

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E  
URBANISMO**

**UTILIZAÇÃO DE FIBRAS DE AÇO PARA REFORÇO DE  
CONCRETO EM ANÉIS PRÉ-MOLDADOS SEGMENTADOS PARA  
REVESTIMENTO DE TÚNEIS**

**Andréa Fernandes**

Campinas  
Agosto 2005

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E  
URBANISMO**

**UTILIZAÇÃO DE FIBRAS DE AÇO PARA REFORÇO DE  
CONCRETO EM ANÉIS PRÉ-MOLDADOS SEGMENTADOS PARA  
REVESTIMENTO DE TÚNEIS**

**Andréa Fernandes**

**Orientador: Newton de Oliveira Pinto Jr.**

Dissertação de Mestrado apresentado à Comissão de pós-graduação da Faculdade de Engenharia da Universidade Estadual de Campinas, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, na área de concentração de Edificações.

Campinas  
Agosto 2005

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA  
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

F391u	<p>Fernandes, Andréa</p> <p>Utilização de fibras de aço para reforço de concreto em anéis pré-moldados segmentados para revestimento de túneis / Andréa Fernandes.--Campinas, SP: [s.n.], 2005.</p> <p>Orientador: Newton de Oliveira Pinto Júnior. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo.</p> <p>1. Túneis - Revestimento. 2. Concreto pré-moldado. 3. Fibras de metal. I. Pinto Júnior, Newton de Oliveira. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. III. Título.</p>
-------	--

Titulo em Inglês: Use of steel fibers to reinforced precast concrete segmental lining tunnels

Palavras-chave em Inglês: Tunnel lining, Precast concrete, Steel fibers e Reinforced concrete fibers

Área de concentração: Edificações

Titulação: Mestre em Engenharia Civil

Banca examinadora: André Luiz Bortolacci Geyer, Vladimir Antonio Paulon

Data da defesa: 31/08/2005 – 106 páginas.

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL,  
ARQUITETURA E URBANISMO

UTILIZAÇÃO DE FIBRAS DE AÇO PARA REFORÇO DE  
CONCRETO EM ANÉIS PRÉ-MOLDADOS  
SEGMENTADOS PARA REVESTIMENTO DE TÚNEIS

Andréa Fernandes

Dissertação de Mestrado aprovada pela Banca Examinadora, constituída por:

Prof. Dr. Newton de Oliveira Pinto Júnior  
Presidente e Orientador / Unicamp

Prof. Dr. André Luiz Bortolacci Geyer  
Universidade Federal de Goiás

Prof. Dr. Vladimir Antonio Paulon  
Unicamp

Campinas, 31 de Agosto de 2005

À minha mãe, meu anjo da guarda.  
À minha inspiração constante, João Pedro.  
Ao amor da minha vida, Tiago.  
Ao meu grande amigo, José Nilson.

## AGRADECIMENTOS

Ao Professor Doutor Newton pela orientação, valiosa amizade e verdadeira ajuda no desenvolvimento deste estudo.

Ao Professor Doutor Vladimir Paulon pela amizade, compreensão, clareza nas dúvidas mais importantes e pela companhia sempre agradável dentro e fora da Universidade.

À Professora Doutora Ana Elisabete pelas contribuições valiosas na etapa de qualificação deste trabalho.

À Vulkan do Brasil divisão Harex, em especial ao Nilson e a Ivanete (grandes profissionais e amigos), ao nosso consultor Engenheiro Ferdinand Budweg e ao Sr. Jürgen Bönninger, por acreditar em nosso trabalho.

À Fitesa na pessoa de Júlio Montardo pela parceria.

À Degussa Construction Chemicals Brasil através do Zander, Fernando Mathias e Tiago pelas informações, disponibilidade para ajudar e auxílios na viabilização dos experimentos.

À Holcim iniciando pelo Engenheiro Catarzinho (in Memoriam) sendo o primeiro a acreditar neste trabalho, seguido pelos Engenheiros Mezzalira, Luiz Otávio, Arcindo, e Abreu. Ao Centro tecnológico da Holcim na pessoa da Renata D'Agostinho e seus funcionários.

À todo o pessoal do laboratório de estruturas da Unicamp, sempre com sorrisos, alto astral, muita vontade e competência para trabalhar na resolução dos desafios operacionais de nossos experimentos.

Ao amigo grego Nikolas Mavridis por dividir seu tempo, competência e conhecimento conosco nos longos meses de trabalho e dedicação incondicional.

Ao amigo Ricardo Telles pelos direcionamentos indispensáveis.

À amiga Lia Knap pelas informações e contribuições preciosas.

Ao amigo Jorge Foster pelo trabalho realizado na integração das empresas envolvidas neste projeto.

Aos amigos Gunther e Leno pela amizade e grande presteza nas informações.

Ao amigo Danniel Cestari pelo grande estímulo para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos amigos dentro e fora da Unicamp que de certa forma participaram deste trabalho trazendo alegrias e incentivos.

Ao Sr. Egon Soni Ern pelo constante incentivo, esclarecendo que o que vale é o trabalho árduo com alegria, independente do tema.

Aos meus pais, Maria Luiza e Benedito Henrique, por tudo que já fizeram por mim, sempre com muito amor e carinho.

Aos meus irmãos queridos e aos meus cunhados Alemão, Claudia e Bruno pela contribuição indireta na forma de amor, força e atenção.

À minha família querida (Tiago e João Pedro) pela troca de nossas horas pessoais pelas profissionais necessárias, por todo o conhecimento compartilhado, e pela forma incondicional de colaboração.

SUMÁRIO.....	
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1 Justificativa do Estudo .....	1
1.2 Pesquisadores e Centros de Pesquisa.....	3
1.3 Objetivo do Estudo .....	4
1.4 Conteúdo da Dissertação .....	5
<b>2. CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO.....</b>	<b>7</b>
2.1 Generalidades .....	7
2.2 Considerações sobre as Propriedades Mecânicas do CRFA para Aduelas .....	10
<i>Resistência à Compressão</i> .....	10
<i>Resistência ao Impacto</i> .....	10
<i>Durabilidade</i> .....	11
2.3 Vantagens da Aplicação do CRFA em Aduelas Pré-Moldadas .....	12
<i>Aumento da Ductilidade (comportamento pseudo-dúctil)</i> .....	12
<i>Diminuição dos Reparos</i> .....	13
<i>Reforço Estrutural</i> .....	15
<i>Área Disponível para Produção</i> .....	15
<i>Benefícios Adicionais</i> .....	16
<b>3. TENACIDADE .....</b>	<b>19</b>
3.1 Introdução.....	19
3.2 Mecanismos .....	19
3.3 Recomendação Japonesa .....	20
3.4 Recomendação Européia – RILEM .....	21
3.5 Discussão sobre as Normas para Avaliação da Tenacidade no uso do CRFA em Aduelas.....	26
<b>4. ESTUDO DE CASOS .....</b>	<b>28</b>
4.1 Introdução - Experiências com aduelas no mundo.....	28

4.2	Estudo de caso 1: Channel Tunnel Rail Link - CTRL Steel Fibre Reinforced Concrete for Tunnel Linings - Inglaterra.....	33
	<i>Introdução</i> .....	33
	<i>Análise inicial</i> .....	33
	<i>Solução Adotada</i> .....	36
	<i>Projeto do Segmento</i> .....	37
	<i>Conclusões do Relatório do CTRL</i> .....	39
4.3	Estudo de caso 2: Steel Fibre Reinforced Concrete for Precast Tunnel Segments - Mix Design and Full Scale Testing-Lesotho/Africa do Sul.....	40
	<i>Introdução</i> .....	40
	<i>Projeto Original</i> .....	40
	<i>Programa Investigativo</i> .....	40
	<i>Caracterização dos Materiais</i> .....	41
	<i>Considerações</i> .....	43
4.4	Estudo de caso 3: Steel Bars Reinforced Concrete for Precast Tunnel Segments in Singapura .....	46
4.5	Estudo de caso 4: CRM Tranvase Manabi – Equador.....	47
	<i>Introdução</i> .....	47
	<i>Solução Adotada</i> .....	47
	<i>Projeto do Anel</i> .....	47
	<i>Considerações</i> .....	48
4.6	Estudo de caso 5 : Experimental investigation on load-carrying capacity of concrete tunnel lining - Japão.....	49
	<i>Introdução</i> .....	49
	<i>Metodologia do Experimento</i> .....	49
	<i>Tipos de Carregamento</i> .....	50
	<i>Considerações</i> .....	51
<b>5.</b>	<b>ESTUDO EXPERIMENTAL.....</b>	<b>53</b>
5.1	Introdução.....	53
5.2	Caracterização dos materiais .....	54
	<i>Traço de Concreto</i> .....	56
	<i>Resistência ao Impacto</i> .....	59

<i>Tenacidade</i> .....	64
<i>Resistência à Compressão do Concreto</i> .....	67
5.3 Simulação da Fase Construtiva das Aduelas .....	67
<i>Fôrma e Dimensões das Aduelas</i> .....	67
<i>Central Dosadora</i> .....	68
<i>Moldagem das Aduelas</i> .....	68
<i>Desfôrma, Içamento e Estocagem</i> .....	72
<i>Transporte</i> .....	77
5.4 Simulação da fase executiva do Túnel - Fendilhamento .....	78
5.5 Simulação do túnel em serviço: Flexo-Compressão.....	81
5.6 Montagem do Anel em Escala Real .....	87
<b>6. CONCLUSÕES .....</b>	<b>88</b>
<b>7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>90</b>
<b>ANEXO .....</b>	<b>95</b>

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Parâmetros da recomendação japonesa. ....	20
Tabela 2 Aduelas pré-moldadas em concreto sem reforço.....	30
Tabela 3 Aduelas pré-moldadas em concreto com reforço de fibras .....	31
Tabela 4 Dados complementares sobre a utilização de fibras de aço como reforço de concreto em segmentos pré-moldados.....	32
Tabela 5 Características das fibras estudadas em Lesotho .....	41
Tabela 6 CRFA traço de referência, sem fibras .....	42
Tabela 7 Os segmentos e cada um dos reforços testados. ....	44
Tabela 8 Ensaio realizado nos segmentos dos túneis de Lesotho.....	45
Tabela 9 Fibra de Polipropileno utilizada nas aduelas do estudo experimental..	54
Tabela 10 Fibra de aço 60 mm utilizada nas aduelas do estudo experimental...	55
Tabela 11 Fibra de aço 49 mm utilizada nas aduelas do estudo experimental...	55
Tabela 12 Fibra de aço 36 mm utilizada nas aduelas do estudo experimental...	55
Tabela 13 Traço base para moldagem das aduelas .....	57
Tabela 14 Identificação dos traços, consumos e tipos de fibras utilizados. ....	58
Tabela 15 Tipos de reforço nas aduelas moldadas. ....	70
Tabela 16 Resultados do ensaio de fendilhamento. ....	80
Tabela 17 Esforços solicitantes no túnel.....	82
Tabela 18 Esforços solicitantes atuantes nas aduelas nas diversas etapas de carregamento.....	84
Tabela 19 Resultados dos ensaios de flexo-compressão das aduelas.....	87

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Quebra durante a instalação da aduela em virtude da zona fragilizada no contato da armadura com o concreto. ....	14
Figura 2 Reparos nas aduelas após a montagem do anel (mal executados), indesejáveis e de alto custo.....	14
Figura 3 (a) “Gaiolas” de aço após montagem e sua estocagem ao fundo dentro da fabrica e (b) estocagem das “gaiolas” na área externa da fabrica. ....	16
Figura 4 “Pulmão” de aduelas em uma fábrica de anéis.....	18
Figura 5 Critério da JSCE-SF4 para quantificação da tenacidade à flexão. ....	21
Figura 6 Detalhes do corpo-de-prova e instrumentação CMOD .....	22
Figura 7 Região do entalhe e base de medida do CMOD .....	22
Figura 8 Distribuição de tensões.....	23
Figura 9 Diagrama carga x deslocamento vertical para determinação de $f_{eq,2}$ .	24
Figura 10 Diagrama carga x deslocamento vertical para determinação de $f_{eq,324}$	24
Figura 11 Diagrama carga x CMOD.....	25
Figura 12 Ensaios realizados no CTRL com aplicação de carga nas aduelas em diferentes situações de desalinhamentos.....	38
Figura 13 Vista de um túnel do CTRL executado em anéis de concreto pré-moldados reforçados com fibras de aço. ....	39
Figura 14 (a) Montagem em escala real de trecho do túnel de 3,5 m de diâmetro interno e (b) detalhe do encaixe (inter-travamento) das aduelas na posição definitiva dentro túnel.....	48
Figura 15 Layout de ensaio em escala real. ....	50
Figura 16 Carregamento tipo A.....	50
Figura 17 Carregamento tipo B.....	51
Figura 18 Carregamento tipo C.....	51
Figura 19 (a) Fibra de polipropileno corrugada (Tabela 9) e (b) fibra de aço trefilado 60 mm de comprimento (Tabela 10). ....	56
Figura 20 (a) Fibra de aço laminado 49 mm de comprimento (Tabela 11) e (b) fibra de aço laminado de 36 mm de comprimento (Tabela 12).....	56

Figura 21 (a) e (b) Aparato utilizado para determinação de resistência ao impacto. ....	59
Figura 22 (a) e (b) Corpos-de-prova para cada traço estudado na resistência ao impacto. ....	60
Figura 23 Padrão de fissuração das placas após a execução dos ensaios, variando-se o teor de fibras conforme os traços utilizados. ....	60
Figura 24 Representação da resistência ao impacto do concreto padrão utilizado. ....	61
Figura 25 Aumento da resistência ao impacto com a utilização de fibras de polipropileno. ....	62
Figura 26 Aumento da resistência ao impacto com o emprego de fibras de aço. ....	62
Figura 27 Aumento da resistência ao impacto empregando fibras de aço e polipropileno. ....	63
Figura 28 (a) Vista do ensaio de tenacidade através da RILEM e (b) entalhe e medidor. ....	64
Figura 29 Carga x Deslocamento vertical para o traço B40. ....	65
Figura 30 Carga x Abertura para o traço B40. ....	65
Figura 31 Carga x Deslocamento vertical para o traço A1B40. ....	66
Figura 32 Carga x Abertura para o traço A1B40. ....	66
Figura 33 (a) Fôrma de aço de alta precisão utilizada e (b) acabamento na superfície do inferior da aduela após a moldagem. ....	67
Figura 34 (a) Central dosadora e um caminhão betoneira e (b) esteira dos agregados e a adição das fibras. ....	68
Figura 35 (a) Slump do concreto 120 +/- 20 mm e (b) corpos-de-prova para o controle tecnológico (tenacidade e resistência à compressão). ....	69
Figura 36 (a) Articulação lateral da fôrma e (b) descarga do concreto na fôrma metálica articulada. ....	70
Figura 37 (a) Concreto fresco sem acabamento superficial e (b) concreto sendo lançado e vibrado. ....	71

Figura 38 (a) Gaiolas para o reforço tradicional confeccionadas com barras de aço e (b) fôrma com a gaiola antes da moldagem da aduela. ....	71
Figura 39 Representação gráfica da armadura utilizada como reforço tradicional (gaiolas) das aduelas.....	72
Figura 40 (a) Içamento e (b) estocagem simulando etapa no pátio da planta de produção.....	73
Figura 41 (a) Eretor de aduelas a vácuo dentro da fabrica no momento da estocagem e durante o transporte (b).....	74
Figura 42 (a) e (b) Eretor de aduelas a vácuo dentro de uma máquina tuneladora.....	74
Figura 43 (a) e (b) Eretor de aduelas tradicional cujo acoplamento é feito num ponto central da aduela. ....	74
Figura 44 Estocagem de um anel completo (usual) no sistema 7 aduelas + 1 chave .....	75
Figura 45 Situação real de estocagem na planta de produção (6 aduelas + 1 chave).....	75
Figura 46 Esquema simplificado de cálculo para verificação das condições de carregamento da primeira aduela durante a estocagem. ....	76
Figura 47 (a) Transporte das aduelas em rodovia estadual e (b) descarregamento das aduelas no pátio da Unicamp, para realização dos ensaios. ....	78
Figura 48 (a) Penúltima etapa de içamento e transporte das aduelas e (b) chegada até a máquina tuneladora antes do eretor. ....	78
Figura 49 (a) Preparação e calibração dos equipamentos, e (b) realização do ensaio de fendilhamento na aduela. ....	79
Figura 50 (a) Ensaio de fendilhamento executado na chave, e (b) chapa de distribuição de carga da estrutura de reação (capacidade 500 Tf).....	79
Figura 51 Ruptura da aduela 8F .....	81
Figura 52 (a) e (b) Vista geral do aparato utilizado para o ensaio de flexo-compressão. ....	83

Figura 53 (a) Registro da deformação no centro das aduelas com carga de projeto e (b) monitoramento de deslocamento do berço de apoio (suporte metálico cinza).....	83
Figura 54 Esquema estático e carregamento das aduelas .....	83
Figura 55 Esforço normal atuante na aduela com e sem deslocamento. ....	85
Figura 56 Momento Fletor atuante com e sem deslocamento no instante da execução do ensaio de flexo-compressão.....	85
Figura 57 (a) e (b) Esmagamentos nos apoios que provocaram os deslocamentos horizontais citados. ....	86
Figura 58 Primeira fissura em virtude do esmagamento do concreto nos apoios e anotação da magnitude da carga (80 Tf).....	86
Figura 59 (a) Montagem do anel e (b) anel montado.....	87

## RESUMO

O reforço do concreto através da utilização de fibras de aço vem se mostrando, ao longo dos anos, como alternativa econômica e tecnicamente viável para diversos tipos de aplicações. Sua ampla utilização na indústria da construção mundial, em diversos casos de sucesso, despertou interesse também do segmento tuneleiro moderno. Passou-se a utilizar fibras para reforçar o concreto das aduelas dos anéis montados por tuneladoras (TBM- Tunnel Boring Machines – máquina de escavar túneis) nas principais obras ao redor mundo. Desta forma, após diversos anos sem obras importantes de túneis metroviários no Brasil, a construção da linha 4 (Amarela) do Metrô de São Paulo, utilizará uma destas máquinas de escavar túneis, sendo do tipo EPBM (Earth Pressure Balanced Machine), cujo revestimento será feito com anéis segmentados (aduelas) de concreto. O projeto básico desta obra (década de 60) prevê armação das aduelas de forma tradicional (em desuso) com gaiolas de aço. Em virtude dos benefícios que o reforço com fibras oferece, e ainda, baseando-se no sucesso da experiência mundial, surgiu a necessidade de um estudo no Brasil sobre esta tecnologia. Assim, tomando como base os dados do projeto básico do projeto da linha 4 (cargas, geometrias, etc.), iniciou-se um estudo comparativo do reforço com gaiolas e do reforço com fibras de aço. Este trabalho apresenta algumas etapas deste estudo, procura abordar aspectos relevantes do processo desde a fabricação até a instalação das aduelas no túnel, explica os benefícios possíveis de serem atingidos, resume alguns dos principais motivos que levaram a indústria tuneleira a adotar a tecnologia de reforço com fibras de aço, vantagens e desvantagens.

Palavras-chave: túneis-revestimento, concreto pré-moldado, fibras de metal

## **ABSTRACT**

The reinforcement of the concrete using steel fibers became possible, through the years, by its economical and technical viability. Its wide range of utilization in civil construction, in several success work cases, made the modern tunneling industry realize the necessity of studding it as well. Concrete Segmental Lining Rings placed by TBMs - Tunnel Boring Machines - have been produced with Steel Fiber in the ultimate reference jobs around the world. After several years without of Metro projects in São Paulo Brasil, the already under construction line 4 with total 12,8 km of tunnels, will use one EPBM - Earth Pressure Balanced Machine – witch lining is being considered made by reinforced concrete. The Basic Project (from the 60's) primarily considered steel bars as cage reinforcement. To benefit from the steel fiber reinforcement concrete, still, based on successful practical cases world wide, became the necessity to study this technology locally, in Brasil. Thus, taking the basic data from the original Line 4 project (geometry, etc.) a comparative study between steel cages and steel fibers started. This work contents some of the steps from this study and intents to evaluate key aspects from the whole process, since production phase at the segment plant, transport, installation and maintenance of the tunnel. Also explains the basic reasons of migration to the steel fiber reinforcement, including the benefits for the whole tunneling industry and society.

Palavras-chave em Inglês: tunnel lining, precast concrete, steel fibers e reinforced concrete fibers

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1 *Justificativa do Estudo*

As fibras de aço foram introduzidas no mercado nacional<sup>1</sup> no início da década de 90. O primeiro registro<sup>2</sup> de utilização como reforço de concreto projetado para revestimentos de túneis, no Brasil, ocorreu na execução do túnel Airton Senna na cidade de São Paulo.

O Concreto Reforçado com Fibras de Aço (CRFA) revelou-se muitas vezes técnica e economicamente vantajoso, conquistou vários campos de aplicação, como pisos industriais de alta sollicitação, pavimentos portuários, rodoviários, aeroportuários, pisos para postos de gasolina, câmaras frigoríficas, pré-moldados, refratários e o concreto projetado. Destas aplicações citadas tiveram destaque os pisos e pavimentos industriais, os quais, foram as grandes alavancas para a viabilização da produção de fibras no Brasil.

Além das aplicações já mencionadas, a procura de subsídios para sua utilização do CRFA em pré-moldados apresentou-se sempre crescente<sup>3</sup>. O desenvolvimento nesta área pode ser considerado como tímido ainda, e isto pode ser explicado pela falta de estudos e validações para possíveis substituições de armaduras secundárias<sup>4</sup> em alguns tipos de peças.

A indústria da construção conserva muitos dogmas. Mesmo em grandes obras no Brasil, nota-se que os projetos e os procedimentos de execução são na sua maioria conservadores e tradicionais. Muitas vezes o conhecimento de uma determinada tecnologia é insuficiente para acompanhar as necessidades de um projeto. Para se alterar ou propor uma nova solução, além do cumprimento das exigências técnicas previstas no projeto, normalmente são esperadas melhorias

---

<sup>1</sup> Dado obtido com o primeiro fabricante de fibras de aço para reforço de concreto no Brasil (Vulkan do Brasil – Fibras Harex).

<sup>2</sup> Como teste.

<sup>3</sup> Dado obtido com o fabricante de fibras de aço Harex(Vulkan do Brasil) através de consultas registradas pelo fabricante desde a década de 90.

<sup>4</sup> De acordo com ACI 544.4R-88 armaduras principais para absorver momentos não podem ser substituídas por fibras de aço em elementos estruturais, tais como lajes elevadas, vigas e pilares.

no processo, rapidez na execução, economia e resultados de qualidade. As alterações de projeto possíveis de serem adotadas são, em geral, julgadas com base em novas experiências<sup>5</sup> consolidadas previamente em outras obras nacionais ou internacionais.

Nos últimos anos vários estudos com fibras de aço foram feitos em âmbito nacional<sup>6,7,8,9</sup>. Pela ausência de normas brasileiras<sup>10</sup> ou recomendações para controle da tenacidade do CRFA, costuma-se utilizar modelos existentes e internacionalmente aceitos<sup>11,12,13,14</sup>. Esta carência, na prática, dificulta a viabilização de uma alternativa de projeto que possa ser otimizada e em muitos casos tornar-se uma obra mais econômica<sup>15</sup>.

No caso de uma obra de túnel, de acordo com a viabilidade técnica e econômica do projeto pode-se, adotar como solução um revestimento composto por anéis formados por segmentos pré-moldados (aduelas) de concreto reforçado com fibras de aço.

Uma vez adotada a solução, faz-se necessário, portanto, ampliar os estudos para fornecer parâmetros para utilização racional das fibras, isto de acordo com

---

<sup>5</sup> A partir de novos materiais ou tecnologias recentes.

<sup>6</sup> FIGUEIREDO, A.D. **Parâmetros de controle e dosagem do concreto projetado com fibras de aço**. São Paulo, 1997. Tese (Doutorado). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

<sup>7</sup> NUNES, N.L. **Estudo da influência da geometria da fibra de aço na tenacidade à flexão dos compósitos de matrizes de concreto**. São Paulo, 1998. 193p. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

<sup>8</sup> CECCATO, M.R. **Estudo da trabalhabilidade do concreto reforçado com fibras de aço**. São Paulo, 1998, 98p. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

<sup>9</sup> PINTO JR., N.O.; MORAES A.A. **Concreto Reforçado com fibras de aço CRFA**. In: 38<sup>a</sup> Reunião do IBRACON – Instituto Brasileiro do Concreto. Ribeirão Preto, SP. 19 a 23 de agosto de 1996. **Anais**, v.2, p.471-479

<sup>10</sup> O texto da norma de fibras de aço esta em andamento, com participação do autor do presente estudo.

<sup>11</sup> AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard Test Method for Flexural Toughness and First Crack of Fiber Strength Reinforced Concrete**. ASTM C 1018. Book of ASTM Standards, Parte 04.02 ASTM, Philadelphia, 1994.

<sup>12</sup> JAPAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. **Method of Tests for Flexural Strength and Flexural Toughness of Steel Fiber Reinforced Concrete**. JSCE SF4. Concrete Library of JSCE. Parte III-2 Method of test for steel fiber reinforced concrete. n.3 June 1984. p. 58-61.

<sup>13</sup> EFNARC. **European Specification for Sprayed Concrete**. Federation of producers and Applicators of Specialist Products for Structures (EFNARC), Hampshire, UK, 1996.30p.

<sup>14</sup> RILEM TC 162-TDF Committee, "RILEM TC 162- TDF: **Test and Design Methods for Steel Fibre Reinforced Concrete**", Materials and Structures, v.33, pp 3-5 Jan.-Feb. 2000a.

<sup>15</sup> Redução do ciclo de execução de um túnel ou de uma execução de um piso industrial por exemplo.

o desempenho que possa vir a ser exigido do compósito em cada projeto. Se faz necessário também o controle da tenacidade do CRFA<sup>16</sup>.

Outros aspectos importantes como a durabilidade das peças, o aumento da resistência ao impacto, proporcionando uma possível redução de lascamentos, quebras de canto durante os processos de manuseio, estoque e transporte, serão abordados no item 2.3. Como benefícios adicionais, reforçando a tendência mundial da utilização de fibras de aço neste segmento da construção civil, pode-se citar redução de custos de fabricação através da diminuição da mão-de-obra, área de fabricação e estocagem, manuseio de gaiolas, corte, dobras de armaduras, e ainda recuperações antes e depois do túnel operando. Desta forma, este material pode ser utilizado futuramente como contribuição para a criação da legislação nacional sobre este tema e também como apoio para o dimensionamento dessas peças.

## **1.2 Pesquisadores e Centros de Pesquisa**

Em geral, pesquisadores e usuários do CRFA mundialmente recorrem a normas tais como ASTM, EFNARC, RILEM, JSCE e outras conforme consta na referência bibliográfica deste estudo.

Referente à aplicação do CRFA em aduelas no exterior podemos citar os centros de pesquisa no Japão<sup>17,18,19</sup>, com investigações experimentais em escala real, com o objetivo de desenvolver modelos de comportamento aplicáveis ao CRFA utilizados em revestimentos de túneis, desenvolvimentos de métodos de ensaios e caracterizações da tenacidade do compósito.

Na Europa pode ser citado o Channel Tunnel Rail Link (parte do complexo de túneis que fazem a ligação Inglaterra e França sob o Canal da Mancha). A exemplo de outras obras, os relatórios técnicos produzidos nesta obra<sup>20</sup>

---

<sup>16</sup> Além das propriedades controladas para o concreto normal, o concreto reforçado com fibras de aço, deve ser avaliado quanto a sua tenacidade (Bentur e Mindess,1990).

<sup>17</sup> JSCE Committee of Tunnel Engineering. em Tokio.

<sup>18</sup> Japan Road Association em Tokio.

<sup>19</sup> Japan Highway Research Institute em Machida.

<sup>20</sup> Estes relatórios podem ser acessados, através do nome RLE - Rail Link Engineering.

funcionam como um banco de dados e as experiências e o aprendizado técnico acumulado podem ser encontrados em documentos diversos da RLE-Rail Link Engineering<sup>21</sup>.

Na Alemanha e Bélgica, podem ser citados os estudos dos fabricantes de fibras de aço<sup>22</sup>.

No Brasil estudos publicados com utilização de fibras de aço podem ser citados na área de concreto projetado para revestimento de túneis<sup>23</sup>, pisos<sup>24</sup>, estruturas e pré-moldados como tubos, vigas<sup>25</sup> e aduelas<sup>26,27</sup>. Atualmente são capacitados para ensaios em escala real com aduelas os laboratórios de FURNAS<sup>28</sup> e o laboratório de estruturas da UNICAMP<sup>29</sup>, que foi equipado em virtude do desenvolvimento do presente trabalho.

### **1.3 Objetivo do Estudo**

Este trabalho tem como objetivo apresentar um estudo sobre as vantagens da utilização do CRFA em aduelas para revestimento de túneis.

Para alcançar este objetivo o estudo foi fundamentado em conceitos discutidos pelos pesquisadores e centros de pesquisa já citados. Para se ter uma análise crítica imparcial e consistente, foi feita uma pesquisa complementar de alguns casos similares em várias partes do mundo.

---

<sup>21</sup> Informações gerais podem ser encontradas em <http://www.ctrl.co.uk/> e [www.eurotunnel.com](http://www.eurotunnel.com)

<sup>22</sup> **Vandewalle, M. Tunnelling the Word**. Belgium. N.V. Bekaert S. A. Zvevegem, 1990.

<sup>23</sup> FIGUEIREDO, A.D. **Parâmetros de controle e Dosagem do Concreto Projetado com Fibras de Aço**. São Paulo, 1992. 342p Tese (Doutorado). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

<sup>24</sup> PINTO, N.O.J.; BINA P. **Pisos industriais construídos com concreto dosado com fibras**. In: 38º REIBRAC,-IBRACON, Ribeirão Preto, SP, 1996. Anais, v.2, p.67-78.

<sup>25</sup> PINTO, N.O.J.; MORENO, A.L.J.; MARINHO, R. Mecanismo de reforço das fibras de aço em vigas de concreto armado sujeitas à carregamento invertido. In: IV IMPOSIÇÃO EPUSP SOBRE ESTRUTURAS DE CONCRETO, 2000, SÃO PAULO. CD-ROM. 2000.

<sup>26</sup> PINTO JÚNIOR, Newton de Oliveira; **Aduelas Pré-Moldadas em Concreto Reforçado Com Fibras de Aço para Revestimento de Túneis**, 06/2001, Revista da Construção Pesada, Vol. 9, pp.10-16, SP, BRASIL, 2001.

<sup>27</sup> PINTO JÚNIOR, N.O., CARNIO, M.A., GUTSTEIN, D., CORREA, C., "Dimensionamento de aduelas pré – moldadas em concreto reforçado com fibras de aço para revestimento de túneis", 42º Congresso Brasileiro do Concreto, Fortaleza, CE, Brasil, 13 a 18 de agosto de 2000.

<sup>28</sup> A parte experimental do estudo PINTO JÚNIOR, Newton de Oliveira; **Aduelas Pré-Moldadas em Concreto Reforçado Com Fibras de Aço para Revestimento de Túneis**, 06/2001, Revista da Construção Pesada, v. 9, pp.10-16, SP, BRASIL, 2001. foi executada neste laboratório.

<sup>29</sup> A parte experimental do presente estudo, e outros estudos ao redor deste tema estão sendo realizados neste laboratório.

Desta forma, pretendeu-se analisar, sistematizar o material existente e apresentar subsídios para avaliações comparativas entre o sistema tradicional de reforço (gaiolas de aço) e o reforço moderno (CRFA) em obras de túneis que irão utilizar anéis pré-moldados segmentados em concreto no Brasil.

Sistematizado o conhecimento, foi elaborado o programa experimental em escala real.

Na ocasião do início dos estudos, teve início a obra de engenharia da linha 4 do metrô de São Paulo, com a possibilidade de aplicação do CRFA nos anéis para revestimentos dos túneis.

A tenacidade é a ferramenta principal de avaliação de um compósito reforçado com fibras de aço, portanto dois documentos considerados adequados foram consultados para realização dos ensaios, sendo eles RILEM TC 162-TDF e JSCE SF4. Com os resultados disponíveis, foi possível discutir as limitações destas recomendações, como documentos de avaliação e controle da tenacidade do concreto dos anéis segmentados.

Ensaio com o objetivo de simular situações reais desde a fabricação até a instalação dos anéis no túnel foram executados.

Este material poderá ser utilizado para orientação em laboratórios de controle tecnológico e, também, para fornecer subsídios para adoção de critérios de projeto que possam ser utilizados na produção de anéis pré-moldados, em escala industrial.

#### **1.4 Conteúdo da Dissertação**

O presente estudo está dividido em 6 capítulos. No primeiro capítulo são apresentados à justificativa do estudo, os pesquisadores, centros de pesquisa no Brasil, no exterior e os objetivos deste estudo.

No capítulo 2 são apresentados conceitos básicos sobre o CRFA, considerações sobre as propriedades mecânicas (resistência à compressão, ao impacto) e a durabilidade do CRFA para utilização em aduelas. São apresentadas também vantagens da aplicação do CRFA em aduelas, comparativamente ao reforço tradicional em gaiolas.

No capítulo 3 é conceituada a tenacidade, discutidos os mecanismos e descritos os métodos de ensaio de duas recomendações - JSCE (Japonesa) e RILEM (Europeia). Há também uma discussão sobre a utilização da tenacidade como forma de dimensionamento, ou não, de aduelas em CRFA.

No capítulo 4 estudos de caso em diferentes países como a África do Sul, Inglaterra, Equador, Singapura e Japão, foram escolhidos representando a importância do tema e reforçando o conteúdo do estudo experimental.

No capítulo 5, é apresentado o estudo experimental, que consiste na seguinte análise: caracterização dos materiais, simulação da fase construtiva das aduelas em escala real, simulação da fase executiva do túnel e simulação do túnel em serviço. Contou inclusive com a montagem de um anel de 8,43 m de diâmetro interno (escala real).

No capítulo 6 são apresentadas as considerações finais sobre a utilização do CRFA em aduelas, orientações práticas, considerações sobre o mercado de fibras em geral e sugestões de aplicação, fruto das experiências realizadas em campo e laboratório.

## 2. CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO

### 2.1 Generalidades

O CRFA é um compósito onde a matriz é de pasta de Cimento Portland (material de ruptura a compressão e tração do tipo frágil), e o reforço é feito pela adição de fibras de aço (material dúctil). Este tema já foi largamente discutido<sup>30</sup> e o objeto de estudo do presente trabalho é a aplicação deste compósito em aduelas. Informações como, classe das fibras, tipos de aços utilizados na produção, limitações, variações permitidas no processo de fabricação, geometria, tipos de ancoragens, ensaios de dobramento<sup>31</sup>, fator de forma das fibras<sup>32</sup> e outras interpretações são encontradas em diversos documentos, como por exemplo a Norma ASTM A 820-01<sup>33</sup>.

O concreto com adição de fibras possui algumas propriedades que o diferenciam do concreto sem reforço, tanto no estado fresco, quanto no estado endurecido. No estado fresco pode ocorrer a redução da retração plástica e exsudação. No estado endurecido, incrementos na tenacidade à flexão, resistência à propagação de fissuras, resistência ao impacto, a fadiga e ao cisalhamento.

O incremento dessas propriedades depende tanto do tipo e volume das fibras adicionadas, quanto das propriedades da matriz, porém este acréscimo não é proporcional a incorporação de fibras, podendo ocorrer problemas de compactação e conseqüentemente o comprometimento do comportamento pós fissuração (CECATTO, NUNES E FIGUEIREDO,1997).

Para que se obtenha uma melhor eficiência do compósito é necessária uma atenção especial a trabalhabilidade da mistura. A adição das fibras de aço

---

<sup>30</sup> BENTUR, A.; MINDESS, S. Fibre Reinforced Cementitious Composites. United Kingdom. Barking, Elsevier. 1990.

<sup>31</sup> Este ensaio é citado na norma ASTM A820 (1994<sup>a</sup>) folha 2 item 7.2.1. Trata-se de um controle para que não haja quebra das fibras durante a mistura do concreto.

<sup>32</sup> Relação de aspecto é dada pela relação entre o comprimento e o diâmetro no caso de fibras de secção circular, e diâmetro equivalente no caso de secção retangular.

<sup>33</sup> AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard Specification for Steel Fibers for Fiber Reinforced Concrete. ASTM A 820/01.** Annual Book of ASTM Standards, v. 01.03 ; v.04.02 August 2001.

aumenta consideravelmente a coesão da mistura fresca dificultando seu lançamento e adensamento<sup>34</sup>.

O CRFA pode ser de consistência para lançamento convencional ou de bomba. No caso das aduelas, de acordo com cada layout de fábrica, o lançamento pode ser feito direto do misturador para dentro da fôrma<sup>35</sup>, passando ou não por esteiras transportadoras.

As fibras de aço podem possuir deformações nas extremidades do seu comprimento (ancoragens tais como ganchos, halteres, cones), ou ainda podem possuir deformações que podem se estender ao longo de todo o seu comprimento (fibras onduladas). A ancoragem tem o objetivo de melhorar o desempenho das fibras (BENTUR E MINDESS, 1990; BANTHIA E TROTTIER,1994). Para este estudo foram escolhidas fibras de aço com ancoragens nas pontas de aço trefilado e laminado, mais detalhes sobre estas fibras podem ser encontrados na Tabela 10 Tabela 11 e Tabela 12.

O embolamento das fibras durante a mistura está relacionado com o teor de fibras<sup>36</sup>, o fator de forma<sup>37</sup>, o tamanho do agregado<sup>38</sup>, e a forma como são adicionadas as fibras à mistura<sup>39</sup>. Uma mistura que não possua a trabalhabilidade adequada pode ter a resistência mecânica negativamente afetada e a durabilidade comprometida. Uma menor compactação da mistura, deixando ninhos de concretagem no compósito, pode comprometer a aderência

---

<sup>34</sup> CECCATO, M.R. **Estudo da trabalhabilidade do concreto reforçado com fibras de aço**. São Paulo, 1998, 98p. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

<sup>35</sup> Em geral concreto de consistência seca e vibradores acoplados às fôrmas metálicas articuladas.

<sup>36</sup> CECCATO, M.R. **Estudo da trabalhabilidade do concreto reforçado com fibras de aço**. São Paulo, 1998, 98p. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

<sup>37</sup> Quanto maior for este valor maior deve ser o cuidado com a mistura. A ASTM A820 recomenda um fator de forma ( $L/d$  ou  $L/d_e$ ) máximo igual a 80.

<sup>38</sup> De acordo com Mindess (1990), é recomendado que o diâmetro máximo do agregado graúdo não seja maior que a metade do comprimento da fibra utilizada, para que a fibra de aço possa ter melhor contribuição no reforço.

<sup>39</sup> As fibras de aço podem ser adicionadas na central de concreto, diretamente na esteira junto com os agregados, ou no caminhão betoneira. É importante que se tenha um fluxo constante e contínuo, para evitar concentrações de fibras na mistura. Após a adição das fibras, deve-se contar o tempo de mistura de 1 minuto para cada  $m^3$  de concreto em rotação média da betoneira. No caso das aduelas, as fibras são levadas até o pátio de produção dos anéis, podem ser armazenadas a granel (em silos) ou em sacos, e adicionadas mecanicamente no momento da mistura do concreto imediatamente antes de seu lançamento.

fibra-matriz, prejudicando a característica mais importante do CRFA que é o comportamento pós-fissuração (Bentur e Mindess,1990).

De acordo com o ACI 544-94R, para o CRFA, em geral, são recomendadas misturas com teor de argamassa mínimo de 50%. Através dos avanços obtidos pelas indústrias fornecedoras de materiais para o concreto (adições, cimentos especiais, aditivos redutores de água e aceleradores) e a modernização de equipamentos (dosadores de fibras, robôs de projeção de concreto, etc.), a utilização do concreto reforçado com fibras foi ampliada, e beneficiada.

No mercado nacional são encontradas atualmente fibras de aço que variam de 25mm a 60mm de comprimento, e diâmetros de 0,55mm a 1,05mm com diversos fatores de forma e tipos de ancoragens.

Fibras de aço que possuem comprimento entre 25mm e 36mm são geralmente utilizadas para concreto projetado, e fibras entre 45mm e 60mm são utilizadas em pisos, pavimentos. Para aplicação em pré-moldados as fibras variam de acordo com a necessidade da peça, por exemplo, fibras de 25mm até 30mm para paredes de cofre com limitação na espessura; fibras longas para tubos. Misturas de diferentes fibras (longas e curtas) podem também ser utilizada.

Como citado anteriormente as aplicações são diversas. O teor e o tipo de fibra a ser adicionado ao concreto varia sempre de acordo com a finalidade ao qual o material é direcionado. É sabido que, em geral, a quantidade de fibra pode variar entre 20 e 30 kg/m<sup>3</sup> para pisos e pavimentos industriais, e de 45 a 60 kg/m<sup>3</sup> para o concreto projetado. No caso das aduelas, como será visto no capítulo 4 o consumo fica entre 30 e 60 kg/m<sup>3</sup>, de acordo com o tipo de fibra e matriz, em combinação com armadura convencional (gaiolas ou telas) ou não, conforme cada projeto<sup>40</sup>.

---

<sup>40</sup> No caso da obra de Lesotho, vários tipos de reforços foram comparados e apresentados na Os tipos de segmentos preparados para os ensaios em escala real estão relacionados na Tabela 7; pode-se observar o total de 116 segmentos.

Tabela 7

## **2.2 Considerações sobre as Propriedades Mecânicas do CRFA para Aduelas**

As propriedades mecânicas do CRFA são influenciadas pelo tipo de fibra comprimento, diâmetro, fator de forma, quantidade de fibras, resistência da matriz, tamanho, formato, método de preparação dos corpos-de-prova e tamanho do agregados (ACI 544.4R-3). Por esta razão, para um projeto específico, é recomendado que se faça estudo de dosagens e ensaios para que sejam verificados valores assumidos em projeto.

### *Resistência à Compressão*

É sabido que a adição de fibras nas dosagens usuais de até 60 kg/m<sup>3</sup>, mesmo no caso das aduelas, e conforme já citado por vários pesquisadores<sup>41,42</sup>, não altera a resistência à compressão do concreto. Contudo, por ser o parâmetro de referencia em tecnologia de concreto é de fundamental importância que se determine este valor<sup>43</sup>.

### *Resistência ao Impacto*

Especialmente no caso da aplicação do CRFA em aduelas para túneis, o aumento da resistência ao impacto passa a ser um dos benefícios principais.

De acordo com o ACI 544.4R-88<sup>44</sup>, baseado em varias pesquisas, a propriedade de resistir a esforços dinâmicos, tais como, queda de massas, cargas explosivas e outras, pode aumentar de 3 a 10 vezes a resistência a esses esforços.

Um material dúctil apresenta maior resistência ao impacto, pois através de deformações plásticas consegue dissipar grande parte dessa energia<sup>45</sup>. Com a adição das fibras ao concreto, o compósito passa a ter um comportamento

---

<sup>41</sup> BENTUR, A.; MINDESS, S. **Fibre Reinforced Cementitious Composites**. United Kingdom. Barking, Elsevier. 1990.

<sup>42</sup> METHA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais**. PINI Editora, São Paulo, S.P.1994.

<sup>43</sup> Até porque a partir do valor de resistência a compressão se estima de acordo com modelos existentes varias outras propriedades do concreto.

<sup>44</sup> AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **Manual of concrete practice: part 5**. ACI. Design considerations for steel fiber reinforced concrete. (ACI 544.4R-88).ACI Committee 544. Detroit, USA,1988.(Reapproved 1994)18p.

<sup>45</sup> Para que haja a ruptura do compósito é necessário que ocorra o arrancamento da fibra.

pseudo-dúctil, e portanto, de maneira semelhante, para ruptura por esforços dinâmicos, irá precisar um gasto maior de energia.

Esta propriedade pode ser alterada em função das características das fibras (forma geométrica, fator de forma, tipo de ancoragem), dos tipos de matérias-primas (sintéticas, aço, etc.) e do teor de fibras incorporado.

De acordo com RAMAKRISHNAN<sup>46</sup>, o ensaio de queda utilizando-se peso e altura padrão conforme a ASTM D1557 não apresenta valores precisos em relação aos valores coletados através da execução do ensaio. Por este motivo, embora seja aceitável do ponto de vista qualitativo, considera que os resultados do ensaio não podem ser tomados como uma verdade científica<sup>47</sup>.

Não foram encontrados na literatura modelos que expressam com exatidão a influência das propriedades do concreto (i.e. especialmente relacionando a resistência à compressão, por exemplo) na resistência ao impacto do CRFA.

### *Durabilidade*

Os principais objetos de estudo da durabilidade do concreto – ataque por carbonatação, ataque por cloretos, penetração de água sob pressão, absorção por imersão em fervura, entre outros – podem tornar-se objeto de dúvida, quando se adicionam fibras de aço. Uma vez que a adição de fibras contribui especialmente para a diminuição da retração e distribuição homogênea de micro-fissuras, é de se esperar que um concreto com fibras apresente índices de avaliação da durabilidade acrescidos em relação ao mesmo concreto sem fibras. Contundentemente, como é mostrado mais à frente, é prudente que se execute os ensaios desejados a fim de se avaliar a influência da adição de fibras, de acordo com cada projeto.

Em geral, obras de grande porte, onde os critérios de projeto (em função das características locais) são rigorosos, além das medidas tradicionais para a

---

<sup>46</sup> RAMAKRISHNAN, V.; GEORGE, Y.W.; HOSALLI, G. Flexural Fatigue Strength, Endurance Limit, and Impact Strength of Fiber Reinforced Concretes. **Transportation Research Record**. n.1226, 1989, p.17-24.

<sup>47</sup> E sim como um indexador comparativo. Por exemplo, concretos podem ser comparados entre si com um valor padrão de resistência ao impacto, expresso em porcentagem.

melhoria dos índices de durabilidade<sup>48</sup>, ainda são sugeridas, com freqüência, a adição de fibras a concretos que estejam expostos a cargas dinâmicas, como é o caso da produção, manuseio, transporte e montagem dos anéis compostos por aduelas.

Mesmo com o concreto fissurado<sup>49,50</sup>, em ambientes agressivos, por exemplo, as fibras de aço podem apresentar resistência à corrosão de tal forma que não haja perda de secção transversal e, conseqüentemente, perda de desempenho da estrutura; as fibras mostraram também eficiência no controle da fissuração através da redistribuição das mesmas.

A durabilidade do CRFA aplicado nas aduelas com relação à corrosão pode ser uma solução viável e beneficiada; considerando o reforço como descontínuo, conseqüentemente não há formação da pilha de corrosão eletrolítica, que é o motivo principal da redução da vida útil em diversas estruturas de concreto armado.

### ***2.3 Vantagens da Aplicação do CRFA em Aduelas Pré-Moldadas***

Alguns trechos da rede subterrânea do Metrô de São Paulo, construída há mais de 20 anos, foram revestidas por aduelas, tanto de aço, quanto em concreto armado. Com a utilização crescente do CRFA no Brasil, pode surgir a possibilidade de aproveitar esta tecnologia na produção das aduelas visando vantagens técnicas e econômicas. A utilização do CRFA em aduelas apresenta as seguintes vantagens.

#### *Aumento da Ductilidade (comportamento pseudo-dúctil)*

A partir de estudos feitos atualmente<sup>51</sup>, nota-se que, para túneis feitos com anéis segmentados, o reforço com fibras de aço passa a ser uma solução. O CRFA

---

<sup>48</sup> Consumo de cimento, relação água/cimento, etc.

<sup>49</sup> CHANVILLARD, G.; AITCIN, P.C.; LUPIEN, C. Field Evaluation of steel fiber reinforced concrete overlay with various bonding mechanisms. **Transportation Research Board**, 1226, 1989, p.48-56.

<sup>50</sup> KOSA, K.; NAAMAN, A. Corrosion of Steel Fiber Reinforced Concrete. **ACI Materials Journal**, v. 87, n1, Jan-feb. 1990. p.27-37.

<sup>51</sup> Como os do CTRL citados no capítulo 4 deste documento.

tende a aumentar o comportamento dúctil do concreto, partindo-se de uma matriz essencialmente frágil. A ruptura do compósito, também no caso de cargas dinâmicas, se dá pela propagação das fissuras, a cada solicitação. Este comportamento depende claramente dos valores de deformações da matriz (módulo de elasticidade), das fibras<sup>52</sup> em si, da geometria da estrutura, da aderência das fibras à matriz, do consumo das fibras no compósito e de outras propriedades que podem ser atreladas à resistência à compressão do concreto. Ao final, o aumento do comportamento pseudo-dúctil do compósito (ductilidade) contribui para o aumento de capacidade de deformação e de absorção de energia (tenacidade). Desta forma, podem ser evitados efeitos indesejáveis advindos de cargas diversas, contribuindo em várias etapas do processo desde a fabricação até a montagem do anel, auxiliando na preservação da integridade de cada peça.

#### *Diminuição dos Reparos*

Manifestações patológicas apresentadas nas aduelas armadas com gaiolas, como fissuras diversas e lascamentos, provocados por fendilhamento<sup>53</sup> (freqüentemente encontrados nos anéis instalados nos túneis), são atribuídos às deficiências que as peças possuem quando postas no ciclo de produção e montagem.

Em geral, o que ocorre são quebras das bordas das peças em função da necessidade do cobrimento das armaduras por questões de durabilidade – prevenção da corrosão.

---

<sup>52</sup> Tipo de fibra, fator de forma, tipo de ancoragem, comprimento da fibra.

<sup>53</sup> Este tema será abordado com detalhes no item 5.4



**Figura 1 Quebra durante a instalação da aduela em virtude da zona fragilizada no contato da armadura com o concreto<sup>54</sup>.**

Reparos nas aduelas ainda durante a sua fabricação, após as diversas etapas do armazenamento<sup>55</sup>, ou após a instalação no túnel, geram custos extras indesejados.



**Figura 2 Reparos nas aduelas após a montagem do anel (mal executados), indesejáveis e de alto custo.**

A Figura 2 mostra um reparo mal executado em duas aduelas que sofreram lascamento devido ao posicionamento das sapatas de apoio da máquina tuneladora. O procedimento correto seria delimitar a região afetada com disco de corte, evitando que os reparos tenham espessura “morrendo em zero”. Além disto, respeitar as juntas de cada peça permitindo movimentação independente.

---

<sup>54</sup> Obra do metro na Venezuela.

<sup>55</sup> No pátio da fábrica, no canteiro de obras ou dentro do túnel, antes da instalação.

Com o reforço feito em fibras, estes custos são minimizados<sup>56</sup>. Conforme trabalho apresentado por COSTA<sup>57</sup> a maior resistência ao impacto contribui para minimizar as ocorrências citadas.

### *Reforço Estrutural*

As fibras adicionadas ao concreto apresentam orientação aleatória e são distribuídas por toda a secção. Desta forma, as propriedades de resistência à tração e ao impacto do compósito com fibras de aço encontram-se também nas partes consideradas inicialmente frágeis, uma vez que as fibras reforçam os cantos imediatamente abaixo da superfície, evitando quebras diversas. A adição de fibras de aço ao concreto das aduelas procura fazer com que a peça seja capaz de absorver os esforços de tração localizados (especialmente nas bordas e cantos) que surgem durante o processo, seja no transporte ou na instalação dos anéis. Assim, por efeito de manutenção da capacidade portante do material, mesmo após a ruptura da matriz de concreto (tenacidade), sugere-se que as aduelas reforçadas com fibras podem oferecer menos riscos em relação à segurança e integridade estrutural.

### *Área Disponível para Produção*

Atualmente nos centros urbanos, grandes terrenos disponíveis para instalação de um centro de produção de elementos pré-moldados, como o necessário para fabricação dos anéis compostos por aduelas podem ser difíceis de ser encontrados. Normalmente estas grandes áreas necessárias são de alto custo, isto porque, embora os custos variem com o tamanho da instalação, ainda há aspectos legais tais como desapropriações, que podem atrapalhar o cronograma da obra ou num caso extremo até inviabilizar negociações.

Caso a solução adotada para o reforço seja a tradicional, na planta de produção deve ser prevista uma área para recebimento do aço, manuseio, preparo das

---

<sup>56</sup> RLE- Rail Link Engineering. Steel fibre reinforced concrete for tunnel linings. **Channel tunnel rail link**, technical report nº 000-RUG-RLEEX-00008-AA

<sup>57</sup> COSTA, F.R.; **Avaliação do concreto incorporando fibras de polipropileno**. Relatório de bolsa pesquisa – SAE Fitesa. Campinas, 2004.

gaiolas (cortes, dobras e amarrações das armaduras) e estoque das gaiolas prontas até a moldagem das peças.



(a)

(b)

**Figura 3 (a) “Gaiolas” de aço após montagem e sua estocagem ao fundo dentro da fabrica e (b) estocagem das “gaiolas” na área externa da fabrica<sup>58</sup>.**

No caso da utilização do CRFA além da redução de mão-de-obra, manuseio e estocagem das gaiolas, a redução do tamanho da fábrica e redução do estoque são economias adicionais que podem ser obtidas<sup>59</sup>.

Uma das vantagens das fibras sob este aspecto é que elas podem ser transportadas e armazenadas à granel<sup>60</sup> na planta de fabricação, e adicionadas na fase de mistura do concreto. Por ficarem armazenadas em grande quantidade, podem ser adicionadas mecanicamente, através de equipamentos automáticos onde vibradores são acoplados, garantindo dosagem homogênea no momento da mistura.

### *Benefícios Adicionais*

Uma preocupação atual, tanto em projetos de novas obras quanto em obras subterrâneas já existentes, é a ocorrência de incêndios. Atualmente, em vários projetos de túneis são discutidas as possíveis maneiras de tornar a estrutura subterrânea resistente ou até mesmo a prova de fogo. Alternativa, seria a utilização de fibras sintéticas, que contribuem para reduzir os deslocamentos

---

<sup>58</sup> Obra do metrô na Venezuela

<sup>59</sup> Como pode ser visto no capítulo 4

<sup>60</sup> Big bags de 500 kg a 1000 kg, em geral, que ocupam espaços reduzidos.

explosivos do concreto frente às ações nocivas do fogo (denominado Spalling<sup>61</sup>,<sup>62,63,64</sup>). A incorporação das fibras de polipropileno ao concreto segundo os autores, NINCE et Al<sup>65</sup>, se fundiriam com o aumento da temperatura ocasionado por um incêndio, gerando vazios. Estes vazios seriam fundamentais na formação de canalículos que trariam alívio para pressões internas geradas pelo vapor.<sup>66</sup> Uma outra idéia seria projetar uma estrutura de concreto que permitisse, de acordo com o layout do projeto, a evacuação segura dos usuários em um determinado intervalo de tempo. Ou ainda, a aplicação de barreiras de proteção de argamassa<sup>67</sup> (sem função estrutural), que servem de camada de sacrifício. Desta forma, a estrutura ficaria protegida por um determinado número de horas, a ser definido em cada projeto, permitindo, além da evacuação, o combate ao incêndio preservando a integridade estrutural e equipamentos.

De acordo com experiências em obras subterrâneas<sup>68</sup> de outros países e informações obtidas junto a fabricantes de aduelas para túneis<sup>69</sup>, uma máquina tuneladora necessita de um pulmão<sup>70</sup> de alguns meses de aduelas estocadas antes do início da obra. Isto demanda uma área grande de produção e estoque.

---

<sup>61</sup> WOODS, E. Fire considerations n the CTRL tunnels. **Tunnels & Tunnelling International**, May v. 36, n. 5, 2004.p.52-55.

<sup>62</sup> Um dos exemplos mais significativos da aplicação desta tecnologia, foi a obra do Channel Tunnel Rail Link.

<sup>63</sup> RLE- Rail Link Engineering. Steel fibre reinforced concrete for tunnel linings. **Channel tunnel rail link**, technical report nº 000-RUG-RLEEX-00008-AA

<sup>64</sup> CAFARO, E. Testing tunnel fire suppression systems. **Tunnels & Tunnelling International**, June v.36, n.6 2004.p.39-42

<sup>65</sup> NINCE, A.A.; COSTA, C.N.; FIGUEIREDO, A.D.e SILVA, V.P. – **Influência de Fibras de Polipropileno no Comportamento do Concreto de Alta Resistência, Submetido à Ação Térmica**. São Paulo, S.P. 2002

<sup>66</sup> De acordo com NINCE, Figueiredo e Silva (durante o processo de Spalling) para temperaturas superiores a 100 °C a água em combinação com o C-S-H, começa a evaporar, gerando pressão nos poros. Em concretos de alta resistência deve se ter mais atenção, frente a baixa permeabilidade do mesmo.

<sup>67</sup> Barreiras de sacrifício feitas de argamassa base cimento com fibras de polipropileno, ‘agregados refratários e alto teor de ar incorporado (ao redor de 30%), como o Meyco Fix Fireshield 1350 da Degussa, por exemplo.

<sup>68</sup> CTRL (Londres), Metro de Caracas e Valencia (Venezuela)

<sup>69</sup> Bernold-Ceresola, Romtech, CELE e outros

<sup>70</sup> “Pulmão” é a maneira como é chamado um estoque de aduelas.



**Figura 4 “Pulmão” de aduelas em uma fábrica de anéis<sup>71</sup>.**

Ao final, além dos critérios de desempenho teórico, do ponto de vista estrutural e de materiais, pode-se identificar alguns pontos para avaliar na prática o desempenho final do concreto das aduelas reforçadas com fibras de aço, dentre os quais, pode-se destacar: acabamento das aduelas (dado pela combinação do concreto e das fôrmas), içamento facilitado, estocagem, transporte, manuseio e instalação, objetivando a redução da ocorrência de quebras e otimização da cadeia produtiva do anel como um todo. Devido ao número de etapas até a aduelas serem instaladas, interagindo-se com a concepção de projeto da planta e logística de entrega das aduelas na frente de serviço; fica evidente, portanto, a importância de redução da área total a ser dispensada para produção e armazenamento tanto na planta quanto ao longo do canteiro de obras.

---

<sup>71</sup> Obra do metrô na Venezuela.

## 3. TENACIDADE

### 3.1 Introdução

A tenacidade é a mais importante característica nos compósitos reforçados com fibras de aço (BENTUR e MINDESS, 1990; ACI, 1989). BENTUR e MINDESS (1990), observaram que a vantagem da adição de fibras é demonstrada no estado pós-fissuração do concreto. Como já explicado anteriormente, as fibras atravessam as fissuras e suportam o processo de arrancamento, de tal forma que a deformação somente pode continuar com um novo acréscimo de energia proveniente do aumento do carregamento, ou seja, as fibras adicionadas ao concreto contribuem para o incremento de absorção de energia.

### 3.2 Mecanismos

A ruptura do concreto sem reforço se dá pela propagação de fissuras que tem o seu início em imperfeições em sua microestrutura. Quando isso acontece são formadas tensões que se concentram e avançam; como o concreto não tem um comportamento plástico, as fissuras propagam preferencialmente nas regiões de interface entre o agregado graúdo, e a pasta do concreto. As fibras de aço devem atuar restringindo o avanço destas fissuras, transmitindo estas tensões. As fibras de aço podem escoar, romper ou arrancadas da matriz, sendo estes os principais mecanismos de reforço, ou seja, para a fissura avançar é necessário um maior gasto de energia. Este aumento de energia conseqüentemente produz o aumento da tenacidade<sup>72</sup>.

Para se obter uma melhor contribuição das fibras é importante que estas estejam aleatoriamente distribuídas na matriz, e que também haja compatibilidade<sup>73</sup> entre os agregados e as fibras, de modo que estas interceptem com maior freqüência às fissuras que ocorrem no compósito.

---

<sup>72</sup> BENTUR, A.; MINDESS, S. *Fibre Reinforced Cementitious Composites*. United Kingdom. Barking, Elsevier. 1990.

<sup>73</sup> BENTUR, A.; MINDESS, S. **Fibre Reinforced Cementitious Composites**. United Kingdom. Barking, Elsevier. 1990. Trata-se da compatibilidade dimensional entre o diâmetro máximo dos agregados graúdos e o comprimento das fibras.

### 3.3 Recomendação Japonesa

Uma das normas utilizada para determinação da tenacidade do concreto reforçado com fibras de aço é a JSCE SF4 “Method of Tests for Flexural Strength and Flexural Toughness of Steel Fiber Reinforced Concrete”, que teve sua última revisão em 1984.

Segundo esta norma são apresentadas na Tabela 1 as dimensões dos corpos-de-prova utilizados para ensaios com fibras de aço maiores ou menores de 40mm e os parâmetros monitorados no ensaio.

**Tabela 1 Parâmetros da recomendação japonesa.**

JSCE SF4 -1984				
C.P. em forma de Prisma	Dimensões (mm)	fibra < 40mm	fibra > 40 mm	Local no C.P.
		b	100	150
	d	100	150	Altura
	L	300	450	Vão Livre entre cutelos
	C	350	500	Comprimento do prisma
Parâmetros Monitorados: Carga por deslocamento vertical medida no meio do vão ou nos cutelos				
Medida ou Fator da Tenacidade: Energia Absorvida até o deslocamento vertical equivalente a L/150				

Esta norma define tenacidade como sendo a área sob a curva *carga x deslocamento vertical*, para um deslocamento máximo de L/150. Ou seja, para um corpo-de-prova onde L = 300 mm, as leituras devem ser feitas até o final (ruptura total do corpo-de-prova). Contudo, para efeitos de cálculo é considerada a energia até o deslocamento vertical de 2 mm. Para L = 450 mm o valor deste deslocamento é de 3 mm.

A Figura 5 é a ilustração da *curva x deslocamento vertical* obtida no ensaio e o esquema de carregamento de acordo com esta recomendação:

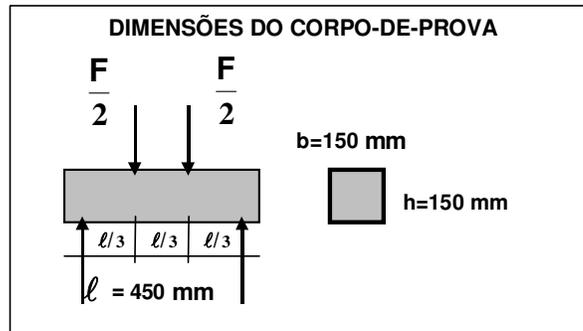
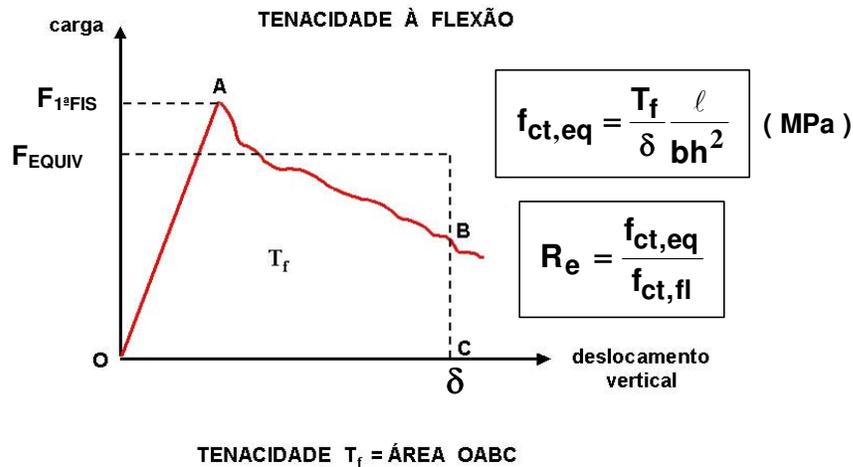


Figura 5 Critério da JSCE-SF4 para quantificação da tenacidade à flexão.

### 3.4 Recomendação Europeia – RILEM

A especificação mais recentemente publicada para avaliar o comportamento de concretos reforçados com fibras é a da RILEM TC 162 – TDF: Test And Design Methods For Steel Fibre Reinforced Concrete (B), publicada em novembro de 2002. De acordo com esta especificação, o comportamento à tração do material é avaliado através da análise do diagrama *carga x deslocamento vertical* ou *carga x abertura da fissura*, obtido em ensaios de corpos - de - prova prismáticos entalhados submetidos a uma carga concentrada no meio do vão.

O ensaio deve ser realizado com controle de deslocamento. Para tanto, a máquina utilizada deve ser capaz de produzir um acréscimo constante no deslocamento ou abertura do entalhe, e sua rigidez deve ser suficiente para evitar zonas de instabilidade na curva *carga x deslocamento*. O aparato de medição do deslocamento deve ser capaz de registrar de forma precisa, a flecha

no meio do vão, devendo-se excluir medidas com interferências devidas a deformações da máquina ou dos apoios. O medidor deve ser ajustado de forma a minimizar o efeito da rotação. Na Figura 6 são mostrados detalhes dos corpos-de-prova e de sua instrumentação.

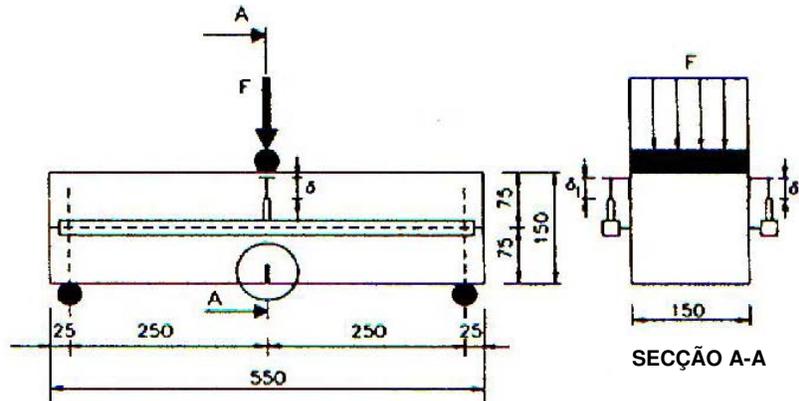


Figura 6 Detalhes do corpo-de-prova e instrumentação CMOD<sup>74</sup>

Detalhes da região do entalhe e da base de medida do CMOD são mostrados na Figura 7:

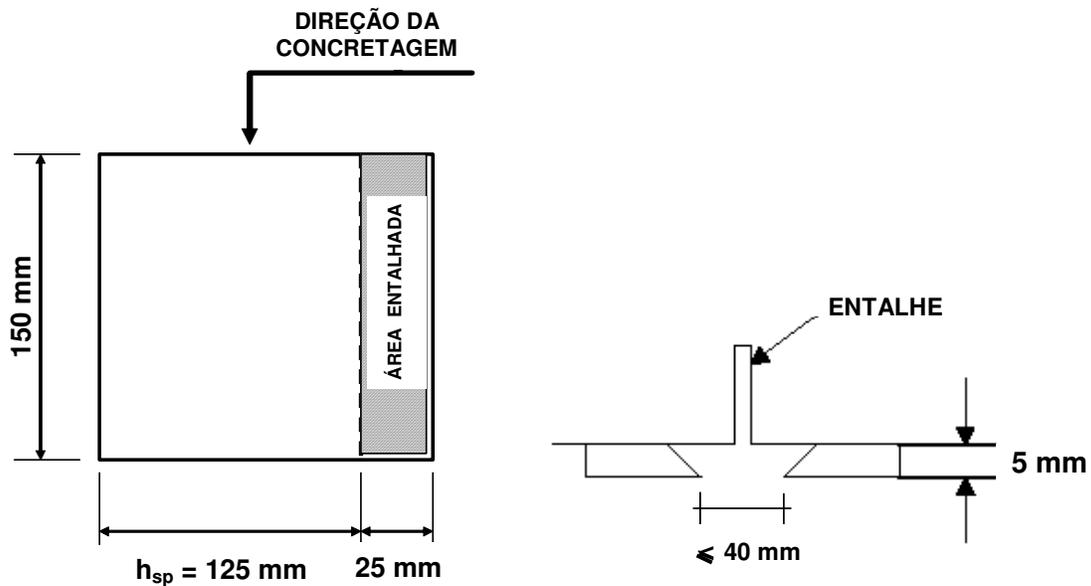


Figura 7 Região do entalhe e base de medida do CMOD

As curvas obtidas são utilizadas para a determinação das seguintes propriedades do material:

<sup>74</sup> CMOD é a abreviatura em inglês de Crack Mouth Opening Displacement.

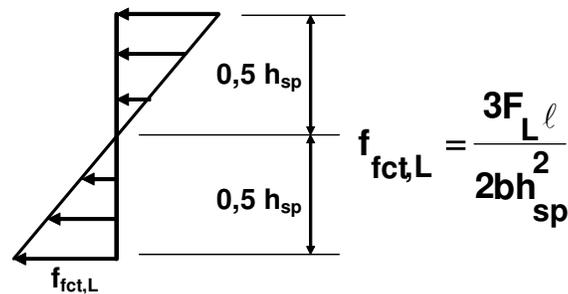
- **tensão limite de proporcionalidade;**
- **resistências equivalentes de tração na flexão;**
- **resistências residuais de tração na flexão.**

A carga limite de proporcionalidade do compósito (  $F_L$  ) é o maior valor encontrado no intervalo até 0,05mm do diagrama *carga x deslocamento vertical* ou *carga x abertura da fissura*.

A esta carga corresponde o seguinte valor do momento fletor, no meio do vão, da viga ensaiada:

$$M_L = \frac{F_L}{2} \cdot \frac{\ell}{2} \text{ onde } \ell \text{ é o vão entre apoios.}$$

Assumindo a distribuição de tensões na secção transversal mostrada na Figura 8, obtém-se a tensão limite de proporcionalidade  $f_{fct,L}$  :



**Figura 8 Distribuição de tensões.**

Onde  $h_{sp}$  é distância entre o topo do entalhe e a face superior da secção (125 mm).

A capacidade de absorção de energia do compósito, ou seja, a sua tenacidade, é numericamente igual à área sob a curva *carga x deslocamento vertical*, a qual é determinada para dois níveis de deslocamento:

- $\delta_2 = \delta_L + 0,65 \text{ mm}$
- $\delta_3 = \delta_L + 2,65 \text{ mm}$

A Figura 9 apresentada exemplifica a determinação das tenacidades do compósito para os níveis de deslocamento acima mencionados.

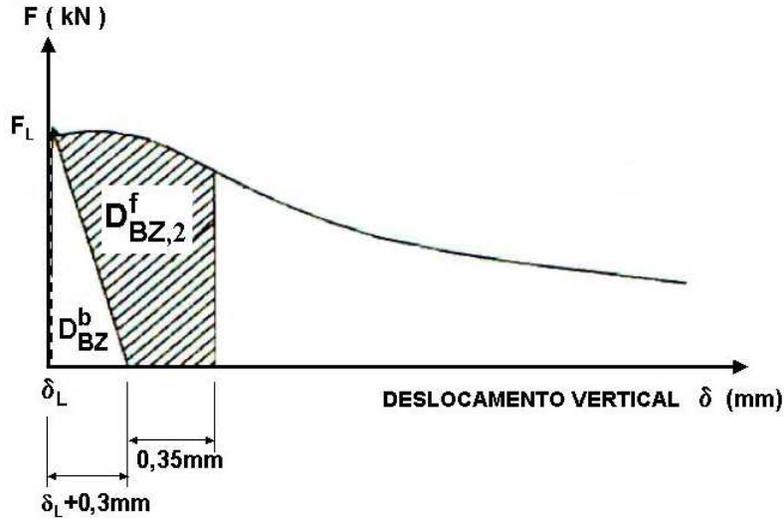


Figura 9 Diagrama carga x deslocamento vertical para determinação de feq,2

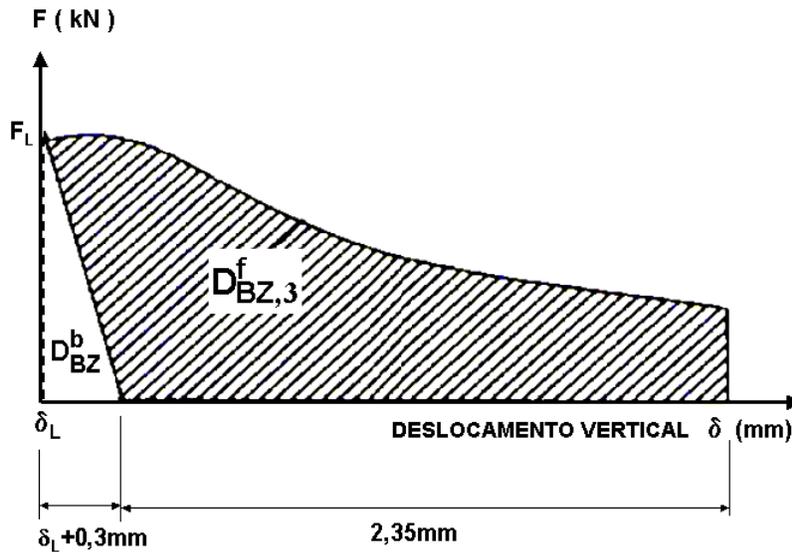


Figura 10 Diagrama carga x deslocamento vertical para determinação de feq,3

As tenacidades correspondentes aos deslocamentos  $\delta_2$  e  $\delta_3$  são obtidas pelo cálculo das áreas sob as curvas, onde  $D_{BZ}^b$  corresponde à contribuição do concreto e  $D_{BZ,2}^f$  e  $D_{BZ,3}^f$  às contribuições das fibras.

Pode-se, desta forma, determinar as forças médias  $F_2$  e  $F_3$ , obtidas por:

$$F_2 = \frac{D_{BZ,2}^f}{0,50} \qquad F_3 = \frac{D_{BZ,3}^f}{2,50}$$

para as quais correspondem os seguintes momentos flectores na secção do meio do vão da viga ensaiada:

$$M_2 = \frac{F_2}{2} \frac{\ell}{2} = \left( \frac{D_{BZ,2}^f}{0,50} \right) \frac{\ell}{4} \quad M_3 = \frac{F_3}{2} \frac{\ell}{2} = \left( \frac{D_{BZ,3}^f}{2,50} \right) \frac{\ell}{4}$$

Assumindo a distribuição de tensões na secção transversal mostrada na Figura 8, obtém-se as resistências equivalentes à tração na flexão para os dois níveis de deslocamentos verticais considerados, dadas por:

$$f_{eq,2} = \frac{3}{2} \left( \frac{D_{BZ,2}^f}{0,50} \right) \frac{\ell}{bh_{sp}^2} \text{ (MPa)} \quad f_{eq,3} = \frac{3}{2} \left( \frac{D_{BZ,3}^f}{2,50} \right) \frac{\ell}{bh_{sp}^2} \text{ (MPa)}$$

As resistências residuais à tração na flexão  $f_{R,i}$  são determinadas para deslocamentos verticais  $\delta_{R,i}$  ou a partir da curva *carga x abertura da fissura* (**CMOD**), cujo traçado é exemplificado na Figura 11.

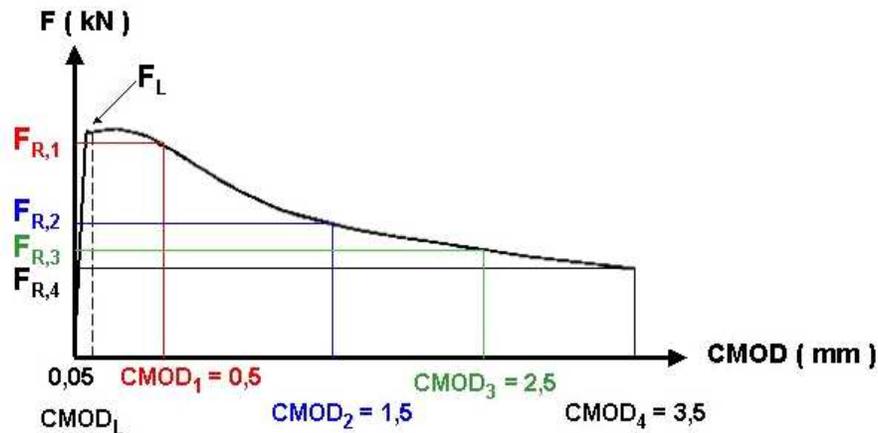


Figura 11 Diagrama carga x CMOD

Assumindo a mesma distribuição de tensões na secção transversal mostrada na Figura 8, obtém-se as resistências residuais à tração na flexão, expressas por:

$$f_{R,i} = \frac{3 F_{R,i} \ell}{2 bh_{sp}^2} \text{ (MPa)}$$

Sabendo-se que a relação média entre **CMOD** e  $\delta$  é expressa por:

$$\text{CMOD} = 1,18\delta + \beta \quad \text{com } \beta = -0,0416 \text{ mm}$$

pode-se determinar as cargas  $F_{R,i}$  para os seguintes níveis de deslocamento vertical ou de **CMOD**:

$$\delta_{R,1} = 0,46 \text{ mm} \rightarrow \text{CMOD}_1 = 0,50 \text{ mm}$$

$$\delta_{R,2} = 1,31 \text{ mm} \rightarrow \text{CMOD}_2 = 1,50 \text{ mm}$$

$$\delta_{R,3} = 2,15 \text{ mm} \rightarrow \text{CMOD}_3 = 2,50 \text{ mm}$$

$$\delta_{R,4} = 3,00 \text{ mm} \rightarrow \text{CMOD}_4 = 3,50 \text{ mm}$$

obtendo-se, assim, as resistências residuais do compósito.

### ***3.5 Discussão sobre as Normas para Avaliação da Tenacidade no uso do CRFA em Aduelas***

Hoje em dia, a definição da tenacidade mais aceita e aplicada é aquela que interpreta a tenacidade como a área sob a curva carga por deslocamento vertical (ACI, 1988; BENTUR e MINDESS, 1990; BALAGURU e SHAH, 1992). O valor desta área, que representa a energia é o trabalho dissipado no material em função do carregamento aplicado. Este tipo de avaliação da tenacidade é o mais utilizado nas principais normas e recomendações para o CRFA, com variações apenas para o tratamento da área sob a curva carga por deslocamento vertical e sua posterior interpretação, conforme já apresentado.

Nos últimos anos várias metodologias de ensaios foram propostas com o objetivo de caracterizar a tenacidade do concreto CRFA, porém sem chegar a um consenso. No entanto, um dos métodos mais utilizados, por apresentarem facilidade na quantificação da tenacidade, é o critério proposto pela JSCE-SF4. Outra proposta é a da RILEM TC 162-TDF sugerindo a padronização do tipo de equipamento a ser utilizado, nas características dos corpos-de-prova, nas condições de carregamento e no sistema de aquisição de dados. Isso pode ser positivo para minimizar as variações dos resultados.

Existem outros métodos<sup>75</sup> de avaliação da tenacidade que não foram abordados neste trabalho como, por exemplo, o proposto pela EFNARC (1996). Este método fornece classificações quantitativas dos compósitos, de acordo com sua capacidade portante pós-fissuração e é utilizado para avaliação de contribuição das fibras no concreto projetado, ou seja, apresenta tabelas de valores de tenacidade dividindo a avaliação do compósito em classes. A tenacidade neste caso é avaliada por deslocamentos verticais pré-estabelecidos, não sofre influência da instabilidade pós-pico e não possui a dificuldade da determinação da primeira fissura pois elimina os valores obtidos no ensaio anteriores a 0,5mm. Todas as metodologias apresentadas até aqui possuem suas limitações; o importante é observar as utilizações que os compósitos se destinam (revestimentos de túneis, pisos ou pré-moldados, etc.), e as exigências requeridas em concordância com a aplicação na prática.

---

<sup>75</sup> EFNARC. European Specification for Sprayed Concrete. Federation of producers and Applicators of Specialist Products for Structures (EFNARC), Hampshire, UK, 1996.30p., AENC Asociación Española De Normalización Y Certificación. Determinación del índice de Tenacidad y Resistencia a Primeira Fissura. AENOR. UNE 83-510-89. Madrid, Espanha. 1989. ASTM American Society For Testing And Materials. **Standard test method for flexural toughness and first crack of fiber reinforced concrete.** ASTM C 1018. Book of ASTM Standards, Parte 04.02. ASTM, Philadelphia, 1994.

## 4. ESTUDO DE CASOS

### 4.1 Introdução - Experiências com aduelas no mundo

A idéia de se ter uma linha de transporte subterrânea foi apresentada pela primeira vez em 1830, em Londres, com o objetivo de integrar varias estações de um sistema de transporte. Esta idéia proposta foi negada na mesma época por falta de recursos. Em 1836 a primeira linha de metrô de superfície começou operar. Em 1852 foi apresentada novamente uma proposta para execução de uma linha subterrânea, que também não se concretizou por falta de informações técnicas. Em 1863 foram entregues seis quilômetros de linha subterrânea em anéis formados por segmentos (aduelas)<sup>76</sup>, como revestimento dos túneis do metrô, cujo avanço foi de 24/m dia<sup>77</sup>.

Atualmente, na Europa, América do Norte, Japão, África do Sul e muitos outros países, são feitos quilômetros de estruturas subterrâneas por ano. No Brasil, este não é o cenário atual, e não há publicações freqüentes de experiências nacionais por não se ter obras desta natureza de forma sistemática e contínua<sup>78</sup>. Em São Paulo, no ano de 2004, o projeto estrutural básico da linha IV do metrô (originalmente concebido em meados da década de 60) considera o revestimento dos túneis em anéis pré-moldados em concreto, segmentados (aduelas) com uma taxa de armadura aproximada de 85 kg/m<sup>3</sup> em barras de aço. Com o intuito de ilustrar a evolução tecnológica que ocorreu durante os últimos anos ao redor do mundo, mostram-se a seguir alguns estudos de caso onde foram testadas e utilizadas aduelas segmentadas com diversos tipos de reforços. Percebe-se que mundialmente existiu uma preocupação em relação à

---

<sup>76</sup> Sendo este o primeiro tipo de revestimento de túneis de metrô no mundo.

<sup>77</sup> Nesta ocasião, foi utilizado um anel de aríete para a escavação que antecedeu a instalação das aduelas. Mais informações podem ser encontradas na Internet no site da TVA Network Civil Engineering Site – London Underground.

<sup>78</sup> Por exemplo, na revista internacional Tunnels & Tunnelings, mensalmente, são abordados assuntos da indústria tuneleira mundial, relevando aspectos técnicos, tendências, relatos de experiências atuais e resultados práticos da aplicação constante de evolução tecnológica disponível no mercado dos países onde se faz obra subterrânea com freqüência. No Brasil, há muitos anos não se faz obras de metrô subterrâneas.

durabilidade das estruturas subterrâneas. Motivo pelo qual buscou-se quando da utilização de aduelas, estudar a viabilidade de substituição das barras de aço pelas fibras de aço como reforço.

É possível encontrar citações de diversas obras feitas no mundo em aduelas de concreto sem reforço. Destaque para o número de segmentos por anel (quando não existe qualquer tipo de reforço), diâmetro dos túneis e fator de forma<sup>79</sup> das aduelas de cada projeto, com vistas na redução de quebras diversas durante o ciclo de produção, transporte e instalação das aduelas. Na Tabela 2 pode-se observar em ordem cronológica de diferentes projetos onde os anéis foram concebidos sem reforço (utilização de concreto simples). Na Tabela 3, também em ordem cronológica, já com a utilização do reforço com fibras, é possível ainda observar a diminuição do número de aduelas para formação dos anéis mesmo para diâmetros maiores.

---

<sup>79</sup> O fator de forma das aduelas é dado pela relação entre o comprimento de cada aduela dividido pela espessura da mesma.

**Tabela 2 Aduelas pré-moldadas em concreto sem reforço**

revestimentos pré-moldados em concreto sem reforço	data de primeira utilização	diâmetro interno d=(mm)	espessura h=(mm)	lagura (mm)	numero de segmentos	ângulo do segmento	comprimento do segmento L=(mm)	relação de aspecto L/h
Don-seg	1950	2,705	152	610	12	30,0	748	4,92
Thames-Lee wedge block	1955	2,73	140	610	11+chave	31,0	777	5,55
Potters Bar	1955	8,077	686	685	20	14,0	1071	1,56
100 inch wedge block	1960	2,54	140	685	11+chave	31,0	726	5,19
Flexilock Lining	1960	3,658	178	610	17+chave	21,0	703	3,95
Victoria Line experimental	1960	3,86	229	610	14+chave	25,5	910	3,97
Victoria Line H-Type	1963	3,81	152	610	11+2 chaves	32,0	1106	7,28
Rapid Lining	1965	3,048	152	610	14+chave	25,5	712	4,68
Heathrow Cargo	1966	10,29	300	607	27	12,5	1155	3,85
Bolted Wedge Block	1970	2,54	140	685	11+chave	31,0	726	5,19
Mini Tunnel	1972	1,2	80	600	3	120,0	1340	16,75
Piccadily Line Extension	1972	3,81	168	600	20+2 chaves	19,0	660	3,93
Piccadily Line T4 loop	1984	3,81	152	750	16+2 chaves	25,3	875	5,76
London Ring Main Phase 2	1992	2,59	180	1,000	7+chave	49,0	1184	6,58
London Ring Main Phase 2	1992	2,91	200	1,000	7+chave	49,0	1330	6,65
Brighton stormwater	1994	6	250	1,400	6+chave	54,0	2945	11,78

**Tabela 3 Aduelas pré-moldadas em concreto com reforço de fibras**

revestimentos pré-moldados em concreto com reforço em fibras de aço	data de primeira utilização	diâmetro interno d=(mm)	espessura h=(mm)	lagura (mm)	numero de segmentos	ângulo do segmento	comprimento do segmento L=(mm)	relação de aspecto L/h
Picadilly Line Extn Trials	1973	3810	152	610	20+2chaves	19,0	657	4,32
Cosenza Water Supply	1989	3500	200	1200	5	75,0	2422	12,11
Fanaco Water Supply	1989	3500	200	1200	5	75,0	2422	12,11
Palazzo 2 Hydroelectric	1990	3500	200	1200	5	75,0	2422	12,11
Trento Water Supply	1990	3500	200	1200	5	75,0	2422	12,11
Stantsed Lining Tests	1991	5640	220	1000	7+chave	48,0	2455	11,16
JLE bolted lining tests	1992	4400	250	1200	5+chave	67,5	2739	10,96
Naples Metro Line 1, lot 3	1993	5800	300	1200	6+chave	56,8	3026	10,09
JLE expanded lining tests	1994	4350	200	1000	10+2chaves	32,0	1271	6,36
Heathrow baggage handling	1994	4600	150	1000	7+chave	51,0	2114	14,09
Lesotho delivery tunnel north	1994	4600	250	1400	5+chave	72,0	3047	12,19
CTRL London & Thames	1998	7150	350	1500	9+chave	37,2	2437	6,96

Na Tabela 4 pode-se encontrar dados complementares de alguns dos casos citados com a utilização do CRFA apresentados na Tabela 3.

**Tabela 4 Dados complementares sobre a utilização de fibras de aço como reforço de concreto em segmentos pré-moldados**

Projeto	Resistencia do concreto	Tipo de fibra	Dosagem da fibra
JLE	50-60 MPa	Aço Trefilado comprimento 60 mm	30 kg/m <sup>3</sup>
Heathrow Baggage Tunnel	50-60 MPa	Aço Trefilado comprimento 60 mm	30 kg/m <sup>3</sup>
Lesotho Water Delivery Tunnel North	desconhecido	Aço Trefilado comprimento 50 mm	35 kg/m <sup>3</sup> mais reforço convencional
Metro de Paris	desconhecido	Aço Trefilado comprimento 50 mm	60 kg/m <sup>3</sup>
Metro de Napolis	40-50 MPa	Aço Trefilado comprimento 60 mm	40 kg/m <sup>3</sup>

## **4.2 Estudo de caso 1: Channel Tunnel Rail Link - CTRL Steel Fibre Reinforced Concrete for Tunnel Linings - Inglaterra**

### *Introdução*

O Channel Tunnel Rail Link<sup>80,81,82,83</sup>, na Inglaterra, trouxe informações fundamentais para o estudo de viabilidade de utilização de concreto reforçado com fibras de aço em anéis pré-moldados. Os segmentos foram projetados para ter 120 anos de vida útil e, em particular, alta resistência à corrosão do aço por ataque de cloretos<sup>84</sup>. Como em todo grande projeto de engenharia, deveria ter o custo otimizado.

Inicialmente foram previstas três formas de reforço para o revestimentos dos túneis, dentre as quais, o CRFA, o reforço convencional com barras de aço (gaiolas), barras de aço revestidas com Epóxi<sup>85</sup>, e ainda o concreto sem reforço. Todas as possíveis soluções foram analisadas sob vários aspectos tais, como durabilidade, reparos, custos<sup>86</sup> entre outros.

### *Análise inicial*

#### Concreto Reforçado com Fibras

Foi considerado que as fibras de aço poderiam contribuir para a durabilidade das peças, pelo fato da descontinuidade do reforço. Evitando, portanto, o comprometimento da peça, pois caso as fibras fossem atacadas através de

---

<sup>80</sup> RLE-Rail Link Engineering. Steel fibre reinforced concrete for tunnel linings. **Channel tunnel rail link**, technical report n<sup>o</sup> 000-RUG-RLEEX-00008-AA

<sup>81</sup> WOODS, E. Fire considerations on the CTRL tunnels. **Tunnels & Tunnelling International**, May v.36, n.5, 2004.p.52-55.

<sup>82</sup> WOODS, E. Overview – London's segmental lining development. **Tunnels & Tunnelling International**, October v.36, n.10, 2004.p.45-47

<sup>83</sup> Este túnel é considerado uma das sete maravilhas da engenharia moderna. Trinta de nove dos cinquenta quilômetros de sua extensão ficam a cerca de 40 metros abaixo do fundo do mar.

<sup>84</sup> O relatório RLE-Rail Link Engineering mostra preocupações relacionadas ao caso dos túneis do Metrô de Singapura e Hong Kong. Estes sofrem com problemas de corrosão na armadura e deslocamentos. Os custos para recuperação das estruturas foram considerados altíssimos e ainda há atualmente a dificuldade das manutenções frente as operações dos trens.

<sup>85</sup> Tipo de pintura que neste caso foi utilizado com objetivo de aumentar da vida útil das barras frente aos agentes agressivos.

<sup>86</sup> O custo não é objeto de estudo neste trabalho, mas pode ser a variável de desempate, quando duas ou mais soluções atendem tecnicamente um projeto.

fissuras, por agentes agressivos, os pontos de oxidação seriam isolados e os produtos de corrosão<sup>87</sup> não comprometeriam a peça através de perda de secção do concreto.

De acordo com o relatório do RLE<sup>88</sup> o Concreto reforçado com fibras de aço foi utilizado em diversos locais onde há ambiente agressivo<sup>89</sup>. Pode-se citar a expansão dos túneis Heathrow Baggage e Jubilee Line Contract 103, onde foram minimizados os efeitos de corrosão (armadura descontínua) por ataque de cloretos.

As dificuldades de manuseio das peças e os possíveis danos, tais como lascamentos, quebras de bordas e cantos que pudessem ocorrer durante todo o processo, desde a fabricação das peças, içamentos, estocagens, transportes e instalação no túnel, foram abordados. As fibras neste caso poderiam contribuir resistindo a esses impactos, o fato de estarem distribuídas em toda a secção de concreto, ajudariam na transferência de tensões dissipando a energia, evitando indesejáveis quebras<sup>90,91</sup>.

A redução de custos relacionados aos reparos, particularmente feitos em quebras de cantos, nos segmentos foi substancialmente reduzida. Uma redução total de custos de produção das aduelas ao redor de dez por cento, em comparação com o reforço tradicional feito com gaiolas de barras de aço.

---

<sup>87</sup> O diâmetro ou diâmetro equivalente da fibra atacada é tão pequeno em relação ao tamanho da peça que a sua expansão dificilmente causaria danos ao concreto. Além do que, o processo é localizado e não contamina outras fibras.

<sup>88</sup> RLE- Rail Link Engineering. Steel fibre reinforced concrete for tunnel linings. **Channel tunnel rail link**, technical report nº 000-RUG-RLEEX-00008-AA

<sup>89</sup> Dubois, F. Nougier, H. Durability of Steel Fibrous Concrete used in the Manufacture of Containers for Nuclear Waste Storage. (citado no relatório **RLE-Rail Link Engineering**)

<sup>90</sup> D. Moysen, Bekaert. Precast Tunnel Segments with Steel Wire Fibre Reinforced Concrete (SRFC)- A State of the Art. (citado no relatório **RLE-Rail Link Engineering**)

<sup>91</sup> P.E. Regan. Jubilee Line Extension, Tests of Reinforced Concrete Tunnel Segments for London Underground Ltd. (citado no relatório **RLE-Rail Link Engineering**)

### Reforço Tradicional

O reforço tradicional caso fosse utilizado, poderia ter a durabilidade comprometida com a abertura de fissuras e a possível entrada de agentes agressivos provocando a corrosão da armadura<sup>92</sup>.

As peças também poderiam se tornar mais suscetíveis às quebras, durante o manuseio, uma vez que a armadura não estaria logo abaixo da superfície acabada, para minimizar quebras de cantos e bordas.

Foi avaliada a dificuldade relacionada aos reparos, custos altos, problemas relacionados aos horários disponíveis para as manutenções (normalmente feitas de madrugada), possíveis recuperações e principalmente sobre a garantia requerida de 120 anos de vida útil do projeto.

### Barras Revestidas com Epóxi

O revestimento de concreto armado com barras revestidas em Epóxi pode ser uma alternativa a considerar onde há exigência de vida útil de projeto. Os benefícios em relação ao prolongamento da vida útil da estrutura são tecnicamente adequados. Contudo, esta tecnologia tem como requisito um alto controle de qualidade, para evitar que as barras sejam danificadas e além disso, o alto custo não permitiu a viabilidade econômica desta alternativa.

### Concreto Simples

O concreto sem reforço seria uma alternativa caso a preocupação fosse apenas a durabilidade. Os segmentos seriam menores e em maior número para evitar quebras durante o manuseio, o número de juntas e tratamentos seriam por consequência muito maior, o que aumentaria o custo da solução. Estruturalmente, de acordo com o relatório do RLE, é possível se conceber a estrutura do anel somente em concreto. Contudo, a combinação escolhida (CRFA) é fruto de uma solução de engenharia onde se aproveitam as propriedades de cada um dos materiais do compósito a fim de viabilizar o

---

<sup>92</sup> Uma vez contaminada a armadura, ela pode induzir a corrosão por toda a peça (gaiola), e pode provocar o descolamento e deslocamento do concreto.

empreendimento técnica e economicamente. O concreto cumprindo sua função de resistir à compressão (por estar em uma estrutura circular) e as fibras protegendo as partes frágeis das peças ao longo do caminho de produção, manuseio, transporte e montagem do anel.

### *Solução Adotada*

A solução adotada pelo CTRL foi o concreto reforçado com fibras de aço para os túneis de nomes Thames e London com 7,15 m de diâmetro, e para o túneis Thameslink 6,0m de diâmetro.

As fibras de aço a serem utilizadas deveriam estar em conformidade com a ASTM 820-90. Foi recomendado o fator de forma das fibras entre 40 e 80 para evitar concentração excessiva das fibras durante a mistura. Como é de conhecimento, nas dosagens usuais de fibras, não há aumento da Resistência à Compressão.

De acordo com ensaios apresentados em relatórios<sup>93</sup>, houve o aumento da Resistência ao Impacto do CRFA cerca de 20 vezes mais comparado ao concreto sem reforço, e ensaios realizados<sup>94</sup> nas juntas demonstraram um desempenho melhor do CRFA do que o reforçado convencionalmente.

Com relação à durabilidade, experiências no continente europeu mostraram menos problemas relacionados ao CRFA do que a armadura convencional. Isto se deve ao controle de abertura de fissuras<sup>95</sup>, e também a baixa permeabilidade do concreto empregado. Por essas razões nenhuma medida adicional foi adotada para proteção contra corrosão nos revestimentos dos túneis citados.

A condutividade elétrica não foi considerada um problema, pois casos similares de aplicação do CRFA em revestimento de túneis mostraram que há um acréscimo desprezível desta propriedade.

---

<sup>93</sup> D.Moysen, Bekaert. Precast Tunnel Segments with Steel Wire Fibre Reinforced Concrete SRFC– A State of the Art.(citado no relatório RLE-Rail Link Engineering cuja referência bibliográfica está na página 90)

<sup>94</sup> P.E. Regan. Jubilee Line Extension, Tests of Reinforced Concrete Tunnel Segments for London Underground Ltd (citado no relatório RLE-Rail Link Engineering)

<sup>95</sup> São citados no relatório RLE-Rail Link Engineering estudos que fizeram esta verificação.

### *Projeto do Segmento*

Por falta de normas e procedimentos para a utilização das fibras<sup>96</sup> os segmentos deveriam ser dimensionados como concreto simples. Ou seja, estruturalmente a peça não dependeria das fibras de aço. As peças reforçadas com fibras foram postas a prova em ensaios de cargas acidentais de manuseio e submetidas a desalinhamentos possíveis de acontecer durante a montagem do anel. Ao contrário de outras aplicações como pisos e concreto projetado, onde a tenacidade é essencial estruturalmente, nos anéis do CTRL as fibras de aço deveriam atuar principalmente evitando quebras nos cantos (manuseio) e aumentando a resistência ao impacto (macacos da tuneladora), onde ficou provada sua eficiência atendendo as expectativas de projeto<sup>97</sup>.

As normas adotadas para controle da tenacidade foram a American Society for Testing of Materials (ASTM)<sup>98</sup>, DBV<sup>99</sup> e a Japan Society of Civil Engineers (JSCE)<sup>100</sup> sendo considerada neste estudo propriedade complementar e não principal para a aprovação de uma determinada fibra. A fibra utilizada foi do tipo ancorada nas extremidades, de aço trefilado, Fator de Forma igual a 80, na dosagem 30kg/m<sup>3</sup>.

Foi executado com o apoio de programas computacionais<sup>101</sup> a checagens diversas das fases de projeto deste revestimento, tais como cargas de solo, grauteamento, cargas do TBM, manuseio e estocagem.

Os ensaios para verificação<sup>102</sup> do desempenho das aduelas reforçadas com fibras de aço neste projeto do CTRL foram sugeridos pela projetista<sup>103</sup>. Servem

---

<sup>96</sup> Engenheiro Eddie Woods projetista da Rail Link Engeneear (Arup)

<sup>97</sup> WEBB, C. Overview – London's segmental lining development. **Tunnels & Tunnelling International**, October v.36, n.10, 2004.p.45-47

<sup>98</sup> ASTM C 1018-94b. **Test Method for flexural Toughness and first Crack Strenght of Fibre Reinforced Concrete (using beam with 3<sup>rd</sup> point loading)** Sept. 1994.

<sup>99</sup> DBV German Concrete Association. Design Principles of SteelFibre Reinforced Concrete for Tunnelling Works.

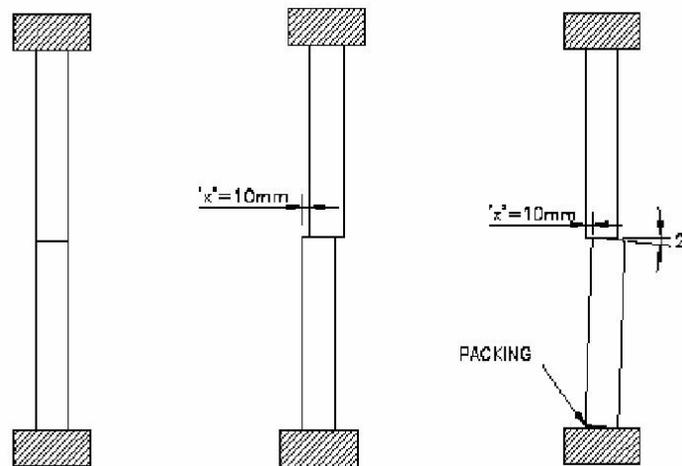
<sup>100</sup> JAPAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. Method of tests for flexural strength and flexural toughness of steel fiber reinforced concrete. JSCE- SF4. Concrete Library of JSCE. Parte III-2 Method of test for steel fiber reinforced concrete. N.3 June 1984. p. 58-61.

<sup>101</sup> Fibre 1 Analysis of SFRC sections for combined axial force and bending (Sir William Halcrow and Partners) e Design of a tunnel concrete lining using capacity limit curves (Bekaert Dramix).

<sup>102</sup> Ensaio em escala real nas juntas circunferenciais das aduelas (Large Scale Test - Radial Joint)

para simular a situação real de instalação dos anéis, quando os mesmos estão sujeitos aos carregamentos das sapatas dos macacos de impulsão da máquina tuneladora. E ainda, como mostra a Figura 12, com os desalinhamentos<sup>104</sup> pré-determinados.

Testes feitos com o mesmo concreto dos túneis Heatrow Baggage, demonstraram que houve um aumento de 32% na capacidade de carga das juntas radiais, devido a adição de 30kg/m<sup>3</sup> de fibras de aço. As fibras próximas à superfície do concreto garantem o reforço correto destas juntas evitando zonas de cobertura não reforçadas (que ocorrem quando do uso de gaiolas).



**Figura 12 Ensaio realizado no CTRL com aplicação de carga nas aduelas em diferentes situações de desalinhamentos.**

Estes ensaios servem para garantir que o túnel será construído com a minimização de ocorrência de quebras nos anéis, conforme já abordado em 2.3.

---

<sup>103</sup> Halcrow Group Limited. Endereço: Vineyard House 44 Brook Green London W6 7BY. Telefone +44 (0)20 7602 7282 Fax +44 (0)20 7603 0095. <http://www.halcrow.com>

<sup>104</sup> Cujas magnitudes variam de acordo com o tamanho dos anéis segundo a experiência da projetista em conjunto com o fabricante da máquina tuneladora e demais envolvidos.



**Figura 13 Vista de um túnel do CTRL executado em anéis de concreto pré-moldados reforçados com fibras de aço<sup>105</sup>.**

Em relação aos reparos o relatório do CTRL faz considerações de que as possíveis quebras que possam ocorrer serão minimizadas pela tenacidade adicional do CRFA quando comparado com o reforço convencional. Além disto, quando da execução do reparo, este ficará mais eficaz devido ao aumento de aderência criado pelas fibras protuberantes na região afetada.

#### *Conclusões do Relatório do CTRL*

Os túneis segmentados do CTRL foram executados com CRFA, para garantir que:

- Durabilidade fosse a melhor possível;
- Danos ao manusear os segmentos fossem minimizados;
- Danos devido a deformações dos anéis fossem contidos;
- Custos minimizados em relação ao reforço tradicional.

---

<sup>105</sup> Fonte: Revista Tunnels & Tunnellings Outubro 2004.

### **4.3 Estudo de caso 2: Steel Fibre Reinforced Concrete for Precast Tunnel Segments - Mix Design and Full Scale Testing-Lesotho/Africa do Sul**

#### *Introdução*

Neste caso, os engenheiros envolvidos na obra estavam preocupados com a seguinte afirmação: “*Revestimentos de túneis reforçados convencionalmente com barras de aço freqüentemente manifestam problemas com relação à durabilidade num estágio prematuro da sua vida útil.*” Assim, através do uso de fibras de aço como reforço para concreto de seu túnel poderiam eliminar os problemas de corrosão relacionados ao reforço tradicional em ambientes agressivos<sup>106</sup>.

#### *Projeto Original*

Foram erguidos pelo TBM<sup>107</sup> 22 quilômetros de segmentos pré-moldados reforçados com barras de aço (tal como pedia o projeto). Aproximadamente 9.000 toneladas de barras de aço foram utilizadas. Os anéis são compostos por cinco segmentos e uma chave, espessura de 250mm, comprimento de 1,40m, volume de concreto de 1,04m<sup>3</sup> por anel, e diâmetro do túnel de 4,60m.

#### *Programa Investigativo*

O programa de investigação sobre o CRFA consistiu em substituir as barras de aço pelas fibras de aço durante o tempo de produção normal dos anéis, durante a construção do túnel, utilizando-se a mesma planta de fabricação e seus equipamentos. O objetivo foi registrar as diferenças em toda a cadeia de produção, desde o lançamento do concreto nas fôrmas, manuseio, transporte até a instalação do anel no túnel. Esta investigação foi concebida em três estágios: desenvolvimento dos traços com adição de fibras, ensaio dos

---

<sup>106</sup> VILJOEN,B.C.;NEUMANN,M.J.:COLLINSJ.R.;TREU,T.P. Steel Fibre Reinforced Concrete for Precast Tunnel Segments - Mix Design and Full Scale Testing

<sup>107</sup> TBM significa Tunnel Boring Machine; é um tipo de máquina tuneladora utilizada para escavação e colocação dos anéis segmentados que formam o revestimento dos túneis.

segmentos em escala real no laboratório, e ensaios no túnel com a utilização dos anéis e o monitoramento através de VWSG's<sup>108</sup>.

### *Caracterização dos Materiais*

No primeiro estágio foram testados traços a fim de se determinar a melhor mistura do concreto com fibras. Cuidados foram tomados para que não houvesse problemas com a trabalhabilidade e compacidade, evitando assim problemas como a formação de ouriços, formação de ninhos de concretagem que pudessem comprometer a aderência das fibras no compósito ou a integridade das aduelas.

Para desenvolvimento deste estudo foram utilizados dois tipos de fibras conforme mostra a Tabela 5:

**Tabela 5 Características das fibras estudadas em Lesotho**

tipo de fibra	fibra tipo 1	fibra tipo 2
origem	Belgica	Africa do sul
método de produção	arame trefilado	chapa cortada
tamanho	50x0,5mm	50x0,5x0,6mm
forma geométrica	secção circular e ancorada nas pontas	secção retangular, reta e fresada
fator de forma	100	81
tensão de escoamento	$\geq 1100\text{MPa}$	350 a 500 MPa
apresentação	coladas	soltas

### Tenacidade

A tenacidade foi avaliada em conformidade com a norma ASTM, para dosagens entre  $40 \text{ kg/m}^3$  e  $80 \text{ kg/m}^3$  (com 7 e 28 dias). As fibras do tipo 1 exibiram melhor desempenho com 28 dias do que as do tipo 2 para todas as dosagens. Misturas com adições de 70 a  $80 \text{ kg/m}^3$  de fibras de aço também foram avaliadas e apresentaram ninhos de concretagem nas peças moldadas. Além disso, esta faixa de dosagem de fibras mostrou ser antieconômica.

---

<sup>108</sup> Strain Gauges

## Resistência à Compressão

A resistência à compressão do CRFA foi medida através da utilização de cubos<sup>109</sup> de 150x150x150 mm após 6 horas de cura a vapor<sup>110</sup>.

## Penetração de água

A água a ser transportada pelo túnel seria pura e conseqüentemente agressiva, a durabilidade do CRFA foi determinada de acordo com a DIN 1048 ensaio de penetração de água. Os resultados mostraram um aumento de penetração de água com o aumento da dosagem das fibras. A adição de sílica ativa (5%) reduziu a penetração de água para menos de 30mm, limite recomendado pela norma, isto ocorreu até mesmo para as dosagens mais altas com a utilização de 80 kg/m<sup>3</sup> de fibras. Os ensaios foram feitos nos pré-moldados com reforço convencional para comparação, e os resultados obtidos de penetração de água ficaram entre 15 e 25mm.

## Moldagem dos Segmentos

Na Tabela 6 é apresentado o traço escolhido para moldagem dos segmentos utilizados no túnel de Lesotho.

**Tabela 6 CRFA traço de referência, sem fibras**

Materiais do traço	Quantidade
cimento (kg)	360
cinzas volantes (kg)	50
silica ativa (kg)	20
areia de rio (kg)	110
pó de pedra (kg)	793
brita 9,5mm (kg)	484
brita 19 mm (kg)	678
agua (l)	145
superplastificante (l)	7,3
relação água/cimento	0,34
teor de argamassa (%)	44
Vebe Tempo (seg.)	7
Slump (mm)	12

<sup>109</sup> no Brasil utilizam-se cilindros de 150 x 300 mm ou 100 x 200 mm de acordo com o D máx do agregado.

<sup>110</sup> Para este tipo de processo normalmente se utiliza cura a vapor.

Na moldagem dos segmentos ocorreu concentração<sup>111</sup> de fibras, que foi corrigido mais tarde com a otimização do traço. Este seria um motivo para se utilizar misturas de concreto auto-adensáveis, evitando a vibração. Claro que por um lado se resolveriam alguns problemas mas por outros novos problemas poderiam aparecer. Como, por exemplo, a forma com que se moldaria a peça. Ao invés de deitada de maneira convexa, concretá-la de pé, diminuindo a superfície de acabamento. Contudo, esta maneira apesar de poder ser utilizada, gera acabamento diferenciado entre as faces que posteriormente se unirão na montagem do túnel (formando o anel adjacente). Ou seja, uma face com acabamento de fôrma (lisa) e outra com acabamento manual (rugosa). Em relação às diferenças de vibração, os segmentos de CRFA demandavam de 3 a 6 minutos e os pré-moldados convencionais de 2 a 4 minutos.

### *Considerações*

O relatório dos ensaios realizados considera que o sucesso da utilização do CRFA em aduelas depende principalmente do grau de compreensão dos usuários desta tecnologia em relação às outras soluções, do conhecimento acumulado para o aproveitamento dos possíveis benefícios advindos da utilização do CRFA. Inserir esta tecnologia na cadeia produtiva da construção de um túnel exige envolvimento e compromisso de várias equipes no sentido de se alcançar melhoria na mudança.

---

<sup>111</sup> Concentração excessiva e sem uniformidade das fibras na peça moldada. Isso pode ocorrer por causa da vibração excessiva utilizada para expulsar o ar aprisionado na mistura no momento da moldagem das peças um efeito parecido com o do liquidificador.

Os tipos de segmentos preparados para os ensaios em escala real estão relacionados na Tabela 7; pode-se observar o total de 116 segmentos<sup>112</sup>.

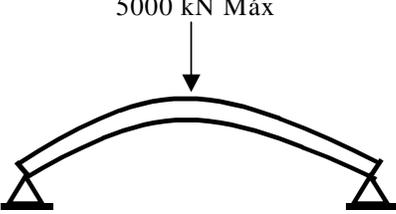
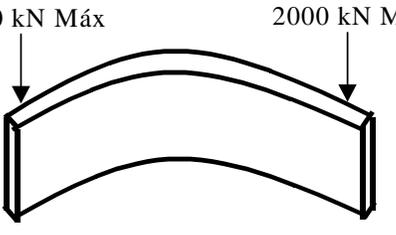
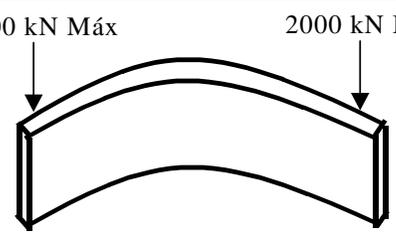
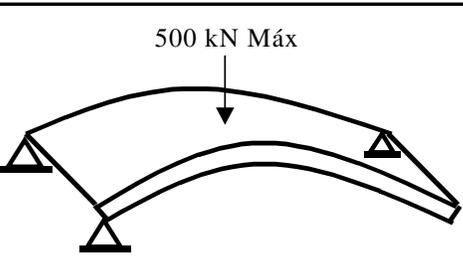
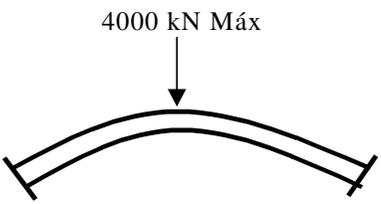
**Tabela 7 Os segmentos e cada um dos reforços testados em Lesotho.**

Tipo de Segmento	Massa da Gaiola (kg)	dosagem da fibra (kg)	Dimensões da Fibra (mm)	numero de segmentos testados
Fibra 1 (ancoragens nas pontas)	-	40	50 x 0,5 $\phi$	14
	-	50	50 x 0,5 $\phi$	9
	-	60	50 x 0,5 $\phi$	13
	-	70	50 x 0,5 $\phi$	1
	-	80	50 x 0,5 $\phi$	1
	-	50	60 x 0,8 $\phi$	1
Fibra 2 (chapa cortada)	-	40	50 x 0,5 x 0,6	11
	-	50		6
	-	50	60 x 0,5 x 0,6	4
	-	60	50 x 0,5 x 0,6	5
	-	80		1
Fibra 1 e Armadura Leve	60	35	50 x 0,5 $\phi$	8
Fibra 1 e Armadura Pesada	106	35	50 x 0,5 $\phi$	6
Fibra 2 e Armadura Leve	60	35	60 x 0,5 x 0,6	6
			50 x 0,5 x 0,6	
<i>Fibra 2 e Armadura Pesada</i>	106	35	50 x 0,5 x 0,6	6
Armadura Leve	106	-	-	13
Armadura Pesada	157	-	-	8
Fibra 1 e um painel de tela leve	11,3	40	50 x 0,5 $\phi$	3

<sup>112</sup> Massas da gaiola e dosagens das fibras são por metro cúbico de concreto.

Na Tabela 8 são apresentados os desenhos esquemáticos dos tipos de carregamentos que os segmentos foram submetidos sempre em analogia a uma situação real.

**Tabela 8 Ensaio realizados nos segmentos dos túneis de Lesotho.**

Tipo de Carregamento	Tipo de teste	Desenho Esquemático	Objetivo da simulação
I	Flexão simples	 <p>5000 kN Máx</p>	Pressões durante grauteamento, cargas de longa duração provenientes do maciço
II	Flexão simples	 <p>2000 kN Máx      2000 kN Máx</p>	Forças introduzidas pelos macacos em segmento irregularmente apoiado em anel previamente lançado
III	Fendilhamento	 <p>2000 kN Máx      2000 kN Máx</p>	Força introduzidas pelos macacos para avanço do TBM
IV	Flexão simples	 <p>500 kN Máx</p>	Carga eventual causada por pressão durante grauteamento, ou bloco de rocha solicitando segmento irregularmente apoiado
V	Flexo-compressão	 <p>4000 kN Máx</p>	Cargas de longa duração provenientes do maciço

#### **4.4 Estudo de caso 3: Steel Bars Reinforced Concrete for Precast Tunnel Segments in Singapura**

Na obra do MRT<sup>113</sup> onde a vida útil de projeto considerada é de cem anos, foram utilizadas barras de aço para reforço das aduelas, formando gaiolas, sem proteção de epóxi<sup>114</sup>. Na opinião dos engenheiros envolvidos na produção dos segmentos, além do controle tecnológico do concreto, de acordo com os critérios de projeto, o controle de qualidade julgou importante incluir precisão nas medidas e acabamentos fornecidos pelas fôrmas, cura eficaz evitando formação de fissuras, operações de manuseio, transporte, recebimento e armazenamento. Desta forma garantindo a integridade das peças. Ou seja, o departamento de qualidade da obra foi responsável por confeccionar e controlar um concreto resistente, moldar as peças com dimensões precisas, efetuar acabamento uniforme esteticamente aceitável e garantir a integridade das peças até a montagem final de cada anel no túnel.

Equipes executavam inspeções em todas as fases de produção dos segmentos, consideradas vitais para a qualidade final da estrutura do túnel. Conforme depoimento dos envolvidos<sup>115</sup>, que já haviam tido experiências em outros projetos, executados com gaiolas de aço, as diferenças fundamentais que se obtém quando se opta pelo reforço com fibras se encontram na redução da área da planta, redução de reparos em todas as etapas e otimização dos processos de fabricação, manuseio, estocagem, transporte e montagem dos anéis nos túneis. Embora tenha-se estudado e reconhecido os benefícios do reforço das aduelas com fibras de aço, neste projeto não foi possível lançar mão desta tecnologia, por razões não publicadas.

---

<sup>113</sup> MRT é o nome dado ao metro de Singapura.

<sup>114</sup> Opção inicialmente considerada devido à condições gerais de projeto.

<sup>115</sup> KRISHNAN, R. Singapore pursues its MRT expansion. **Tunnels & Tunnelling International**, July v.36, n.7 2004.p.28-31.

## **4.5 Estudo de caso 4: CRM Tranvase Manabi – Equador**

### *Introdução*

O revestimento do túnel deste empreendimento é constituído por anéis formados por segmentos pré-moldados montados por uma máquina tuneladora.

### *Solução Adotada*

A solução adotada foi a utilização de fibras de aço como reforço do concreto desses anéis. Diferentemente do ocorrido nos túneis do CTRL<sup>116</sup>, este projeto executado no Equador utilizou métodos de cálculos<sup>117</sup> que consideram a contribuição das fibras, através do aumento da ductilidade do concreto, como reforço estrutural. Combinações de ações como carregamentos permanentes, acidentais e, inclusive, cargas provenientes de abalos sísmicos, foram considerados no projeto para compor a análise estrutural.

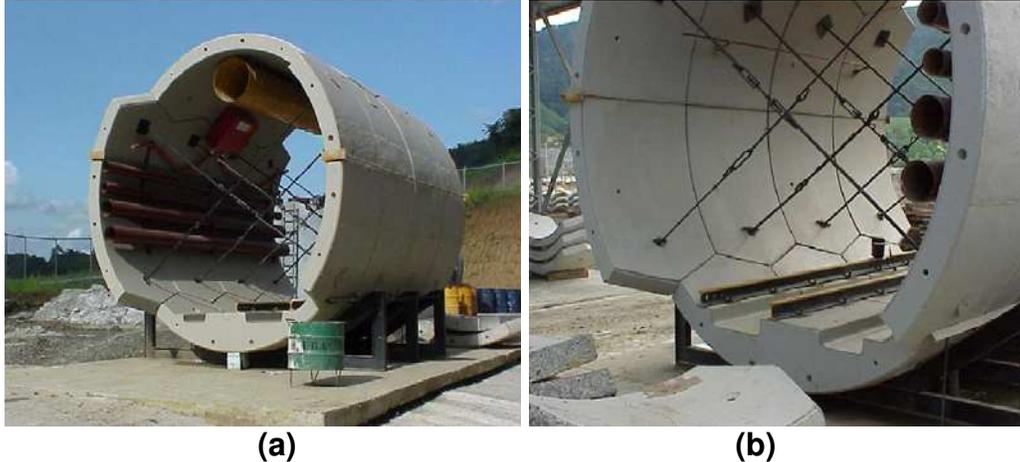
### *Projeto do Anel*

Nesta solução cada anel é composto por quatro segmentos, sendo que dois estão posicionados nas laterais, um na cobertura e outro no invert. As peças são inter-travadas, estes detalhes são apresentados nas figuras Figura 14 (a) e (b). O diâmetro interno do túnel adotado neste projeto foi 3,50 m, o comprimento médio de cada aduela aproximadamente 2,90 m, a espessura de 0,20 m e a largura de 1,20 m. O comprimento total do túnel é de 15 km.

---

<sup>116</sup> Estudo de caso 4.2 na página 33 onde os anéis foram considerados estruturalmente estáveis através da utilização isolada do concreto de alta resistência (desconsiderando-se a contribuição das fibras de aço, e aproveitando-as somente para os aspectos de contribuição na redução de quebras, especialmente).

<sup>117</sup> A seqüência simplificada de cálculo se encontra no artigo onde os anéis foram considerados estruturalmente estáveis através da utilização isolada do concreto de alta resistência (desconsiderando-se a contribuição das fibras de aço, e aproveitando-as somente para os aspectos de contribuição na redução de quebras, especialmente)



**Figura 14 (a) Montagem em escala real de trecho do túnel de 3,5 m de diâmetro interno e (b) detalhe do encaixe (inter-travamento) das aduelas na posição definitiva dentro túnel.**

### *Considerações*

Neste estudo ficou claro que as aduelas estão sujeitas às tensões de tração mais significativas na etapa de desfôrma, manuseio e transporte. Ou seja, após o túnel pronto, mesmo fazendo-se combinações de ações de carregamentos diversos, incluindo sismos, por estarem dispostas em forma de anel, as tensões resultantes destas ações na estrutura são essencialmente de compressão, sendo muito pequenas ou inexistentes as de tração<sup>118</sup>. Por ser um tipo de estudo multidisciplinar, que inclui tecnologia de concreto, estruturas, equipamentos, etc., este estudo foi feito por engenheiros de diversas empresas, incluindo a ENGEVIX<sup>119</sup>, FURNAS<sup>120</sup>, CNO<sup>121</sup> e consultores<sup>122</sup>.

---

<sup>118</sup> os valores destes cálculos estão disponíveis no artigo já citado.

<sup>119</sup> Engevix Engenharia S/C Ltda - Foi a responsável pela análise estrutural e dimensionamento das aduelas.

<sup>120</sup> Furnas Centrais elétricas S.A. - O laboratório de Furnas foi o responsável pela dosagem dos concretos e pela execução do programa experimental feito pelo grupo de trabalho, incluindo protótipos, em escala real, das aduelas.

<sup>121</sup> Construtora Norberto Odebrecht foi a interessada pelos estudos e responsável pela execução das obras.

<sup>122</sup> Prof. Dr. Newton de Oliveira Pinto Jr (Unicamp).

## **4.6 Estudo de caso 5 : Experimental investigation on load-carrying capacity of concrete tunnel lining - Japão**

### *Introdução*

O número de construções de túneis aumentou de acordo com o desenvolvimento econômico do Japão. As seções tornaram-se maiores, os prazos de entrega menores, os túneis mais longos e as exigências com relação à vida útil das estruturas aumentaram. O estudo foi realizado pelo Instituto de pesquisa de auto-estradas do Japão, com objetivo de levantar dados para estabelecer um método de dimensionamento e analisar a capacidade de carga de revestimentos de túneis. Baseado em obras anteriores de túneis no Japão, que foram feitas utilizando-se revestimento em concreto, observou-se que estas costumam apresentar queda de fragmentos do revestimento após o desenvolvimento de fissuras localizadas<sup>123</sup>. A montagem de uma seção em escala real e simulações utilizando-se dois softwares<sup>124</sup> em paralelo mostraram o comportamento mecânico comparativo entre aduelas moldadas em CRFA e aduelas moldadas em concreto simples<sup>125</sup> frente aos tipos de carregamentos aplicados (Figura 16 a Figura 18). Os resultados dos ensaios mostraram os mecanismos de colapso de revestimentos de túneis de acordo com o tipo de carregamento e os benefícios da utilização do CRFA em aduelas.

Esses programas foram munidos de informações tais como, módulo de elasticidade, resistência à compressão do concreto, e módulo de reação do solo.

### *Metodologia do Experimento*

Consistiu na aplicação de três tipos de carregamento através de macacos hidráulicos diretamente sobre uma meia-seção de túnel em escala real formando um semi-círculo, como mostra a Figura 15:

---

<sup>123</sup> Fissuras que podem ocorrer nas aduelas de acordo com as causas analisadas e citadas ao longo deste trabalho.

<sup>124</sup> Frame-Model Analysis e FEM Analysis.

<sup>125</sup> Este estudo de 2002 não considerou o reforço com gaiolas de barras de aço.

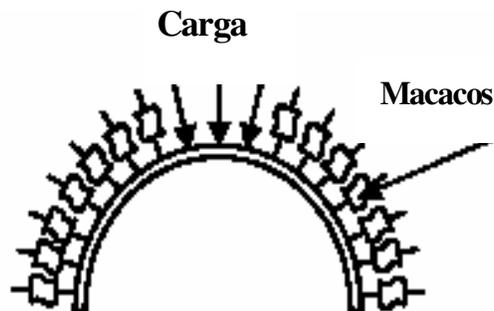


**Figura 15** Layout de ensaio em escala real.

O diâmetro interno adotado para o experimento foi o equivalente a 9,70 m, a espessura do revestimento adotada de 0,3 m e a largura de 1,0 m.

### *Tipos de Carregamento*

O carregamento tipo A (Figura 16), simulou uma carga extra no teto do túnel. As fibras de aço utilizadas para o reforço da matriz na moldagem das aduelas foram de 60 e 30 mm de comprimento, com ancoragens nas pontas e de arame trefilado.



**Figura 16** Carregamento tipo A126.

O carregamento tipo B (Figura 17), simulou uma carga extra com o adicional de uma caverna através do revestimento, isolando o teto e ombros do túnel:

---

<sup>126</sup> Carga aplicada no teto através de três macacos e o restante segurando as deformações e cargas de forma reativa (sem aplicar cargas), simulando a reação do solo em que o túnel está envolvido.

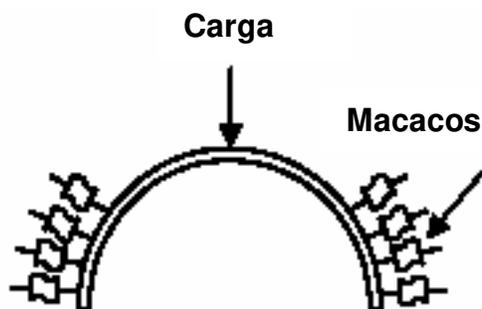


Figura 17 Carregamento tipo B.

O carregamento tipo C (Figura 18), simulou um túnel instalado em solo ruim, através da aplicação de carga em todos os macacos:

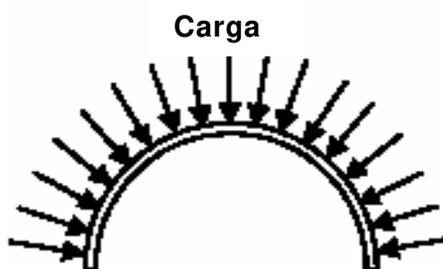


Figura 18 Carregamento tipo C.

### *Considerações*

As seguintes considerações foram feitas através do comparativo de ensaios de meia-seção de aduelas em escala real em concreto simples versus CRFA:

- O CRFA aumentou a capacidade de carga nas condições onde a influência do momento fletor foi dominante. A capacidade de carga variou de acordo com a eficiência das fibras (comprimento e tipo);
- A prevenção de queda de fragmentos do revestimento com CRFA foi confirmada tanto quando o momento fletor, quanto o esforço normal foram dominantes;
- A previsão do comportamento do revestimento dos túneis feitos com os materiais estudados<sup>127</sup> e a avaliações da capacidade de carga puderam

---

<sup>127</sup> Concreto simples e CRFA.

ser reproduzidos adotando-se valores adequados das variáveis que abastecem os programas<sup>128</sup> utilizados;

---

<sup>128</sup> Como o módulo de rotação da mola do solo, por exemplo.

## 5. ESTUDO EXPERIMENTAL

### 5.1 Introdução

O plano experimental deste estudo surgiu em virtude da construção da Linha 4 do metrô de São Paulo (12,8 km de túneis da Estação Luz até a Vila Sônia). É chamada de Linha Amarela, a Linha da Integração, por interligar diversas linhas já existentes. O projeto básico da linha 4 é antigo (década de 60). Em virtude das diversas atualizações tecnológicas, aperfeiçoamento dos métodos construtivos, e experiências de obras importantes (citadas no capítulo 4), o proprietário da obra (Metrô - SP) e os empreiteiros notaram a possibilidade de se aplicar recursos, já disponíveis para a construção dos túneis. Adicionalmente, preservando a faixa de custo de construção que se enquadra o projeto e oferecendo benefícios de redução da manutenção através do aumento da vida útil das estruturas do túnel. Desta forma, surgiu a necessidade de um estudo para a comprovação local, pela primeira vez no Brasil, da utilização da CRFA para a aplicação em aduelas de anéis de concreto. Embora é sabido que no mundo este tipo de aplicação tem sido utilizada com sucesso, em virtude de diversas questões técnicas e políticas, foi realizado este estudo.

Este programa de investigação sobre o CRFA foi elaborado com o objetivo de estudar a adoção desta tecnologia para a moldagem dos anéis do túnel da linha 4. Houve planejamento tanto no âmbito laboratorial quanto no campo, ou seja, houve simulações de situações reais, com peças em escala 1:1 para observação do seu comportamento indo de encontro ao cotidiano de uma produção industrial destes anéis. Este estudo foi concebido da seguinte maneira:

#### a) Caracterização dos materiais

- Dosagem do concreto
- Controle das propriedades do concreto:
  - Resistência à Compressão;
  - Tenacidade;
  - Resistência ao Impacto.

b) Simulação da fase construtiva das aduelas

- Moldagem;
- Desfôrma, içamento e estocagem;
- Transporte.

c) Simulação da fase executiva: lançamento das aduelas, ensaio fendilhamento

d) Simulação do túnel em serviço: ensaio de flexo-compressão

## **5.2 Caracterização dos materiais**

O programa de investigação sobre o CRFA para a moldagem das aduelas consistiu em registrar o desenvolvimento do traço base e ensaios com adição de fibras para escolha das melhores misturas. A exemplo da investigação realizada em Lesotho foram feitas no nosso estudo várias misturas também inclusive com tipos diferentes de fibras no mesmo traço Figura 32 .

Para este estudo foram utilizados 2 tipos de fibra de aço; sendo uma fibra de arame e outras duas de chapa; todas de comprimentos diferentes e com ancoragens nas pontas. Foi também utilizado um tipo de fibra de polipropileno modificada; Estas fibras possuem deformações ao longo de seu comprimento e foram desenvolvidas especialmente para este estudo. As características das fibras de aço e polipropileno utilizadas para o reforço do concreto das aduelas são mostradas nas Tabelas 9, 10, 11 e 12:

**Tabela 9 Fibra de Polipropileno utilizada nas aduelas do estudo experimental.**

<i>Matéria Prima</i>	<i>Polipropileno</i>
<i>Frequência de fibras</i>	<i>2,8 milhões por kg</i>
<i>Área superficial</i>	<i>44m<sup>2</sup>/kg</i>
<i>Diâmetro Nominal da Fibra ( d )</i>	<i>0,001mm</i>
<i>Comprimento Nominal ( l )</i>	<i>50 mm</i>
<i>Fator de Forma ( relação l / d )</i>	<i>500</i>

**Tabela 10 Fibra de aço 60 mm utilizada nas aduelas do estudo experimental.**

<i>Matéria Prima</i>	<i>Fios de Aço Carbono Trefilados</i>
<i>Resistência a Tração</i>	$\geq 1000 \text{ MPa (EN 10002)}$
<i>Denominação Conforme</i>	<i>EN 10016</i>
<i>Diâmetro Nominal da Fibra ( d )</i>	<i>0,8 mm</i>
<i>Comprimento Nominal ( l )</i>	<i>60 mm</i>
<i>Fator de Forma ( relação l / d )</i>	<i>75</i>

**Tabela 11 Fibra de aço 49 mm utilizada nas aduelas do estudo experimental.**

<i>Matéria Prima</i>	<i>Chapa de aço carbono laminada à frio</i>
<i>Resistência a Tração</i>	<i>690 a 850 MPa</i>
<i>Denominação Conforme</i>	<i>ASTM A820/90</i>
<i>Dimensões da Seção Transversal</i>	<i>b = (1,70 ± 0,1) mm</i> <i>d = (0,50 ± 0,05) mm</i>
<i>Diâmetro Equivalente ( d<sub>e</sub> )</i>	<i>1,040 mm</i>
<i>Comprimento Nominal ( l )</i>	<i>49 mm</i>
<i>Fator de Forma ( relação l / d<sub>e</sub> )</i>	<i>47,11</i>

**Tabela 12 Fibra de aço 36 mm utilizada nas aduelas do estudo experimental.**

<i>Matéria Prima</i>	<i>Chapa de aço carbono laminada à frio</i>
<i>Resistência a Tração</i>	<i>690 a 850 MPa</i>
<i>Denominação Conforme</i>	<i>ASTM A820/90</i>
<i>Dimensões da Seção Transversal</i>	<i>b = (0,8 ± 0,08) mm</i> <i>d = (0,50 ± 0,05) mm</i>
<i>Diâmetro Equivalente ( d<sub>e</sub> )</i>	<i>0,714 mm</i>
<i>Comprimento Nominal ( l )</i>	<i>36 mm</i>
<i>Fator de Forma ( relação l / d<sub>e</sub> )</i>	<i>50,42</i>

As fibras de polipropileno e aço<sup>129</sup> são apresentadas nas Figura 19 (a e b) e Figura 20 (a e b).

<sup>129</sup> As fibras de aço utilizadas do tipo laminado e trefilado foram fornecidas pelo fabricante Vulkan do Brasil-Harex.



(a) (b)  
**Figura 19 (a) Fibra de polipropileno corrugada (Tabela 9) e (b) fibra de aço trefilado 60 mm de comprimento (Tabela 10).**



(a) (b)  
**Figura 20 (a) Fibra de aço laminado 49 mm de comprimento (Tabela 11) e (b) fibra de aço laminado de 36 mm de comprimento (Tabela 12).**

### *Traço de Concreto*

A partir de um traço de referência, onde a trabalhabilidade, resistência a compressão, entre outros aspectos foram determinados, variou-se o tipo e o teor de fibras. Para facilitar, praticamente todos os traços aplicados foram similares (consumo de cimento, teor de argamassa, etc.), ajustando-se apenas a dosagem de superplastificante<sup>130</sup> em função do teor de fibras, para se obter a mesma trabalhabilidade do traço de referência (120 +/- 20 mm), diminuindo-se, assim, o

---

<sup>130</sup> De acordo com os materiais existentes escolheu-se uma mistura que aceitasse as variações de dosagem do superplastificante a base de eterpolicarboxilato da Degussa (Glenium).

número de variáveis existentes. O traço principal<sup>131</sup> escolhido para a moldagem dos 22 segmentos está detalhado na Tabela 13:

**Tabela 13 Traço base para moldagem das aduelas<sup>132</sup>**

Materiais do Traço	Quantidade (kg)
Cimento	410
Areia de Cava (Rosa)	363
Pó de Pedra	442
Brita 9,5 mm	342
Brita 19 mm	636
Água	170
Superplastificante (0,4%)	1,7
Relação água/cimento	0,42
Ar aprisionado (%)	1,5
Teor de argamassa (%)	55
Slump (mm)	120 +/- 20

A consistência do concreto para a moldagem das aduelas do estudo experimental foi adotada a partir das condições de produção, transporte e lançamentos existentes. Num caso real de produção industrial, a consistência<sup>133</sup> do concreto pode ser ajustada de acordo com os equipamentos (vibradores), fôrma, posição da moldagem (em pé, convexa) transporte, sistema de adensamento, produção e controle do concreto. A Tabela 14 mostra que tipo de fibra foi adicionado, e sua quantidade, em cada um dos traços utilizados para a moldagem das aduelas:

---

<sup>131</sup> Cimento utilizado foi o CPV-ARI-RS da Holcim e os agregados da Concretex.

<sup>132</sup> Conforme já citado, dosagem de superplastificante variou de acordo com o teor de fibras, buscando-se trabalhabilidade similar ao traço de referência (120 +/- 20 mm).

<sup>133</sup> que em geral é de slump zero a 10 mm, com aditivos superplastificantes que auxiliam no adensamento através da utilização de vibradores acoplados às fôrmas.

**Tabela 14 Identificação dos traços, consumos e tipos de fibras utilizados.**

<b>TRAÇO</b>	<b>FIBRAS ( kg/m<sup>3</sup> )</b>
<b>A1B40- 40/60</b>	<b>40 ( 40%A1 + 60%B ) + 2kg PP</b>
<b>A1B40- 50/50</b>	<b>40 ( 50%A1 + 50%B ) + 2kg PP</b>
<b>A1B40- 60/40</b>	<b>40 ( 60%A1 + 40%B ) + 2kg PP</b>
<b>A1B30- 40/60</b>	<b>30 ( 40%A1 + 60%B ) + 2kg PP</b>
<b>A1B30- 50/50</b>	<b>30 ( 50%A1 + 50%B ) + 2kg PP</b>
<b>A1B30- 60/40</b>	<b>30 ( 60%A1 + 40%B ) + 2kg PP</b>
<b>MC – 1</b>	<b>CONTROLE( 2kg PP)</b>
<b>A40</b>	<b>40 A + 2kg PP</b>
<b>B40</b>	<b>40 B + 2kg PP</b>
<b>MC – 2</b>	<b>CONTROLE( 2kg PP)</b>
<b>A30</b>	<b>30 A + 2kg PP</b>
<b>B30</b>	<b>30 B + 2kg PP</b>

Sendo que:

A: fibra de aço laminado – comprimento 49 mm;

A1: fibra de aço laminado – comprimento 36 mm;

B: fibra de aço trefilado – comprimento 60 mm;

MC: mistura de controle;

40: teor total de fibras de aço por m<sup>3</sup>;

30: teor total de fibras de aço por m<sup>3</sup>;

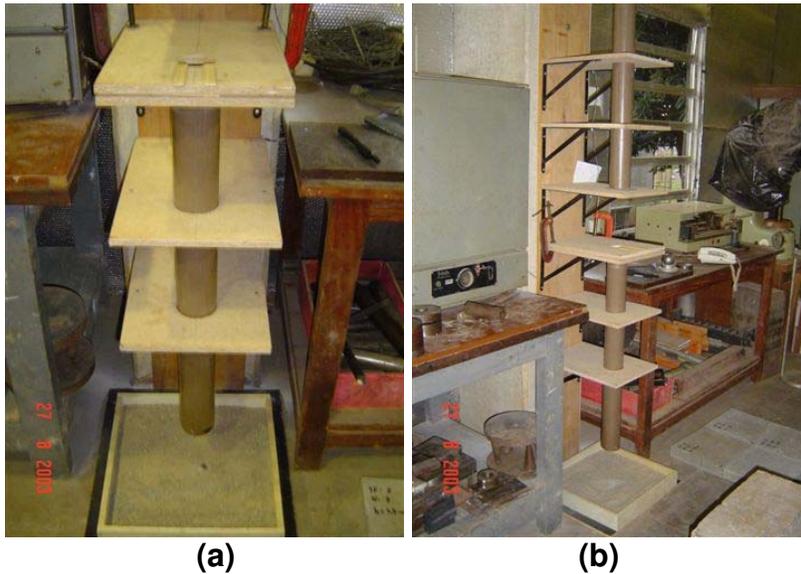
PP: fibras de polipropileno.

### *Resistência ao Impacto*

Como o ensaio sugerido pela ACI 544.4R-89 demanda equipamentos especiais, um ensaio desenvolvido localmente nos laboratórios da Unicamp, adaptado a partir deste documento, é apresentado a seguir. O ensaio procura estimar, através do número de golpes necessários para um determinado grau de desintegração (i.e. primeira fissura, ruptura total da placa, etc.) quantas vezes um determinado concreto com fibras é mais resistente ao impacto que o mesmo concreto sem as fibras<sup>134</sup>.

Fibras de polipropileno do tipo corrugadas<sup>135</sup> foram especialmente desenvolvidas para este projeto para conferir, ao compósito, melhor resistência ao impacto.

As Figura 21 (a) e (b) mostram o aparato dotado de um tubo por onde uma bola de aço de massa conhecida (aproximadamente 1 kg), que pode ser lançada<sup>136</sup> de uma altura padrão sobre a placa de concreto que fica assente em um berço de areia seca.



**Figura 21 (a) e (b) Aparato utilizado para determinação de resistência ao impacto.**

---

<sup>134</sup> Fibras de aço e de polipropileno.

<sup>135</sup> Monofilamentos de polipropileno extrudado, com tratamento de rugosidade que permite ancoragem da fibra na matriz de concreto.

<sup>136</sup> A Figura 21 mostra um detalhe do caminho (trilho) por onde a bola é introduzida e solta, descendo até a boca do tubo (por onde cai em queda livre), minimizando, assim, as interferências do operador.

Para cada traço de concreto<sup>137</sup> foram moldados 3 corpos-de-prova cilíndricos para determinação da resistência à compressão (para correlação) e cinco placas de 30 cm x 30 cm x 5 cm para a determinação da resistência ao impacto<sup>138</sup>. Os ensaios foram executados com altura de 1,0 m. Informações adicionais sobre este estudo podem ser encontradas em documento publicado pelo fabricante das fibras<sup>139</sup>.



Figura 22 (a) e (b) Corpos-de-prova para cada traço estudado na resistência ao impacto.



Figura 23 Padrão de fissuração das placas após a execução dos ensaios, variando-se o teor de fibras conforme os traços utilizados.

A idéia foi observar o número de golpes necessários para romper a placa com a variação do teor de fibras adicionado. Para um mesmo  $f_{ck}$  a primeira fissura ocorre independente do teor de fibras. O que varia é a ocorrência da ruptura da

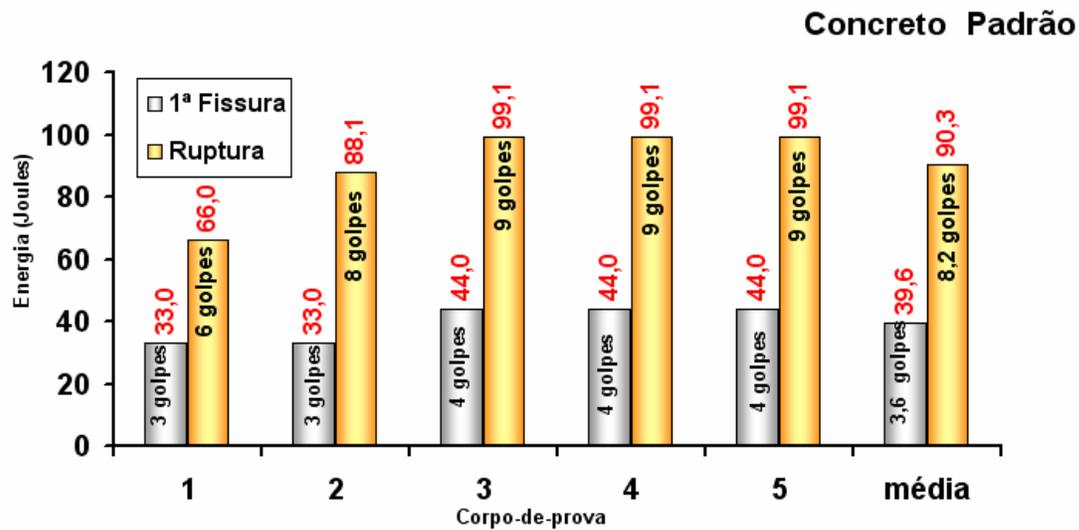
<sup>137</sup> No total 6 traços sendo um de referência (sem fibras) e os outros escolhidos a partir dos resultados de melhor índice de tenacidade, dentre muitos.

<sup>138</sup> Dimensões e outros valores adaptados do ACI 544-89.

<sup>139</sup> Fitesa – Ficha Técnica do Produto Polycrrete CR, Janeiro 2005.

placa em função do aumento de fibras no traço, ou seja, para um maior teor de fibras é necessário um maior número de golpes.

Conforme abordado em 2.3 a análise de resistência ao impacto deve ser feita de maneira comparativa. Desta forma, para se verificar os benefícios da adição de uma determinada fibra ou combinações, é necessário que se faça os ensaios para o concreto padrão (sem fibras). A Figura 24 mostra o comportamento de resistência ao impacto do concreto padrão:



**Figura 24 Representação da resistência ao impacto do concreto padrão utilizado.**

A energia média necessária para se obter visualmente a primeira fissura no concreto padrão foi de 39,6 J (3,6 golpes). Para a ruptura total da placa foram necessários em média 90,3 J (8,2 golpes).

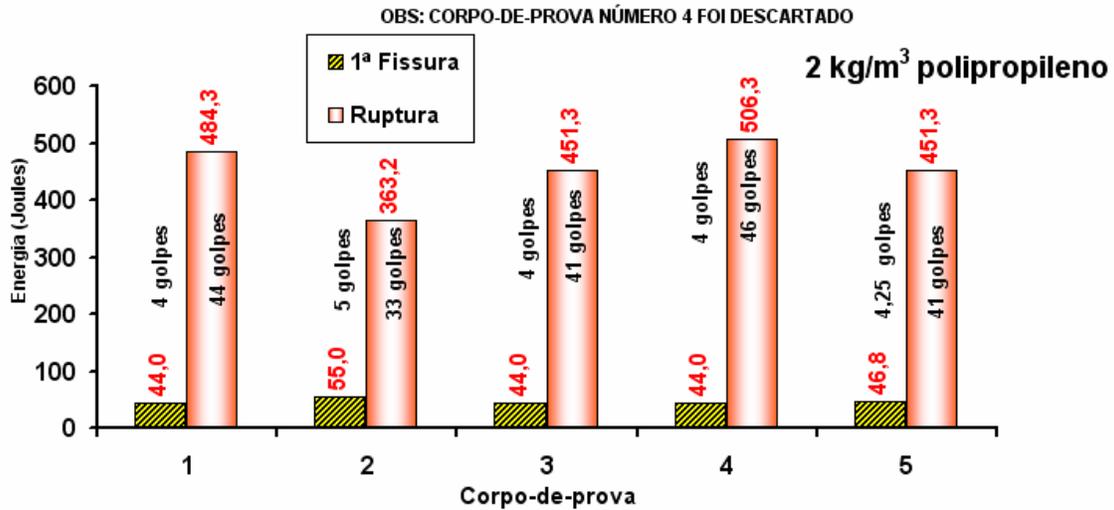


Figura 25 Aumento da resistência ao impacto com a utilização de fibras de polipropileno. Adicionando-se ao traço padrão 2 kg/m<sup>3</sup> das fibras de polipropileno necessita-se, em média, de 46,8 J (4,25 golpes) para a primeira fissura<sup>140</sup>. Para a ruptura total da placa foram necessários em média 451,3 J (41 golpes)<sup>141</sup>.

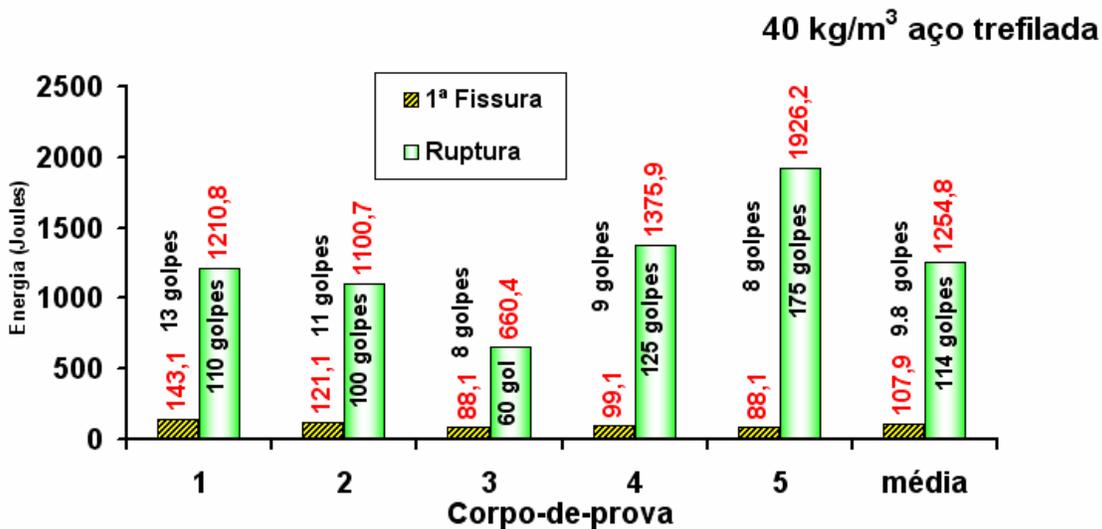
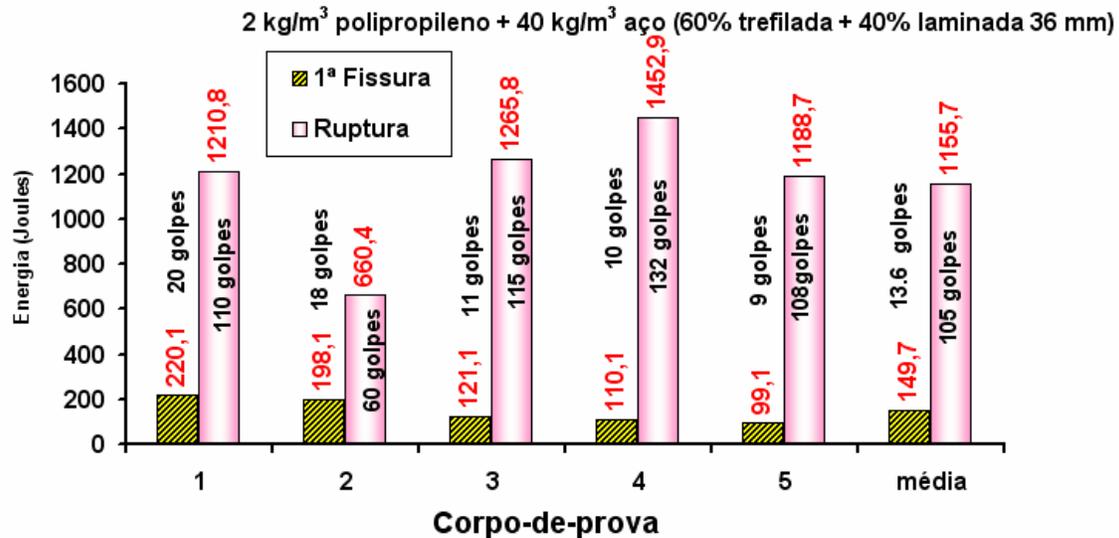


Figura 26 Aumento da resistência ao impacto com o emprego de fibras de aço.

<sup>140</sup> Aumento de 18% em relação ao traço padrão. Este valor, conforme já abordado em 2.2 não deve ser tomado como um aumento absoluto de resistência ao impacto, e sim de forma comparativa entre concretos de mesma matriz com diferentes adições (consumos e tipos de fibras).

<sup>141</sup> Aumento de 400% em relação ao concreto padrão (4 vezes mais).

Adicionando-se ao traço padrão  $40 \text{ kg/m}^3$  das fibras de aço tipo B necessita-se, em média, de  $107,9 \text{ J}$  (9,8 golpes) para a primeira fissura<sup>142</sup>. Para a ruptura total da placa foram necessários em média  $1254,8 \text{ J}$  (114 golpes)<sup>143</sup>.



**Figura 27 Aumento da resistência ao impacto empregando fibras de aço e polipropileno.**

Pôde-se notar que a combinação de dois tipos de fibras de aço em conjunto com a fibra de polipropileno proporcionou, dentre outras misturas testadas, o melhor resultado neste tipo de avaliação de resistência ao impacto. Adicionando-se ao traço padrão  $2 \text{ kg/m}^3$  de fibras de polipropileno e  $40 \text{ kg/m}^3$  da mistura de fibras de aço (60%B + 40%A1) necessita-se, em média, de  $149,7 \text{ J}$  (13,6 golpes) para a primeira fissura<sup>144</sup>. Para a ruptura total da placa foram necessários em média  $1155,7 \text{ J}$  (105 golpes)<sup>145</sup>.

<sup>142</sup> Aumento de 172% em relação ao concreto padrão (1,72 vezes mais).

<sup>143</sup> Aumento de 1290% em relação ao concreto padrão (12,9 vezes mais).

<sup>144</sup> Aumento de 177% em relação ao concreto padrão (1,77 vezes mais).

<sup>145</sup> Aumento de 1180% em relação ao concreto padrão (11,8 vezes mais).

## Tenacidade

Os ensaios para determinação da tenacidade do CRFA, as resistências residuais e equivalentes à tração na flexão, foram feitas de acordo com recomendação Européia RILEM<sup>146</sup>.

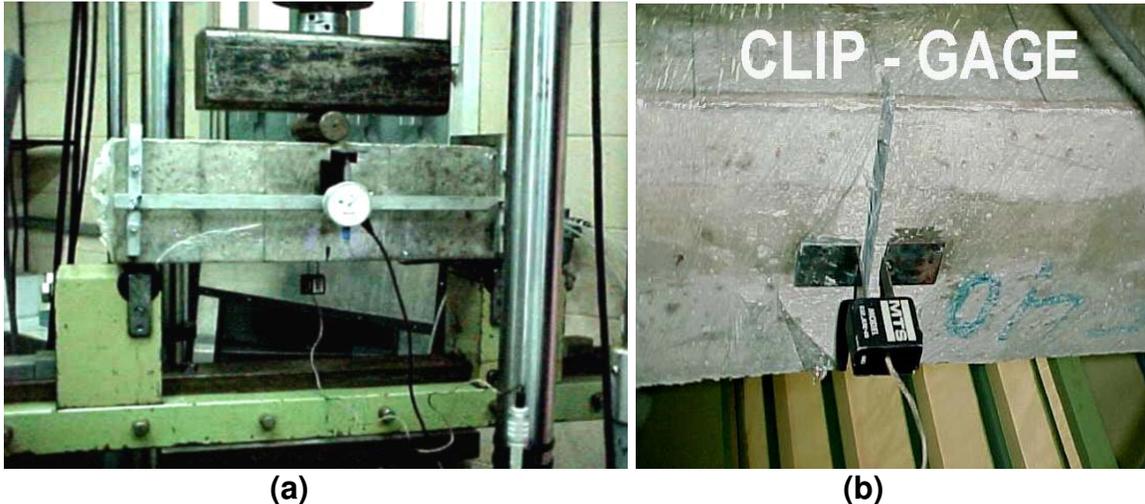


Figura 28 (a) Vista do ensaio de tenacidade através da RILEM e (b) entalhe e medidor.

Os ensaios de tenacidade para a escolha dos traços para moldagem das aduelas foram realizados variando-se o tipo e consumo de fibra.

O critério empregado foi a moldagem das aduelas utilizando-se somente os traços que apresentassem resultados de tenacidade maiores entre todos os ensaiados, comparativamente.

Das Figura 29 à Figura 32 são mostrados os comportamentos *carga x deslocamento vertical* e *carga x abertura da fissura* dos vários corpos-de-prova dos traços (B40 e A1B40).

Os demais resultados dos ensaios de tenacidade dos traços apresentados na Tabela 14 (página 58) são citados integralmente no ANEXO deste trabalho.

<sup>146</sup> RILEM TC 162 – TDF: Test And Design Methods For Steel Fibre Reinforced Concrete – Bending Test – Final Recommendation, Materials and Structures, V. 35, November 2002, p. 579 – 582.

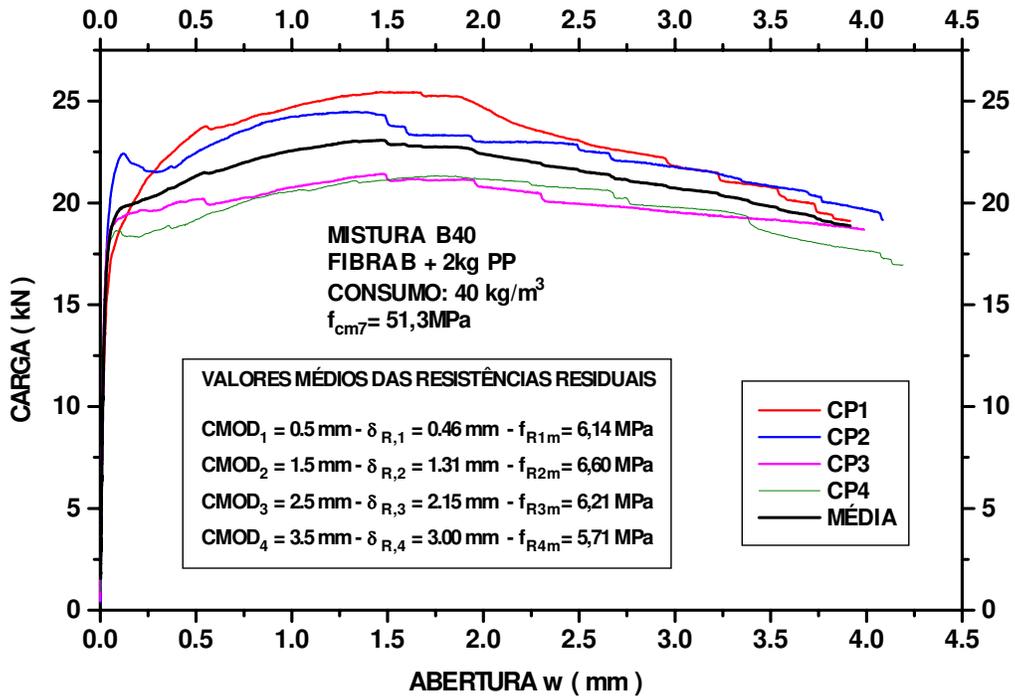
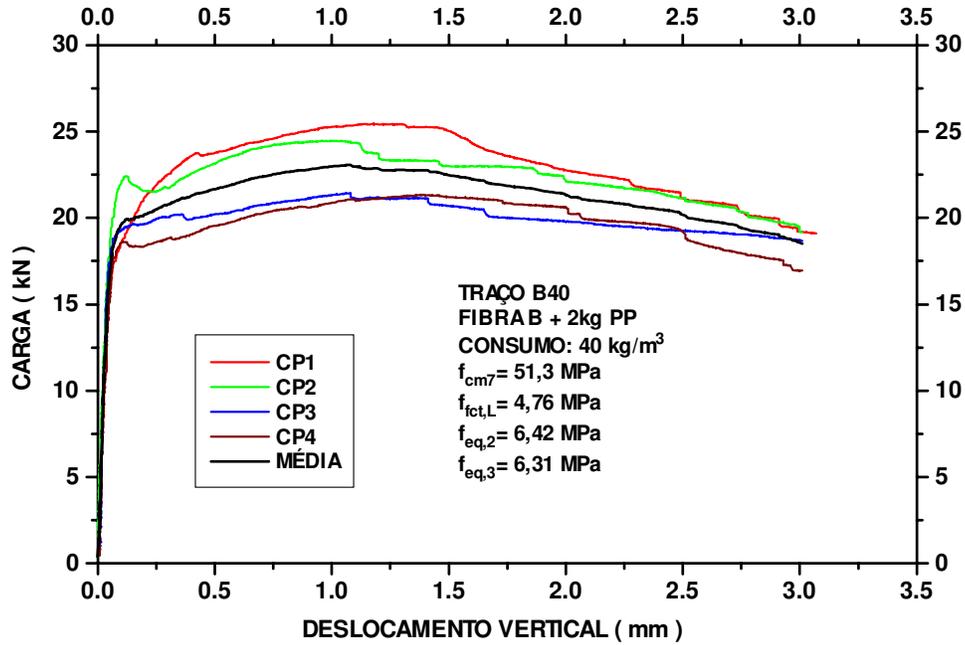


Figura 29 Carga x Deslocamento vertical para o traço B40.

Figura 30 Carga x Abertura para o traço B40.

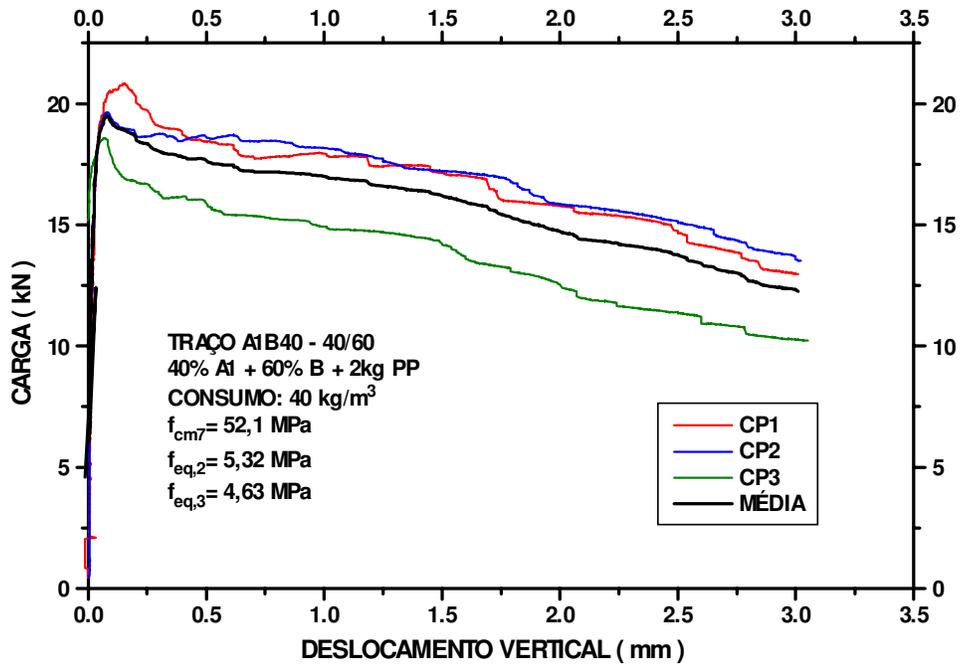


Figura 31 Carga x Deslocamento vertical para o traço A1B40.

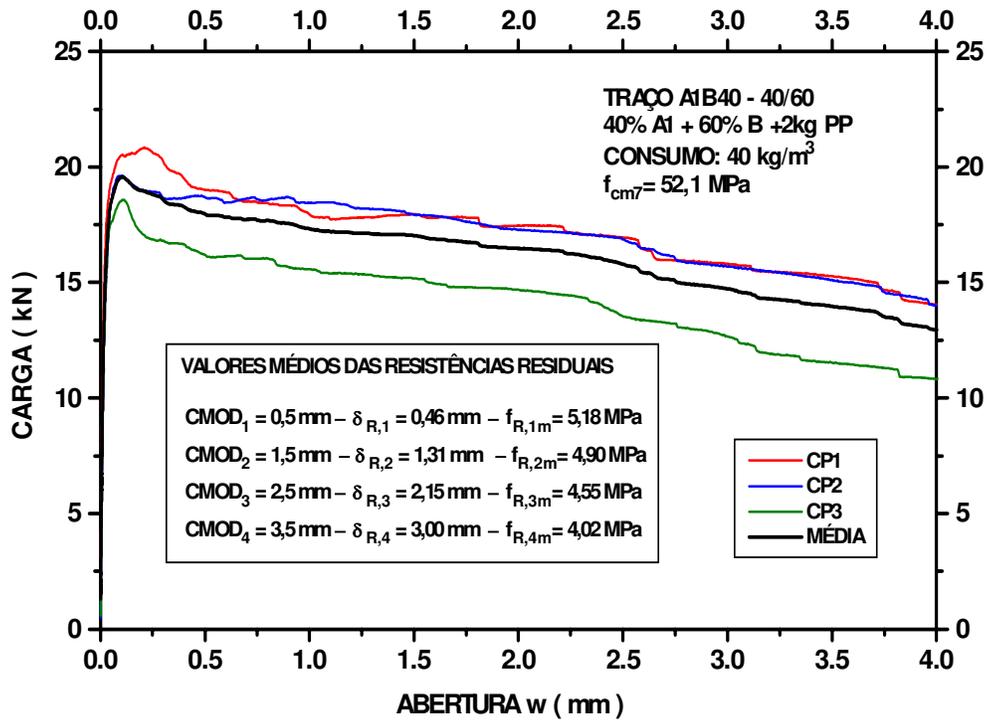


Figura 32 Carga x Abertura para o traço A1B40.

### *Resistência à Compressão do Concreto*

A resistência do traço de concreto utilizado para a moldagem dos corpos-de-prova prismáticos e cilíndricos, necessários para a execução dos ensaios de tenacidade utilizando-se as normas RILEM, já citadas anteriormente resultou em um concreto ao redor de 15 MPa aos 2 dias<sup>147</sup> e 65 MPa aos 28 dias.

### **5.3 Simulação da Fase Construtiva das Aduelas**

#### *Fôrma e Dimensões das Aduelas*

De acordo com os dados do projeto básico da linha 4, a fôrma<sup>148</sup> deveria ser confeccionada para atingir as seguintes medidas: largura de 1,50m, espessura de 0,30 m e comprimento de 3,67 m. Para a moldagem das chaves foi utilizado o mesmo molde sendo que as extremidades se deslocaram para atingir as dimensões desejadas. Foi utilizado equipamento de calandragem de alta precisão para a confecção das fôrmas, onde o erro estimado das medidas resulta em medida ao redor de 0,2 mm.



**Figura 33 (a) Fôrma de aço de alta precisão utilizada e (b) acabamento na superfície do inferior da aduela após a moldagem.**

Para melhor homogeneidade da peça foram utilizados vibradores acoplados à estrutura da fôrma, além da utilização pontual de vibrador de imersão (agulha de

---

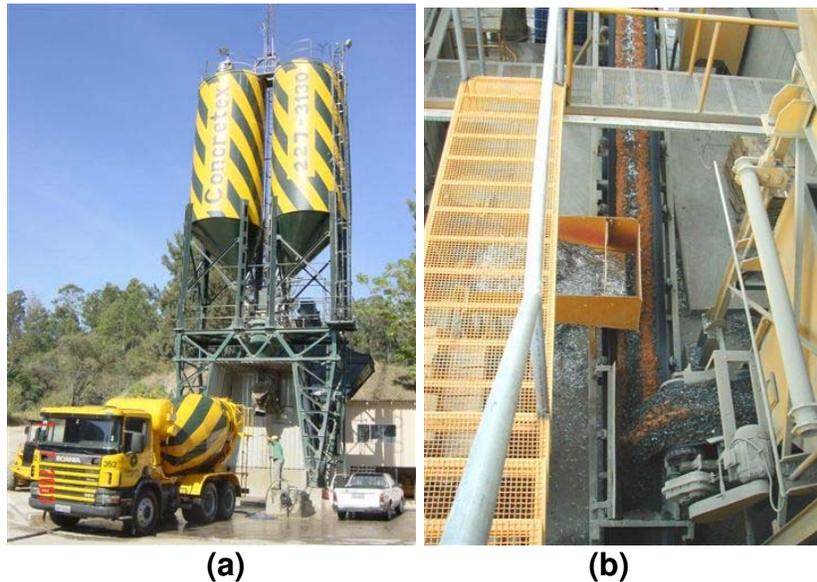
<sup>147</sup> Instante em que as aduelas eram içadas, simulando na fabricação ao redor de 7 horas de cura térmica.

<sup>148</sup> A fôrma utilizada na moldagem das aduelas foi de responsabilidade do Engenheiro Nikolas Mavridis; foi montada no pátio da empresa Jaraguá, localizada na cidade de Sorocaba, SP.

50 cm), quando necessário. Para melhor acabamento da superfície foi utilizado desmoldante universal de base mineral.

### *Central Dosadora*

Cada um dos carregamentos de concreto para moldagem das aduelas, foi acompanhado desde a central dosadora até o local da concretagem. Para melhor homogeneidade das cargas foram misturados 2,5 m<sup>3</sup> por viagem, mesmo utilizando-se apenas 1,65 m<sup>3</sup> por aduela.



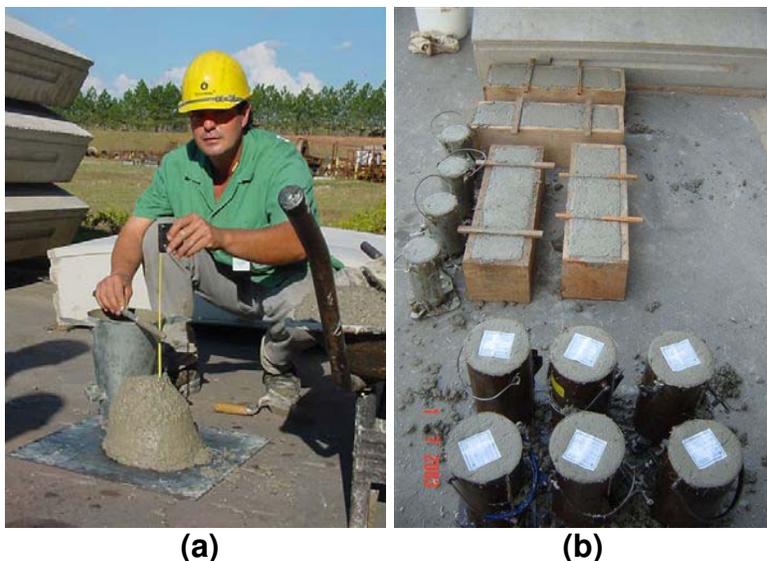
**Figura 34 (a) Central dosadora e um caminhão betoneira e (b) esteira dos agregados e a adição das fibras.**

### *Moldagem das Aduelas*

Após carregados, os caminhões betoneira viajavam cerca de 30 minutos, até o local onde foram executadas as moldagens das aduelas. Na sua chegada era sistematicamente feito o controle de recebimento através do ensaio de Abatimento do Tronco de Cone<sup>149</sup>.

---

<sup>149</sup> NBR 7223 também chamado de slump test.



**Figura 35 (a) Slump do concreto 120 +/- 20 mm e (b) corpos-de-prova para o controle tecnológico (tenacidade e resistência à compressão).**

Antes de se lançar o concreto na fôrma era feito o acerto da trabalhabilidade através do emprego de aditivo superplastificante. Ao final de cada carga foi feita a moldagem sistemática de corpos-de-prova para controle da resistência à compressão e tenacidade, para cada aduela.

Foram moldadas aduelas e chaves, contendo vários tipos de reforço, de acordo com a Tabela 15 ,estabelecendo portanto, um estudo comparativo.

As aduelas foram moldadas ao longo de 3 meses com apoio de uma única central fornecedora de concreto<sup>150</sup> e o acompanhamento de diversos engenheiros de diferentes empresas<sup>151</sup> em uma cidade vizinha<sup>152</sup> de Campinas.

---

<sup>150</sup> Concretex

<sup>151</sup> Degussa, Fitesa, Holcim-Concretex, Vulkan e Unicamp.

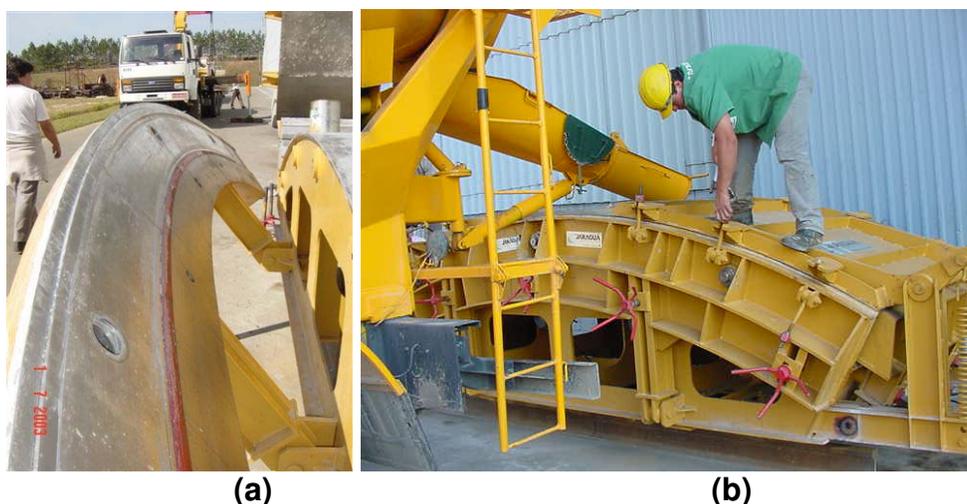
<sup>152</sup> As aduelas foram moldadas em Sorocaba (cerca de 100 km da cidade de Campinas), na empresa Jaraguá, dona do projeto da forma.

**Tabela 15 Tipos de reforço nas aduelas moldadas.**

Data da Concretagem	Nomenclatura das aduelas	Tipo de Reforço da Aduela	Fibra utilizada	Fibra (kg/m <sup>3</sup> )
26/6/2003	1F	Fibra de aço	A	40
1/7/2003	2F	Fibra de aço	B	40
4/7/2003	3FT	Fibra de aço + tela	A	30
8/7/2003	4FT	Fibra de aço + tela	B	30
15/7/2003	5F	Mistura de Fibras	60%B + 40%A1	24+16 = 40
18/7/2003	6G	Gaiola de Aço	-	-
29/7/2003	7F	Fibra de aço	A	40
1/8/2003	8F	Fibra de aço	B	40
5/8/2003	9F	Mistura de Fibras	60%B + 40%A1	24+16 = 40
8/8/2003	10FT	Fibra de aço + tela	A	35
12/8/2003	11F	Fibra de aço	B	35
19/8/2003	12G	Gaiola de Aço	-	-
2/9/2003	1 chave*	Fibra de aço	B	40
4/9/2003	2 chave*	Fibra de aço	B	35
9/9/2003	3 chave*	Mistura de Fibras	60%B + 40%A1	24+16 = 40

Legenda		
Fibra	Material	Comprimento (mm)
A	Aço Laminado	49
A1	Aço Laminado	36
B	Aço Trefilado	60
D**	Polipropileno	50
T	Tela $\phi$ 15 mm c/ 10 cm nas duas direções	
FT	Fibra em combinação com a Tela	
G	Gaiola	

\* utilizadas para o ensaio de fendilhamento  
 \*\* dois kg/m<sup>3</sup> desta fibra foram adicionados em todos os traços



**Figura 36 (a) Articulação lateral da fôrma e (b) descarga do concreto na fôrma metálica articulada.**

O aspecto do concreto com fibras (sem acabamento superficial) é mostrado na (Figura 37a), a distribuição das fibras é apresentada de maneira aleatória no

concreto e não houve problemas de concentração excessiva de fibras durante as moldagens. Foi executada vibração complementar localizada, efetuada com vibrador de imersão (Figura 37b) e foram acoplados à forma um sistema composto por vibradores fixos.



**(a)** **(b)**  
**Figura 37 (a) Concreto fresco sem acabamento superficial e (b) concreto sendo lançado e vibrado.**

As gaiolas para moldagem das aduelas foram produzidas e colocadas na aduela com apoio de uma empilhadeira. A correta colocação da armadura se deu através de espaçadores, respeitando o cobrimento de 3 cm. Devido a concentração de armadura da gaiola houve dificuldade na hora do lançamento do concreto. Assim, foi feita a vibração de imersão por mais tempo, houve diminuição da velocidade de concretagem e maior ação dos vibradores acoplados à forma.



**(a)** **(b)**  
**Figura 38 (a) Gaiolas para o reforço tradicional confeccionadas com barras de aço e (b) fôrma com a gaiola antes da moldagem da aduela.**

O consumo de aço por metro cúbico de concreto (taxa de armadura) de projeto<sup>153</sup> considerado foi de 85 kg/m<sup>3</sup>. O detalhamento da gaiola utilizada nas moldagens é apresentado na Figura 39:

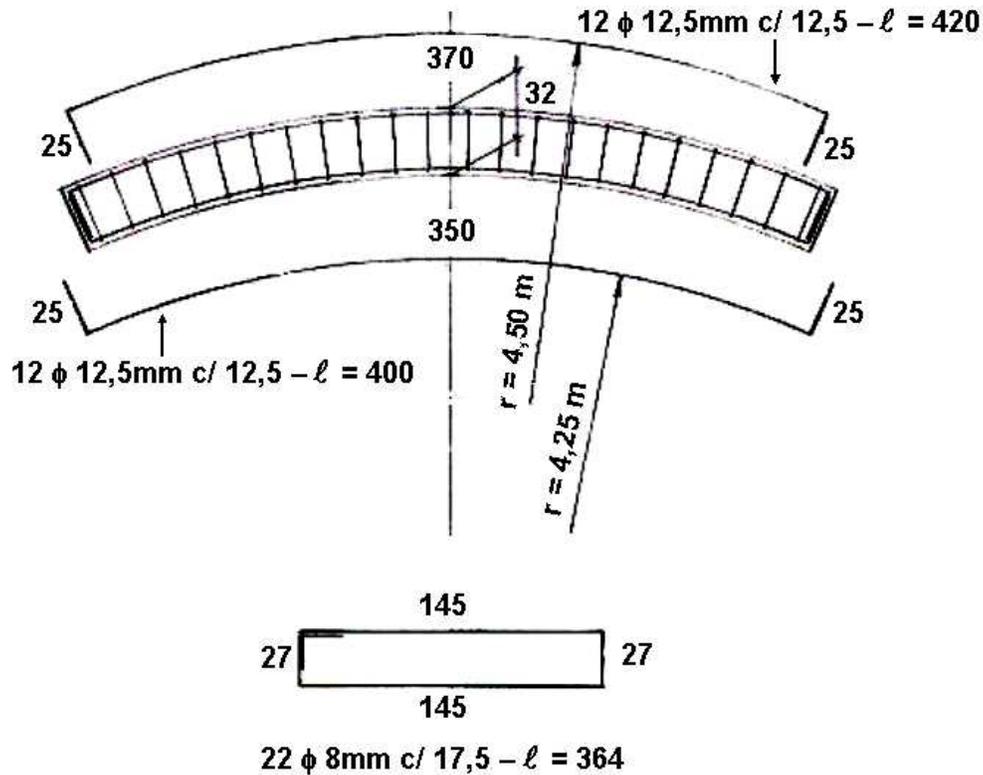


Figura 39 Representação gráfica da armadura utilizada como reforço tradicional (gaiolas) das aduelas.

### *Desfôrma, Içamento e Estocagem*

Uma das etapas mais importantes do ciclo, quando em escala de produção dos anéis, é o içamento das aduelas no momento da desfôrma. Nesta etapa elas ficam sujeitas às piores condições de tensão de tração<sup>154</sup> e o concreto que as compõe ainda apresenta resistência relativamente baixa<sup>155</sup>. Para se obter um aumento significativo da resistência de baixa idade, deve-se aumentar substancialmente o consumo de cimento, alterando as condições econômicas do

<sup>153</sup> Dados colhidos do projeto básico feito por uma das projetistas na fase inicial da concorrência para a construção da linha 4 do Metrô-SP.

<sup>154</sup> Conforme explicado em 4.5.

<sup>155</sup> da ordem de 10 MPa a 15 MPa, em geral.

projeto. Uma forma adicional seria executar a cura térmica, normalmente utilizada em projetos deste porte.

Como há diversas formas de se executar o içamento<sup>156</sup>, entre elas o içamento “pinçado”, (mostrado na Figura 40 a) e a vácuo (muito utilizado atualmente mostrado nas Figura 42 a e b), o ideal é que se faça um estudo a partir das condições de cada projeto. Fica claro que a definição do tipo de içamento que se irá utilizar na planta de produção é essencial para a determinação das cargas atuantes nas peças nesta etapa. É importante observar que o içamento na planta de produção dos anéis, em geral, é adotado a partir do utilizado pela máquina de escavar túneis, ou seja, o dimensionamento das aduelas fica sujeito às definições de projeto num âmbito geral, sendo de fundamental importância o balanço de custos a partir da resposta de resistência a compressão do traço a baixa idade, ciclo de produção (incluindo cura térmica) e do tipo de içamento adotado.



**Figura 40 (a) içamento e (b) estocagem simulando etapa no pátio da planta de produção.**

Outro tipo de içamento é apontado nas Figura 43 a e b, onde as peças são erguidas por apenas um ponto central.

---

<sup>156</sup> O içamento é executado várias vezes na cadeia de produção.



(a)

(b)

Figura 41 (a) Eretor de aduelas a vácuo dentro da fabrica no momento da estocagem e durante o transporte (b)



(a)

(b)

Figura 42 (a) e (b) Eretor de aduelas a vácuo dentro de uma máquina tuneladora.

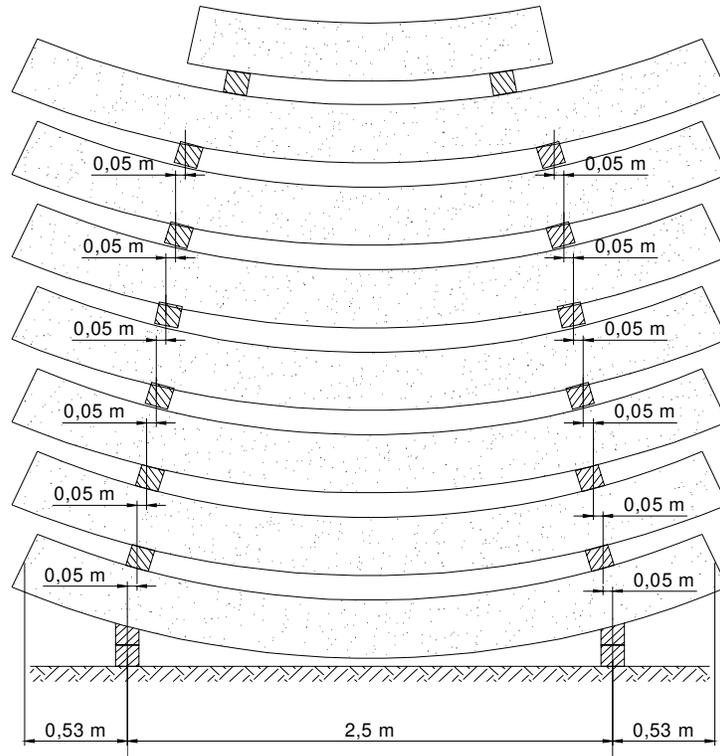


(a)

(b)

Figura 43 (a) e (b) Eretor de aduelas tradicional cujo acoplamento é feito num ponto central da aduela.

Na planta de produção dos anéis, em geral, a forma de estocagem do mesmos é feita de acordo com a Figura 44, variando-se apenas a quantidade de aduelas para se compor o anel em cada projeto:



**Figura 44 Estocagem de um anel completo (usual) no sistema 7 aduelas + 1 chave**



**Figura 45 Situação real de estocagem na planta de produção (6 aduelas + 1 chave).**

Nesta situação, tem-se as seguintes cargas atuantes sobre a primeira aduela:

- peso próprio de cada aduela:  $44 \text{ kN} \times 6 \text{ aduelas} = 264 \text{ kN}$ ;

- peso próprio da chave: 22 kN;
- Carga total = 286 kN.

Os pontos de carregamento na primeira aduela surgem através de dois espaçadores verticais, geralmente sarrafos de madeira, que são colocados entre elas para a estocagem. Desta forma, divide-se a carga total por dois. A partir da Figura 46 é mostrada a memória de cálculo simplificada da verificação da estocagem:

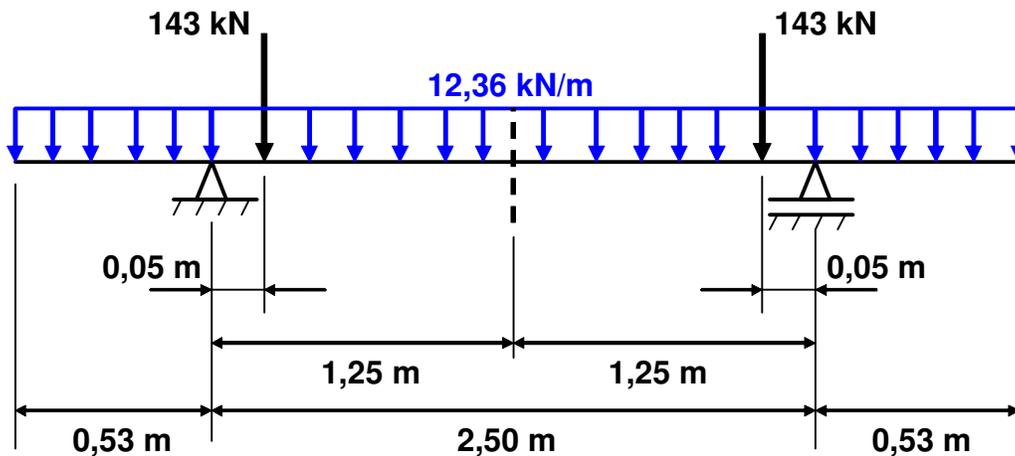
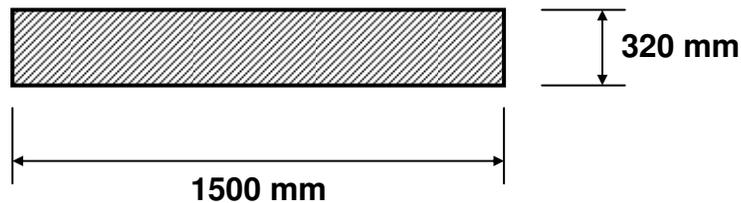


Figura 46 Esquema simplificado de cálculo para verificação das condições de carregamento da primeira aduela durante a estocagem.

Este carregamento causa, na seção do meio do vão, o momento fletor  $M_{\ell/2} = 15,07 \text{ kN.m}$  resultando no seguinte valor de tensão na borda da seção transversal:



$$\sigma_{ct} = \frac{15,07 \times 0,16}{0,004096} = 588,7 \text{ kN/m}^2 \cong 0,59 \text{ MPa}$$

O valor da tensão de cálculo  $\sigma_{ctd}$  a considerar deve levar em consideração o efeito dinâmico da solicitação, expresso pelo coeficiente de majoração  $\beta_a = 1,3$ , de acordo com a NBR 9062: 2001 – Projeto e execução de estruturas de concreto pré-moldado, assim como o coeficiente de ponderação das ações no

estado limite último  $\gamma_g = 1,3$  correspondente às combinações de ações permanentes especiais ou de construção, segundo a NBR 6118: 2003 – Projeto de estruturas de concreto – Procedimento.

$$\therefore \sigma_{ctd} = \beta_a \cdot \gamma_g \cdot \sigma_c = 1,3 \times 1,3 \times 0,59 \cong 1,0 \text{ MPa}$$

Também de acordo com a NBR 6118: 2003, a tensão solicitante de cálculo  $\sigma_{ctd}$  não deve exceder à tensão resistente de cálculo,  $\sigma_{ctRd}$ , considerando como se a peça fosse executada em concreto simples, ou seja:

- $f_{ct,f} = 5,0$  MPa : valor médio da tensão de tração na flexão dos concretos ensaiados;
- $f_{ct} = 0,7 \cdot f_{ct,f} = 0,7 \times 5,0 = 3,5$  MPa : resistência à tração direta;
- $f_{ctk,inf} = 0,7 \cdot f_{ct} = 0,7 \times 3,5 = 2,45$  MPa : resistência característica inferior;
- $f_{ctd} = f_{ctk,inf} / \gamma_c = 2,45 / ( 1,2 \times 1,4 ) = 1,46$  MPa : resistência à tração direta de cálculo;
- $\sigma_{ctRd} = 0,85 \cdot f_{ctd} = 0,85 \times 1,46 = 1,24$  MPa : tensão resistente de cálculo.

Portanto, como  $\sigma_{ctd} < \sigma_{ctRd}$ , não existem problemas relativos à flexão para a estocagem das aduelas.

### *Transporte*

Após a sua moldagem, desfôrma, içamento e estocagem preliminar, as aduelas foram transportadas por meio rodoviário até o laboratório da Unicamp, com objetivo de simular situações reais de solicitações das peças em serviço (escala 1:1). Esta etapa é fundamental no estudo como um todo, pois numa situação real de produção em grande escala numa determinada obra, as aduelas passarão repetidamente por solicitações de içamento, estocagem e transporte. Desde o momento que saem da fôrma, são içadas, estocadas preliminarmente<sup>157</sup>, estocadas definitivamente<sup>158</sup>, transportadas até um primeiro

---

<sup>157</sup> Para se fazer inspeções, reparos eventuais e tratamentos superficiais, de acordo com as necessidades de projeto.

<sup>158</sup> Na planta de produção, fazendo parte do pulmão de aduelas, conforme explicado em 2.3.

ponto perto do local onde a máquina tuneladora irá instalá-las, colocadas nos carrinhos dentro do túnel e, finalmente, içadas para serem instaladas.



Figura 47 (a) Transporte das aduelas em rodovia estadual e (b) descarregamento das aduelas no pátio da Unicamp, para realização dos ensaios.



Figura 48 (a) Penúltima etapa de içamento e transporte<sup>159</sup> das aduelas e (b) chegada até a máquina tuneladora antes do eretor.

#### 5.4 Simulação da fase executiva do Túnel - Fendilhamento

Já nos ensaios de fendilhamento, que procuram simular a ação dinâmica dos macacos na face lateral das aduelas no momento de sua instalação dentro do túnel, procurou-se aplicar a carga de projeto de 150 toneladas em diferentes

<sup>159</sup> Descida no poço de acesso e transporte sobre trilhos em conjunto com outros insumos até a máquina tuneladora.

posições, prováveis de se ocorrer na prática<sup>160</sup>, observando-se comparativamente as diferenças de danos produzidos.

Para avaliar a resistência ao fendilhamento, os ensaios foram executados no Laboratório de Estruturas e Materiais de Construção utilizando uma estrutura de reação de 500 toneladas. Os ensaios foram realizados tanto em peças prismáticas moldadas no laboratório, respeitando os mesmos traços escolhidos para as aduelas em campo, quanto nas próprias peças que foram moldadas em campo e depois transportadas para o laboratório, conforme mostra a Figura 49:



**Figura 49 (a) Preparação e calibração dos equipamentos, e (b) realização do ensaio de fendilhamento na aduela.**



**Figura 50 (a) Ensaio de fendilhamento executado na chave<sup>161</sup>, e (b) chapa de distribuição de carga da estrutura de reação (capacidade 500 Tf).**

<sup>160</sup> Devido a apoios descontínuos e diferentes tamanhos das sapatas ou outro imprevisto relativo a desalinhamentos do anel anterior, na seqüência de instalação.

<sup>161</sup> Chave é o segmento de fechamento do anel.

Durante o movimento de avanço do TBM no túnel as sapatas de seus macacos empurram o anel previamente instalado. A carga de compressão de cada macaco pode alcançar valores tão altos quanto 6000kN.

Tais cargas são muito perigosas, uma vez que causam elevadas tensões de tração nos elementos, na direção perpendicular ao eixo do túnel, e em função de sua magnitude, este caso de carregamento é geralmente determinante para o dimensionamento das aduelas. Para simular tal condição de carregamento no laboratório foi considerada a seguinte situação:

- Cargas e tensões aplicadas pelo TBM:
  - Força axial de trabalho aplicada por cada cilindro (macaco) do TBM = 5670kN;
  - Força axial máxima aplicada por cada cilindro do TBM = 7875kN;
  - Número de cilindros = 15 duplos;
  - Força total de trabalho sobre o anel =  $5670 \times 15 = 85000\text{kN}$ ;
  - Área da chapa de distribuição da força axial =  $1000 \times 315\text{mm} = 315000 \text{ mm}^2$ ;
  - Tensão de trabalho =  $5670000 \text{ N} / 315000 \text{ mm}^2 = 18 \text{ MPa}$
  - Tensão máxima =  $7875000 \text{ N} / 315000 \text{ mm}^2 = 25 \text{ MPa}$
- Simulação no laboratório:
  - Área da chapa de =  $400 \times 200\text{mm} = 80000 \text{ mm}^2$ ;
  - Força axial de trabalho simulada =  $80000 \text{ mm}^2 \times 18 \text{ MPa} = 1440000\text{N} = 1440\text{kN}$ ;
  - Força axial máxima simulada =  $80000 \text{ mm}^2 \times 25 \text{ MPa} = 2000000\text{N} = 2000\text{kN}$ .

Nos ensaios realizados foram obtidos os resultados apresentados na Tabela 16:

**Tabela 16 Resultados do ensaio de fendilhamento.**

Elemento	Carga aplicada (kN)	Ocorrência
Aduela 8F	3070	ruptura
Aduela 6G	3050	ruptura
Chave 1	2010	sem danos
Chave 3	2500	formação de fissura



**Figura 51 Ruptura da aduela 8F**

A ocorrência de fissuras nas aduelas neste tipo de ensaio reforça que a transferência da carga aplicada pelos macacos na interface das juntas<sup>162</sup>, dentro do túnel, devem ter tolerâncias máximas que evitem a ocorrência de concentrações excessivas a ponto de causar rupturas como a mostrada na Figura 51.

### **5.5 Simulação do túnel em serviço: Flexo-Compressão**

Notou-se a necessidade de se fazer ensaios em escala real das peças submetidas a flexo-compressão. Este tipo de carregamento, submete as peças a condições desfavoráveis gerando tensões de tração localizadas. O ensaio de flexo-compressão mostra que estas tensões podem ser absorvidas pelas fibras de aço, através do aumento da ductilidade do material, e fornece dados de deformação e a medição dos deslocamentos encontrados.

Foram determinados<sup>163</sup> os esforços solicitantes na condição de serviço, em função do desenvolvimento em cota da geratriz superior do túnel das aduelas, distinguindo-se duas situações, a primeira das quais denominada *seção rasa* e a segunda de *seção profunda*.

---

<sup>162</sup> Em geral o projetista do anel determina que tipo de ensaio deve ser feito e quais as tolerâncias da ocorrência de desvios nas juntas de acordo com a concepção geométrica do anel.

<sup>163</sup> A partir do Projeto Básico da Linha 4 – Amarela do Metrô da cidade de São Paulo.

Para a *seção rasa* foi adotada a profundidade de 13,0m e para a *seção profunda* uma cobertura de 28,0m. Na Tabela 17 são mostrados os esforços solicitantes obtidos para as duas condições acima citadas.

**Tabela 17 Esforços solicitantes no túnel.**

Seção	Carregamento de edificações	Esforços solicitantes máximos		
		N (kN/m)	M (kNm/m)	V (kn/m)
Rasa	com prédio, considerando fundação profunda	-1490	8,66	6,60
	com prédio, considerando fundação rasa	-1450	6,37	4,37
Profunda	sem prédio	-2510	4,40	2,35
	com prédio, fundação profunda	-2720	10,02	5,48
	considerando escavação futura	-2320	14,77	11,81

Como se pode observar nos resultados contidos na Tabela 17, existe sempre, a predominância do esforço normal de compressão acompanhado de reduzidos momentos fletores para a condição de serviço do túnel. Isto conduz a taxas mínimas de armaduras de flexão, não havendo necessidade de armaduras transversais para combate ao cisalhamento.

No programa experimental desenvolvido, buscou-se simular as condições apresentadas acima por meio da realização de ensaios de flexo-compressão nas aduelas moldadas em concreto reforçado com fibras.

As aduelas foram ensaiadas de acordo com o esquema mostrado na Figura 52 e Figura 53. Em tal esquema as aduelas se comportam como arcos bi-articulados, como representado na Figura 54, que se constituem em estruturas hiperestáticas.



Figura 52 (a) e (b) Vista geral do aparato utilizado para o ensaio de flexo-compressão.

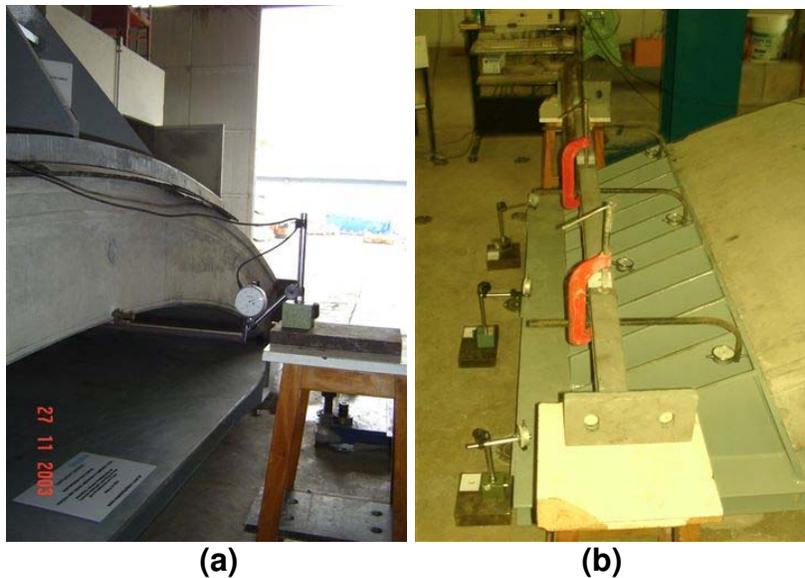


Figura 53 (a) Registro da deformação no centro das aduelas com carga de projeto e (b) monitoramento de deslocamento do berço de apoio (suporte metálico cinza).

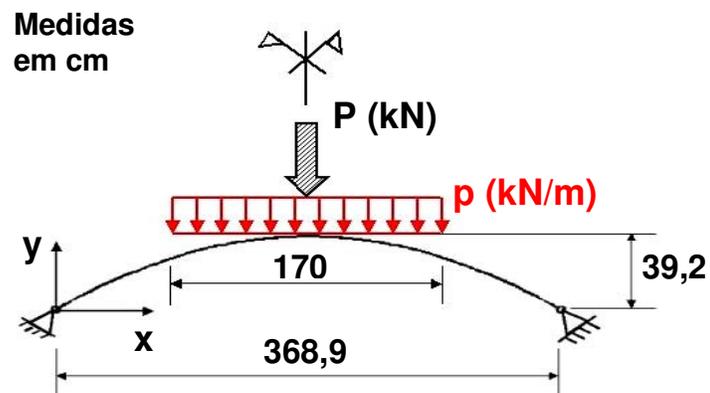


Figura 54 Esquema estático e carregamento das aduelas

Os esforços solicitantes atuantes em tais estruturas foram calculados para cada etapa de carregamento, obtendo-se os resultados mostrados na Tabela 18.

**Tabela 18 Esforços solicitantes atuantes nas aduelas nas diversas etapas de carregamento**

P	p	Seção	Ordenadas		N	M	V
			x (cm)	y (cm)			
500	294,12	0	0	0	- 864,94	0	- 111,43
		5	59,5	21,6	- 872,03	- 32,16	10,03
		10	121,3	34,8	- 853,19	5,61	67,55
		15	184,5	39,2	- 835,49	27,32	0
1000	588,24	0	0	0	- 1729,88	0	- 222,87
		5	59,5	21,6	- 1744,06	- 64,32	20,05
		10	121,3	34,8	- 1706,38	11,23	135,10
		15	184,5	39,2	- 1670,97	54,64	0
1500	822,36	0	0	0	- 2594,82	0	- 334,29
		5	59,5	21,6	- 2616,09	- 96,48	30,09
		10	121,3	34,8	- 2559,57	16,83	202,65
		15	184,5	39,2	- 2506,47	81,96	0
2000	1176,48	0	0	0	- 3459,76	0	445,72
		5	59,5	21,6	- 3488,12	- 128,64	40,12
		10	121,3	34,8	- 3412,76	22,44	270,20
		15	184,5	39,2	- 3341,96	109,28	0

Sendo:

P (kN): carga aplicada pelo macaco

p(kN/m): carga distribuída sobre a aduela

N: força normal

M: momento fletor

V: força cortante

Analisando os resultados apresentados nas Tabela 17 e Tabela 18 , verifica-se que nos ensaios realizados os esforços solicitantes atuantes superam muito aqueles determinados no projeto básico, o que garante a segurança das aduelas executadas em concreto reforçado com fibras.

Durante a realização dos ensaios foi observado o aparecimento de fissuras nas aduelas, fissuras de pequena abertura, da ordem de 0,2mm.

Tais fissuras foram formadas em função de deslocamentos horizontais ocasionados por esmagamentos localizados nas aduelas durante o carregamento, esmagamentos estes provenientes do ajustamento da peça a seu berço de apoio. Tal fato pode ser confirmado analiticamente, considerando um deslocamento horizontal de apenas 6mm do arco bi-articulado, conforme ilustrado na Figura 55:

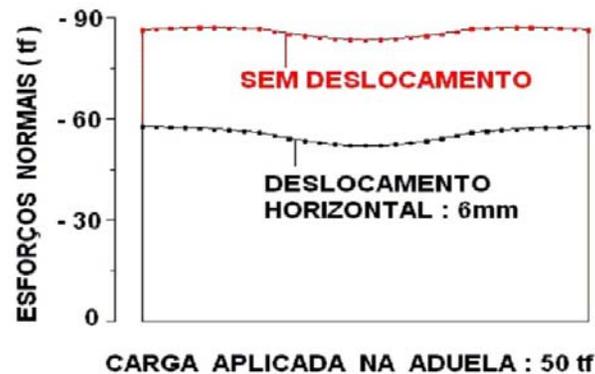


Figura 55 Esforço normal atuante na aduela com e sem deslocamento.



Figura 56 Momento Fletor atuante com e sem deslocamento no instante da execução do ensaio de flexo-compressão.

Como se pode observar na Figura 56, existe grande diferença de magnitude nas solicitações quando ocorre um deslocamento horizontal da aduela no ensaio de flexo-compressão. As tensões de tração geradas no concreto nesta situação podem ser maiores que a resistência à tração na flexão, provocando o surgimento de fissuras nas peças.

Note-se que quando não há deslocamento nos apoios, apenas a parte central da aduela é tracionada. Além disto, as tensões são relativamente baixas e o concreto é, em geral, capaz de resistir a tais solicitações. Já no caso de uma acomodação, as solicitações de tração ocorrem ao longo de toda a extensão da aduela, sendo ainda de intensidade bem mais elevada, comprometendo a integridade da peça.

Na Figura 57 (a) e (b) são mostrados esmagamentos localizados ocorridos durante a execução dos ensaios, sendo estes responsáveis pelo aparecimento de fissuras (Figura 58).



**Figura 57 (a) e (b) Esmagamentos nos apoios que provocaram os deslocamentos horizontais citados.**



**Figura 58 Primeira fissura em virtude do esmagamento do concreto nos apoios e anotação da magnitude da carga (80 Tf).**

Os resultados obtidos nos ensaios de flexo-compressão realizados com aduelas em concreto reforçado com fibras e em concreto armado são apresentados na Tabela 19:

**Tabela 19 Resultados dos ensaios de flexo-compressão das aduelas.**

Aduela	Carga de fissuração *	Carga máxima aplicada **	Flecha máxima
	(kN)	(kN)	(mm)
2F	800	1938	9,9
3FT	1000	2001	9,5
5F	1000	1920	8,2
6G	700	2070	9,0
11F	800	1957	10,1
12G	600	1982	9,7

\* primeira fissura visível

\*\* carga aplicada pelo macaco

### **5.6 Montagem do Anel em Escala Real**

Para certificar-se da precisão das medidas das fôrmas e apreciar em real grandeza o resultado, a montagem de um anel de 8,43 m de diâmetro interno complementou este trabalho.

O anel foi montado no pátio da empresa Jaraguá e teve como responsável o engenheiro Nikolas Mavridis no sistema 6+1 (seis aduelas +1 chave para fechamento).



**(a)** **(b)**  
**Figura 59 (a) Montagem do anel e (b) anel montado.**

## 6. CONCLUSÕES

A substituição do reforço das gaiolas de aço das aduelas por fibras de aço, permite obtenção de qualidade superior do resultado final da estrutura quando são analisados os diversos benefícios que esta substituição traz. A começar pela retirada total da chance de ocorrência de corrosão das armaduras. Seguida da otimização do processo de fabricação, manuseio, transporte e instalação como um todo. Isto porque seus benefícios permitem um ciclo de produção mais rápido na fábrica (especialmente quando em conjunto com a utilização de cura térmica) e permite que as intervenções localizadas para execução dos reparos por motivos de quebra, sejam minimizadas. Além disso, asseguram que durante a instalação das aduelas no túnel os cantos e bordas possam resistir também à ações dinâmicas do empuxo dos macacos dos TBM, evitando mais uma vez quebras e intervenções de manutenção, neste caso após o anel instalado.

Do ponto de vista de comportamento estrutural, como praticamente são geradas apenas tensões de compressão no anel, as pequenas tensões de tração podem ser absorvidas através da utilização das fibras de aço como substituição da armadura convencional. Ou seja, de um modo geral, a relativamente alta resistência à compressão do concreto dos anéis (ao redor de 65 MPa) é o que assegura a estabilidade estrutural do túnel em operação. O motivo de se adicionar fibras ao concreto das aduelas é aumentar a ductilidade do concreto que compõe a peça e, desta forma, assegurar sua integridade, mesmo nas fases mais críticas do processo. É claro que, para os casos onde o anel pode ser estável somente com a utilização do concreto simples, quando utilizadas as fibras de aço os benefícios de redução nas quebras, aumento da resistência ao impacto, durabilidade, etc., são obtidos.

No caso da utilização da tenacidade como ferramenta de apoio para dimensionamento das aduelas, considera-se que a RILEM TC 162-TDF pode ser a melhor opção de metodologia. Isto porque, permite a avaliação da tenacidade em função do controle da abertura das fissuras e quantifica como a fibra pode colaborar efetivamente neste processo.

A combinação da utilização de diferentes tipos de fibra, como de aço em conjunto com polipropileno, foi adotada em obras importantes com as do CTRL e provou ser importante tanto na fase construtiva, através do significativo aumento da resistência ao impacto, quanto na fase executiva, onde pode aumentar a resistência ao lascamento frente ao eventual ataque por fogo. Estas aplicações comprovam que a utilização das fibras é uma tecnologia disponível para utilização em aduelas. No Brasil, no caso de um acompanhamento da tendência mundial à mecanização dos processos construtivos de túneis, o conhecimento do comportamento e contribuição das fibras em aduelas passa a ser uma ferramenta importante na viabilização da construção de estruturas de túneis duráveis. Atualmente, a próxima oportunidade para a aplicação desta tecnologia é na construção da linha 4 Amarela do Metropolitano de São Paulo, acompanhando o aprimoramento tecnológico mundial e levando os benefícios da utilização desta tecnologia para a sociedade.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **Manual of concrete practice: part 5.** ACI. Design considerations for steel fiber reinforced concrete. (ACI 544.4R-88). ACI Committee 544. Detroit, USA ,1988.(Reapproved 1994)18p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard test method for flexural toughness and first crack of fiber reinforced concrete.** ASTM C 1018. Book of ASTM Standards, v. 04.02. ASTM, Philadelphia, 1994.

\_\_\_\_. **Standard Specification for Steel Fibers for Fiber Reinforced Concrete.** **ASTM A 820/01.** Annual Book of ASTM Standards, v. 01.03; v. 04.02 August 2001.

BALAGURU, P.N.; SHAH, S.P. **Fiber Reinforced cement composites.** USA. McGraw-Hill. 1992.

BANTHIA, N.; TROTTIER, J-F. Concrete Reinforced with Deformed Steel Fibers, Part I: Bond-Slip Mechanisms. **ACI Materials Journal**, v.91, n.5, sep-oct 1994, p. 435-446.

BARROS, J.A.O.; ANTUNES, J.A.B.; AMORIM, J.A.S.B.A. **Influência da quantidade de fibras, porcentagem de fibras volantes e idade no comportamento à flexão de betão reforçado com fibras de aço Dramix RC-80/60-BN**, Part I: bond-slip mechanisms. POCTI, n°34793/99, Julho 2002, 87p.

BENTUR, A.; MINDESS, S. **Fibre Reinforced Cimentitious Composites.** United Kingdom. Barking, Elsevier. 1990.

BLAYNEY, N. Segmental lining Technology News. **Tunnels & Tunnelling International**, October v.36, n.10, 2004.p.49-50

CAFARO, E. Testing tunnel fire suppression systems. **Tunnels & Tunnelling International**, June v.36, n.6 2004.p.39-42.

CECCATO, M.R. **Estudo da trabalhabilidade do concreto reforçado com fibras de aço**. São Paulo, 1998, 98p. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

CHANVILLARD, G.; AITCIN, P.C.; LUPIEN, C. Field Evaluation of steel fiber reinforced concrete overlay with various bonding mechanisms. **Transportation Research Record**, 1226, 1989, p.48-56.

COSTA, F.R. **Avaliação do concreto incorporando fibras de polipropileno**. Relatório de bolsa pesquisa – SAE Fitesa. Campinas, 2004

EFNARC. **European Specification for Sprayed Concrete**. European Federation of Producers and Applicators of Specialist Products for Structures (EFNARC), Hampshire, U.K. 1996. 30p.

FIGUEIREDO, A.D. **Concreto Projetado: Fatores Intervenientes no Controle da Qualidade do Processo**. São Paulo, 1992. 284p. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

FIGUEIREDO, A.D. **Parâmetros de controle e Dosagem do Concreto Projetado com Fibras de Aço**. São Paulo, 1992. 342p. Tese (Doutorado). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

FIGUEIREDO, A.D.; CECATTO, M.R. e TONERI, P. Influência do comprimento da fibra no desempenho do concreto reforçado com fibras de aço. 39<sup>a</sup> **REIBRAC**. Instituto Brasileiro do Concreto. São Paulo. 1997. 10p.

FIGUEIREDO, A.D.; HELENE, P.R.L. O ensaio de punção de placas para o controle da tenacidade no concreto com fibras de aço. In.IV Congresso Iberoamericano de Patologia das Construções e VI Congresso de Controle da Qualidade – CONPAT 97. Porto Alegre, Brasil 21 a 24 de Outubro de 1997. Volume II. **Anais**. p.469-76.

JAPAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. **Method of tests for flexural strength and flexural toughness of steel fiber reinforced concrete**. JSCE-SF4. Concrete Library of JSCE. Parte III-2 Method of test for steel fiber reinforced concrete. n.3 June 1984. p. 58-61

KOSA, K.; NAAMAN, A. Corrosion of Steel Fiber Reinforced Concrete. **ACI Materials Journal**, v. 87, n1, Jan-feb. 1990, p.27-37

KRISHNAN, R. Singapore pursues its MRT expansion. **Tunnels & Tunnelling International**, July v.36, n.7 2004.p.28-31.

METHA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais**. PINI Editora, São Paulo, S.P.,1994

NINCE, A.A.; COSTA, C.N.; FIGUEIREDO, A.D.e SILVA,V.P. – **Influência de Fibras de Polipropileno no Comportamento do Concreto de Alta Resistência, Submetido à Ação Térmica** . São Paulo, 2002.

NUNES, N.L. **Estudo da influência da geometria da fibra de aço na tenacidade à flexão dos compósitos de matrizes de concreto**. São Paulo, 1998. 193p. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

PINTO JR.,N.O.;MORAES A.A. Concreto Reforçado com fibras de aço CRFA. In: 38a Reunião do IBRACON – Instituto Brasileiro do Concreto. Ribeirão Preto, SP. 19 a 23 de agosto de 1996. **Anais**, v.2, p.471-479

PINTO JÚNIOR, N.O.; Aduelas Pré-Moldadas em Concreto Reforçado Com Fibras de Aço para Revestimento de Túneis, 06/2001, Revista da Construção Pesada, v.9, p.10-16, SP, BRASIL, 2001

PINTO JÚNIOR, N.O., CARNIO, M.A., GUTSTEIN, D., CORREA, C., **“Dimensionamento de aduelas pré – moldadas em concreto reforçado com fibras de aço para revestimento de túneis”**, 42º Congresso Brasileiro do Concreto, Fortaleza, CE, Brasil, 13 a 18 de agosto de 2000.

PINTO, N.O.J.; BINA P. Pisos industriais construídos com concreto dosado com fibras. In:38º REIBRAC,-IBRACON, Ribeirão Preto, SP, 1996. Anais, v.2, p.67-78.

PINTO, N.O.J.; MORENO, A.L.J.; MARINHO, R. Mecanismo de reforço das fibras de aço em vigas de concreto armado sujeitas à carregamento invertido. In: IV IMPÓSIO EPUSP SOBRE ESTRUTURAS DE CONCRETO, 2000, SÃO PAULO. CD-ROM. 2000.

RAMAKRISHNAN, V.; GEORGE, Y.W.; HOSALLI, G. **Flexural Fatigue Strength, Endurance Limit, and Impact Strength of Fiber Reinforced Concretes**. Transportation Research Record. n.1226, 1989, p.17-24.

RILEM TC 162-TDF Committee, **“RILEM TC 162- TDF: Test and design methods for steel fibre reinforced concrete”**, Materials and Structures, v.33, p. 3-5 Jan-Feb 2000.

RILEM TC 162 – TDF: Test And Design Methods For Steel Fibre Reinforced Concrete – Bending Test – Final Recommendation, **Materials and Structures**, v. 35, November 2002, p. 579 – 582.

RLE- Rail Link Engineering. Steel fibre reinforced concrete for tunnel linings. **Channel tunnel rail link**, technical report n<sup>o</sup> 000-RUG-RLEEX-00008-AA, 1997.

VILJOEN, B.C.; NEUMANN, M.J.:COLLINSJ.R. TREU,T.P. **Steel Fibre Reinforced Concrete for Precast Tunnel Segments - Mix Design and Full Scale Testing**

WOODS, E. Overview – London’s segmental lining development. **Tunnels & Tunnelling International**, October v.36, n. 10, 2004.p.45-47

WOODS, E. Fire considerations on the CTRL tunnels. **Tunnels & Tunnelling International**, May v.36, n. 5, 2004.p.52-55.

## **ANEXO**

DIAGRAMAS CARGA x DESLOCAMENTO VERTICAL E CARGA x ABERTURA DA FISSURA PARA OS DIVERSOS TRAÇOS DE CONCRETOS REFORÇADOS COM FIBRAS DE AÇO E POLIPROPILENO.

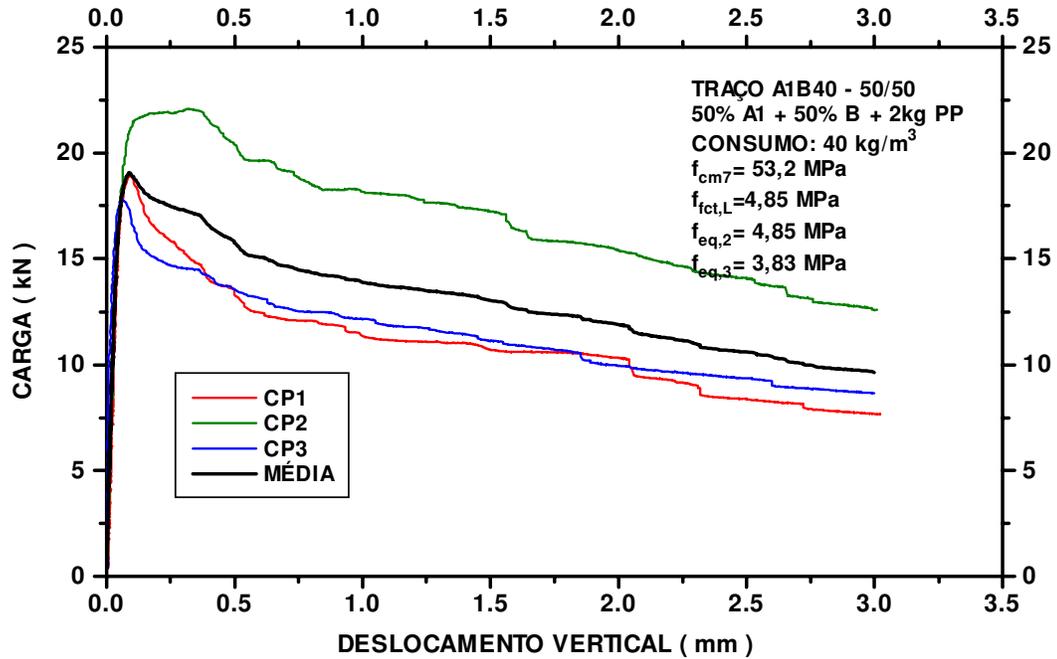


Gráfico 1 Carga x Deslocamento Vertical para o traço A1B40 - 50/50.

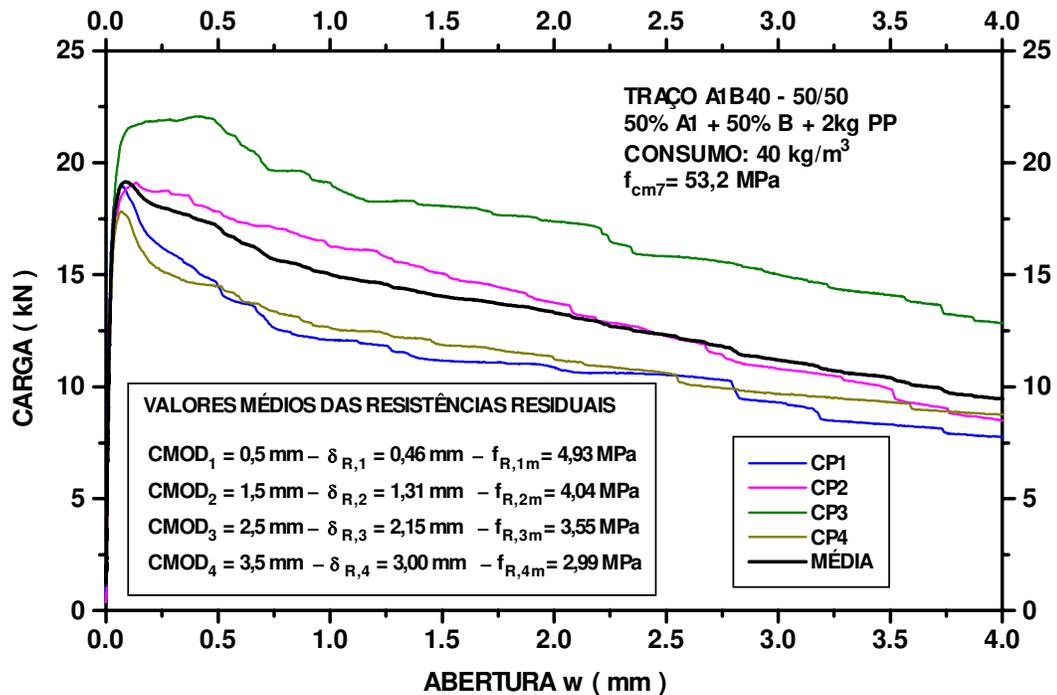


Gráfico 2 Carga x Abertura para o traço A1B40 - 50/50.

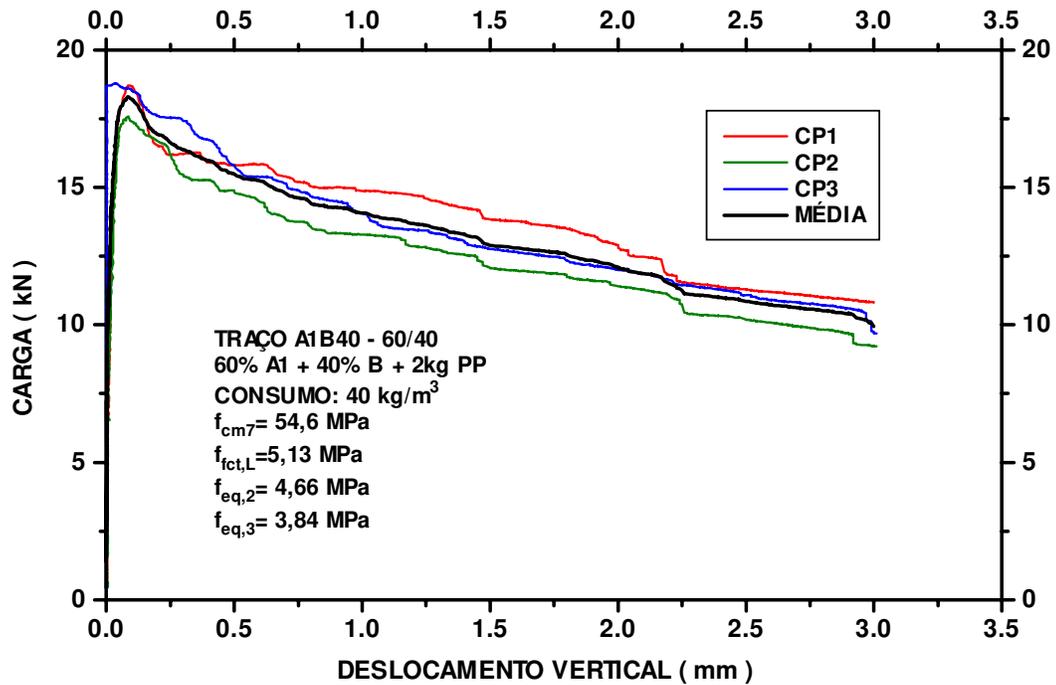


Gráfico 3 Carga x Deslocamento Vertical para o traço A1B40 – 60/40.

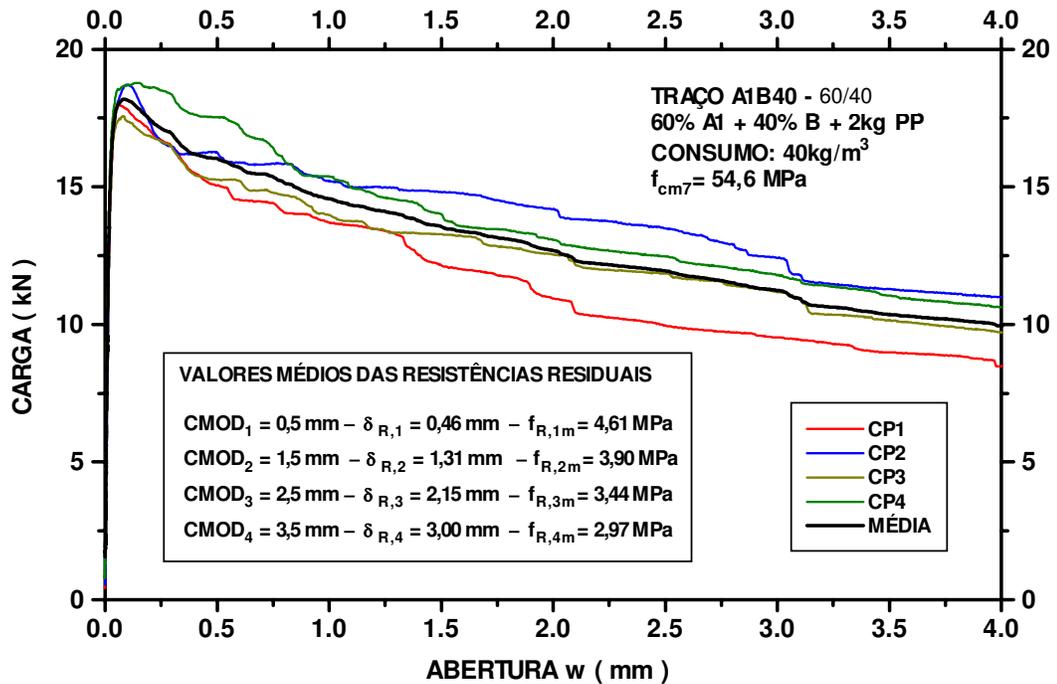


Gráfico 4 Carga x Abertura para o traço A1B40 – 60/40.

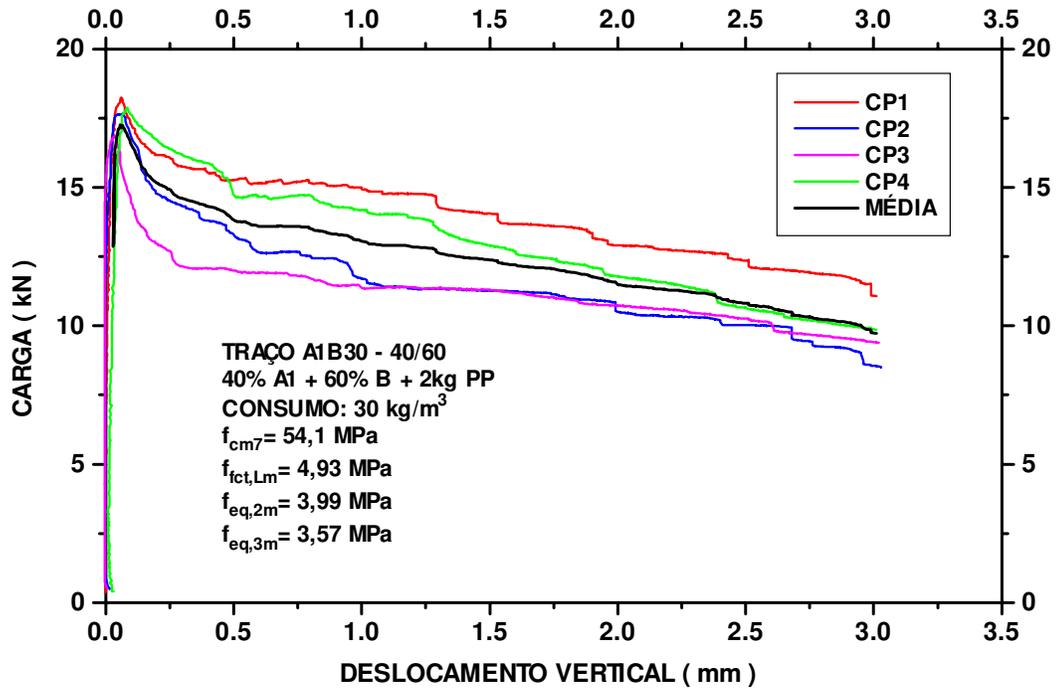


Gráfico 5 Carga x Deslocamento Vertical para o traço A1B30 – 40/60.

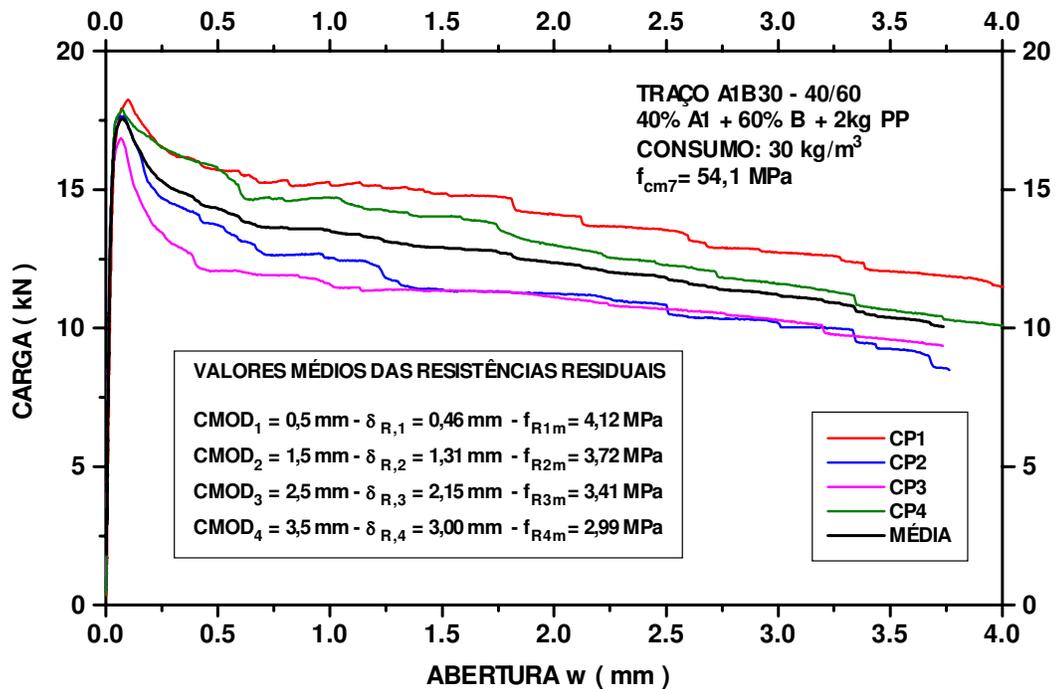


Gráfico 6 Carga x Abertura para o traço A1B30 – 40/60.

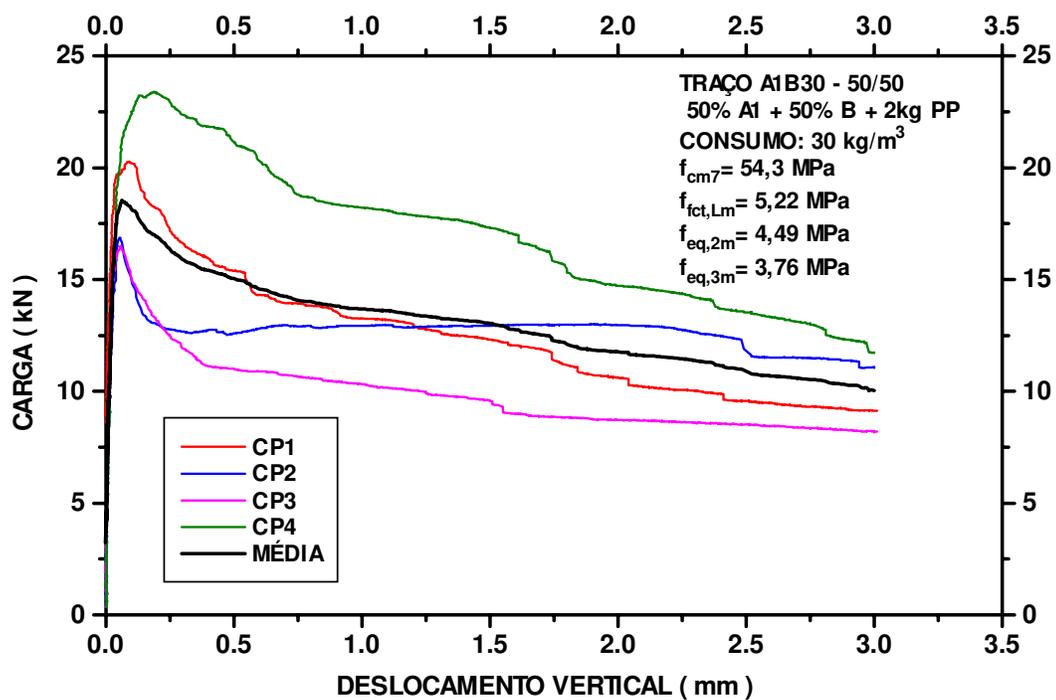


Gráfico 7 Carga x Deslocamento Vertical para o traço A1B30 – 50/50.

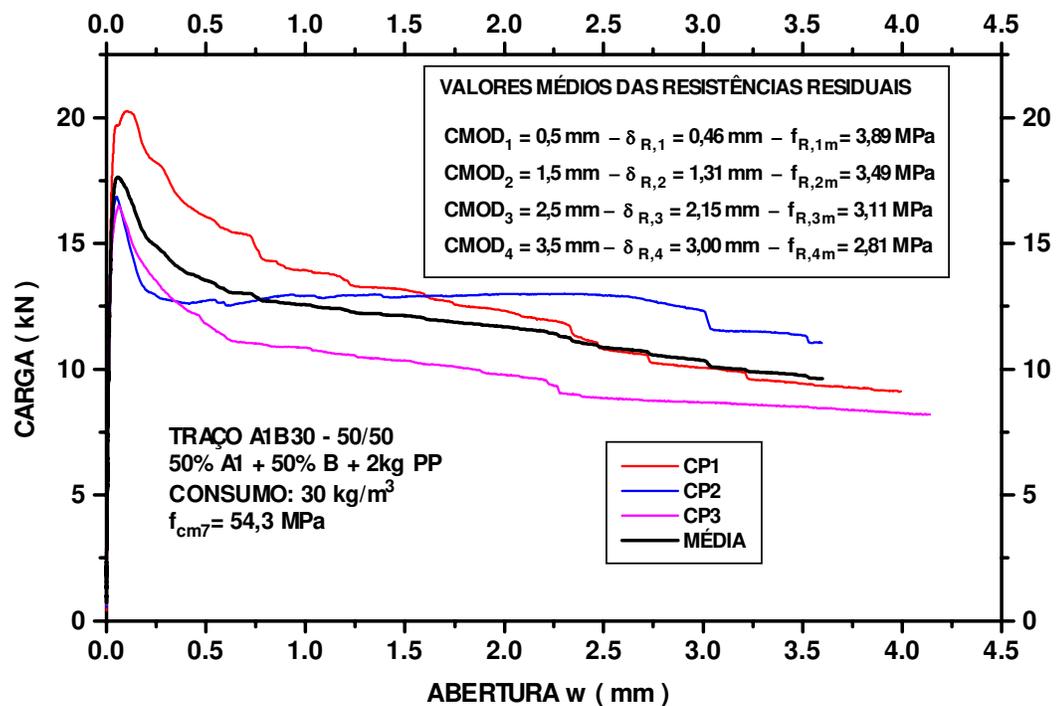


Gráfico 8 Carga x Abertura para o traço A1B30 -50/50.

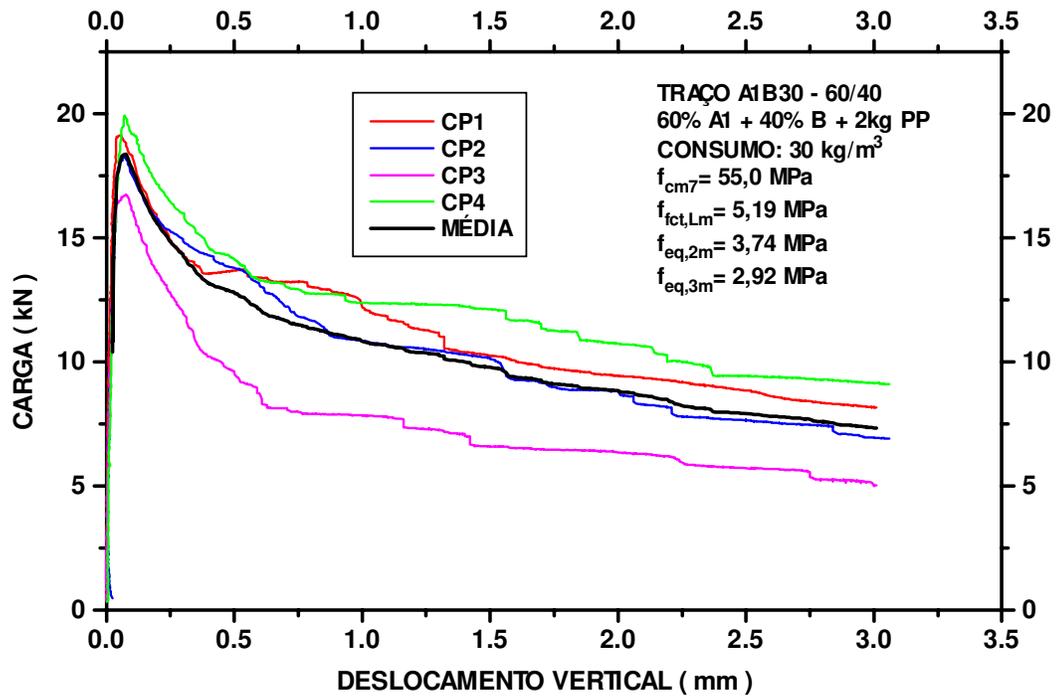


Gráfico 9 Carga x Deslocamento Vertical para o traço A1B30 – 60/40.

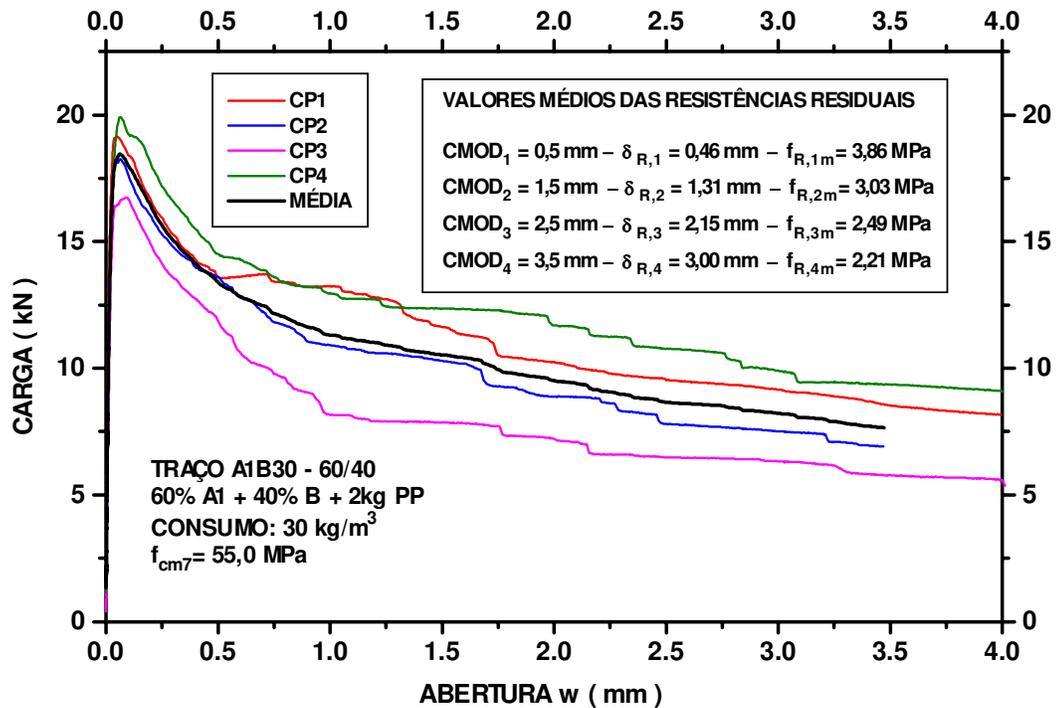


Gráfico 10 Carga x Abertura para o traço A1B30 – 60/40.

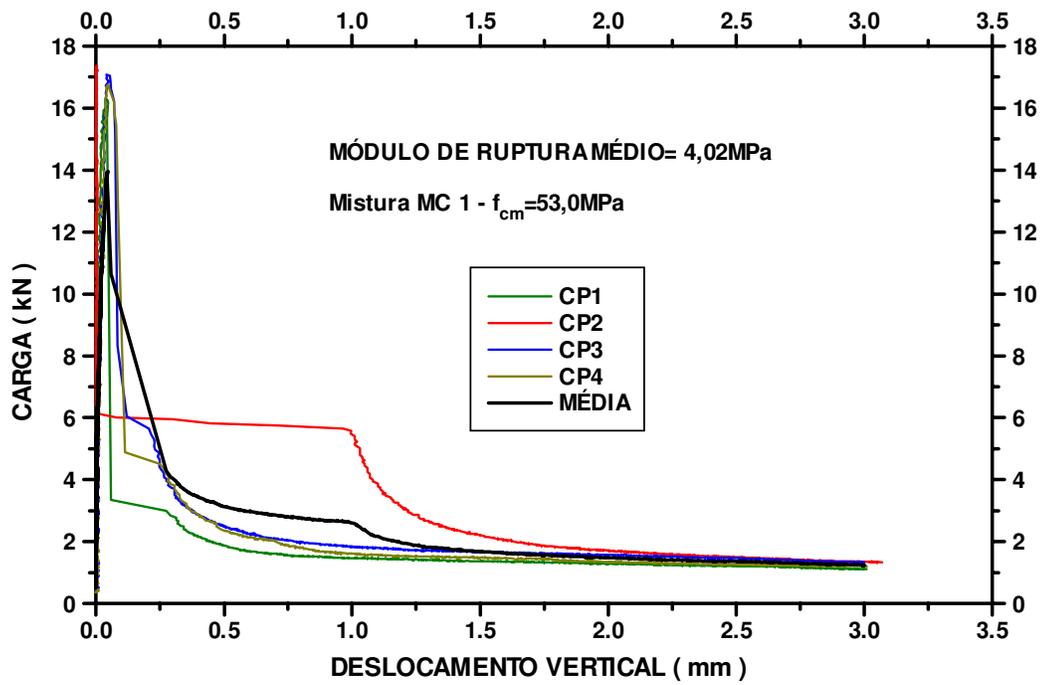


Gráfico 11 Carga x Deslocamento Vertical para o traço MC-1.

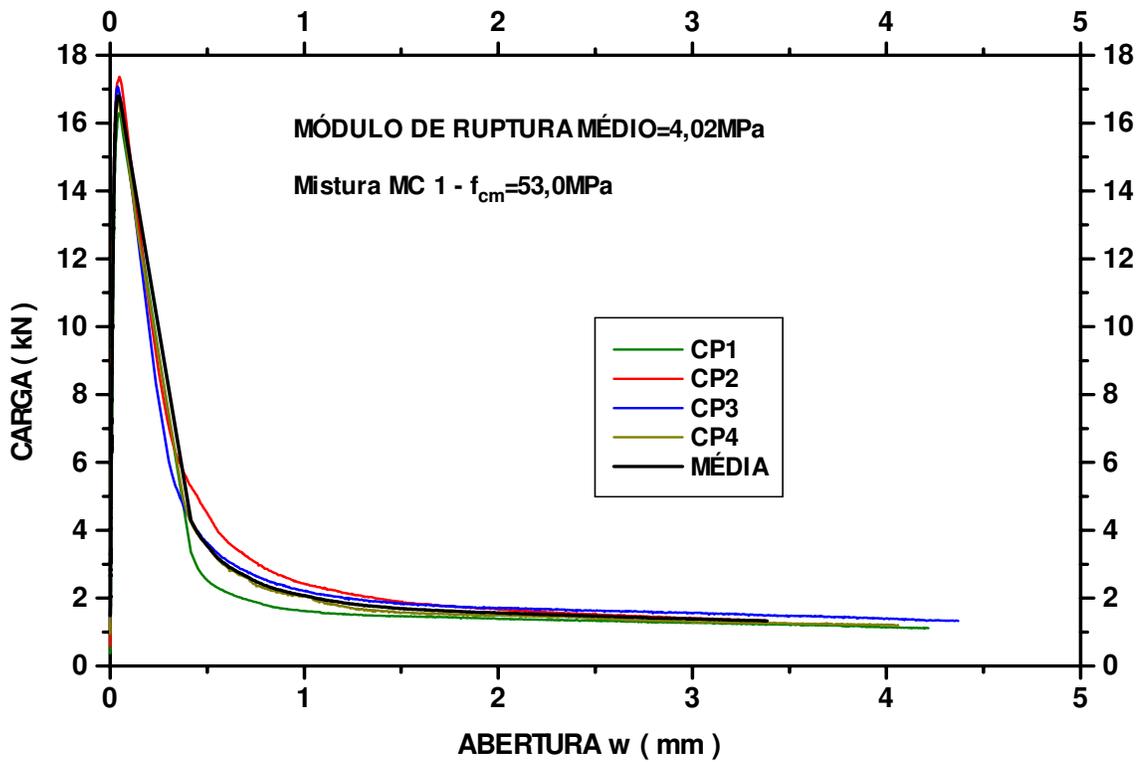


Gráfico 12 Carga x Abertura para o traço MC-1.

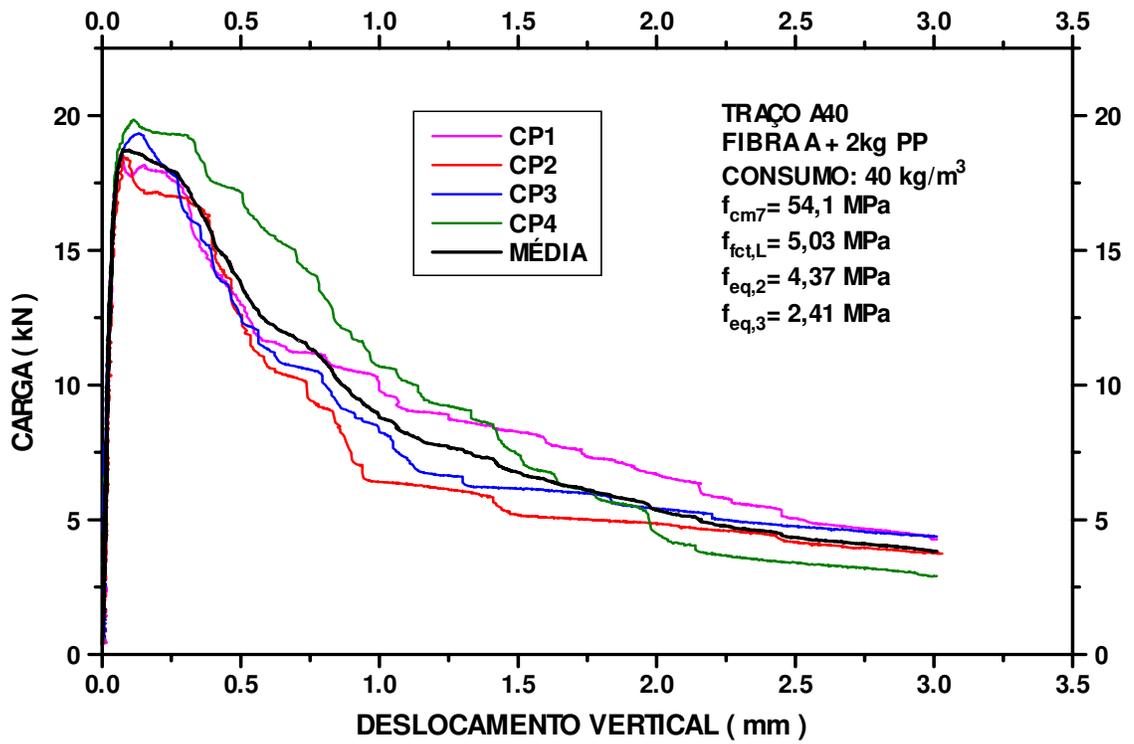


Gráfico 13 Carga x Deslocamento Vertical para o traço A40.

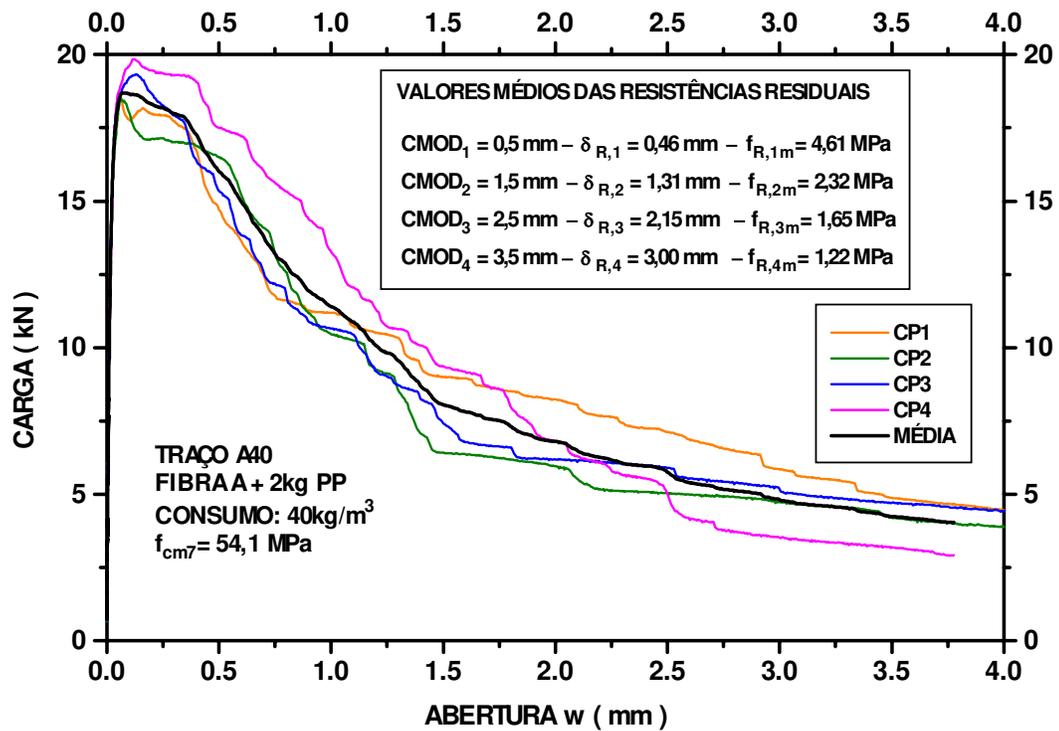


Gráfico 14 Carga x Abertura para o traço A40.

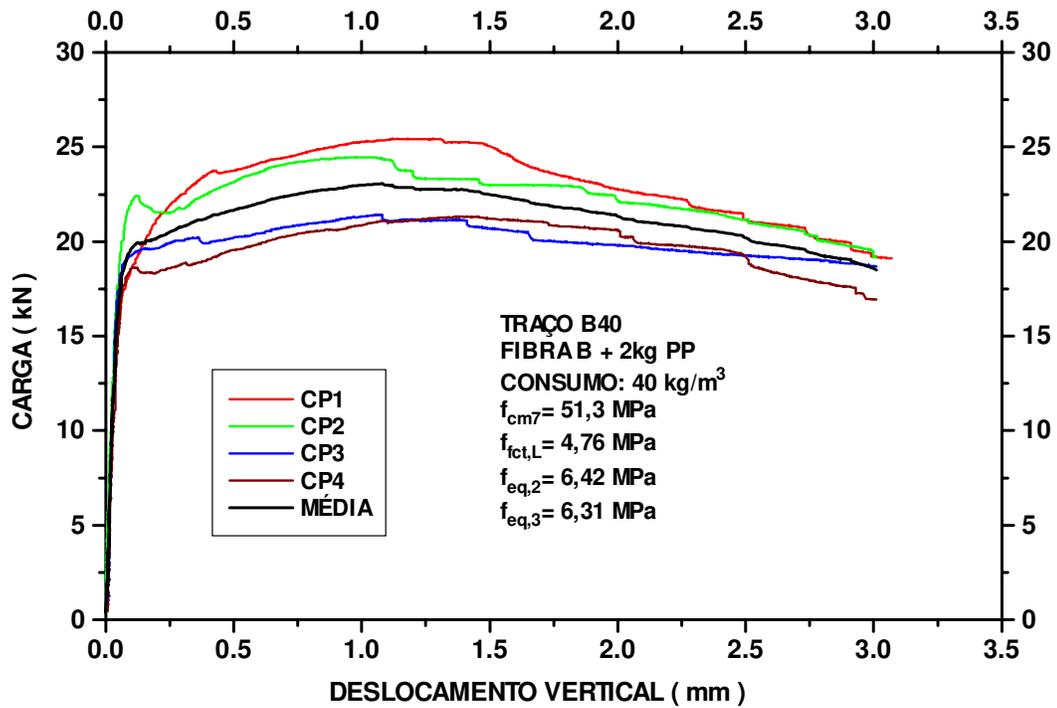


Gráfico 15 Carga x Deslocamento Vertical para o traço B40.

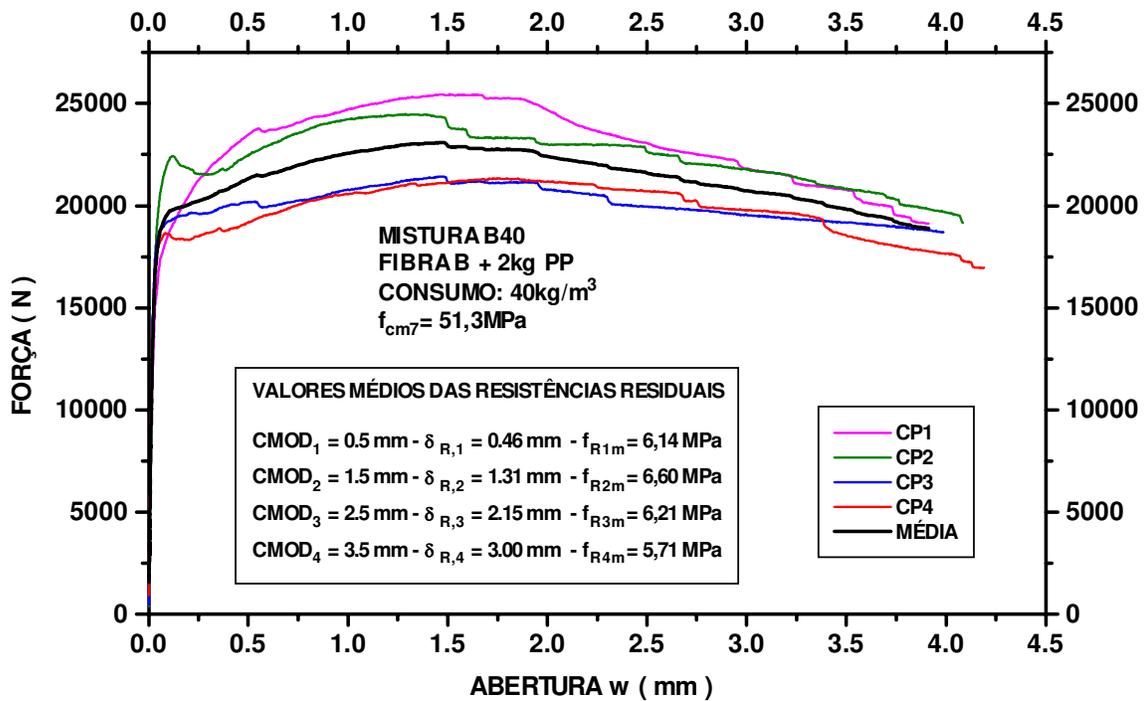


Gráfico 16 Carga x Abertura para o traço B40.

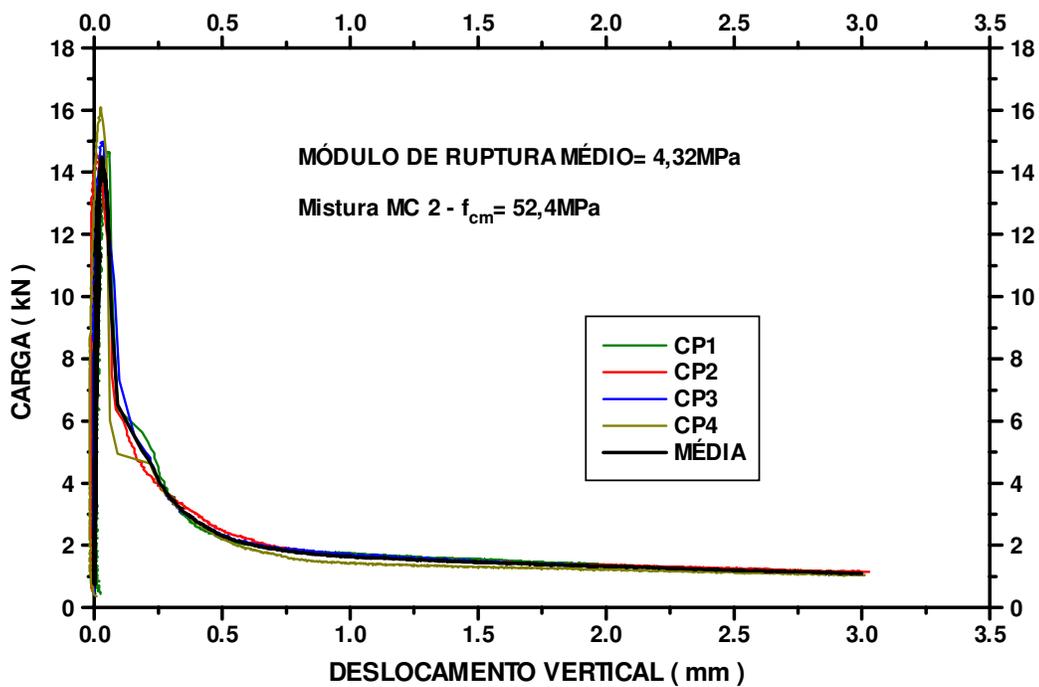


Gráfico 17 Carga x Deslocamento Vertical para o traço MC-2.

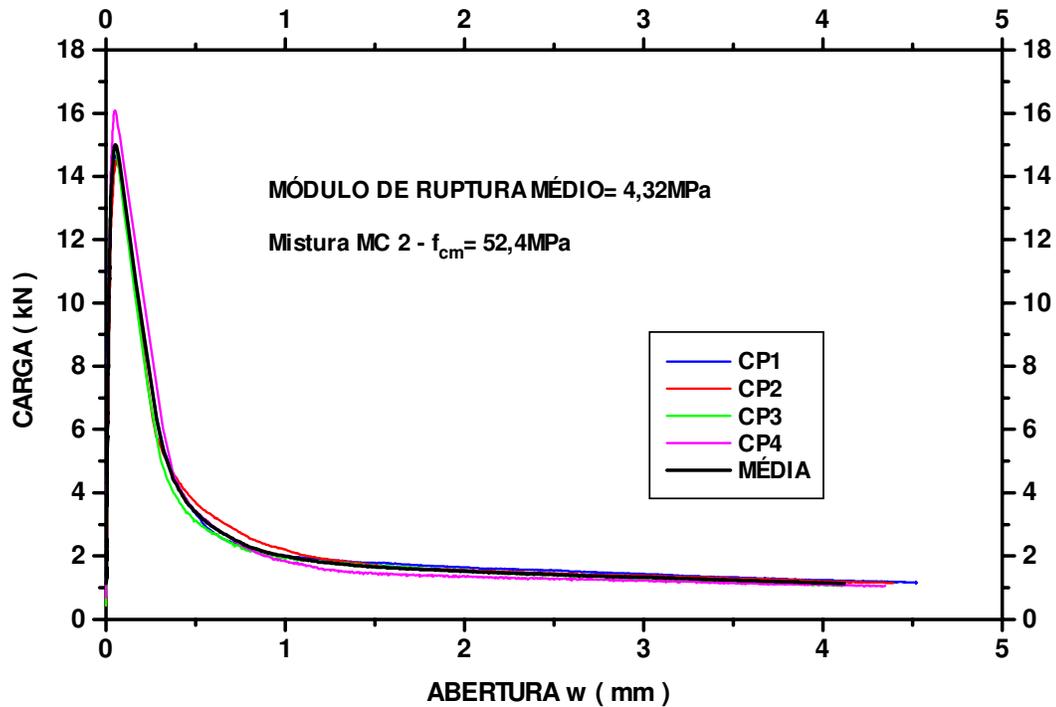


Gráfico 18 Carga x Abertura para o traço MC-2.

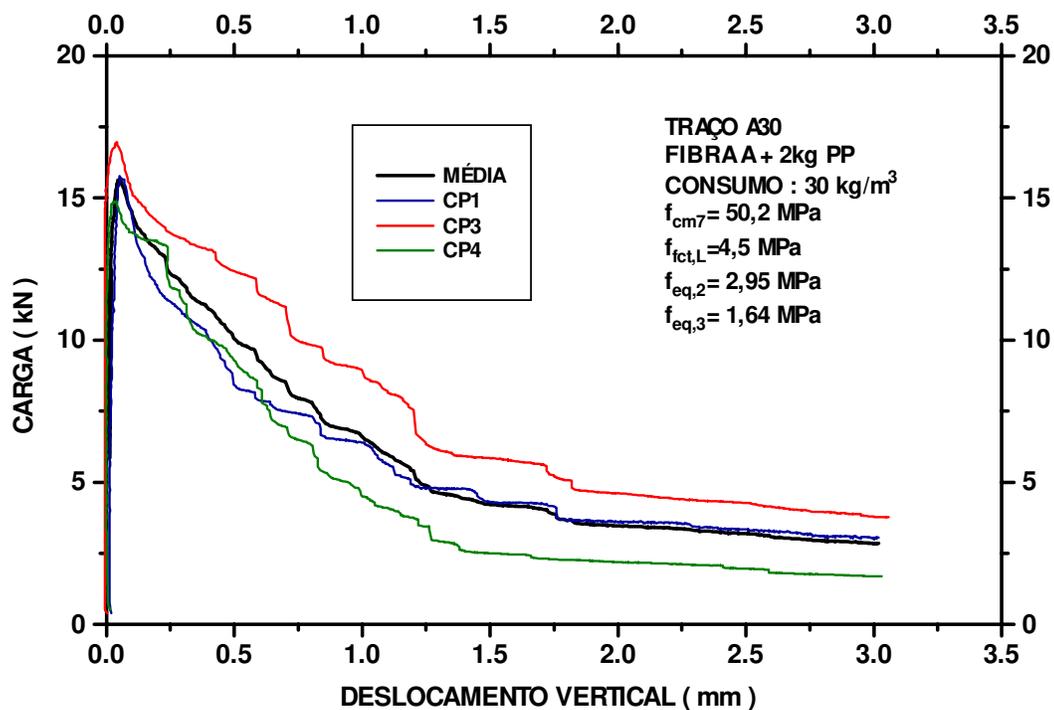


Gráfico 19 Carga x Deslocamento Vertical para o traço A30.

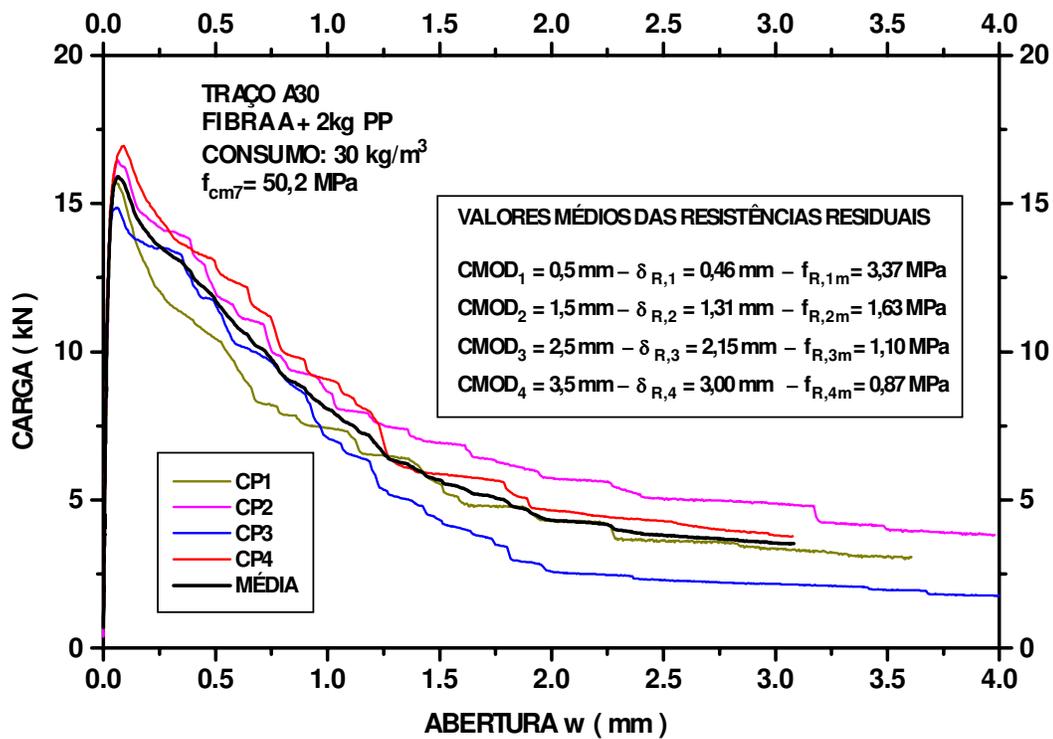


Gráfico 20 Carga x Abertura para o traço A30.

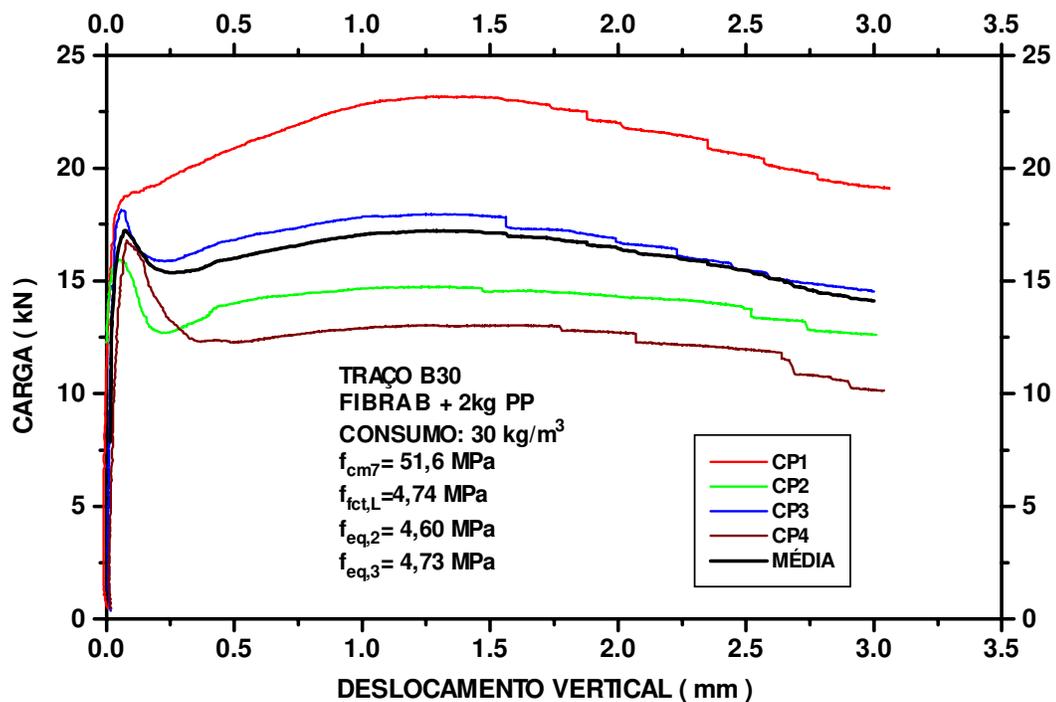


Gráfico 21 Carga x Deslocamento Vertical para o traço B30.

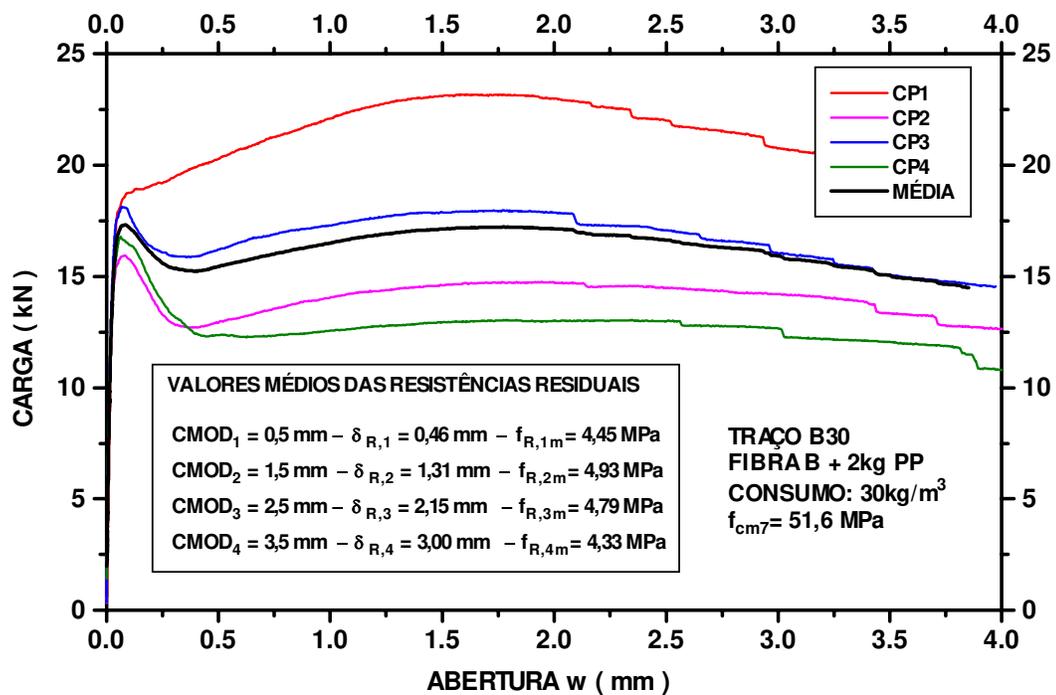


Gráfico 22 Carga x Abertura para o traço B30.