	fc_{7-2}	fc_{7-R}	fc_{28-1}	fc_{28-2}	fc_{28-R}
2	13,6	17,3	17,3	27,7	30,8	30,8	—*	—*	—*
4	15,8	16,2	16,2	20,5	20,9	20,9	27,0	26,9	27,0
5	14,4	13,6	14,4	21,3	19,2	21,3	28,9	27,3	28,9

* Resultado comprometido em função da extração dos testemunhos.

Tabela 4.7 – Resultados de resistência à compressão aos 28 dias dos testemunhos extraídos dos túneis.

Sistema de Projeção	28 dias				
	Túnel	CPs	fc_{28-1}	fc_{28-2}	fc_{28-R}
Via úmida	1	2	12,9	14,6	14,6
Via seca	1	2	17,6	22,5	22,5

Graficamente, os resultados das Tabelas 4.4 a 4.6 podem ser expressos conforme a Figura 4.1.

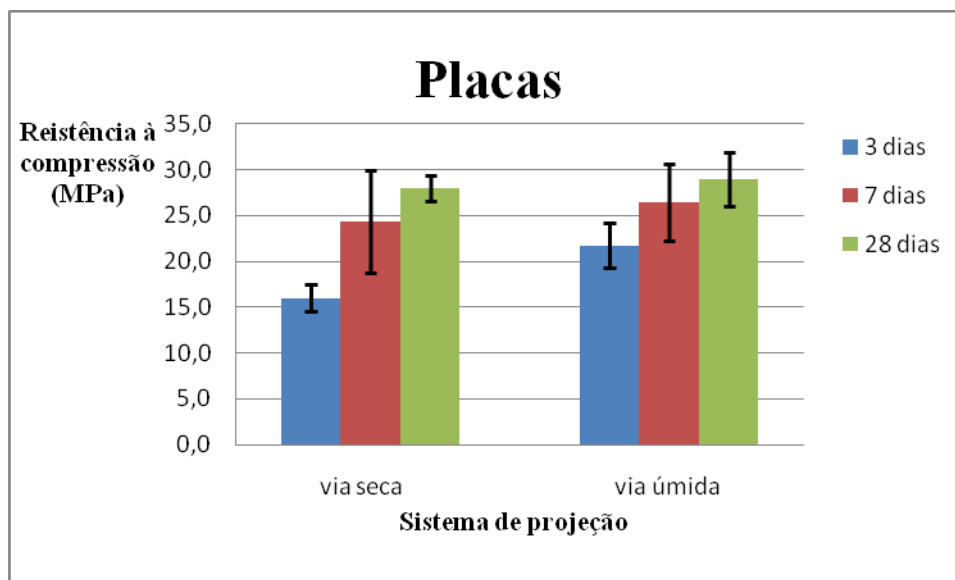


Figura 4.1 – Resultados médios (com desvio-padrão) de resistência à compressão dos corpos-de-prova extraídos das placas por sistema de projeção.

A Figura 4.1 apresenta os resultados de resistência à compressão comparando os sistemas via seca e via úmida aos 3, 7 e 28 dias e a Figura 4.2 demonstra a resistência à compressão comparando os sistemas via seca e via úmida, aos 28 dias.

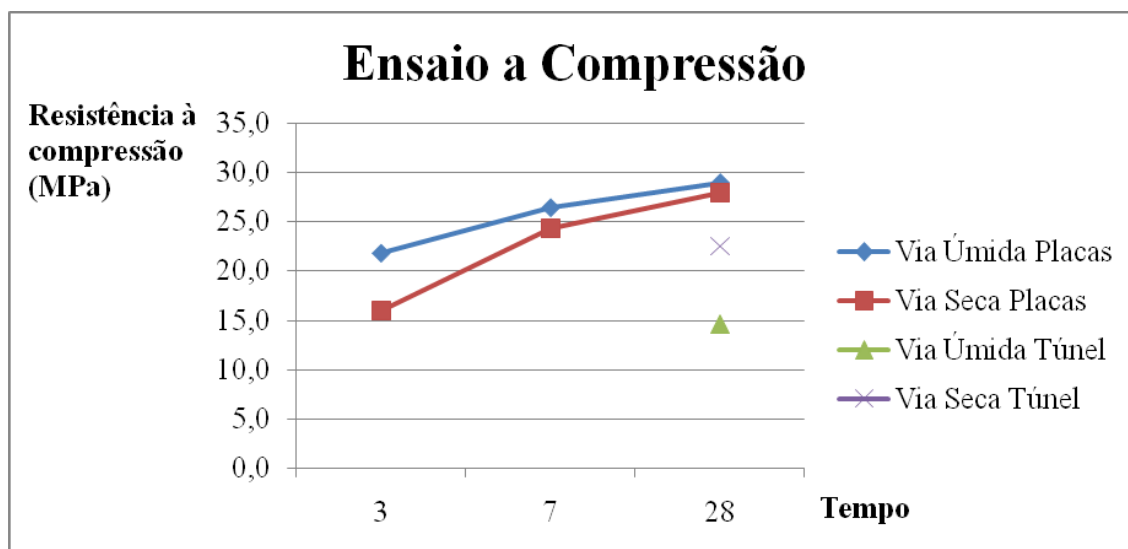


Figura 4.2 – Resistência à compressão comparando os sistemas via seca e via úmida para os concretos projetados nas placas e extraídos dos túneis.

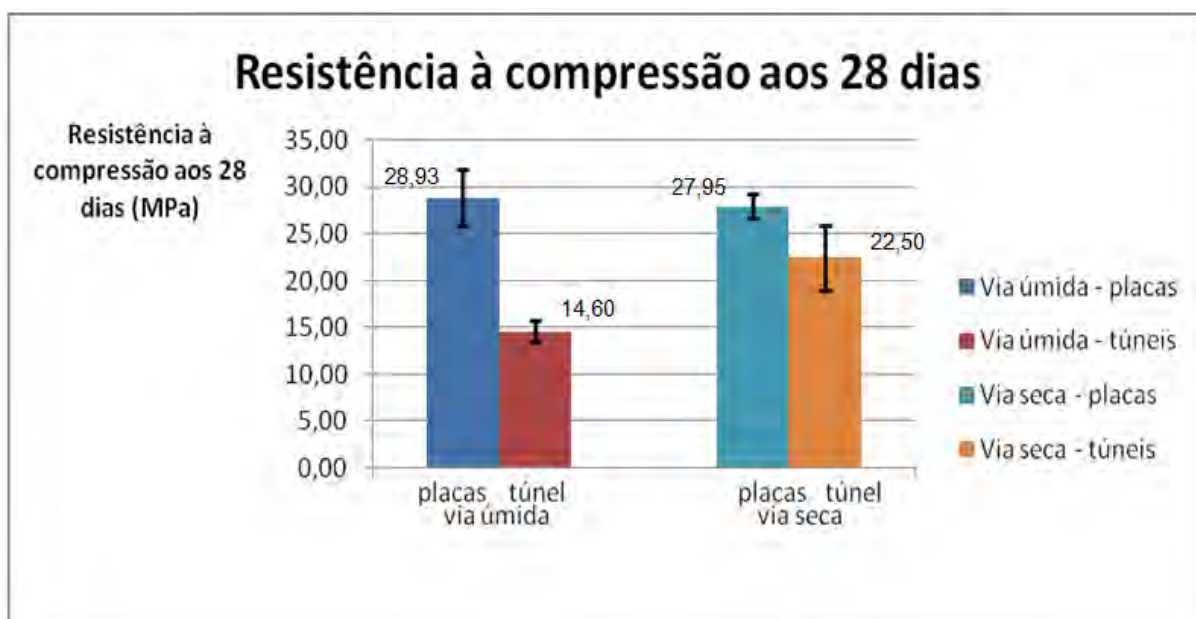


Figura 4.3 – Resistência à compressão (valores médios com os seus desvios-padrão) comparando os sistemas via seca e via úmida para os concretos projetados nas placas e extraídos dos túneis, aos 28 dias.

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão axial aos 28 dias apresentaram diferenças acentuadas dos corpos-de-prova extraídos do túnel e extraídos das placas para um mesmo sistema de projeção. O sistema via úmida para placas mostrou resultado bem melhor que o sistema via úmida para túneis, ou seja, para as placas a projeção significou como traço de saída sem considerar as perdas de material por reflexão (efeito rebote) um resultado acima da resistência a compressão exigida em projeto de 20 MPa, em torno de 50% acima; no resultado dos túneis, houve perda de resistência à compressão em comparação à resistência característica de projeto (em torno de 25%) e em comparação à média das resistências das placas cerca de 50% abaixo. A diferença de resistência comparativamente nas amostras no sistema via úmida dos corpos-de-prova obtidos entre placas e túneis mostra claramente o efeito da reflexão no material projetado no que tange à resistência à compressão, já que houve uma grande diferenciação de resultados em relação às placas. A reflexão ocasiona a perda de materiais constituintes do concreto e pode produzir alterações significativas no traço de partida, que no sistema via úmida com a presença de alta umidade na mistura, notadamente pelo acréscimo de umidade oriunda da base de projeção (solo com infiltrações do lençol freático), ocasionaram a perda de desempenho na propriedade avaliada.

O índice de reflexão por medição direta foi de 25% e a reconstituição de traço obteve proporcionamento de 1 : 4,0 (cimento : agregados) no sistema via úmida para as amostras extraídas dos túneis, comparando-se com o traço de partida 1 : 4,59 (cimento : agregados), havendo, portanto, perda de agregados. Comparando-se o consumo médio de cimento do sistema via úmida obtido na reconstituição de traço de 416 kg/m^3 e o consumo de cimento de partida do sistema via úmida de 400 kg/m^3 , houve o enriquecimento de consumo de cimento do traço reconstituído em relação ao traço de partida, assim sendo houve mudança qualitativa entre os traços de partida e o incorporado no túnel, que a princípio poderia ser benéfica ao comportamento da resistência mecânica do concreto projetado, mas que com a presença de alta umidade no substrato, tal comportamento foi severamente alterado, ou seja, a média da resistência do sistema via úmida no túnel cai em relação às placas muito provavelmente por causa da umidade elevada no substrato. A explicação que parece mais razoável é a da água livre da base do paramento se incorporar ao concreto recém-lançado, facilitada por uma elevada energia de impacto do material projetado, aumentando com isso a relação água/cimento e assim reduzindo a resistência mecânica. Estas considerações podem ser feitas em virtude de se ter utilizado a mesma mão-de-obra e equipamentos (mesma regulação), sendo fixa a consistência do concreto projetado e a relação água/materiais secos para o traço de saída.

Entretanto, outra explicação provável é que a adição do aditivo acelerador de pega ao concreto projetado é regulada pelo mangoteiro no bico de projeção tanto no sistema via úmida quanto para o sistema via seca, o que pode ocasionar um melhor desempenho do sistema via seca em relação ao via úmida, pois com a maior reflexão (perdas e deslocamentos) do sistema via úmida pela presença de água livre no substrato de projeção, o mangoteiro adiciona maior quantidade de aditivo acelerador de pega para um endurecimento mais rápido do concreto para tentar diminuir a reflexão, o que não acontece no sistema via seca. Conforme Prudêncio (2005) a utilização desse aditivo acelerador de pega não alcalinos líquidos em concretos projetados por via úmida em obra subterrânea realizada na cidade de São Paulo, em 2004, constataram-se quedas importantes (entre 20 e 30%) na resistência do concreto projetado, quando comparada com a obtida em corpos-de-prova extraídos de placas em que o acelerador não foi empregado.

O sistema via seca se comportou de forma diferente do sistema via úmida. Observa-se uma diferenciação de resultados menor entre a média dos resultados das placas e os extraídos dos túneis. O resultado do ensaio obtido do túnel no sistema via seca mostra que a resistência encontrada aproxima-se da resistência característica à compressão especificada em projeto (20 MPa), tendo, portanto, um ganho percentual aproximada em 10% em relação ao f_{ck} dos túneis e em relação ao sistema via úmida, tem uma perda percentual aproximada de 30% em relação ao f_{ck} dos túneis. A média dos resultados dos corpos-de-prova das placas resultou cerca de 40% acima em relação à resistência característica de projeto. A média dos resultados dos corpos-de-prova das placas resultou cerca de 50% acima em relação à resistência real do túnel no sistema via úmida e cerca de 20% acima em relação à resistência real do túnel no sistema via seca. A explicação mais provável do sistema via seca obter resultados mais próximos (placa e túnel) é porque como a água deste sistema é regulável pelo mangoteiro, havendo certa quantidade de água na base, o mangoteiro fecha mais o registro de água, não havendo, dessa forma, grandes prejuízos para o concreto projetado pela presença de água.

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão axial aos 3, 7 e 28 dias das placas apresentaram um crescimento linear das resistências, o que já era esperado. Há um acréscimo de resistência diretamente proporcional ao aumento da idade e, tendo em vista o efeito comparativo de correlação entre os dois sistemas, há um ganho maior de resistência à compressão no sistema via seca para as idades iniciais (entre os 3 e 7 dias), o que já não ocorre para o sistema via úmida. Isto provavelmente é oriundo do melhor desempenho do aditivo acelerador de pega empregado no sistema via seca, do que o empregado no sistema via úmida.

Certamente a causa mais provável do sistema via úmida apresentar baixos valores da resistência à compressão aos 28 dias em comparação ao sistema via seca no túnel é em função da água livre da base de projeção incorporar-se ao concreto projetado (explicado anteriormente), já que quando se comparam os dois sistemas nas placas, o via úmida sempre resulta em resistências superiores ao via seca, nas 3 idades avaliadas, demonstrando que, de partida, o concreto via úmida possui propriedades mecânicas superiores ao concreto via seca. Todavia, no que tange aos aspectos práticos e operacionais, há uma inversão clara de comportamento entre os dois tipos de concreto. No sistema via seca, os testemunhos extraídos dos túneis aos 28 dias produziram resultados de resistência significativamente superiores em comparação ao sistema via úmida, certamente porque como a água daquele sistema é regulável pelo mangoteiro, na presença de água no substrato de projeção, o mangoteiro regula a saída de água (fechando mais o registro no bico de projeção), não havendo, dessa forma, grandes prejuízos para o concreto projetado pela presença de água no substrato (que produz alta reflexão e alteração substancial das características microestruturais do concreto).

De modo geral, para os dois sistemas, os concretos extraídos dos túneis mostraram resultados inferiores aos resultados de resistência à compressão axial aos 28 dias obtidos das placas de controle da obra. As causas prováveis dessa diferenciação são a maior reflexão no túnel em relação às placas, assim como as alterações ambientais no substrato, como a presença de alta umidade (aspecto não evidenciado nas placas), que provavelmente produziram impacto na relação água/cimento e, conseqüentemente, nos resultados de resistência à compressão. Este último fato é menos significativo para o sistema via seca, pelas razões expostas anteriormente (controle da saída de água pelo mangoteiro), o que muito provavelmente justifica as diferenças nesse sistema não serem tão pronunciadas entre as resistências das placas e dos túneis.

Como comentário final deste item, cabe ratificar os melhores resultados dos testemunhos extraídos dos túneis para o sistema via seca (em relação ao sistema via úmida), sendo expressivamente mais vantajoso o seu uso para as peculiaridades da obra em questão, a despeito dos resultados de partida indicarem exatamente o contrário. Isto reforça a importância de se estudar previamente aspectos práticos e da operacionalidade da obra, visando a definição e especificação mais apropriada de determinado material, processo ou sistema executivo.

4.1.3 Ensaios associados à durabilidade

4.1.3.1 Absorção de água por capilaridade

Os resultados obtidos dos ensaios de absorção de água por capilaridade, realizados no período de 18 de setembro a 1 de outubro de 2009, foram compilados e expressos na forma de acréscimo de massa por área da superfície de contato do corpo-de-prova (g/cm^2) e altura de absorção atingida (cm). Os valores encontrados estão apresentados nas Tabelas 4.8 e 4.9. As Figuras 4.4 e 4.5 apresentam os resultados de absorção por capilaridade de altura de penetração e o índice de absorção, comparando os sistemas via seca e via úmida, para os concretos projetados nas placas e extraídos do túnel.

Tabela 4.8 – Resultado dos ensaios de absorção de água por capilaridade das placas.

Placa Nº	Nº CP	Massa (g)	Seco 72 h (g)	Após 3h (g)	(3h) 21/09 16:30 h (g)	(24h) 22/09 10:30 h (g)	(48h) 23/09 10:30 h (g)	(72h) 24/09 (g)	Absorção (g/cm^2)	H(cm)
01	5	1421,2	1311,0	1327,7	1333,7	1354,3	1365,9	1369,6	1,326	5,90
(VU)	13	1364,7	1256,7	1275,0	1281,9	1302,7	1313,7	1317,4	1,374	5,10
	14	1384,3	1281,5	1294,7	1300,0	1317,2	1326,6	1331,1	1,123	5,80
02	04	1429,8	1310,8	1324,2	1331,4	1339,3	1344,5	1345,9	0,794	3,50
(VS)	10	1433,8	1313,5	1330,2	1338,5	1350,0	1356,3	1358,7	1,023	5,20
	14	1409,1	1291,7	1305,6	1312,2	1321,5	1327,1	1328,4	0,831	3,80
03	1	1455,3	1364,7	1378,5	1382,8	1396,6	1404,6	1408,3	0,987	7,50
(VU)	12	1462,7	1368,1	1381,4	1385,5	1398,3	1406,7	1410,8	0,967	7,60
	14	1406,1	1314,9	1329,5	1333,4	1345,6	1353,7	1357,8	0,971	7,40
04	10	1452,3	1363,3	1372,3	1376,0	1387,8	1395,8	1398,9	0,806	6,40
(VS)	11	1437,8	1342,0	1356,5	1361,5	1378,1	1387,5	1391,8	1,127	7,90
	16	1393,6	1306,7	1320,2	1324,7	1339,1	1348,2	1352,3	1,032	7,00
06	1	1365,5	1263,0	1282,3	1288,2	1306,6	1317,7	1323,0	1,358	9,00
(VU)	2	1428,1	1321,3	1340,8	1346,6	1366,0	1378,0	1383,3	1,403	8,50
	9	1428,7	1323,3	1341,0	1347,0	1365,9	1379,1	1386,6	1,433	8,70
05	1	1440,4	1337,3	1354,9	1360,8	1380,1	1390,1	1394,1	1,286	8,80
(VS)	2	1442,7	1337,5	1353,5	1358,8	1374,8	1382,1	1384,8	1,071	7,30
	3	1442,8	1339,1	1355,5	1360,4	1377,5	1386,8	1390,8	1,170	7,80

Tabela 4.9 – Resultado dos ensaios de absorção de água por capilaridade dos testemunhos extraídos do túnel.

Placa Nº	Nº CP	Massa (g)	Seco 72 h 28/09 10:00 h (g)	Após 3h 28/09 13:00 h (g)	(3h) 28/09 16:00 h (g)	(24h) 29/09 10:00 h (g)	(48h) 30/09 10:00 h (g)	(72h) 01/10 10:00 h (g)	Absorção (g/cm^2)	H(cm)
Túnel 1	1	1353,2	1224,4	1244,2	1248,0	1268,7	1281,3	1288,0	1,440	6,00
(VU)	2	1358,1	1225,5	1244,9	1268,9	1268,9	1280,1	1286,1	1,372	6,60
Túnel 1	1	1416,6	1291,8	1313,2	1316,9	1335,2	1347,0	1354,6	1,421	6,40
(VS)	2	1431,8	1328,5	1342,7	1345,0	1355,5	1362,1	1366,6	0,862	5,40

VU.: sistema de projeção via úmida.

VS.: sistema de projeção via seca.

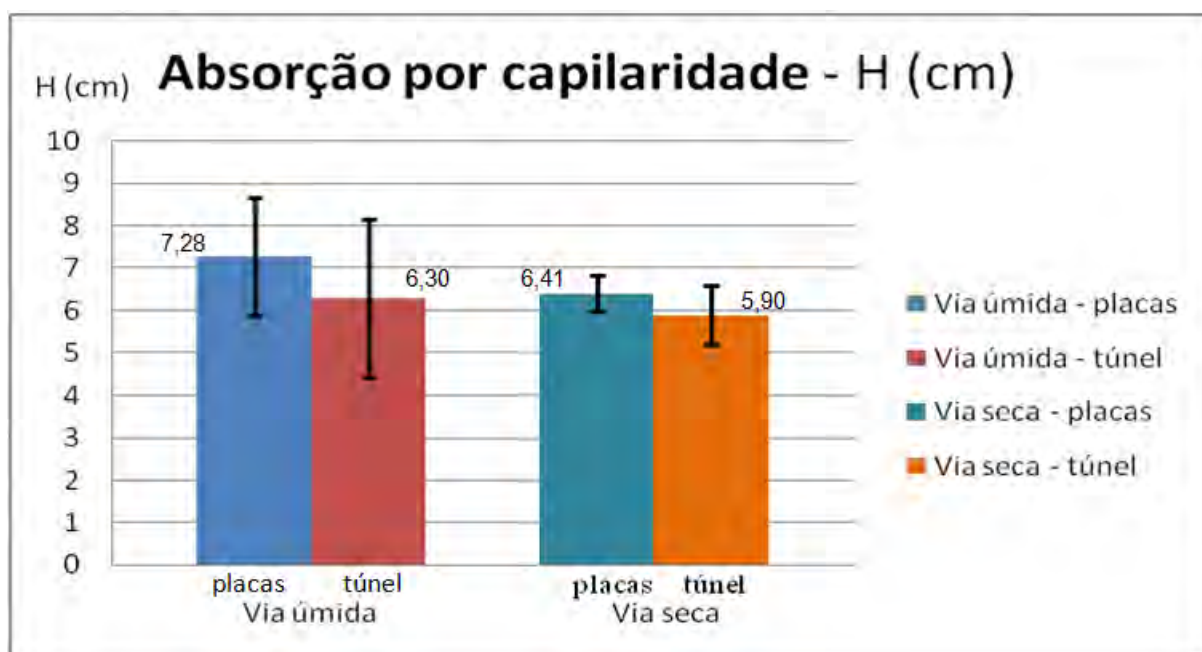


Figura 4.4 – Absorção de água por capilaridade - altura de penetração, comparando os sistemas via seca e via úmida, para os concretos projetados nas placas e extraídos do túnel.

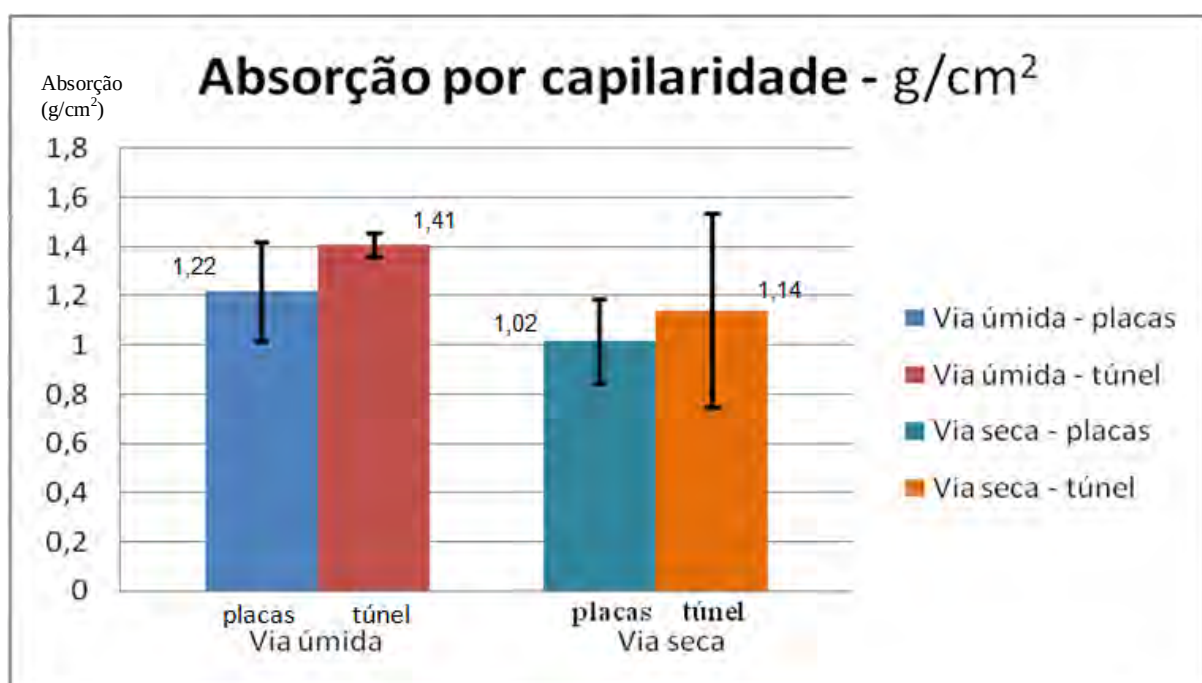


Figura 4.5 – Absorção de água por capilaridade - índice de absorção de água, comparando os sistemas via seca e via úmida, para os concretos projetados nas placas e extraídos do túnel.

Quanto menor o diâmetro dos poros capilares, maiores serão as pressões capilares e conseqüentemente, maiores as alturas de ascensão da água, todavia as alturas de ascensão não crescem indefinidamente com a redução do diâmetro e com o aumento das pressões. Isto

porque, na redução do diâmetro dos poros, chega um momento que vai havendo uma redução da interconexão de poros (estes vão ficando isolados, tortuosos, etc.) e, neste momento, não ocorre mais ascensão capilar. Por outro lado, quanto maior o diâmetro dos capilares menor será a altura da ascensão da água, porém a quantidade total de água absorvida por unidade de área poderá ser maior, dependendo da força de sucção capilar existente. Portanto, a NBR 9779:1995 se propõe, com este método, a medir a força de sucção capilar conjuntamente com o grau de interconectividade dos poros presentes no concreto, cuja interpretação dos resultados nem sempre é tão simples.

Os resultados de absorção de água por capilaridade apresentaram resultados de maior altura de penetração para o sistema via úmida obtidos das placas, analisando comparativamente ao sistema via úmida obtido dos túneis (observou-se, neste caso, um decréscimo em torno de 15% dos valores de altura de penetração dos túneis em relação às placas). Muito provavelmente, tal diferença é reflexo da alteração do sistema de poros quando a projeção no túnel aconteceu em um substrato com elevado teor de umidade. Neste caso, o concreto pode ter tido sua porosidade capilar aumentada em termos de quantidade de poros e também, qualitativamente, em termos da dimensão (diâmetro) desses poros, o que explica uma certa perda de força capilar, constatada pela menor altura capilar em relação à projeção nas placas. Para o sistema via seca, os valores obtidos das placas e dos túneis foram muito próximos, em torno de 6 cm de altura de penetração. O sistema via seca, portanto, comportou-se melhor do que o sistema via úmida para o parâmetro de altura de penetração na absorção de água por capilaridade.

O índice de absorção, representado pelo acréscimo de massa por área da superfície de contato do corpo-de-prova (g/cm^2), mostrou valores diferenciados entre placas e túneis, tanto para o sistema via úmida quanto para o sistema via seca, sendo que um ligeiro acréscimo, em torno de 10%, foi verificado para os túneis. Os resultados são piores para os testemunhos extraídos dos túneis com ganho de massa de água maior em relação às placas, fruto das condições mais desfavoráveis de projeção nos túneis e, no caso do sistema via úmida, adicionalmente pela provável alteração de sua microestrutura face à presença de água no substrato. Nesta situação, a massa de água absorvida mais alta é decorrente de uma porosidade capilar mais aberta e interconectada, que ainda possui força capilar. Os resultados comparativos dos sistemas via úmida e via seca se mostraram similares tanto para altura de penetração quanto para índice de absorção de água, tendo o sistema via seca obtido um melhor comportamento, apesar de apresentar uma dispersão acentuada de resultados para a projeção no túnel (considerando a massa de água absorvida).

A porosidade do concreto, no que diz respeito à distribuição do tamanho de poros, influencia fortemente a velocidade de transporte de massa. O tamanho dos poros na pasta de cimento abrange várias ordens de grandeza. De acordo com as características originais, os poros podem ser descritos como sendo poros de ar aprisionado, poros de ar incorporado, poros capilares e poros de gel, como se ilustra na Figura 4.6. Classificando os poros de uma forma mais geral, aparenta ser mais prático classificá-los em macroporos, poros capilares e microporos. São os poros capilares e os macroporos que têm importância em relação à durabilidade (NEVILLE, 1997; MEHTA; MONTEIRO, 1994; FERREIRA, 2000 *apud* MENDES, 2009).

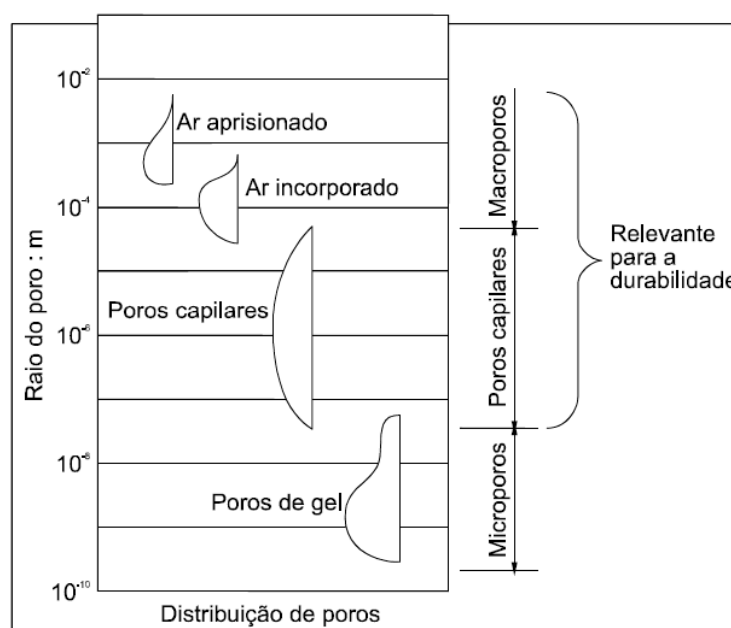


Figura 4.6 – Estrutura porosa do concreto (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

Os autores Mehta e Monteiro (1994) e Neville (1997) classificam por ordem de grandeza os tipos de poros mostrados na Figura 4.6, da seguinte maneira:

- **macroporos**: são os vazios incorporados e aprisionados à massa de concreto, apresentando dimensões bem maiores que os demais poros. Os vazios de ar incorporados são também gerados por meio de aditivos que têm a finalidade de incorporar poros de formato esférico, não sendo influenciados pela relação a/c e não sendo também interconectados; podendo seus vazios variar de 50 μm a 200 μm . Já os vazios de ar aprisionados são advindos da operação de mistura, sendo que seus vazios podem chegar a 3 mm. Ambos os tipos de vazios, segundo Lara (2003 *apud* MENDES, 2009), são capazes de afetar negativamente a resistência e a impermeabilidade.

- **poros capilares:** são os espaços não ocupados pelo cimento ou pelos produtos de hidratação, originados nos espaços inicialmente ocupados pela água de amassamento em excesso que, antes da hidratação, provoca o afastamento dos grãos de cimento; a porosidade capilar é tanto maior quanto maior for a quantidade de água adicionada à mistura e quanto menor for o grau de hidratação do cimento;

- **poros gel:** são os espaços vazios entre os produtos de hidratação do cimento.

De acordo com Cascudo (1997), quando os diâmetros dos poros são reduzidos o material tem uma forte capilaridade e uma permeabilidade fraca e, inversamente, quando os diâmetros são grandes a capilaridade é pequena e a permeabilidade grande. A Figura 4.7 ilustra as diferenças entre porosidade e permeabilidade.

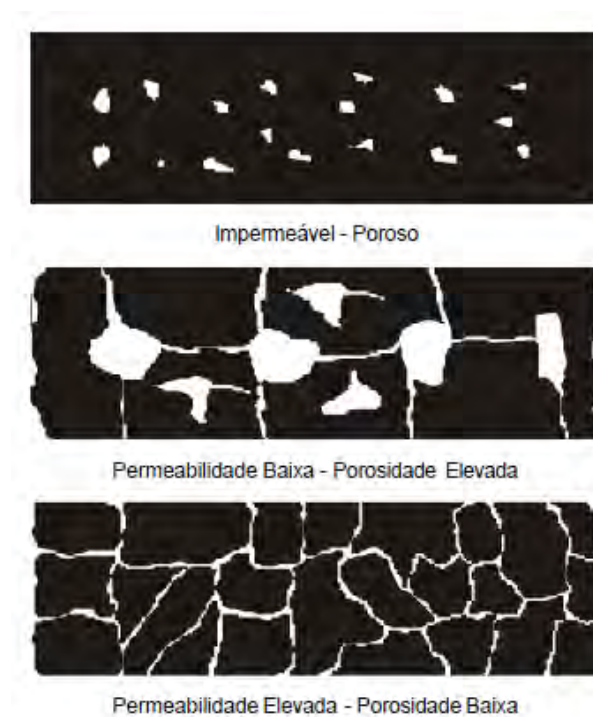


Figura 4.7 – Diferença entre porosidade e permeabilidade (FERREIRA, 2000 *apud* MENDES, 2009).

Segundo Neville (1997), a relação água/cimento é o fator mais influente na porosidade do concreto, pois quanto mais baixa a relação água/cimento, menores serão os poros interligados e, conseqüentemente, a porosidade do concreto será menor, como se observa no gráfico da Figura 4.8.

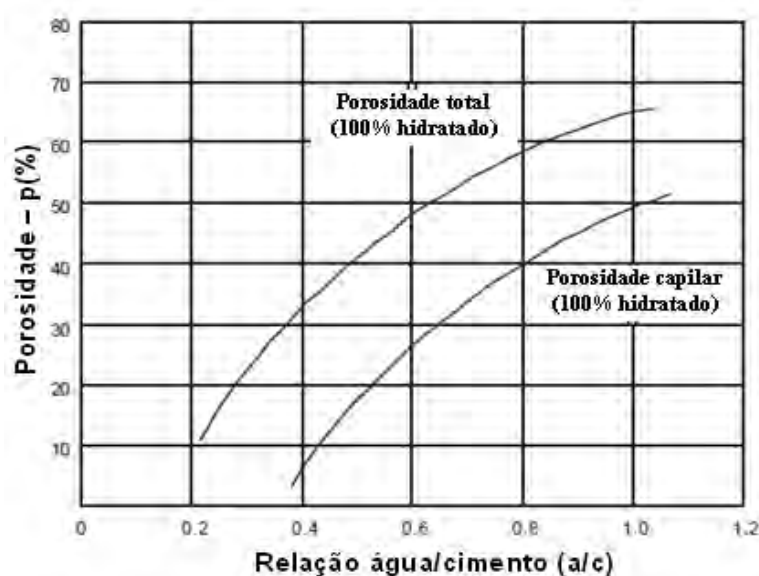


Figura 4.8 – Influência da relação a/c na porosidade total e capilar (NEVILLE, 1997).

A incorporação de água livre presente no substrato de projeção ao concreto projetado certamente ocasionou para o sistema via úmida uma modificação da relação a/c entre o proporcionamento de partida e o proporcionamento presente no túnel, aumentando a relação a/c e conseqüentemente a sua porosidade, o que ocorreu um aumento na altura de penetração de água e absorção de água em relação ao sistema via seca.

A presença de água livre no concreto projetado no sistema via úmida propicia uma maior porosidade pela ocupação de espaços vazios que ficaram após a saída de água da composição do material aplicado, fenômeno migratório das águas existentes na composição do concreto projetado em decorrência da alta quantidade de água formando os poros capilares, que ocorre do início da pega ao tempo de cura do concreto. Um aumento na porosidade, para esta situação, ocasionou uma aumento de poros com diâmetros maiores acarretando uma diminuição da força de ascensão capilar e um aumento da retenção de água (g/cm²), conforme a Lei de Jurin (MENDES, 2009) onde quanto maior o raio (e/ou diâmetro) do poro capilar, menor será a altura de sucção capilar (grandezas inversamente proporcionais), o que provavelmente explica os resultados desfavoráveis para os testemunhos extraídos dos túneis com ganho de volume de água maior que para as placas, enquanto que a altura de sucção capilar para os túneis apresentou ser menor em relação às placas (veja Figuras 4.4 e 4.5).

O fato do concreto projetado ser compactado através do processo de projeção, faz dele um material mais poroso que o concreto convencional, contudo, o concreto projetado obedece ao padrão dos concretos secos: não ocorre exsudação e os poros pouco se interligam, resultando em pequena formação de capilares. Assim, é possível obter baixos índices de

absorção capilar, o que pode significar baixa permeabilidade, como em túneis de adução e mesmo nos demais casos de túneis em contato com lençóis freáticos, onde a presença de aquíferos ocorre no maciço (GASPARIM, 2007). Esta consideração pode ser aplicada em um sistema normal de projeção, onde o substrato não possui elevada presença de água livre que possa incorporar prejudicialmente ao concreto projetado, em especial no sistema via úmida (condições externas não previstas para a obra: presença de grande aquífero subterrâneo, região de nascentes, falhas geológicas em aquíferos, etc).

Para o sistema via seca a presença de alta umidade no substrato criou uma condição de regulação da água pelo mangoteiro, havendo diminuição da entrada de água no sistema, mantendo próxima a relação a/c inicial (de partida) com a final (projetado no substrato), não proporcionando dessa forma, grandes prejuízos ao concreto projetado dessa forma, isso explica a proximidade na Figura 4.4 a proximidade das placas e túneis no sistema via seca. Muito provavelmente isto também explica a menor altura de ascensão capilar para o sistema via seca, comparando o sistema via úmida com o sistema via seca, obtendo-se um sistema de poros pequenos e mais fechados, com alta compacidade, com menor relação a/c (comparando ao sistema via úmida) gerando menor porosidade, menor ascensão capilar e quantidade de água absorvida.

Absorção capilar é o transporte de líquidos nos poros devido à tensão superficial agindo nos capilares. Ela está relacionada não só com a estrutura dos poros, mas também com as características do líquido, tais como viscosidade, densidade e tensão superficial, e também das características do sólido poroso como raio, tortuosidade e a continuidade dos poros, além da energia superficial (BAUER, 1995; LARA, 2003 *apud* MENDES, 2009). Quanto mais elevada for a tensão superficial no interior dos poros maior será a ascensão capilar (CASCUDO, 1997).

Cabe ressaltar, que na prática, não é possível analisar os poros capilares individualmente pelo fato de estes estarem dispostos de uma forma irregular e formarem um emaranhado de pequenos canais, de secção extraordinariamente variável, extremamente complexos e numerosos (AZEVEDO, 2002 *apud* MENDES, 2009).

A microestrutura porosa tem influência determinante na absorção capilar, quer seja no volume de água absorvido, na velocidade de absorção, como também na altura de sucção. Em princípio, quanto menor for o diâmetro dos capilares, maiores as pressões capilares e, conseqüentemente, maior e mais rápida absorção de água (LARA, 2003 *apud* MENDES, 2009).

Segundo Ferreira (2003), quanto menores os diâmetros dos poros, maiores as pressões capilares e maior a altura de sucção capilar. Sob enfoque inverso, com poros maiores tem-se alturas menores, porém volumes absorvidos maiores. No entanto, segundo Basheer *et al.* (2001 *apud* MENDES, 2009), concretos de reduzida relação água/cimento, apesar de apresentarem capilares com diâmetros menores, estes poros são muito menos interconectados, resultando em menores alturas de sucção e também em menores volumes totais absorvidos.

4.1.3.2 Absorção de água por imersão

O ensaio de absorção de água por imersão, realizado no período de 15 de setembro de 2009 a 02 de outubro de 2009, está apresentado na Tabela 4.10. Tem-se a leitura deste ensaio com dados obtidos em laboratório, os resultados como porcentagem de absorção, índice de vazios e massa específica estão representados na Tabela 4.11.

Tabela 4.10 – Leitura de medição em massa dos ensaios de absorção de água por imersão dos corpos-de-prova extraídos das placas e dos túneis.

Placa nº	Nº CP	Peso úmido (g)	Peso seco 72 h (g)	Peso ar(g)*	Peso imerso(g)*
01	1	1421,9	1315,2	1411,0	788,2
(VU)	2	1443,9	1340,5	1432,2	803,7
	4	1432,9	1327,4	1419,8	794,0
02	8	1336,9	1235,6	1336,5	755,9
(VS)	15	1262,8	1165,0	1260,9	715,1
	16	1394,8	1287,7	1343,1	787,6
03	2	1465,1	1377,9	1456,1	828,3
(VU)	3	1458,9	1372,1	1449,7	823,5
	16	1376,5	1290,3	1368,0	773,4
04	2	1371,6	1281,7	1369,8	769,3
(VS)	13	1445,7	1354,7	1452,3	822,5
	15	1456,5	1368,3	1455,4	825,7
05	5	1391,8	1304,5	1388,3	786,9
(VS)	9	1377,5	1281,7	1371,0	769,6
	10	1335,6	1238,2	1331,8	743,9
06	4	1450,5	1353,0	1443,1	812,6
(VU)	5	1447,2	1351,4	1440,4	812,0
	7	1435,0	1335,4	1428,4	801,1
Túnel 1	1	1353,2	1229,0	1354,1	741,4
(VU)	2	1358,1	1230,2	1363,0	744,4
Túnel 2	1	1416,6	1295,8	1412,6	786,6
(VS)	2	1431,8	1331,5	1427,8	808,9

* Após Fervura de um tempo de 5 horas.

VU.: sistema de projeção via úmida.

VS.: sistema de projeção via seca.

Tabela 4.11 – Resultados de ensaios de absorção, índice de vazios e massa específica.

Placa nº	Absorção após imersão (%)	Absorção após imersão e fervura (%)	Índice de vazios após saturação (%)	Índice de vazios após saturação e fervura (%)	Massa específica seca em estufa (g/cm ³)	Massa específica seca após saturação (g/cm ³)	Massa específica seca após saturação e fervura (g/cm ³)	Massa específica seca real (g/cm ³)
1	8,11	7,28	16,84	18,18	2,11	2,28	2,27	2,50
(VU)	7,71	6,84	16,15	17,08	2,13	2,30	2,28	2,50
	7,95	6,96	16,51	17,32	2,12	2,29	2,27	2,49
2	8,20	8,17	17,44	21,03	2,13	2,30	2,30	2,58
(VS)	8,39	8,23	17,86	21,32	2,13	2,31	2,31	2,59
	8,32	4,30	17,64	11,08	2,32	2,51	2,42	2,57
3	6,33	5,68	13,69	14,23	2,19	2,33	2,32	2,51
(VU)	6,33	5,66	13,66	14,15	2,19	2,33	2,32	2,50
	6,68	6,02	14,29	15,03	2,17	2,32	2,30	2,50
4	7,01	6,87	14,93	17,19	2,13	2,28	2,28	2,50
(VS)	6,72	7,20	14,60	18,34	2,15	2,30	2,31	2,55
	6,45	6,37	13,98	16,05	2,17	2,31	2,31	2,52
5	6,69	6,42	14,43	16,19	2,17	2,31	2,31	2,52
(VS)	7,47	6,97	15,76	17,44	2,13	2,29	2,28	2,50
	7,87	7,56	16,46	18,94	2,11	2,27	2,27	2,50
6	7,21	6,66	15,28	16,67	2,15	2,30	2,29	2,50
(VU)	7,09	6,59	15,08	16,50	2,15	2,30	2,29	2,51
	7,46	6,96	15,71	17,41	2,13	2,29	2,28	2,50
Túnel 1	10,11	10,18	20,30	25,66	2,01	2,21	2,21	2,52
(VU)	10,40	10,79	20,84	27,34	1,99	2,20	2,20	2,53
Túnel 2	9,32	9,01	19,17	22,94	2,07	2,26	2,26	2,54
(VS)	7,53	7,23	16,10	18,43	2,15	2,31	2,31	2,55

Os gráficos dos ensaios de absorção por imersão estão representados nas Figuras 4.9 e 4.10 e representam uma avaliação comparativa para os concretos projetados nas placas e extraídos dos túneis. A permeabilidade, não pode ser definida em termos de quantidade de poros e volume de vazios, sem que se leve em conta a distribuição e interligação dos poros. A distribuição, o arranjo, a interligação e o tamanho dos poros afetam diretamente a possibilidade de fluxo de água e agentes agressivos no interior do concreto, daí a importância de avaliar a rede de poros como um todo (GASPARIM, 2007). Assim pode-se afirmar que muito mais representativos que os ensaios de absorção por imersão e fervura e índice de vazios, é o ensaio de absorção de água por capilaridade.

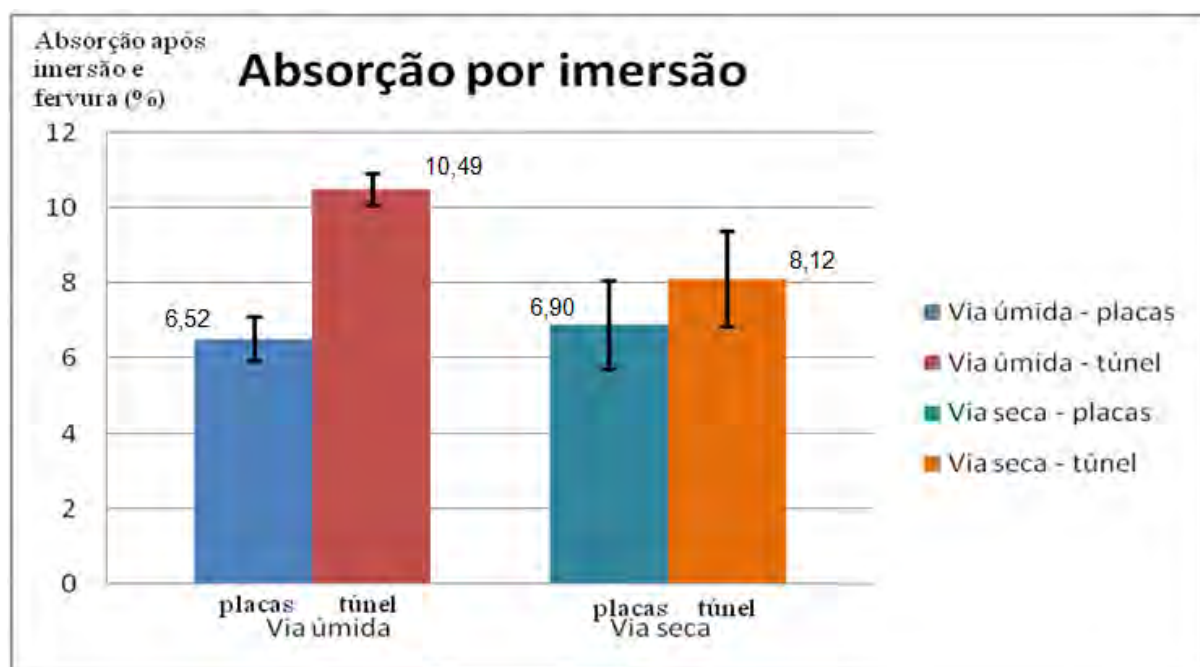


Figura 4.9 – Correlação entre absorção de água após imersão e fervura, comparando os sistemas via seca e via úmida, para os concretos projetados nas placas e extraídos dos túnel.

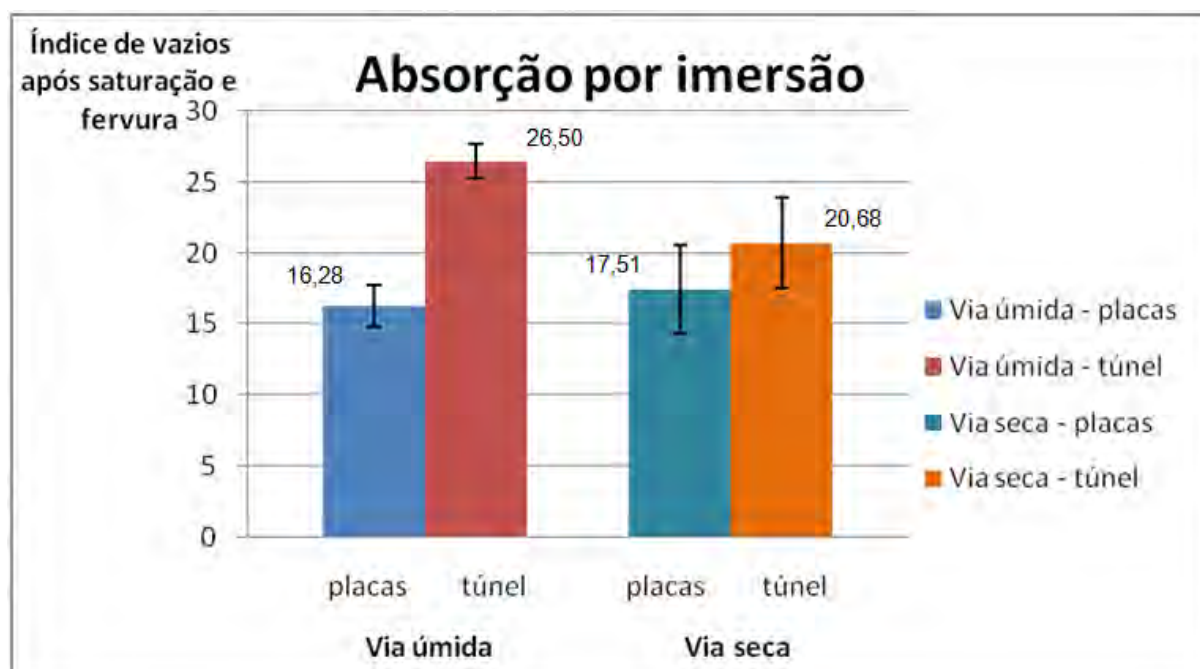


Figura 4.10 – Correlação entre índice de vazios após saturação e fervura, comparando os sistemas via seca e via úmida, para os concretos projetados nas placas e extraídos dos túnel.

O ensaio de absorção por imersão, que tem os resultados como porcentagem de absorção e índice de vazios após imersão e fervura, apresentou como valores percentuais para absorção após imersão e fervura o valor médio para o sistema via úmida referente as placas com um índice 40% menor que o valor encontrado para os túneis. Morgan (1992 *apud*

GASPARIM, 2007) classifica como excelente a qualidade dos concretos com absorção, após imersão e fervura, inferior a 6%, boa entre 6% e 8%, razoável entre 8% e 9% e ruim acima de 9%. O valor percebido no sistema via úmida para as placas então ficaram classificados como qualidade boa e para os túneis como qualidade ruim.

Os resultados do sistema via seca apresentaram melhor desempenho que os apresentados para o sistema via úmida. No sistema via seca para as placas obteve-se resultado em torno de 10% inferior ao valor encontrado para os túneis. Ambos os valores estão classificados com qualidade boa para absorção por imersão, entre 6% e 8%.

A correlação entre índice de vazios após saturação e fervura, comparando os sistemas via seca e via úmida, para os concretos projetados nas placas e extraídos dos túneis tem comportamento análogo aos resultados de porcentagem de absorção, com as mesmas variações de porcentagens encontradas. Semelhante ao exposto, Morgan (1992 apud GASPARIM, 2007), no mesmo trabalho, considera de qualidade excelente os concretos com índice de vazios permeáveis inferiores a 14%, boa os concretos com índice entre 14% e 17%, razoável quando o índice está entre 17% e 19% e ruim quando superior a 19%. Nesse caso, o valor apresentado no sistema via úmida para as placas ficam classificados como qualidade boa e para os túneis como qualidade ruim e para o sistema via seca, o valor das placas está classificado como qualidade razoável e o valor dos túneis está classificado com qualidade ruim.

No caso do concreto projetado via seca a compactação do material é dada pelo volume de pasta incorporado ao material (FIGUEIREDO, 1997) responsável pelo fechamento do volume de vazios deixado pelos agregados, como pode ser observado na Figura 4.11. Até um certo ponto, o aumento da água proporciona um melhor preenchimento destes vazios. Numa segunda fase, onde há uma saturação destes vazios por parte da pasta, a porosidade é dada pela própria relação água/cimento (FIGUEIREDO, 1997), o que caracteriza o comportamento do material como de um concreto de reologia seca com ponto ótimo de umidificação para máxima compactação e resistência mecânica (PRUDÊNCIO, 1993).

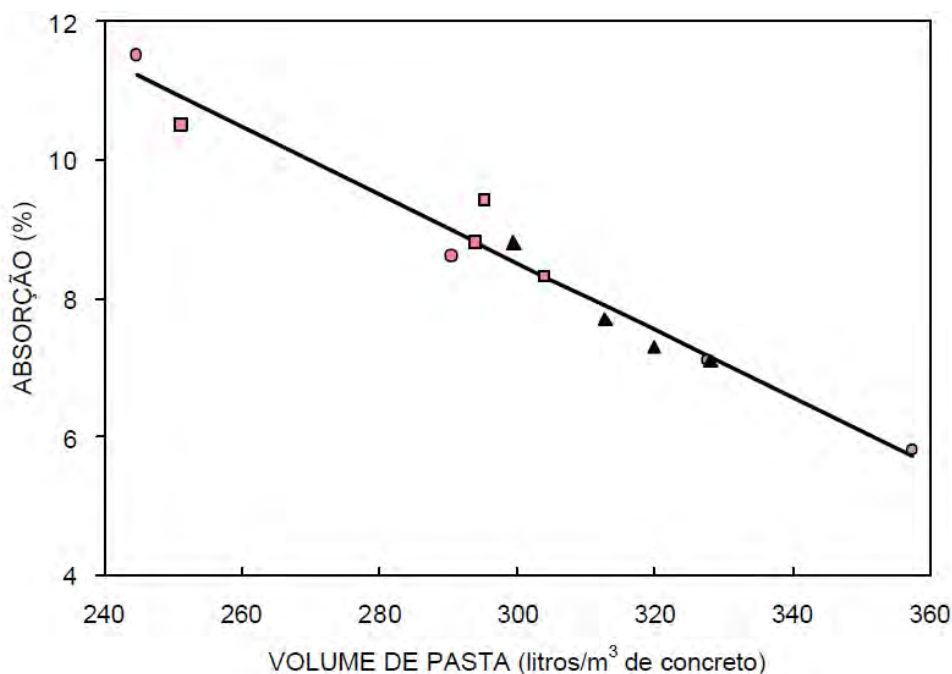


Figura 4.11- Correlação entre a absorção por imersão e fervura e o volume de pasta presente no concreto projetado (FIGUEIREDO, 2005).

Para que se garanta uma maior durabilidade e melhor desempenho do concreto projetado no sistema via seca, não se deve seguir totalmente as recomendações para concreto convencional utilizando-se um valor de relação a/c máxima. No caso do concreto projetado no sistema via úmida, o comportamento é basicamente de um concreto plástico (PRUDÊNCIO, 1993), fazendo com que a lei de Abrams tenha validade e, neste caso, a fixação de uma relação a/c máxima tem sentido e contribui para o melhor desempenho do material (FIGUEIREDO, 2005).

No sistema via seca a relação a/c é controlada pelo mangoteiro no momento da projeção, que com a presença de água livre no substrato de projeção, o mesmo diminui a inserção de água no sistema fechando o registro controlador para evitar maior projeção e deslocamentos, o concreto assim fica obedecendo ao padrão dos concretos secos que não ocorre exsudação e os poros pouco se interligam, resultando em pequena formação de capilares (GASPARIM, 2007). Assim foi possível obter baixos índices de absorção capilar para o sistema via seca, o que pode significar baixa permeabilidade e um menor índice percentual de absorção por imersão, propriedade de natural interesse para a durabilidade.

Pela regulação da água pelo mangoteiro na projeção e em consequência da relação a/c no sistema via seca, possibilitou uma melhor coesão e hidratação do cimento, acarretando redução da porosidade e da permeabilidade. Na Figura 4.9 o sistema via seca para o túnel apresenta uma absorção próximo de 8% e para as placas cerca de 7%, correlacionando com

gráfico da Figura 4.11, encontraremos valores para a o volume de pasta antes da projeção, para as placas, cerca de 330 l/m^3 de concreto e para o túnel próximo de 310 l/m^3 de concreto, sendo assim ocorre uma perda de 20 l/m^3 de concreto de pasta após a projeção, provavelmente explicado pelo efeito rebote (reflexão) e pela poeira (névoa em suspensão) de cimento, principalmente, e pequenas partículas em suspensão da mistura (sílica em suspensão), provocada pelo bico de projeção no momento da projeção.

Na projeção do sistema via úmida que houve a incorporação de água ao concreto projetado, pela presença de água livre no substrato de projeção, há um aumento da relação a/c, ocasionando uma maior porosidade capilar, com poros de diâmetro maior que neste caso também explicam provavelmente a grande diferença entre os resultados médios das placas e dos túneis no sistema via úmida, tanto para a absorção por imersão e fervura (%) e o índice de vazios após saturação e fervura, em torno de 40%. O concreto projetado via úmida dos túneis perdeu propriedades importantes em relação às placas, no processo de reflexão, “lixiviação” do concreto pela água livre e pela incorporação de água ao proporcionamento projetado. Todos estes fatores prejudicaram a relação a/c do proporcionamento de partida para o proporcionamento, na reflexão pela perda de materiais (aglomerantes mais agregados ou pasta de cimento e agregados), no carregamento de materiais finos, principalmente o cimento (pasta, também) pela água livre em contato com o concreto e principalmente pelo aumento da quantidade de água no concreto projetado.

Como existe a exigência de elevadas resistências a baixas idades quando é o caso de revestimento de túneis, entram no sistema os aditivos aceleradores de pega e endurecimento que têm forte influência na resistência final e no nível de compactação (PRUDÊNCIO, ARMELIN e HELENE, 1994 *apud* FIGUEIREDO, 2005; FIGUEIREDO, 1997). Estes aditivos, como aceleram quase que imediatamente a pega dependendo do teor utilizado, dificultam a compactação conferida ao material pelo próprio jato de projeção. Assim, a análise da durabilidade do concreto projetado não deve ficar dissociado das peculiaridades ligadas ao material. A quantidade de aditivo acelerador de pega é controlado pelo mangoteiro, que regulou a maior entrada desse aditivo ao concreto projetado no sistema via úmida do que no sistema via seca, devido a maior quantidade de reflexão para esse sistema, melhorando assim o comportamento de absorção de água por imersão ao sistema via seca em relação ao sistema via úmida.

O sistema via seca obteve melhor desempenho do que o sistema via úmida, para os ensaios de absorção por imersão tanto nos itens índice de absorção de água após imersão e fervura, quanto no índice de vazios após saturação e fervura. Analogamente aos resultados

anteriores as placas obtiveram melhor desempenho de durabilidade, neste quesito de absorção por imersão do que os túneis, para os dois sistemas de projeção.

4.1.3.3 Penetração de água sob pressão

Os resultados de penetração de água sob pressão, realizados no período de 09 de outubro de 2009 a 11 de dezembro de 2009 são apresentados na Tabela 4.12. Todos os resultados de medida linear de penetração foram de distribuição regular de água no interior de cada corpo-de-prova, não ocorrendo vazamentos laterais nos mesmos. A análise comparativa será feita em função da altura de penetração, conforme preconiza a norma NBR 10787:1994.

Tabela 4.12 - Resultado dos ensaios de penetração de água sob pressão dos corpos-de-prova das placas e dos testemunhos extraídos dos túneis.

Placa nº	Nº CP	Data do ensaio	Altura de penetração H (cm)
01	1	09/10/2009	3,70
(VU)	2	09/10/2009	3,70
	3	09/10/2009	3,80
02	1	19/10/2009	2,99
(VS)	2	19/10/2009	3,04
	3	19/10/2009	3,42
03	1	26/10/2009	1,30
(VU)	2	26/10/2009	3,44
	3	26/10/2009	3,27
04	1	13/11/2009	2,36
(VS)	2	13/11/2009	2,63
	3	13/11/2009	2,61
05	1	20/11/2009	2,30
(VS)	2	20/11/2009	2,69
	3	20/11/2009	2,17
06	1	26/11/2009	1,90
(VU)	2	26/11/2009	2,10
	3	26/11/2009	1,74
TEST.	1	04/12/2009	2,59
T-1	2	04/12/2009	2,48
(VU)	3	04/12/2009	2,45
TEST.	1	11/12/2009	2,32
T-2	2	11/12/2009	2,51
(VS)	3	11/12/2009	2,75

O gráfico do ensaio de penetração de água sob pressão está representado na figura 4.12 e representa uma avaliação comparativa para os concretos projetados nas placas e extraídos dos túneis, nos sistemas de projeção via úmida e via seca.

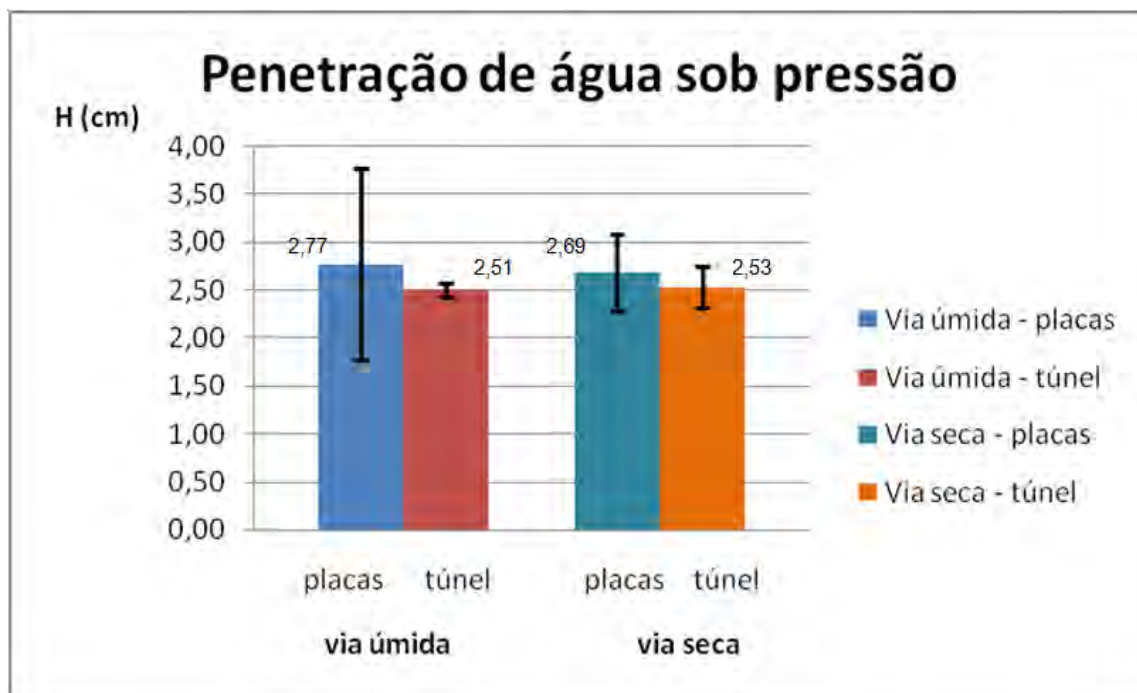


Figura 4.12 – Penetração de água sob pressão, comparando os sistemas via seca e via úmida, para os concretos projetados nas placas e extraídos dos túneis.

Os resultados de penetração de água sob pressão apresentam valores para os sistemas via úmida e via seca, tanto para as placas quanto para os túneis valores muito próximos, em torno de 2,5 cm de penetração, valor menor do que o indicado por Palermo (1997), como parâmetro de durabilidade, nos estudos dos túneis do metrô de São Paulo, valor menor ou igual a 5,0 cm (50 mm) de profundidade de penetração. De acordo com a profundidade de penetração, todas as amostras atenderam aos limites da especificação citada. A análise comparativa feita em função da altura de penetração, conforme a norma NBR 10787:1994 (ABNT, 2004) não apresentaram diferenciações consideráveis entre os sistemas de projeção via úmida e via seca, mostrando similaridade entre a resistência do concreto projetado à penetração de água sob pressão tanto para os testemunhos extraídos dos túneis quanto para os corpos-de-prova provenientes das placas. A comparação dos resultados conduzidos pelos diversos tipos de sistema de projeção indica um comportamento análogo do concreto projetado (em estudo neste programa experimental) presente nos túneis, nos dois sistemas de projeção; ou seja, independente do sistema de projeção adotado, a penetração de água frente à presença de lençóis freáticos (onde a presença de aquíferos ocorre no maciço, induzindo a pressão no concreto projetado) tem um comportamento muito semelhante, com pequena desvantagem de desempenho para o sistema via úmida.

A Figura 4.12 representa a média dos resultados de penetração de água sob pressão, tomando particularmente a média das alturas de penetração das placas para o sistema via

úmida, onde apresenta um desvio padrão alto e uma dispersão maior dos resultados, há que se ressaltar que os maiores valores de penetração de água sob pressão estão no sistema via úmida 3,80 e 3,70 cm, representando uma variação maior de altura de penetração em relação ao sistema via seca, o que representa uma ligeira diferenciação para uma tendência de pior resultado para o sistema via úmida, acompanhando os resultados dos ensaios anteriores. Esta tendência se configura pela presença de água livre no substrato de projeção, que altera a relação a/c do concreto projetado via úmida, pela incorporação de água ao mesmo, diminuindo assim esta relação, obtendo um comportamento de penetração de água sob pressão ligeiramente pior em relação ao sistema via seca. Como explicado anteriormente, aumentando a relação a/c, os diâmetros são maiores, a capilaridade é pequena e a permeabilidade grande, o que certamente ocasionou um comportamento de altura de penetração em parte superior para o sistema via úmida em relação ao sistema via seca. Para o sistema via seca, onde a água é controlada pelo mangoteiro, que na presença de água livre no substrato, o mesmo regula a água do sistema, fechando o registro, diminuindo a quantidade de água no concreto na projeção, diminuindo a relação a/c, diminuindo sua porosidade, o que caracteriza o comportamento do material como de um concreto de reologia seca com ponto ótimo de umidificação para máxima compactação (PRUDÊNCIO, 1993). Concretos de reduzida relação água/cimento, apesar de apresentarem capilares com diâmetros menores, estes poros são muito menos interconectados (MENDES, 2009), resultando em menores alturas de penetração de água sob pressão.

Ferreira (2003) ressalta que a permeabilidade a líquidos sob pressão será tanto mais acentuada quanto maior for o diâmetro dos poros capilares, além obviamente da comunicação entre eles; isto na prática é obtido por meio de relações água/cimento relativamente altas (acima de 0,6, por exemplo). Por sua vez, à medida que se reduz a relação a/c, vai se obtendo estruturas cada vez mais compactas, com poros capilares mais “estreitos”, isto diminui a permeabilidade. A justificativa deste fato é que com estrutura de pasta mais compacta, haverá sempre uma queda significativa na porosidade capilar e na interconexão ou comunicação entre os poros (CASCUDO, 1997).

Os parâmetros de durabilidade de permeabilidade do material à água sob pressão e a determinação do volume de vazios permeáveis (Tabela 4.13) são fatores que ajudam a determinar o desempenho do ensaio de penetração de água sob pressão. Apesar de mais poroso, o concreto projetado acaba apresentando uma menor permeabilidade, dado que o mesmo não tem seus poros interconectados como ocorre com o concreto convencional (FIGUEIREDO, 2005).

Tabela 4.13 - Resumo dos resultados de permeabilidade obtidos por Dantas e Tango (1990) e Armelin et al (1994 *apud* FIGUEIREDO, 2005).

Concreto	K (cm/s) (lei de Darcy)	Volume de vazios permeáveis (%)
Tradicional	$3,41 \times 10^{-9}$	12,9
Projetado	$<10^{-11}$	15,1
Túnel		
Via seca	$\sim 10^{-8}$ a 10^{-10}	12,4
Via úmida	$\sim 10^{-11}$	14,4

Deve-se chamar atenção, no entanto, para o fato de que, os resultados obtidos para o coeficiente de permeabilidade da lei de Darcy (K) são bem baixos para o concreto projetado, indicando que corresponderia a um tempo de percurso da água para vencer toda a espessura de 15 cm de um revestimento primário de um túnel, seria cerca de anos, o que é um tempo bastante elevado.

4.1.3.4 Resistividade elétrica superficial

Os resultados dos ensaios de resistividade elétrica superficial, realizados no dia 07 de outubro de 2009, apresentaram diferenciação de valores significativos entre os corpos-de-prova extraídos das placas e da estrutura dos túneis, demonstrados na Tabela 4.14. Conforme Palermo (1997) o revestimento primário deve ser maior ou igual a 10 kΩ.cm, para o bom desempenho de durabilidade do concreto projetado em túneis rodo-ferroviários e conforme avaliação de resistividade elétrica superficial do concreto do CEB 192 (CASCUDO, 1997), a indicação de probabilidade de corrosão entre 10 e 20 kΩ.cm é baixa e entre 5 e 10 kΩ.cm é alta.

Tabela 4.14 – Resultado dos ensaios de resistividade elétrica das placas e dos túneis.

CP	Extração CPs	kΩ.cm
1	Túnel 1 (VU)	8,9
2	Túnel 1 (VU)	7,6
1	Túnel 2 (VS)	9,4
2	Túnel 2 (VS)	11,0
3	Placa 1 (VU)	14,0
1	Placa 1 (VU)	14,0
11	Placa 1 (VU)	14,0
3	Placa 2 (VS)	18,0
2	Placa 2 (VS)	18,0
12	Placa 2 (VS)	17,0
10	Placa 3 (VU)	19,0
11	Placa 3 (VU)	19,0
06	Placa 3 (VU)	19,0
14	Placa 4 (VS)	20,0
1	Placa 4 (VS)	15,0
3	Placa 4 (VS)	17,0
6	Placa 5 (VS)	18,0
13	Placa 5 (VS)	16,0
8	Placa 5 (VS)	17,0
16	Placa 6 (VU)	14,0
8	Placa 6 (VU)	15,0
15	Placa 6 (VU)	15,0

VU.: sistema de projeção via úmida.

VS.: sistema de projeção via seca.

1 a 6: número da placa moldada

O gráfico de resistividade na Figura 4.13, representa uma avaliação comparativa para os concretos projetados nas placas e extraídos dos túneis.

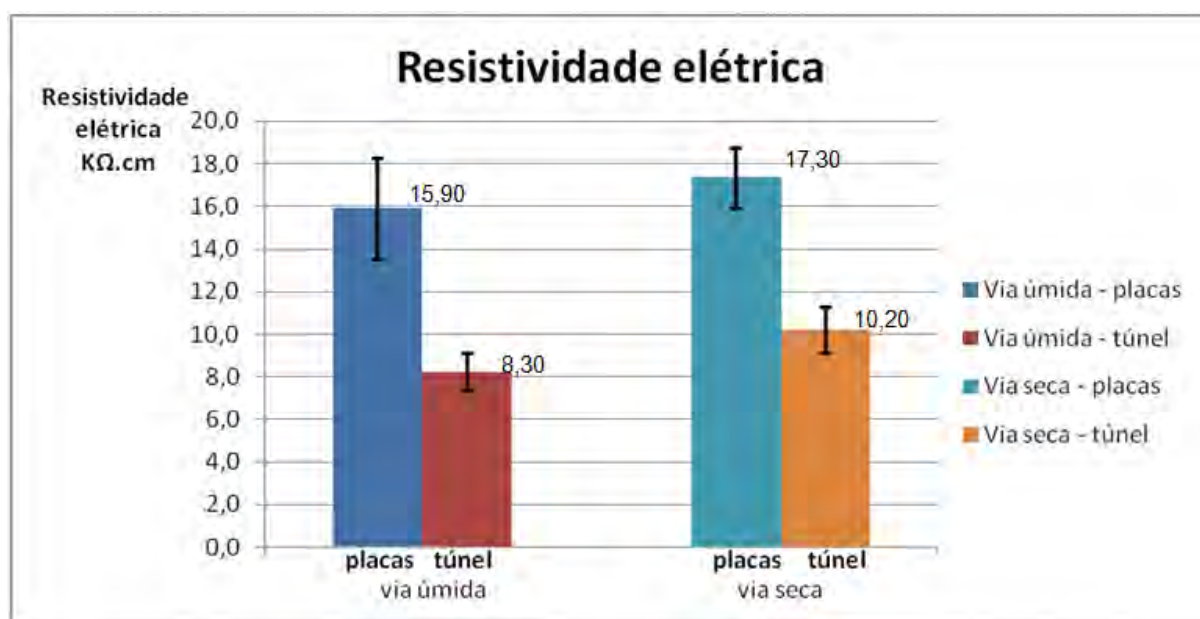


Figura 4.13 – Resistividade elétrica superficial para os concretos projetados nas placas e extraídos dos túneis.

Os resultados de ensaios de resistividade elétrica superficial tendem a se aproximar muito dos ensaios de resistividade elétrica volumétrica, em casos de similaridade de condição. O procedimento adotado de saturação, garante a uniformidade de umidade e cria a condição crítica de máxima condutibilidade, portanto desfavorável aos resultados e favorável a segurança. Além disso, frequentemente as estruturas de concreto projetado se encontram em contato com aquíferos ou compõem condutores de água. Dessa forma, a saturação remete também, à simulação de situações práticas.

Os resultados dos ensaios de resistividade elétrica superficial para o sistema via úmida, apresentaram diferenciação de valores significativos entre os corpos-de-prova extraídos das placas e da estrutura do túnel, o valor médio das placas foi 50% maior do que o valor médio do túnel, sendo que para o túnel o valor ficou abaixo de 10 k Ω .cm, indicando alta probabilidade de corrosão das armaduras. Conforme avaliação de resistividade elétrica superficial do concreto do CEB 192 (CASCUDO, 1997), a indicação de probabilidade de corrosão entre 10 e 20 k Ω .cm é baixa e entre 5 e 10 k Ω .cm é alta. Para o resultado obtido no sistema via seca, advindo da média dos resultados das placas, foi cerca de 70 % acima do valor proveniente da média dos testemunhos extraídos do túnel. Semelhante ao constatado para as propriedades anteriores, nota-se que o sistema via seca obteve um melhor desempenho em relação ao sistema via úmida e que os corpos-de-prova das placas obtiveram um melhor desempenho em relação aos extraídos dos túneis. O procedimento adotado nos ensaios de resistividade elétrica neste programa experimental tem atualmente ampla aceitação, resultados confiáveis e é adotado em vários laboratórios, devido a sua praticidade.

No ensaio, os pinos do equipamento de medição, colocados em contato com a superfície do corpo-de-prova saturado, medem, diretamente, a resistividade do concreto em kohm x cm. A saturação, garante a uniformidade de umidade e cria a condição crítica de máxima condutibilidade que é inversamente proporcional a resistividade elétrica. A redução da porosidade proporciona uma diminuição da condutibilidade e um aumento da resistividade (GASPARIM, 2007). A permeabilidade do concreto é uma condicionante da resistividade elétrica, quanto maior for sua permeabilidade, menor será sua resistividade elétrica.

No sistema via seca a relação a/c é controlada pelo mangoteiro, que ajusta o teor de umidade da mistura, pela trabalhabilidade e pelo índice de reflexão; na presença de excesso de água livre na base de projeção o mangoteiro realizou a diminuição da água pelo fechamento do registro, diminuindo a relação a/c, proporcionando o alcance do ponto ótimo de umidificação do concreto projetado para uma máxima compactação. À medida que se reduz a relação a/c, vai se obtendo estruturas cada vez mais compactas, com poros capilares mais

“estreitos”, diminuindo a sua permeabilidade. Como explicado anteriormente, a justificativa deste fato é que com estrutura de pasta mais compacta, haverá sempre uma queda significativa na porosidade capilar e na interconexão ou comunicação entre os poros (CASCUDO, 1997); pela saturação do corpo-de-prova haverá preenchimento destes poros por água, que conduzirá a corrente elétrica “passante” pelo sistema, ou seja, a sua condutividade e por consequência a sua resistividade elétrica. A diminuição dos poros interconectados foi acentuada no sistema via seca propiciando uma menor condutividade e uma maior resistividade elétrica e o inverso ocorre para o sistema via úmida que tem um aumento dos poros interconectados, pela presença maior de água livre nos poros e pelo aumento da relação a/c (pela incorporação de água livre do substrato na mistura), que propicia uma maior condutividade e em consequência uma menor resistividade elétrica. Certamente, isto explica o desempenho melhor do concreto projetado via seca em comparação ao sistema via úmida.

A metodologia de ensaios de resistividade elétrica mede a porosidade comunicável com a presença de água. Os limites normalmente especificados exigem concretos extremamente compactos e bem curados. A medida que se aumenta a relação a/c diminui-se a resistividade elétrica. (PALERMO, 1997).

A perda de propriedade de resistividade elétrica entre as placas e o túnel no sistema via úmida em torno de 100% (Figura 4.13) é maior que a perda de propriedade de resistividade elétrica entre as placas e o túnel no sistema via seca próximo de 70%, a explicação provável é que pelo processo de ganho de água na relação a/c, ocorrido pela presença de água na base de projeção (aumento da relação a/c), propicia um concreto projetado via úmida no túnel de resistividade elétrica muito menor que o das placas, com maior porosidade capilar e interconexão ou comunicação entre os poros. A presença de água incorporada no concreto via úmida, além de aumentar a relação a/c, retira parte do cimento com o carreamento de material por lixiviação do concreto. A perda de parte do cimento através de aerodispersão gerando poeira ou névoa no momento da projeção no sistema via seca e a regulação da entrada de água na mistura na projeção no sistema via seca pelo mangoteiro não propiciaram uma alteração na relação a/c, que pelo encontro do ponto ótimo de compactação pelo mangoteiro, semelhante a variação do sistema via úmida.

Para se assegurar uma boa impermeabilidade do concreto é preciso evitar a saída da água livre incorporado ao concreto. (PALERMO, 1997). Os vazios e poros surgem devido a antes da pega, pelo excesso de água na hidratação do cimento, incorporado em virtude da velocidade de impacto da projeção no substrato, que ao sair do concreto projetado deixa vazios e também pelo ar aprisionado retido durante as operações de projeção.

4.1.3.5 Penetrabilidade de íons cloreto

Os resultados dos ensaios de penetrabilidade de íons cloreto ou resistência do concreto à penetração dos íons cloreto, realizados no período de 05 a 26 de novembro de 2009, foram analisados de acordo com os critérios de classificação quanto aos riscos de penetração de íons cloreto definidos pela ASTM C 1202:2009 (ASTM, 2009), conforme mostrado na Tabela 4.15. Esse método consiste na avaliação laboratorial da condutância elétrica de amostras de concreto com a finalidade de se obter uma indicação rápida da resistência dessas amostras a penetração dos íons cloretos.

O gráfico do ensaio de penetração de íons cloreto está representado na Figura 4.14 e representa uma avaliação e uma correlação comparativa para os concretos projetados nas placas e extraídos dos túneis, nos sistemas de projeção via úmida e via seca.

Tabela 4.15 - Resultado dos ensaios de penetrabilidade de íons cloreto dos corpos-de-prova das placas e dos testemunhos extraídos dos túneis.

CP	TEMPO (h:min)													Carga Q	Carga Q	Média	Média por Sistema de Projeção	Penetrabilidade		
amostras	00:00	00:30	01:00	01:30	02:00	02:30	03:00	03:30	04:00	04:30	05:00	05:30	06:00	(Coulomb)	ajustada	(Placa)		Por placa	Por Sistema	
1 - VU															(Coulomb)		VU	ou CPs extraídos	de Projeção	
1	101,7	120,6	131,5	138,3	147,9	152,5	157,5	159,9	163,5	168,2	172,7	175,5	178,3	3291	2050	2669	2101	MODE-RADA	MODE-RADA	
2	108,8	128,3	141,6	150,0	160,7	166,7	173,8	176,2	181,3	189,6	194,6	199,6	200,0	3630	2262					
3	147,0	177,5	200,0	230,0	250,0	260,0	280,0	300,0	320,0	330,0	340,0	350,0	370,0	5933	3696					
2 - VS																				
1	35,7	42,6	48,4	53,0	57,3	60,2	63,2	65,3	67,7	69,8	71,6	73,3	76,9	1312	817	1191				BAIXA
2	45,4	52,4	57,8	61,8	65,5	68,5	72,0	74,7	77,3	80,8	83,7	85,4	89,1	1525	950					
3	85,2	97,4	107,3	115,3	124,6	131,9	139,6	144,9	149,3	155,6	158,9	161,5	164,9	2900	1807					
3 - VU																				
1	90,5	103,0	113,0	119,6	123,8	127,3	131,5	134,4	137,0	138,6	141,1	143,1	144,8	2754	1716	1669				BAIXA
2	92,3	104,0	114,9	123,0	129,2	134,7	139,4	144,2	148,2	151,4	153,7	154,7	157,5	2920	1819					
3	78,9	87,0	94,7	99,9	104,4	108,4	111,8	115,6	118,2	120,7	122,9	125,1	126,2	2360	1471					
4 - VS																	VS			
1	102,5	117,4	131,3	138,5	145,6	149,6	153,6	157,9	159,0	160,0	160,2	162,9	164,9	3185	1985	1963	1945	BAIXA	BAIXA	
2	99,8	114,1	129,8	141,4	149,4	156,4	162,6	168,1	171,1	172,1	174,1	175,5	178,4	3337	2079					
3	94,5	104,6	113,8	121,9	129,0	135,7	140,0	145,2	148,7	152,1	154,6	156,0	157,5	2930	1825					
5 - VU																				
1	111,0	123,4	140,4	154,0	163,6	172,7	180,2	185,3	191,7	194,3	198,1	200,0	200,0	3707	2309	1964				BAIXA
2	80,0	98,8	110,3	117,8	124,9	130,6	135,3	139,3	142,5	143,7	146,6	148,0	149,6	2795	1741					
3	77,0	104,2	116,9	123,7	132,1	138,1	143,1	144,3	150,1	153,6	156,5	159,1	160,9	2953	1840					

6 - VS																		
1	96,1	138,8	161,5	180,2	193,2	210,0	220,0	230,0	250,0	260,0	270,0	290,0	300,0	4683	2918	2680		MODERADA
2	98,3	140,1	162,3	176,0	186,1	196,3	200,0	210,0	220,0	230,0	240,0	260,0	270,0	4329	2697			
3	86,7	129,6	150,8	157,8	163,4	178,7	183,0	190,1	200,0	210,0	220,0	220,0	230,0	3891	2424			
T1- VU														(Testemunhos extraídos)				
1	133,5	159,1	185,2	210,0	240,0	250,0	270,0	290,0	310,0	340,0	350,0	360,0	370,0	5789	3607	3437	3437	MODE-RADA
2	143,7	166,8	197,1	230,0	250,0	270,0	280,0	300,0	320,0	340,0	360,0	370,0	380,0	6022	3752			
3	121,9	136,6	156,7	172,9	191,2	200,0	210,0	230,0	240,0	270,0	290,0	310,0	330,0	4740	2953			
T2 - VS																		
1	180,9	220,0	260,0	310,0	350,0	390,0	400,0	440,0	470,0	500,0	530,0	580,0	600,0	8713	5429	3776	3776	MODE-RADA
2	136,6	155,7	179,7	200,0	220,0	230,0	230,0	250,0	260,0	270,0	280,0	290,0	300,0	5011	3122			
3	127,1	142,6	162,7	180,5	198,2	210,0	210,0	220,0	230,0	240,0	240,0	250,0	260,0	4460	2779			

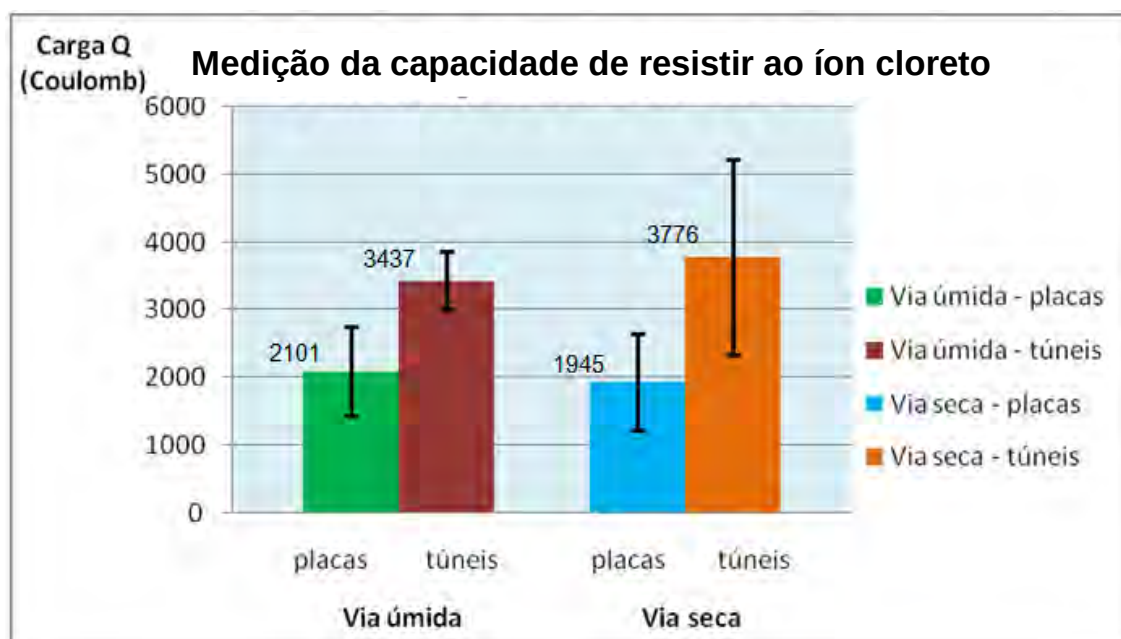


Figura 4.14 – Penetrabilidade de íons cloreto, comparando os sistemas via seca e via úmida, para os concretos projetados nas placas e extraídos dos túneis.

Os resultados dos ensaios de penetrabilidade de íons cloreto ou resistência do concreto à penetração dos íons cloreto foram analisados a partir de enfoques distintos, primeiramente apresenta-se uma análise de acordo com os critérios de classificação quanto aos riscos de penetração de íons cloreto definidos pela ASTM C 1202:2009 (ASTM, 2009), conforme mostra a Tabela 4.16, posteriormente discute-se os resultados com base em estudo comparativo dos sistemas de projeção e do modo de extração dos corpos-de-prova.

Tabela 4.16 – Correlação do risco de penetrabilidade de íons cloreto no concreto com a carga elétrica passante, conforme ASTM C 1202:1992 (ASTM, 2009).

CARGA PASSANTE (Coulomb)	PENETRABILIDADE DE CLORETOS
>4.0000	Alta
2.000 a 4.000	Moderada
1.000 a 2.000	Baixa
100 a 1.000	Muito Baixa
< 100	Desprezível

A classificação do sistema via úmida conforme as Tabelas 4.15 e 4.16, de penetrabilidade de cloretos para as placas é moderada e para o sistema via seca para as placas é baixa, sendo que para o sistemas via úmida e via seca para os túneis estão classificados como moderada. A carga passante para o sistema de projeção via úmida das placas está em torno de 40 % a menos em relação à dos túneis e para o sistema via seca as placas está em torno de 50 % a menos em relação à dos túneis. O desempenho das placas foi melhor que o resultado do túnel quanto ao parâmetro de durabilidade de penetração de íons cloreto. Os sistemas via úmida e via seca tiveram comportamentos similares quanto a penetração de íons cloreto, determinados pela carga passante entre os eletrodos dos ensaios.

É importante salientar que a absorção capilar só pode ocorrer em concretos não saturados e, por isso, é o principal mecanismo de penetração de cloretos no concreto quando a estrutura está submetida a ciclos de molhagem e secagem. No período de molhagem, a superfície absorve a solução de cloreto rapidamente e no período de secagem a água evapora e o sal se mantém no concreto. Com os ciclos subseqüentes há o aumento da concentração de cloretos na solução dos poros do concreto e, conforme a umidade relativa do ambiente, o sal reduz a evaporação, aumentando a umidade no interior do concreto (KROPP, 1995 *apud* MENDES, 2009).

Stanish (2000 *apud* MENDES, 2009) afirma que absorção capilar não é por si só suficiente para transportar os cloretos ao nível da armadura do concreto, exceto nos casos onde o concreto utilizado seja de qualidade extremamente baixa e o cobrimento seja pequeno. No entanto, a absorção capilar pode transportar mais rapidamente os cloretos até determinadas profundidades e reduzir a distância que eles têm que penetrar por difusão para alcançar a armadura. A Figura 4.15 ilustra bem qual é a interferência do mecanismo de absorção capilar no transporte de íons, em profundidade, na camada superficial do concreto.

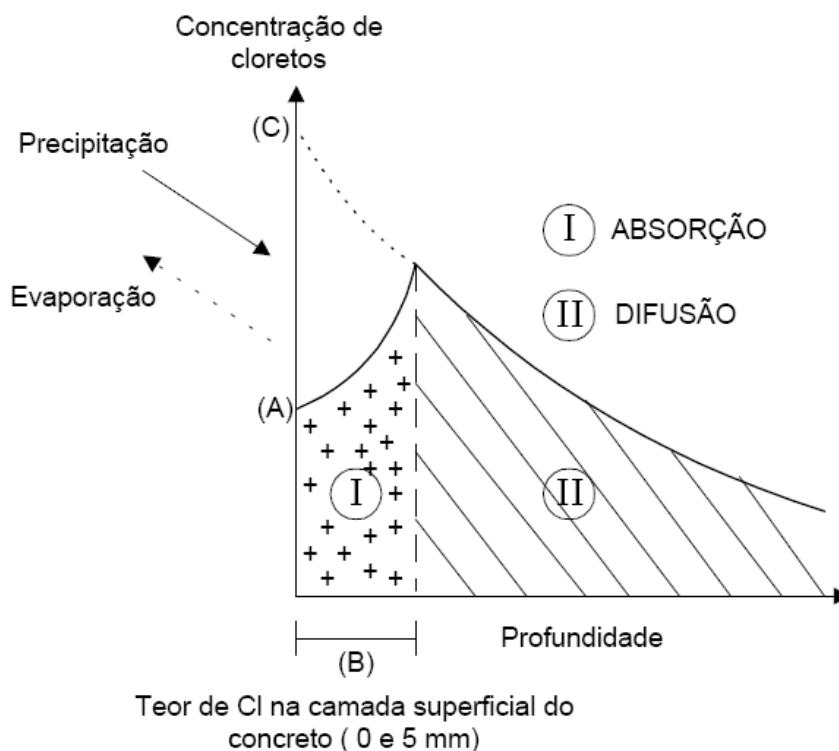


Figura 4.15 – Formas de penetração de cloretos em concreto (Adaptado de BORGES *et al.*; ANDRADE, 2001 *apud* MENDES, 2009).

A condutância elétrica de amostras de concreto representa o coeficiente de difusão ou difusividade, que é o índice que mede a habilidade do concreto em resistir à penetração de cloretos, sendo, portanto um parâmetro muito importante para prever a durabilidade do concreto (MENDES, 2009).

Os concretos via úmida e via seca obtiveram resultados semelhantes, para as placas ambos obtiveram classificação como moderada pela ASTM C 1202:1992 (ASTM, 2009) (Tabela 4.16), com valores muito próximos conforme Tabela 4.15 e Figura 4.14, mesmo com a padronização da umidade da estrutura interna do concreto. Para o túnel os resultados também são muito próximos (os valores apresentados ficam próximos a 2.000 C), para o sistema via seca obteve classificação como baixa e para o sistema via úmida como moderada pela ASTM C 1202:1992 (ASTM, 2009) (Tabela 4.16), mas de acordo com a Figura 4.14, levando em consideração os desvios padrões encontrados, os resultados no sistema via úmida e via seca estão no mesmo intervalo comum, ficando os resultados muito semelhantes. Um dos prováveis motivos é que durante o ensaio a diferença de potencial aplicada é muito alta, de 60 V, podendo alterar o valor real da carga passante, inclusive aumentando fatores como aquecimento do corpo-de-prova e a resistividade do concreto.

De acordo com Calçada (2004 *apud* MENDES, 2009), um dos principais questionamentos, referentes a este ensaio é o fato de que, sob a ação de um campo elétrico,

não só os cloretos, mas todos os íons em solução se movimentam e, portanto, a carga elétrica medida não diz respeito somente a cloretos. Além disso, a carga passante no corpo-de-prova não considera que uma parcela dos cloretos que penetrar no concreto será fixada pelos produtos de hidratação do cimento. Sendo questionado também quanto à voltagem aplicada, que é muito elevada, produzindo o aquecimento do corpo-de-prova por efeito Joule e isto altera a mobilidade dos íons, bem como a resistividade do concreto, tornando os valores lidos irreais.

Castellote (1997 *apud* MENDES, 2009) fez um estudo aprofundado da influência de diferentes parâmetros experimentais, nomeadamente das alterações na microestrutura e na interação dos cloretos com a matriz cimentícia resultante da aplicação da corrente elétrica, do qual se concluiu que há efetivamente uma alteração da microestrutura do concreto em particular dos poros capilares de menor dimensão devido às alterações iônicas na solução intersticial.

Prudêncio Jr. *et al.* (1999 *apud* MENDES, 2009) constataram que o ensaio prescrito pela ASTM C 1202:2009 mede propriedades elétricas do concreto e não sua habilidade de resistir à penetração dos cloretos, quando observou-se que carga total passante no corpo-de-prova se correlaciona bem com a condutividade elétrica do concreto e com a corrente inicial medida no ensaio.

4.1.4 Parâmetros associados à durabilidade

A título de referência, em termos de parâmetros associados à durabilidade, neste programa experimental, adota-se a realização da comparação de alguns dos resultados de requisitos observados, com os índices já encontrados como parâmetros de relevância para o bom desempenho de durabilidade do concreto projetado, nos túneis do metrô de São Paulo (PALERMO, 1997).

Conforme Palermo (1997), para o concreto projetado sugerem-se os seguintes requisitos abaixo apresentados para túneis rodo-ferroviários:

- Resistência à compressão (NBR 5739:1994) (ABNT, 1994): $f_{ck} \geq 20$ MPa, calculado segundo os critérios de projeto de túneis do trecho 01 da Ferrovia Norte-Sul e da norma NBR 12655:1996 (ABNT, 1996);
- Absorção de água por imersão e fervura (NBR 9778:1987) (ABNT, 1987) $\leq 8\%$

- Massa específica aparente seca (NBR 9778:1987) (ABNT, 1987) $\geq$ (densidade teórica do traço – 100 kg/dm³).
- Penetração de água sob pressão (NBR 10787:1994) (ABNT, 1994) $\leq$ 50 mm;
- Absorção por capilaridade (NBR 9779:1995) (ABNT, 1995), o limite de aceitação dado pelo coeficiente de absorção capilar é para um volume de vazios permeáveis $< 17\%$;
- Resistividade elétrica – volumétrica e superficial (NBR 9204:1985 (ABNT, 1985) e/ou ASTM G57:2006 (ASTM, 2006)):
 - revestimento de primeira fase $\geq 10000 \Omega \cdot \text{cm}$;
 - revestimento de segunda fase $\geq 25000 \Omega \cdot \text{cm}$. Este valor deverá ser de, no mínimo, 60 000 $\Omega \cdot \text{cm}$ em obras metroviárias ou ferroviárias que empreguem sistema de tração de corrente contínua.

4.1.5 Discussão final dos resultados

Neste item apresenta-se uma análise global do experimento frente às condições do material concreto projetado nos sistemas de projeção via seca e via úmida, para a discussão final dos resultados. A Tabela 4.17 mostra a comparação entre os resultados das placas de controle e os testemunhos extraídos dos túneis para os dois sistemas de projeção, mostrando a evolução das perdas de propriedades de resistência mecânica do concreto projetado e de propriedades associadas à durabilidade do concreto projetado.

Tabela 4.17 – Comparação entre os resultados das placas de controle e os testemunhos extraídos dos túneis para os sistemas via úmida e via seca (%).

Ensaio associado à durabilidade e resistência mecânica	Via úmida**		Via seca**	
	Placas	Túnel	Placas	Túnel
Resistência à compressão aos 28 dias (MPa)	↓	50%	↓	20%
Absorção de água por capilaridade – H (cm)	↓	15%	não alterou* ↔	
Absorção de água por capilaridade (g/cm ²)	↑	15%	↑	15%
Absorção de água por imersão (%)	↑	60%	↑	15%
Absorção de água por imersão – índice de vazios (%)	↑	60%	↑	20%
Penetração de água sob pressão – H (cm)	↓	10%	não alterou* ↔	
Resistividade elétrica superficial (kΩ.cm)	↓	50%	↓	70%
Penetrabilidade de íons cloreto (C)	↑	60%	↑	95%

* o resultado foi considerado inalterado, quando a diferença for menor que 10%.

** todos os resultados compararam placas com túnel, o resultado é a partir das placas em relação aos túneis, com porcentagem aproximada.

Os resultados deste programa experimental, comparando as placas com os testemunhos extraídos conforme a Tabela 4.17, mostraram grandes diferenças dos resultados dos corpos-de-prova das placas de controle e dos testemunhos (reais) da estrutura, devidas à influência das condições ambientais do túnel. As placas obtidas pela projeção não “espelham” a realidade dos testemunhos extraídos do túnel e não constituem uma amostra representativa do concreto efetivamente projetado na estrutura do túnel, principalmente em função das condições de alta umidade (água livre presente) no substrato de projeção, ou seja, nestas condições é indicado obter-se, além das placas, testemunhos extraídos dos túneis rotineiramente para comparação com os resultados das placas e para o controle tecnológico mais eficaz da obra.

A partir da análise dos resultados obtidos neste estudo experimental, elaborado com concreto projetado via seca e via úmida, verificou-se um ganho sensível nos parâmetros de durabilidade para o sistema via seca em relação ao sistema via úmida, conforme a Tabela 4.18, tanto no que se refere às propriedades associadas à durabilidade do concreto projetado, quanto no que se refere à resistência mecânica. No entanto, o incremento dos parâmetros se mostrou muito mais expressivo quando da comparação dos dois sistemas nos testemunhos extraídos dos túneis, notadamente por causa da grande quantidade de água presente no

momento da projeção, levando-se em conta que o concreto projetado via seca pode melhor se adequar às condições ambientais do substrato do túnel.

Tabela 4.18 – Comparação entre os resultados dos sistemas via úmida e via seca (%).

Ensaio associado à durabilidade e resistência mecânica	Placas**		Túnel**	
	Via úmida	Via seca	Via úmida	Via seca
Resistência à compressão aos 28 dias (MPa)	não alterou*		↑ 55%	
Absorção de água por capilaridade – H (cm)	↓ 10%		não alterou*	
Absorção de água por capilaridade (g/cm ²)	↓ 15%		↓ 20%	
Absorção de água por imersão (%)	não alterou*		↓ 75%	
Absorção de água por imersão – índice de vazios (%)	↓ 25%		não alterou*	
Penetração de água sob pressão – H (cm)	não alterou*		não alterou*	
Resistividade elétrica superficial (kΩ.cm)	↑ 10%		↑ 25%	
Penetrabilidade de íons cloreto (C)	não alterou*		não alterou*	

* o resultado foi considerado inalterado, quando a diferença for menor do que 10%.

** todos os resultados comparam placas com placas e túnel com túnel, sendo o resultado expresso a partir da comparação do sistema via úmida em relação ao sistema via seca, com porcentagem aproximada.

Ao longo de todo o experimento realizado foi possível constatar que em todas as propriedades avaliadas o sistema de projeção via úmida apresentou resultados inferiores em relação ao sistema de projeção via seca, para traços de partidas similares, umidades padronizadas da estrutura interna dos corpos-de-prova, mesmas condições ambientais e mesmos operários (mangoteiros) para as projeções deste programa experimental. Muito provavelmente, como comentado anteriormente, essa tendência é causada pela água livre da base de projeção, que em contato com o concreto projetado do sistema via úmida, é incorporada ao concreto, aumentando assim a relação a/c (água/aglomerante), aumentando sua permeabilidade e diminuindo a sua resistência à compressão. O concreto já plástico do sistema via úmida, possuindo adição de plastificante e superplastificante, e projetado com alta velocidade de impacto na lâmina de água no substrato, leva a crer que a água se incorpora rapidamente ao material, alterando importantes propriedades associadas à durabilidade do concreto projetado. No sistema via seca, o controle da inserção da água na mistura é realizado pelo mangoteiro, que na presença de água livre na base de projeção, pela sua percepção e adequação à trabalhabilidade e diminuição da reflexão, diminui a quantidade de água,

favorecendo o teor de umidade na mistura para que em contato com a água livre no substrato esta seja incorporada ao concreto, obtendo-se assim uma umidade ótima para a compactação em sucessivas camadas de projeção. Isto adéqua melhor a relação a/c, já que a mistura possuía uma consistência inicial mais seca, favorecendo a durabilidade do concreto e reduzindo as perdas por reflexão, enfim, produzindo melhores resultados frente ao sistema via úmida.

A durabilidade do concreto é um dos mais importantes requisitos do concreto, pois é essencial que ele seja capaz de resistir às condições para as quais foi projetado durante toda vida útil prevista (NEVILLE; 1997).

A permeabilidade a líquidos sob pressão será mais pronunciada quanto maior for o diâmetro dos poros capilares e quanto maior for a comunicação entre eles, acentuada por meio de relações água/cimento relativamente altas (acima de 0,6, por exemplo) (Veja Figura 4.16). Por sua vez, à medida que se reduz a relação a/c, vai se obtendo estruturas cada vez mais compactas, com poros capilares mais “estreitos”. Isto favorece uma maior altura de ascensão capilar, pelas forças de sucção aumentadas quando da redução no diâmetro dos capilares, mas é desejável que isso aconteça porque diminui de fato a absorção total e a permeabilidade. Com a estrutura de pasta mais compacta, a despeito do favorecimento no acréscimo das pressões capilares, haverá sempre uma queda significativa na porosidade capilar e na interconexão ou comunicação entre os poros (CASCUDO, 1997). Em obras de túneis a serviço, esta característica associada à durabilidade é muito importante ao desempenho e a vida útil dos túneis. A durabilidade das estruturas de um túnel está relacionado a uma grande necessidade de impermeabilidade à água do material concreto projetado. Os principais mecanismos de deterioração do concreto de obras subterrâneas são explicados pelos processos de penetração de agentes agressivos no interior do concreto conduzido pelas águas dos lençóis subterrâneos através da permeabilidade do concreto.

Pelas considerações teóricas de Power (1951 *apud* PALERMO, 1987) é possível construir o gráfico da Figura 4.16, que apresenta uma ponderação teórica da importância da cura no fechamento da porosidade do concreto e a relação de aumento de porosidade capilar com o aumento da relação a/c. Os processos construtivos que permitem o emprego de fator a/c inferior a 0,35, como é o caso do concreto projetado via seca, poderiam ter o seu tempo de cura sensivelmente minimizado para se alcançar a durabilidade, sendo assim isto explicaria também o bom desempenho do sistema de projeção via seca em relação ao sistema de projeção via úmida neste programa experimental.

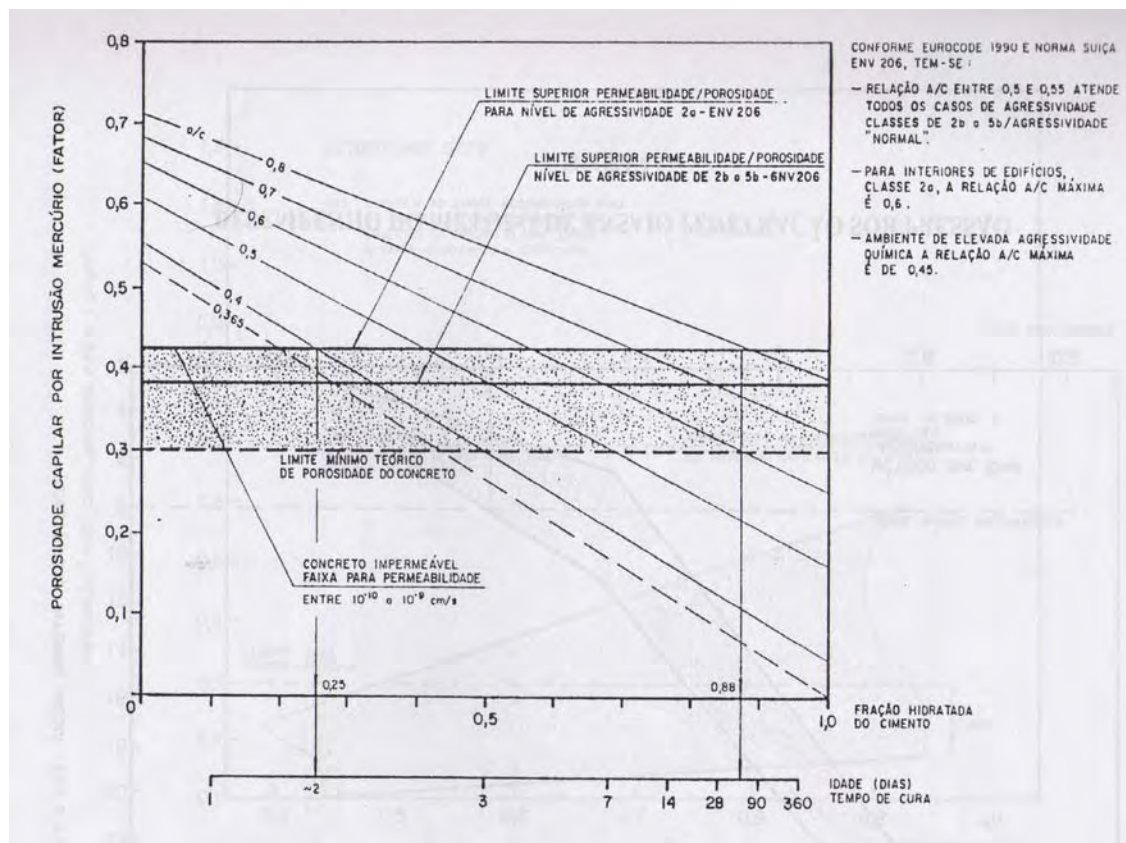


Figura 4.16 – Nível de porosidade do concreto em função da fração hidratada do cimento e o tempo de cura do concreto projetado (PALERMO, 1997). Detalhe: curvas de relação a/c ascendentes correlacionadas com o aumento da porosidade capilar.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir da análise dos resultados obtidos neste programa experimental, elaborado com concreto projetado via seca e via úmida, utilizando-se corpos-de-prova extraídos das placas de controle e da estrutura dos túneis da Ferrovia Norte-Sul, e que abordou o estudo de propriedades associadas à durabilidade, bem como a avaliação da resistência mecânica, pôde-se obter as conclusões descritas na seqüência, para as variáveis, condições de ensaio e materiais adotados.

Para traços de partida distintos entre os concretos de projeção no sistema via úmida e via seca, mesmas condições de projeção ambientais, equipamentos e mão-de-obra, mesmas condições de umidade e temperatura nos ensaios (condições padronizadas), houve um decréscimo em torno de 50% na resistência à compressão aos 28 dias, das placas em relação ao túnel, para os resultados de resistência à compressão axial do sistema via úmida; para o sistema via seca houve um decréscimo em torno de 20%, das placas em relação ao túnel. Quando se comparam os dois sistemas de projeção, os melhores resultados obtidos são para o sistema via seca em relação ao sistema via úmida, sendo expressivamente mais vantajoso o seu uso para as condições da obra e materiais escolhidos de construção da Ferrovia Norte-Sul, trecho 01.

As reconstituições de traço nos sistema via úmida e via seca denotaram algumas alterações entre os traços originais (de partida) e os projetados, de maneira que o concreto via úmida resultou em uma mistura um pouco mais rica em cimento e o sistema via seca se apresentou mais pobre após a projeção. Estes resultados mostraram que os traços obtidos após a projeção, para os dois sistemas, foram praticamente iguais quanto ao proporcionamento cimento:agregado, a saber: 1 : 4,0 (cimento:agregados) como traço de valor médio. O consumo médio de cimento foi de 416 kg/m³ para os dois sistemas de projeção. Apesar de inesperado, para o sistema via úmida, observou-se uma alteração no traço, onde o traço de partida era 1 : 4,59 e mudou para 1 : 4,00, portanto tendo ficado mais “rico” no teor de cimento. Para o sistema de projeção via seca, observou-se que o traço de partida passou de

1 : 3,83 para 1 : 4,00, indicando que o traço ficou mais “pobre” quanto ao consumo de cimento.

A reflexão medida para o sistema via úmida foi significativamente mais alta do que aquela verificada para o sistema via seca (cerca de 25% para o via úmida contra 15% para o via seca). Mesmo assim, as alterações de traço, como visto nas reconstituições, não foram tão pronunciadas. Deduz-se, então, que, tendo em vista a alta reflexão do concreto via úmida, houve para este concreto uma perda igualitária de material constituinte, ou seja, perdeu-se muita pasta de cimento (tendo sido notória essa perda, como fuga de nata em meio à elevada umidade do substrato), mas se constatou também uma perda muito elevada de agregados, haja vista que a mistura projetada ficou um pouco mais rica em cimento. Para o sistema via seca, certamente perdeu-se também pasta e agregado, pois se mediu uma reflexão da ordem de 15%; contudo, a “poeira” de material fino, principalmente cimento, nas etapas iniciais de projeção (em que a vazão de água era menor, para ajustar a melhor projeção do concreto, tendo em vista a alta umidade do substrato), pode ajudar a explicar porque a mistura resultou um pouco mais pobre em cimento em relação ao proporcionamento previsto inicialmente.

Para praticamente todas as propriedades avaliadas associadas à durabilidade, assim como em relação à resistência à compressão, os resultados das placas de controle foram significativamente melhores dos que os resultados dos túneis, assim como os resultados do sistema via seca foram qualitativamente melhores do que os resultados do sistema via úmida. A explicação mais provável para esse quadro está relacionada com a presença de elevada umidade no substrato de projeção no Túnel. A água livre provavelmente se incorpora ao concreto projetado no sistema via úmida, aumentando assim a relação água/cimento e, com isso, aumentando a porosidade, a permeabilidade, a absorção de água e a penetrabilidade de cloretos, e reduzindo a resistência à compressão e a resistividade elétrica do concreto. Para o sistema via seca, tendo em vista a presença de umidade no substrato, o mangoteiro tem a possibilidade de regular a água no bico de projeção, diminuindo a sua entrada, favorecendo com isso o ajuste de água da mistura. Assim, é possível a obtenção de uma umidade ótima de compactação, melhorando as condições de pega, a própria compactação e a resistência mecânica, além da durabilidade, com menores índices de reflexão, que foi o que efetivamente se viu no presente trabalho.

O sistema via seca obteve melhor comportamento global em comparação ao sistema via úmida para o parâmetro de altura de ascensão capilar e para a absorção de água no ensaio de absorção por capilaridade. Como dito anteriormente, a incorporação de água livre presente no substrato de projeção no concreto projetado certamente ocasionou para o sistema via

úmida uma modificação da relação a/c entre o proporcionamento de partida e o proporcionamento presente no túnel, aumentando a sua porosidade e a interconexão de poros, o que se refletiu nos resultados de absorção por capilaridade.

A exigência de elevadas resistências a baixas idades para o caso de revestimento de túneis, acarretam a inserção no sistema dos aditivos aceleradores de pega e endurecimento que têm forte influência na resistência final e no nível de compactação do concreto projetado. A adição do aditivo acelerador de pega ao concreto projetado é regulada pelo mangoteiro no bico de projeção tanto para o sistema via úmida quanto para o sistema via seca, o que provavelmente acarretou também um melhor desempenho do sistema via seca em relação ao sistema via úmida, pois com a maior reflexão (perdas e deslocamentos) do sistema via úmida pela presença de água livre no substrato de projeção, o mangoteiro adiciona maior quantidade de aditivo acelerador de pega para um endurecimento mais rápido do concreto para tentar diminuir a reflexão, o que não acontece no sistema via seca.

Também para os ensaios de absorção de água por imersão, tanto para o índice de absorção de água após imersão e fervura, quanto no índice de vazio, o sistema via seca obteve melhores resultados do que o sistema via úmida. A classificação dos concretos quanto à absorção de água, pelos critérios adotados na literatura empregados neste trabalho, ressalta as placas do sistema via úmida como de qualidade boa e os testemunhos dos túneis como de qualidade ruim. Os resultados do sistema via seca, em ambos os casos, classificam os corpos-de-prova como de qualidade boa para a absorção por imersão.

No ensaio de penetração de água sob pressão, a análise comparativa não apresentou diferenciações consideráveis entre os sistemas de projeção via úmida e via seca. Os resultados de penetração de água sob pressão apresentaram para os sistemas via úmida e via seca, tanto para as placas quanto para os túneis, valores muito próximos, em torno de 2,5 cm de penetração. Este valor é menor do que o indicado por Palermo (1997) como parâmetro de durabilidade do metrô de São Paulo, cujo requisito previa um valor menor ou igual a 5,0 cm de profundidade de penetração.

Nos resultados dos ensaios de resistividade elétrica superficial, notou-se que o sistema via seca obteve melhores resultados do que o sistema via úmida e que os corpos-de-prova advindos das placas obtiveram melhor comportamento em relação aos extraídos dos túneis. O valor médio de resistividade das placas apresentou-se 50% superior àquele encontrado para os túneis, sendo que para os túneis o valor ficou abaixo de 10 k Ω .cm, indicando alta probabilidade de corrosão das armaduras, conforme os critérios do CEB 192 descritos por Cascudo (1997).

Aplicando a classificação da ASTM C 1202 (ASTM, 2009) quanto à penetrabilidade de cloretos, para as placas do sistema via úmida, obteve-se penetrabilidade moderada e para as placas do sistema via seca, penetrabilidade baixa. Para os túneis, tanto para o sistema via seca quanto para o sistema via úmida, a penetrabilidade de cloretos resultante foi moderada. Portanto, o comportamento das placas foi melhor do que o do túnel e os sistemas via úmida e via seca tiveram comportamentos semelhantes quanto à penetração de íons cloreto.

Como considerações finais, pode-se dizer que na obra da Ferrovia Norte-Sul, trecho 01, foram encontrados condicionantes *suigeneris* que modificaram o índice de reflexão e os resultados de durabilidade do concreto projetado, em geral. Um dos principais fatores foi a presença excessiva de umidade nos dois substratos de projeção (maciços rochosos e de solos nos dois túneis do trecho), ocorrendo em virtude da presença de água advinda do lençol freático acentuado no túnel 01, que é região de contribuição e da nascente de um dos principais corpos hídricos da cidade de Anápolis-GO: o Córrego das Antas.

Em linhas gerais, portanto, a vantagem do investimento em processos de otimização e pesquisa de adequação do sistema de projeção ideal e de equipamentos na obra, conforme os requisitos de projeto e ambientais presentes nos túneis (características peculiares a cada caso) e intrínsecos aos parâmetros de durabilidade requeridos para esse tipo de estrutura. As placas de controle obtidas pela projeção não “espelharam” a realidade dos testemunhos extraídos do túnel e, dessa forma, não constituíram uma amostra representativa do concreto projetado na estrutura do túnel, para as condições de alta umidade (água livre presente) no substrato de projeção, ou seja, nestas condições é indicado obter-se além das placas, testemunhos extraídos dos túneis rotineiramente para a comparação com os resultados das placas e para um controle tecnológico mais eficaz da obra.

5.2 SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

Como recomendação para estudos futuros, sugere-se um trabalho amplo que possa correlacionar o comportamento do concreto projetado (para os dois sistemas de projeção) com cada tipo de solo e/ou rocha, para o avanço geotécnico e geológico dos túneis NATM em execução.

A avaliação da retração para o concreto projetado, comparando as variáveis de tipos de sistema de projeção e modo de retirada dos corpos-de-prova (das placas e dos túneis), também

deve merecer futuras pesquisas, por sua grande importância em obras de estruturas contínuas, como é o caso dos túneis.

Como sugestão para futuras pesquisas, recomenda-se realizar um estudo das propriedades de módulo de elasticidade, efeito Rush e deformação lenta para o concreto projetado, comparando os dois sistemas de projeção de via seca e via úmida, retirando os corpos-de-prova das placas de controle e de testemunhos extraídos dos túneis. O avanço no conhecimento desses parâmetros traria benefícios para o setor de dimensionamento dos revestimentos e para a previsão dos coeficientes de segurança dos túneis, onde se poderia minimizar custos, investir na melhoria dos coeficientes de segurança e na durabilidade da obra.

Neste estudo foi observado que com a adição total da quantidade indicada na dosagem do plastificante, na central de dosagem da concreteira, de onde se partiam os caminhões betoneira para alimentar a bomba injetora do sistema via úmida no Túnel 1 da Ferrovia Norte-Sul, havia grandes deslocamentos, colocando as vidas dos operários em risco, ao passo que quando se dosava metade da quantidade na central dosadora e a outra metade no emboque do Túnel 1, junto à bomba injetora, não ocorriam grandes deslocamentos, somente as reflexões no sistema via úmida. Como recomendação para estudos futuros, sugere-se ainda um trabalho que de alguma forma possa correlacionar as dosagens (a quantificação) dos aditivos plastificante, superplastificante e acelerador de pega para o sistema via úmida e somente o aditivo acelerador de pega para o sistema via seca, com a incidência maior ou menor da reflexão e com os principais parâmetros de durabilidade do concreto projetado.

ANEXOS

ANEXO A

Tabela e laudos técnicos obtidos através da projeção dos túneis
e da produção da Ferrovia Norte-Sul – lote 01- Anápolis-GO
Laudo de Ensaio de Reconstituição de Traço do IPT-SP

Tabela A 1 – Data das moldagens das placas

Placa Nº	Sistema de Projeção	Data da moldagem
01	via úmida	16/07/2009
02	via seca	17/07/2009
03	via úmida	18/07/2009
04	via seca	23/07/2009
05	via seca	25/07/2009
06	via úmida	28/07/2009

DOSAGEM EXPERIMENTAL DO CONCRETO

Certificado nº: 01/2009
Obra: Túneis

Interessado: Queiroz Galvão S/A
Local: Anápolis - Go

Fck	Sd	Fck28	ADENSAM.	SLUMP	A/C	A%	MÊS	ANO
20 Mpa	4	26,6	Projetado	18 ± 2	0,45		Nov.	2008

MATERIAL	TIPO	PROCEDÊNCIA	MASSA ESPEC.	MASSA UNIT.	Ø MÁXIMO	MODULO DE FINURA	%
CIMENTO	CPII - F	Cezarina - Go	3,15	1,42			
AREIA	Média	Pedreira Anhanguera	2,674	1,524	4,8	2,74	51
BRITA	Nº 0	Pedreira Anhanguera	2,668	1,446	9,5	1,47	49

TRAÇO UNITÁRIO EM PESO (1:a:p:A/C)							TRAÇO (1:M)	
CIMENTO	AREIA	BRITA	SEIXO		A/C	ADITIVO	CIMENTO	AGREGADOS
1	2,34	2,25	**		0,45		1	4,59

DOSAGEM CALCULADA : PESO E VOLUME

MATERIAL	PROCEDÊNCIA	POR M³	
		dm³	KG
CIMENTO	CPII - F		400
AREIA	Média		936
BRITA	Nº 0		900
ADITIVO - 1	Plastificante Mastermix 390N		2,4 Lts
ADITIVO - 2	Superplastificante MC BAUCHEMIE (Muraplast FK 22)		5,3 Lts
ADITIVO - 3	Acelerador MC BAUCHEMIE (Centrament 640 rápido)		17,5 Lts
ÁGUA			180lts

RESISTÊNCIA DE ENSAIO (Mpa)			RESISTÊNCIA (Mpa)			PREVISTA	SLUMP	ARGAMASSA	CONCRETO
3 dias	7 dias	28 dias	3 dias	7 dias	28 dias		OBTITO	%	FRESCO (kg/m³)
30,9	34,9	47,1	13,6	18,6	26,6		21,0		

OBSERVAÇÕES:

Cálculos realizado com agregados secos, umidade zero.

Aditivo plastificante 2,4 l/m³ - Mastermix 390.

Aditivo superplastificante 5,3 l/m³ - MC BAUCHEMIE (Muraplast FK 22)

Aditivo acelerador 17,5 l/m³ - MC BAUCHEMIE (Centrament 640 rápido)

TECNOLOGISTA : _____ ENGENHEIRO : _____ APROVO : _____

Francisco de Souza Amorim
Engº Civil
CREA - 2488 D/CE

Francisco de Souza Amorim
Engº Civil
CREA - 2488 D/CE

Francisco de Souza Amorim
Engº Civil
CREA - 2488 D/CE



CONCRETO REDIMIX DO BRASIL

ESTUDO DE DOSAGEM

DATA

OBRA : FERROVIA NORTE SUL - ANÁPOLIS - GO

01/04/2008

TRAÇO : f _{ck} 20,0 MPa C/ BRITA 0			QUANTIDADES m³	QUANTIDADE ESTUDADA 0,035 m³
TIPO : CONCRETO PROJETADO				
DADOS DA COMPOSIÇÃO	CIMENTO	kg	450	15,75
	ÁGUA	l	203	7,105
	AREIA	kg	832	29,120
	BRITA NR 0	kg	830	29,050
	BRITA NR 1	kg		
	ADITIVO PLASTIFICANTE	l	2,7	0,0945
	ADITIVO SUPER PLASTIFICANTE	l	6,3	0,22
	ADITIVO ACELERADOR	l	22,5	0,787
PROPRIEDADES DO CONCRETO	RELAÇÃO A/C		0,45	
	ABATIMENTO INICIAL	(mm)	30 ± 10	15
	ABATIMENTO FINAL	(mm)	180 ± 20	220
RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO MPa	12 HORAS		10,0	6
	3 DIAS			
	7 DIAS		18,0	20,9/19,7
	28 DIAS		25,0	

MATERIAIS	PRODUTOR FABRICANTE	CARACTERÍSTICAS
CIMENTO	CIMPOR	CPIIF - 32 RC28=50,0 Mpa
AREIA	PEDREIRA ANHANGUERA	Ø MAX 4,8mm MF=3,05
BRITA NR 0	PEDREIRA ANHANGUERA	Ø MAX 12,5mm MF=5,90
BRITA NR 1		
ADITIVO PLASTIFICANTE	BASF	MASTERMIX - 390N
ADITIVO SUPER PLASTIFICANTE	BASF	RHEOBUILD 1000B
ADITIVO ACELERADOR	BASF	MEYCO SA 160

RESPONSÁVEL
Engº LUIZ CARLOS GAUTIER

Parecer

Receber

Aprovado
em 12/08/2008

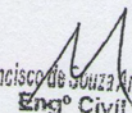
Francisco de Souza Amorim
Engº Civil
CREA - 2488 D/CE

TRAÇO PARA 1 m³ DE CONCRETO REVISÃO 1

CONCRETO PROJETADO VIA SECA

CIMENTO 450 Kg
AREIA 828 Kg
BRITA 0 895 Kg
ÁGUA 202 Litros
ADITIVO ACELERADOR (CENTRAMENT 640 RÁPIDO)..... 22,5 Litros/m³

Aprovado para execução dos túneis


Francisco de Souza Amorim
Eng^o Civil
CREA - 2488 D/CE

RELATÓRIO DE ENSAIO Nº 1 008 328-203

CLIENTE: UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS (UFG)

A/C Prof. Dr. Oswaldo Cascudo

Av. Universitária, 1.488 - Qd 86 - Lt área - Setor universitário

CEP 74605-220 - Goiânia - GO

NATUREZA DO TRABALHO: Análise química e reconstituição de traço

REFERÊNCIA: Carta UFG de 12.03.2010 e e-mail de 23.03.2010

1 MATERIAL

Dois (02) materiais recebidos no Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC) do IPT em 19.03.2010, referentes ao trabalho de mestrado "Concreto projetado: análise segundo parâmetros de durabilidade", do Programa de Pós-Graduação da Universidade Federal de Goiás desenvolvido pelo Eng. Antônio Davi Barbosa de Meneses, sob orientação do Prof. Dr. Oswaldo Cascudo. Na Tabela 1 estão descritas informações referentes à identificação dos materiais.

Tabela 1: Dados de identificação dos materiais

Identificação do Cliente	Dados do IPT	
	Massa (kg)	LMCC-Q N.º
"Concreto projetado (Amostra 01) - local de retirada: Túnel 01 - emboque sul - Anápolis - GO - Obra: Ferrovia Norte Sul - Sistema: via úmida - Data: 28.10.2009"	2,6	24.733
"Concreto projetado (Amostra 02) - local de retirada: Túnel 01 - emboque norte - Anápolis - GO - Obra: Ferrovia Norte Sul - Sistema: via seca - Data: 27.10.2009"	2,7	24.734

Atenção: Este é um arquivo digital para consulta. O original deste relatório de ensaio, impresso com a marca d'água IPT e devidamente assinado, é o único documento que possui validade legal.

Os resultados apresentados neste documento se aplicam somente ao item ensaiado ou calibrado.
Este documento não dá direito ao uso do nome ou da marca IPT, para quaisquer fins, sob pena de indenização.
A reprodução deste documento só poderá ser feita integralmente, sem nenhuma alteração.

2 MÉTODOS UTILIZADOS

Umidade, perda ao fogo, resíduo insolúvel, anidrido silícico, óxidos de ferro e alumínio (R_2O_3), óxido de cálcio (CaO), óxido de magnésio (MgO) e anidrido sulfúrico (SO_3): Procedimento CT-OBRAS-LMCC-Q-PE-042 "Concreto e Argamassa – Reconstituição de traço", com base em diretrizes gerais do método de ensaio apresentado em: QUARCIONI (1998)¹ e IPT (1940)².

Anidrido carbônico (CO_2): Procedimento CT-OBRAS-LMCC-Q-PE-011 "Determinação de anidrido carbônico (CO_2) por gasometria", com base em diretrizes gerais da NBR NM 20:2009.

3 RESULTADOS

3.1 Preparação de amostra

Os concretos foram moídos mecanicamente em britador de mandíbula e, a seguir, em moinho de disco até passantes totalmente em peneira ABNT N.º 20 (0,84mm).

3.2 Resultados de análise química

Os resultados obtidos nas análises químicas dos concretos, expressos na base original e na base não volátil (excluindo-se os teores de umidade e perda ao fogo), estão apresentados na Tabela 2.

¹ QUARCIONI, V. A. 1998. **Reconstituição de traço de argamassas simples e mistas de cimento Portland e cal hidratada**: atualização do método do IPT. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. 188p.

² Método "Reconstituição do traço do concreto". **Métodos de análises químicas adotados no IPT**. Boletim... São Paulo: IPT, setembro 1940, N.º 25, p. 75-84.

Tabela 2: Resultados de análise química

Determinações	Resultados, em %			
	"Concreto projetado (Amostra 01)" (LMCC-Q N.º 24.733)		"Concreto projetado (Amostra 02)" (LMCC-Q N.º 24.734)	
	Base original	Base não volátil	Base original	Base não volátil
Umidade	2,82	-	2,57	-
Perda ao fogo	6,23	-	6,47	-
Resíduo insolúvel	73,3	80,6	73,7	81,0
Anidrido silícico (SiO ₂)	3,29	3,62	3,22	3,54
Óxidos de ferro e alumínio (R ₂ O ₃)	1,76	1,94	1,49	1,64
Óxido de cálcio (CaO)	11,3	12,4	12,0	13,2
Óxido de magnésio (MgO)	0,19	0,21	0,19	0,21
Anidrido sulfúrico (SO ₃)	0,95	1,04	0,59	0,65
Anidrido carbônico (CO ₂)	2,29	-	2,35	-

3.3 Parâmetros calculados - reconstituição do traço

Os respectivos teores dos constituintes presentes e os traços prováveis do concreto ensaiado (Tabela 2) foram calculados a partir de três parâmetros químicos (RI, SiO₂ e CaO), considerando-se as seguintes premissas:

- os valores obtidos na base não volátil (Tabela 2);
- o resíduo insolúvel (RI) ser proveniente da fração agregado, de natureza silicosa (Tabela 2);
- o anidrido silícico (SiO₂) e o óxido de cálcio (CaO) serem provenientes do cimento;
- composição química de um cimento Portland tipo CP III, adotado como parâmetro de referência para os cálculos dos traços (Tabela 4).

Calculou-se para os três concretos os consumos de cimento, admitindo-se os seguintes parâmetros genéricos: massa específica do cimento: 2,96g/cm³; massa específica dos agregados: 2,65 g/cm³; massa específica da água: 1,00g/cm³; relação água/aglomerante: 0,5 e índice de vazios: 2%.

Tabela 3: Resultados de reconstituição de traço e consumo de cimento

Parâmetros calculados, em massa		Resultados	
		"Concreto projetado (Amostra 01)" (LMCC-Q N.º 24.733)	"Concreto projetado (Amostra 02)" (LMCC-Q N.º 24.734)
Cálculo do traço a partir do resíduo insolúvel (RI)	Cimento, em %	19,4	19,0
	Agregado, em %	80,6	81,0
	Traço (cimento : agregado)	1 : 4,2	1 : 4,3
	Consumo de cimento, em kg/m ³	407	400
Cálculo do traço a partir do anidrido silícico (SiO ₂)	Cimento, em %	20,8	20,4
	Agregado, em %	80,6	81,0
	Traço (cimento : agregado)	1 : 3,9	1 : 4,0
	Consumo de cimento, em kg/m ³	426	419
Cálculo do traço a partir do óxido de cálcio (CaO)	Cimento, em %	19,8	21,0
	Agregado, em %	80,6	81,0
	Traço (cimento : agregado)	1 : 4,1	1 : 3,9
	Consumo de cimento, em kg/m ³	413	428
Valores médios	Cimento, em %	20,0	20,1
	Agregado, em %	80,6	81,0
	Traço (cimento : agregado)	1 : 4,0	1 : 4,0
	Consumo de cimento, em kg/m³	416	416

A Tabela 4 apresenta os constituintes do cimento considerado nos cálculos dos traços dos concretos ensaiados.

Atenção: Este é um arquivo digital para consulta. O original deste relatório de ensaio, impresso com a marca d'água IPT e devidamente assinado, é o único documento que possui validade legal.

Os resultados apresentados neste documento se aplicam somente ao item ensaiado ou calibrado.
Este documento não dá direito ao uso do nome ou da marca IPT, para quaisquer fins, sob pena de indenização.
A reprodução deste documento só poderá ser feita integralmente, sem nenhuma alteração.

Tabela 4: Constituintes do cimento de referência

Cimento	Base original (%)					Base anidra (%)			
	PF	SiO ₂ -RI	CaO	MgO	SO ₃	SiO ₂	CaO	MgO	SO ₃
"CP II-F"	5,27	16,5	59,4	5,96	3,17	17,4	62,7	6,29	3,35

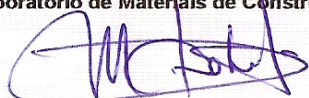
4 CONSIDERAÇÕES

O Boletim n.º 25/40, referido no item 2, indica que o valor médio do traço calculado por meio de três parâmetros (resíduo insolúvel, anidrido silícico e óxido de cálcio) deve ser tomado como valor característico do concreto ensaiado, desde que haja concordância entre os valores individuais calculados.

O mesmo documento indica que "na falta de concordância dos valores eles podem ser, às vezes, interpretados como valores limites". Ainda, "a concordância entre estes valores é um índice bastante seguro de que o concreto não contém materiais que interferem na reconstituição de traço e que o traço é merecedor de confiança".

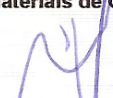
São Paulo, 28 de abril de 2010.

CENTRO DE TECNOLOGIA DE OBRAS DE
INFRA-ESTRUTURA
Laboratório de Materiais de Construção Civil



Quím. M^º Fabiano Ferreira Chotoli
Supervisor dos Ensaios
CRQ n^º 04243178 - RE. n^º 8488.9

CENTRO DE TECNOLOGIA DE OBRAS DE
INFRA-ESTRUTURA
Laboratório de Materiais de Construção Civil



Quím. Dr. Valdecir Angelo Quarcioni
Responsável pelo Laboratório
CRQ n^º 04212772 - RE. n^º 6741.3

EQUIPE TÉCNICA

Daniel Martins Aleixo - Químico

Erick Flávio Luiz Fonseca - Técnico Químico

José Francisco de Paula - Técnico Químico

ANEXO B

Fotos da obra dos túneis, da tentativa de extração dos testemunhos nos túneis,
dos corpos-de-prova da Ferrovia Norte-Sul – lote 01- Anápolis-GO



Figura B 1 – Emboque sul túnel 2 Ferrovia Norte Sul – trecho Anápolis - Porto Seco
Abril/2009



Figura B 2 – Emboque norte túnel 1 Ferrovia Norte Sul – trecho Anápolis - Porto Seco
Abril/2009



Figura B 3 – Emboque sul túnel 1 ferrovia norte sul – trecho Anápolis - Porto Seco
Abril/2009



Figura B 4 – Instalação da extratora na gaiola da escavadeira (tentativa de extração no túnel 1).



Figura B 5 – Corpos-de-prova retirados da placa – separados por sistema de projeção (via seca e via úmida).



Figura B 6 – Emboque norte túnel 1 ferrovia norte sul – trecho Anápolis - Porto Seco
Abril/2009



Figura B 7 – Emboque norte túnel 1 Ferrovia Norte sul – trecho Anápolis - Porto Seco
Abril/2009 – colocação de enfilagens



Figura B 8 – Emboque norte túnel 2 Ferrovia Norte sul – trecho Anápolis - Porto Seco
Abril/2009 – colocação de telas no túnel

ANEXO C

Fotos do corte de corpos-de-prova, realização de ensaios de resistência à compressão axial.



Figura C 1 – Máquina de corte de concreto para corpos de prova para o tamanho de realização dos ensaios - Centro Tecnológico de Engenharia Civil de Furnas Centrais Elétricas

6 REFERÊNCIAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 5739: **Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, RJ. 1994.

ABNT _____. NBR 7211: **Agregados para concreto**. Rio de Janeiro, RJ, 1983.

ABNT _____. NBR 7211: **Agregados para concreto**. Rio de Janeiro, RJ, 2005.

ABNT _____. NBR 7215: **Cimento Portland – determinação da resistência à compressão**. Rio de Janeiro, RJ, 1996.

ABNT _____. NBR 7217: **Determinação da composição granulométrica dos agregados – Método de ensaio**. Rio de Janeiro, RJ. 1987.

ABNT _____. NBR 7251: **Agregado em estado solto - Determinação da massa unitária**. Rio de Janeiro, RJ, 1982.

ABNT _____. NBR 7680: **Concreto – Extração, preparo e ensaios de testemunhos de concreto**. Rio de Janeiro, RJ, 2007.

ABNT _____. NBR 9204: **Concreto Endurecido determinação da resistividade elétrica – volumétrica**. Rio de Janeiro, RJ, 1985.

ABNT _____. NBR 9776: **Agregado –determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do Frasco de Chapman**. Rio de Janeiro, RJ, 1994.

ABNT _____. NBR 9778: **Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por imersão – Índices de vazios e massa específica**. Rio de Janeiro, RJ, 1987.

ABNT _____. NBR 9779: **Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por capilaridade**. Rio de Janeiro, RJ, 1995.

ABNT _____. NBR 10787: **Concreto endurecido – Determinação da penetração de água sob pressão**. Rio de Janeiro, RJ. 1994.

ABNT _____. NBR 11578: **Cimento Portland composto**. Rio de Janeiro, RJ, 1991.

ABNT _____. NBR 11579: **Cimento Portland – determinação da finura por meio de peneira 0,075 mm (nº 200)**. Rio de Janeiro, RJ, 1991.

ABNT _____. NBR 11768: **Aditivos para concreto de cimento Portland**. Rio de Janeiro, RJ. 1991.

ABNT _____. NBR 12655: **Concreto – Preparo, controle e recebimento**. Rio de Janeiro, RJ. 1996.

ABNT _____. NBR 13044: **Concreto projetado – Reconstituição da mistura recém-projetada**. Rio de Janeiro, RJ, 1993.

ABNT _____. NBR 13070: **Moldagem de placas para ensaio de argamassa e concretos projetados**. Rio de Janeiro, RJ, 1994.

ABNT _____. NBR 13317: **Concreto projetado – Determinação do índice de reflexão por medição direta**. Rio de Janeiro, RJ, 1995.

ABNT _____. NBR 13354: **Concreto projetado: determinação do índice de reflexão em placas**. Rio de Janeiro, RJ, 1995.

ABNT _____. NBR 14026: **Concreto projetado - Especificação**. Rio de Janeiro, RJ, 1997.

ABNT _____. NBR NM 20: **Cimento portland e suas matérias-primas - análise química - determinação de dióxido de carbono por gasometria**. Rio de Janeiro, RJ, 2009.

ABNT _____. NBR NM 23: **Cimento portland e outros materiais em pó - Determinação de massa específica**. Rio de Janeiro, RJ, 2000.

ABNT _____. NBR NM 43: **Cimento portland - Determinação da pasta de consistência normal**. Rio de Janeiro, RJ, 2000.

ABNT _____. NBR NM 65: **Cimento Portland - Determinação do tempo de pega**. Rio de Janeiro, RJ, 2002.

ABNT _____. NBR NM 67: **Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do troco de cone**. Rio de Janeiro, RJ, 1998.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE ACI 506R – 90. **Guide to Shotcrete**. American Concrete Institute, Detroit, USA, 1995. 41p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS ASTM G 57. **Standard Test Method for Field Measurement of Soil Resistivity Using the Wenner Four-Electrode Method**. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, USA, 2006.5 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS ASTM C 1202. **Standard test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration**. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, USA, 2009.7 p.

AMORIM, F.S. **Tecnologia básica do concreto**. Gráfica Brasil – Imperatriz, 2006. 86p.

BARBOSA, M. A. L. **Avaliação de Desempenho do Concreto Projetado via seca frente à ação de sulfatos**. 2001 141 f. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

CAMPANHÃ, C. A.; BOSCOV, P. **Manual NATM**. São Paulo, SP, 2008. 85p.

CÁNOVAS, M. F. **Patologia e terapia do concreto armado**. São Paulo, Pini, 1988. 522p.

CASCUDO, O. **O controle da corrosão de armaduras em concreto: inspeção e técnicas eletroquímicas**. São Paulo, SP, Ed. Pini, Goiânia, GO, Ed. UFG, 1997. 237p.

DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTE - MINISTÉRIO DO TRANSPORTE. **Norma DNIT 087/2006 – ES - Execução e acabamento do concreto projetado – Especificação de serviço**. 2006.

FERREIRA, R. B. **Influência das adições minerais nas características do concreto de cobrimento e seu efeito na corrosão de armadura induzida por cloretos**. 2003. 224 f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, Goiás, 2003.

FIGUEIREDO, A. D. **Parâmetros de controle e dosagem do concreto projetado com fibras de aço**. 1997. 342 f. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997. 342p.

FIGUEIREDO, A. D. **O papel do concreto projetado na impermeabilização de túneis**. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP. Departamento de Engenharia de Construção Civil. BT/PCC/260, EPUSP, USP, São Paulo, 2005.7p.

GARSHOL et al. **Shotcrete for rock support – A summary report on the state of the art**. International Tunneling Association Working Group on Shotcrete Use, Lausanne, Suíça, Article in press. 2005. 64p.

GASPARIM, J. C. **Concreto projetado elaborado com cimentos especiais: análise segundo parâmetros de durabilidade**. 2007, 111f. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: Estrutura, Propriedade e Materiais**. Pini, São Paulo, SP, 2008. 573p.

MELBYE, T.; GARSHOL, K.F. **Sprayed Concrete for Rock Support**. MBT International Underground Group, Zurich, Switzerland., 2000.

MENDES, M. V. A. S. **Avaliação das propriedades de transporte de massa contendo adições minerais**. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, 2009. 175 p.

NEVILLE, A.M. **Propriedades do Concreto**. Pini, São Paulo, SP, 1997. 828p.

PALERMO, G. **Concreto Projetado como Revestimento de Túneis**. Dissertação de Mestrado, EPUSP, USP, São Paulo, SP, 1997. 306p.

PRUDÊNCIO JÚNIOR, L.R. **Contribuição à Dosagem do Concreto Projetado**. Tese (Doutorado), EPUSP, USP, São Paulo, SP, 1993. 224p.

PRUDÊNCIO JÚNIOR, L.R. **Concreto Projetado**. Concreto. Ensino, Pesquisa e Realizações. IBRACON, São Paulo, SP, 2005. p. 1227-1257.

QUARCIONI, V. A. **Reconstituição de traço de argamassas simples e mistas de cimento Portland e cal hidratada: atualização do método do IPT**. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, SP, 1998. 188p.

RAMOS, D. V. M. **Avaliação da influência das elevadas temperaturas em concretos empregados em revestimentos de túneis**. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2005, 320p.

SCHLUMPF, J.; HÖFLER J. **Concreto projetado na construção de túneis – Introdução à tecnologia básica do concreto projetado**. Ed. Pustmeister Sika, São Paulo, SP, 2004. 72p.

SILVA, P. F. A. **Concreto Projetado para Túneis**. Pini, São Paulo, SP, 1997. 92p.

YAO, C. **Study on the new shell bolting and shotcrete support and its application in soft rock tunnels**. Journal of coal science & engineering. Huainan, China, 2009, 5p.

7 BIBLIOGRAFIA

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. EB 1763: **Aditivos para concreto de cimento Portland**. Rio de Janeiro, RJ, 1992.4p.

ABNT _____. NBR 5738: **Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos ou prismáticos de concreto**. Rio de Janeiro, RJ. 1994. 9p.

ABNT _____. NBR 6118: **Projeto de estruturas de concreto** - Especificação. Rio de Janeiro, RJ, 2003. 242p.

ABNT _____. NBR 7219: **Determinação do teor de materiais pulverulentos nos agregados – Método de ensaio**. Rio de Janeiro, RJ. 1987. 8p.

ABNT _____. NBR 7222: **Argamassa e concreto – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, RJ, 1994. 3p.

ABNT _____. NBR 8802: **Concreto endurecido – Determinação da velocidade de propagação de onda ultra-sônica**. Rio de Janeiro, RJ, 1994. 8p.

ABNT _____. NBR 9775: **Agregados – Determinação da umidade superficial em agregados miúdos por meio do frasco de Chapman**. Rio de Janeiro, RJ. 1987. 6p.

ABNT _____. NBR 9833: **Concreto fresco – Determinação da massa específica e do teor de ar pelo método gravimétrico**. Rio de Janeiro, RJ, 1987. 3p.

ABNT _____. NBR NM 30: **Agregado miúdo – Determinação da absorção de água**. Rio de Janeiro, RJ. 2001. 16p.

ABNT _____. NBR NM 47: **Concreto – Determinação do teor de ar em concreto fresco – Método pressométrico**. Rio de Janeiro, RJ, 2002. 23p.

ABREU, J. V.DE.; MEZZALIRA, F. A.; CRUZ, I. O. M. **Brazilian special cements for shotcrete and injections in underground constructions**. 11p. Disponível em: http://www.ita-aitec.org/cms/fileadmin/filemounts/general/pdf/ItaAssociation/ProductAndPublication/Training/TrainingCourses/SP18_2005.pdf. Acesso em 19 jun. 2010, 16:01:35.

ANJOS, M. SILVA, W. PEREIRA, A. RODRIGUES, H. GOMES, V. **Concreto projetado para recuperação de estruturas – análise das Resistências à compressão e aderência à tração**. Disponível em: http://www.redenet.edu.br/publicacoes/arquivos/20080922_095814_CIVI-013.pdf. Acesso 16 abril 2010, 11:23:13.

ARMELIN, H.A. **Contribuição ao Estudo do Concreto Projetado por Via Seca com Fibras Destinado ao Revestimento de Túneis NATM**. Dissertação de Mestrado, EPUSP, USP, São Paulo, SP. 1992. 152p.

ARMELIN, H. S.; HELENE, P. R. L. **Contribuição ao Estudo do Concreto Projetado por Via Seca com Fibras Destinado ao Revestimento de Túneis NATM.** Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP. Departamento de Engenharia de Construção Civil. BT/PCC/138, EPUSP, USP, São Paulo, 1994. 22p.

AUSTIN, S. GOODIER, C. AND ROBINS, P. **Low-volume wet-process sprayed concrete: pumping and spraying.** Materials and Structures. Loughborough University, England, 2005, 9p.

BAUER, L.A.F. **Materiais de Construção.** Livros Técnicos e Científico, Rio de Janeiro, RJ. 1979.

BELOHUBY, M. e BRACHER, G. **Resistências Iniciais do Concreto Projetado: Importância, Métodos de Medições e Simplificações.** In: 2º Congresso Brasileiro de Túneis e Estruturas subterrâneas. Seminário internacional “south american tunnelling”, Salvador, BA, 2008.

BREITENBÜCHER, R. **Developments and applications of high-performance concrete.** Materials and Structures, 1998. p. 209-215.

CBT – COMITÊ BRASILEIRO DE TÚNEIS. **Túneis do Brasil – Tunneling in Brazil.** 2006. São Paulo, SP, 2006. 327p.

CELLOP – COMPANHIA ESTADUAL DE HABITAÇÃO E OBRAS PÚBLICAS. **Execução e acabamento do concreto projetado – Especificação de serviço.** Disponível em <http://200.199.118.135/orse/esp/ES00315.pdf>. Acesso em 21 mar 2010, 13:05:10.

COLOMBO, M. PRISCO, M. MAZZOLENI, L. **Sprayed tunnel linings: a comparison between several reinforcement solutions.** Materials and Structures. Milano, Italy, 2009, 17p.

BENTZ, D. SNYDER, K. PELTZ, M. **Doubling the service life of concrete structures. II: Performance of nanoscale viscosity modifiers in mortars.** Cement & Concrete Composites. 7p.

DANTAS, F.A.S.; TANGO, C.E.S. **Estudo do coeficiente de permeabilidade em concreto projetado.** 32º IBRACON, Fortaleza, CE, v2, 1990. p. 467-480.

DER/SP – DEPARTAMENTO DE ESTRADAS E RODAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Norma DER ET-DE-C00/012 –Especificação de Técnica - Concreto Projetado.** 2006, 11p.

ECIVIL. **Concreto projetado – visão geral.** Disponível em: http://www.ecivilnet.com/artigos/concreto_projetado.htm. Acesso em 16 de abril 2010, 11:09:34.

EUROPEAN FEDERATION OF PRODUCERS AND APPLICATIONS OF SPECIALIST PRODUCTS FOR STRUCTURES EFNARC. **European Specification for Sprayed Concrete,** EFNARC, Loughbough University, 1996. 30p.

FIGUEIREDO, A. D. **Concreto projetado: fatores intervenientes no controle da qualidade do processo.** 1992.284 f. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1992.

FIGUEIREDO, A. D.; ABREU, J. V.; CRUZ, L. O. M. **Análise experimental de cimentos especiais em concreto projetado via seca para túneis.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO, 46. 2004, Florianópolis, SC. Anais... Florianópolis: IBRACON, 2004.

FIGUEIREDO, A. D.; HELENE, P. R. L. **Concreto projetado: O controle do processo de projeção.** Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP. Departamento de Engenharia de Construção Civil. BT/PCC/92, EPUSP, USP, São Paulo, 1993.34p.

FIGUEIREDO, A. D.; HELENE, P. R. L. **Concreto projetado com fibras de aço para túneis.** Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP. Departamento de Engenharia de Construção Civil. BT/PCC/181, EPUSP, USP, São Paulo, 1997.21p.

FRANCO, B. L. M.; GALLOVICH, A. **Controle de qualidade do concreto reforçado com fibras para túneis.** Disponível em: <http://www.acquacon.com.br/2cbt/apresentacoes/2306/14h00brunofranco.pdf>. Acesso em 16 abril 2010, 11:57:25.

FRITZ, L.; HADWIGER, M.; GEIER, G.; PITTINO, G.; GRÖLLER, E. **A Visual Approach to Efficient Analysis and Quantification of Ductile Iron and Reinforced Sprayed Concrete.** IEEE transactions on visualization and computer graphics, vol. 15, nº. 6, november/december 2009. 8p.

GASPARIM, J. C. **Concreto projetado elaborado com cimentos especiais: análise segundo parâmetros de durabilidade.** Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP. Departamento de Engenharia de Construção Civil. BT/PCC/499, EPUSP, USP, São Paulo, 2008. 15p.

GOPALATNAM, V.S.; GETTU, R. **On the characterization of flexural toughness in fiber reinforced concretes.** Cement and Concrete Composites, 1995. p. 239-254.

GOODIER, C.; AUSTIN, S.; ROBINS, P. **Low-volume wet-process sprayed concrete: hardened Properties.** Materials and Structures. Loughborough University, England, 2008, 13p.

HAACK, A. **Current safety issues in traffic tunnels.** Tunnelling and Underground Space Technology, 2002a. p. 117-127.

HAACK, A. **Invited editorial.** Tunnelling and Underground Space Technology, 2002b. p. 115-116.

LEE, S. **Numerical analysis for irregular shotcrete on uneven tunnel perimeter.** International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences. Seoul, Republic of Korea, 2010, 8p.

LEGRAND et al. **Recommendation on sprayed concrete – technology and practice.** Association Française des Travaux en Souterrain, Paris, França, 1975. 11p.

LOBATO, F. H. C.; MORESI, M. V. D.; KUWAJIMA, F. M. Y.; MATSUI, M. M. **Evolução do concreto projetado na construção o caso histórico do lote 1 da linha 2 do metrô/SP.** Disponível em http://www.ita-aitec.org/cms/fileadmin/filemounts/general/pdf/ItaAssociation/ProductAndPublication/Training/TrainingCourses/SP13_2005.pdf. Acesso em 21 mar. 2010, 10:42:40.

MA, B.; ZOU, D.; XU, L. **Manufacturing technique and performance of functionally graded concrete segment in shield tunnel.** Front. Archit. Civ. Eng. China, 2009, 4p.

MACCAFERRI. **Túneis e Galerias – Necessidades e Soluções.** Disponível em http://www.maccaferri.com.br/download/cat_tuneis.pdf?PHPSESSID=gfi0vrg4lntt9aae3nmb3u8t42. Acesso em 21 mar. 2010, 11:54:45.

MASHIMO, H. **State of the road tunnel safety technology in Japan.** Tunnelling and Underground Space Technology, 2002. p. 145-152.

NEITHALATH, N.; JAIN, J. **Relating rapid chloride transport parameters of concretes to microstructural features extracted from electrical impedance.** Cement and Concrete Research. United States, 2010, 11p.

PALERMO, G.; HELENE, P. R. L. **Concreto projetado como revestimento de túneis.** Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP. Departamento de Engenharia de Construção Civil. BT/PCC/183, EPUSP, USP, São Paulo, 1997. 26p.

PEREIRA, C.H.A.F. **Avaliação da Influência da Adição de Fibras Sintéticas na Durabilidade do Concreto Portland.** Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, GO, 2002. 214p.

PEREIRA, P.C. **Influência da cura no desempenho de revestimentos produzidos com argamassas inorgânicas.** Dissertação (mestrado) – Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, GO, 2000. 182p.

PEREZ, F.; BISSONNETTE, B.; GAGNE, R. **Parameters affecting the debonding risk of bonded overlays used on reinforced concrete slab subjected to flexural loading.** Materials and Structures. Québec, Canada, 2009, 18p.

PICHLER, B.; SCHEINER, S.; HELLMICH, C. **From micron-sized needle-shaped hydrates to meter-sized shotcrete tunnel shells: micromechanical upscaling of stiffness and strength of hydrating shotcrete.** Acta Geotechnica, Viena, Austria, 2008, 22p.

PILEGGI, R. G.; MARQUES, Y. A.; FILHO, D. V.; STUDART, A. R.; PANDOLFELLI, V. C. **Aditivos para concretos de projeção.** Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/ce/v48n308/14889.pdf>. Acesso em 16 abril 2010, 12:00:07.

PRUDÊNCIO JUNIOR, L. R.; HELENE, P. R. do L. **Concreto projetado por via seca: metodologia de dosagem.** Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP.

Departamento de Engenharia de Construção Civil. BT/PCC/118, EPUSP, USP, São Paulo, 1993.22p.

SILVA, M.G.; HELENE, P.R. **Concreto projetado com adição de microssílica**. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP. Departamento de Engenharia de Construção Civil. BT/PCC/107, EPUSP, USP, São Paulo, 1993.27p.

SPRAYED CONCRETE ASSOCIATION – SCA. **An Introduction to Sprayed Concrete**. Reino Unido. Disponível em <http://www.sca.org.uk>. Acesso em: 15 set. 2009, 16:30:30.

TAYLOR, H. F. W. **Cement Chemistry**. Thomas Telford, Londres. 1997. 459p.

TEIXEIRA, A. H. **Tratamento de Maciços de Solos**. TURB SIMPÓSIO SOBRE TÚNEIS URBANOS. São Paulo, SP, 1995. 163-182p.

VALEC ENGENHARIA, CONSTRUÇÕES E FERROVIAS S.A, **Norma nº 80-ES-000F-11-8004 - Especificação técnica para concreto projetado**. 2006, 14p.

VANDEWALLE, M. **Tunnelling the World**. N.V. Bekaerst, Zwevegem, Bélgica. 1997. 247 p.

YANG, J.; HONGBIN, L.; CHEN, J.; YUDAN, J.; PEIHUO, P. **Toughness and characterization of reactive powder concrete with ultra-high strength**. Science in China Series E: Technological Sciences. Beiijng, China, 2009, 19p.