



UNICAMP

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL

**ANÁLISE EXPERIMENTAL  
DE TUBOS DE CONCRETO  
REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO**

Marcelo Francisco Ramos

T 222 0 111

Campinas  
2002

UNICAMP  
BIBLIOTECA CENTRAL  
SEÇÃO CIRCULANTE

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS**  
**FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL**

**ANÁLISE EXPERIMENTAL  
DE TUBOS DE CONCRETO  
REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO**

Marcelo Francisco Ramos

Orientador: Prof. Dr. Newton de Oliveira Pinto Júnior

Dissertação de Mestrado apresentada à Comissão de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Campinas, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, na área de concentração de Edificações.

**Campinas, 2002**  
**S.P. - Brasil**

Assentado em	Comissão de Pós-Graduação
de	
Prof. Dr.	23.03.04
ABRIGADO	048232

UNIDADE	PL
Nº CHAMADA	UNICAMP
	R147a
V	EX
TOMBO BC/	58627
PROC	16-117-04
C	<input type="checkbox"/>
D	<input checked="" type="checkbox"/>
PREÇO	11,00
DATA	29-06-04
Nº CPD	

CM0019B19B-4

BIB 10 317189

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

R147a Ramos, Marcelo Francisco  
Análise experimental de tubos de concreto reforçado  
com fibras de aço / Marcelo Francisco Ramos.--  
Campinas, SP: [s.n.], 2002.

Orientador: Newton de Oliveira Pinto Júnior.  
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de  
Campinas, Faculdade de Engenharia Civil.

1. Concreto. 2. Fibras. 3. Tubos. I. Pinto Júnior,  
Newton de Oliveira. II. Universidade Estadual de  
Campinas. Faculdade de Engenharia Civil. III. Título.

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS**

**FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL**

**ANÁLISE EXPERIMENTAL  
DE TUBOS DE CONCRETO  
REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO**

Marcelo Francisco Ramos

Dissertação de Mestrado aprovada pela Banca Examinadora, constituída por:



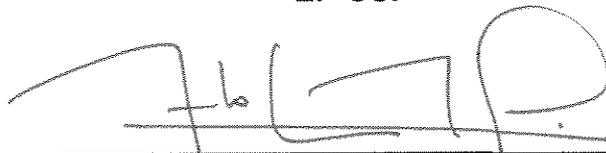
---

**Prof. Dr. Newton de Oliveira Pinto Júnior**  
Presidente e Orientador  
FEC-UNICAMP



---

**Prof. Dr. José Samuel Giongo**  
EP-USP



---

**Prof. Dr. Armando Lopes Moreno Júnior**  
FEC - UNICAMP

Campinas  
2002

## AGRADECIMENTOS

Deixo sinceros agradecimentos a todas as pessoas que colaboraram direta e indiretamente para a realização desta conquista, em especial minha esposa, nossa família, amigos e professores, demais departamentos, laboratórios e empresas que contribuíram para a realização deste projeto com doação de materiais, serviços e informações. E principalmente à Deus, sem Ele nada disso seria possível.

# SUMÁRIO

	<b>Página</b>
LISTA DE TABELAS.....	XIII
LISTA DE FIGURAS .....	XV
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS.....	XIX
RESUMO .....	XXI
ABSTRACT.....	XXIII
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2 OBJETIVO .....</b>	<b>3</b>
<b>3 CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO .....</b>	<b>5</b>
3.1 INTRODUÇÃO.....	5
3.2 MECANISMO DE REFORÇO DAS FIBRAS .....	6
3.3 ZONA DE TRANSIÇÃO FIBRA-MATRIZ E SUA INFLUÊNCIA NA TENACIDADE DO COMPÓSITO .....	10
<b>4 TUBOS DE CONCRETO.....</b>	<b>13</b>
4.1 CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES.....	13
4.1.1 <i>Coefficiente de segurança</i> .....	14
4.2 CARGAS .....	17
4.2.1 <i>Teoria de Marston-Spangler</i> .....	17
4.2.2 <i>Condições típicas de carregamento</i> .....	19
4.2.2.1 Valas ou trincheiras .....	19
4.2.2.2 Aterro.....	21
4.2.2.3 Pseudovalas .....	21
4.2.2.4 Tubos em túnel ou cravados .....	22
4.3 PROJETO E DIMENSIONAMENTO .....	25

4.3.1	<i>Generalidades</i> .....	25
4.3.2	<i>Ensaio de laboratório</i> .....	28
4.3.2.1	Fatores de equivalência.....	29
4.3.2.1.1	Tubos em vala .....	29
4.3.2.1.2	Tubos salientes (projeção positiva) .....	32
4.3.2.1.3	Tubos reentrantes (projeção negativa).....	36
4.3.2.1.4	Tubos em pseudovalas.....	36
<b>5</b>	<b>PROGRAMA EXPERIMENTAL</b> .....	<b>37</b>
5.1	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS .....	37
5.1.1	<i>Cimento</i> .....	37
5.1.2	<i>Agregados</i> .....	38
5.1.3	<i>Fibras</i> .....	40
5.2	DOSAGEM UTILIZADA NOS CONCRETOS .....	41
5.3	MOLDAGEM DOS TUBOS E CORPOS-DE-PROVA.....	41
5.4	AVALIAÇÃO DA TENACIDADE À FLEXÃO. ....	45
5.5	DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA COMPRESSÃO DIAMETRAL DE TUBOS DE CONCRETO (MÉTODOS DE ENSAIO) .....	48
5.6	DESENVOLVIMENTO DE ENSAIOS PRELIMINARES.....	50
5.6.1	<i>Etapa 1 – Tubos de concreto reforçado com fibras de aço (soltas)</i> .....	50
5.6.2	<i>Etapa 2 - Tubos de concreto reforçado com fibras de aço (soltas / coladas)</i> .....	51
5.6.3	<i>Etapa 3 - Tubos de concreto armado</i> .....	53
5.6.4	<i>Documentação fotográfica</i> .....	55
5.6.5	<i>Conclusões Parciais</i> .....	57
<b>6</b>	<b>APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS</b> .....	<b>59</b>
6.1	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL .....	59
6.2	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA COMPRESSÃO DIAMETRAL .....	62
6.3	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO (PRISMAS) .....	64
6.4	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DIAMETRAL EM TUBOS.....	67
6.4.1	<i>Documentação fotográfica</i> .....	72
6.5	ANÁLISE DOS RESULTADOS .....	74
6.5.1	<i>Resistência à compressão axial</i> .....	74
6.5.2	<i>Resistência à tração na compressão diametral</i> .....	74
6.5.3	<i>Resistência à tração na flexão: tenacidade dos compósitos</i> .....	75
6.5.4	<i>Ensaio de compressão diametral em tubos</i> .....	75
<b>7</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	<b>77</b>
7.1	CONCLUSÕES GERAIS .....	77
7.2	ESTUDOS POSTERIORES .....	78

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	79
ANEXO I - ESPECIFICAÇÕES DA ABNT PARA TUBOS DE CONCRETO .....	85
ANEXO 2 – ENSAIOS DE TRAÇÃO NA FLEXÃO - PRISMAS (15x15x50cm) .....	97
ANEXO 3 – ENSAIOS DE COMPRESSÃO DIAMETRAL EM TUBOS.....	105

## LISTA DE TABELAS

	<b>Página</b>
Tabela 4.1 – Valores de x (diferentes bases). (ZAILLER, 1983) .....	35
Tabela 5.1 – Propriedades físicas, químicas e mecânicas do cimento (CPV ARI) .....	38
Tabela 5.2 – Caracterização dos agregados (NBR 7211/83).....	38
Tabela 5.3 – Dosagem empregada nas concretagens .....	41
Tabela 5.4 – Quantificação dos tubos e corpos-de-prova moldados .....	43
Tabela 6.1- Resistência à compressão axial (tubos em concreto simples e armados).....	60
Tabela 6.2- Resistência à compressão axial (tubos reforçados com fibras soltas).....	60
Tabela 6.3- Resistência à compressão axial (tubos reforçados com fibras coladas).....	61
Tabela 6.4- Resistência à tração na compressão diametral (tubos simples e armados).....	62
Tabela 6.5- Resistência à tração na compressão diametral (tubos com fibras soltas).....	63
Tabela 6.6- Resistência à tração na compressão diametral (tubos com fibras coladas) .....	63
Tabela 6.7-Valores de tenacidade para os deslocamentos de 2, 4 e 6mm.....	70

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Página</b>
Figura 3.1 – Propagação das fissuras e concentração de tensões. ....	7
Figura 3.2 – Mecanismo de controle de propagação das fissuras .....	8
Figura 3.3 – Representação Esquemática da Zona de Transição Fibra-Matriz. ....	11
Figura 4.1 –Carga de terra atuante sobre o tubo (ZAILLER, 1983).....	17
Figura 4.2 – Exemplos de valas ou trincheiras (ZAILLER, 1983) .....	20
Figura 4.3 – Aterro (tubos salientes) .....	23
Figura 4.4 – Aterro (tubos reentrantes) .....	23
Figura 4.5 – Pseudovalas .....	23
Figura 4.6 – Tubos em túnel ou cravados.....	23
Figura 4.7 – Foto de uma linha de tubos (vala) .....	24
Figura 4.8 – Rolo compactador tipo pé-de-carneiro .....	24
Figura 4.9 – Momentos teóricos em função do tipo de apoio. (ZAILLER, 1983) .....	26
Figura 4.10 – Métodos de ensaio. (ZAILLER, 1983).....	28
Figura 4.11 – Bases Condenáveis (valas). (ZAILLER, 1983) .....	30
Figura 4.12 – Bases comuns (valas). (ZAILLER, 1983) .....	31
Figura 4.13 – Bases de 1ª classe (valas). (ZAILLER, 1983) .....	31
Figura 4.14 – Bases de Concreto (valas). (ZAILLER, 1983) .....	32
Figura 4.15 – Bases condenáveis (tubos salientes). (ZAILLER, 1983).....	33
Figura 4.16 – Bases comuns (tubos salientes). (ZAILLER, 1983) .....	33
Figura 4.17 – Bases de 1ª classe (tubos salientes). (ZAILLER, 1983) .....	34
Figura 4.18 – Bases de concreto (tubos salientes). (ZAILLER, 1983) .....	34
Figura 5.1 Curva granulométrica da areia .....	39
Figura 5.2 – Curva granulométrica da brita.....	39

Figura 5.3 – Moldagem de corpos-de-prova cilíndricos e prismáticos. ....	42
Figura 5.4 – Sistema de moldagem dos tubos .....	44
Figura 5.5 - Curva carga x deslocamento vertical (quantificação da tenacidade).....	45
Figura 5.6 - Comportamento de um corpo-de-prova-ensaio de tração na flexão .....	46
Figura 5.7- Comportamento de corpos-de-prova prismáticos de concreto reforçado com fibras de aço (ensaio de tração na flexão). (PINTO JR, MORAES e CARNIO, 1998).....	46
Figura 5.8 - Ensaio de tração na flexão – yoke (JSCE-SF4, 1984).....	47
Figura 5.9 – Detalhes para execução do ensaio de compressão diametral. (NBR9795/87).....	49
Figura 5.10 – Calço padrão para medida das fissuras. (NBR 9795/87) .....	49
Figura 5.11– Ensaio de tubos com fibras soltas – L=1000 mm .....	50
Figura 5.12 – Ensaio de tubos com fibras soltas – L=1500 mm .....	51
Figura 5.13 – Ensaio de tubos com fibras soltas – $t=30 \text{ kg/m}^3$ .....	51
Figura 5.14 – Ensaio de tubos com fibras soltas – $t=25 \text{ kg/m}^3$ .....	52
Figura 5.15 – Ensaio de tubos com fibras coladas – $t=25 \text{ kg/m}^3$ .....	52
Figura 5.16 – Ensaio de tubos com fibras coladas – $t=30 \text{ kg/m}^3$ .....	53
Figura 5.17 – Ensaio de tubos em concreto armado – D=1000mm - T1(3).....	53
Figura 5.18 – Ensaio de tubos em concreto armado – D=1000mm - T2(3).....	54
Figura 5.19 – Ensaio de tubos em concreto armado – D=800mm - T3(3).....	54
Figura 5.20 – Ensaio de tubos em concreto armado – D=800mm – T4(3). ....	55
Figura 5.21 – Tubo T1(1) com fibras soltas L=1000 mm .....	55
Figura 5.22 – Tubo T3(1) com fibras soltas L=1500 mm .....	55
Figura 5.23 – Tubo T1(2) com fibras soltas L=1500 mm .....	56
Figura 5.24 – Tubo T4(2) com fibras coladas L=1500 mm .....	56
Figura 5.25 – Tubo T1(3) em concreto armado L=1500 mm e D=1000mm .....	56
Figura 5.26 – Tubo T3(3) em concreto armado L=1500 mm e D=800mm .....	56
Figura 5.27 – Tubo em concreto simples – momento da ruptura.....	57
Figura 5.28 – Tubo em concreto simples – após a ruptura.....	57
Figura 5.29 – Detalhe da fixação do transdutor de deslocamento usada nas etapas 1 e 2.....	58
Figura 5.30 – Detalhe da fixação do transdutor de deslocamento usada na etapa 3 .....	58
Figura 6.1 – Resistência à compressão axial (corpos-de-prova cilíndricos) .....	61
Figura 6.2 – Resistência à tração na compressão diametral (corpos-de-prova cilíndricos) .....	64

Figura 6.3-Curvas carga x deslocamento vertical – FS-20.....	65
Figura 6.4-Curvas carga x deslocamento vertical – FS-30.....	65
Figura 6.5-Curvas carga x deslocamento vertical – FC-20 .....	66
Figura 6.6-Curvas carga x deslocamento vertical – FC-30 .....	66
Figura 6.7-Curvas médias dos ensaios de tubos armados e tubos com fibras soltas.....	67
Figura 6.8-Curvas médias dos ensaios de tubos armados e tubos com fibras coladas.....	68
Figura 6.9-Curvas médias dos ensaios de tubos armados e tubos com fibras.....	69
Figura 6.10 - Valores de tenacidade para os deslocamentos de 2, 4 e 6mm. ....	70
Figura 6.11 – Cargas de fissura dos tubos ensaiados. ....	71
Figura 6.12 – Vista geral do ensaio de compressão diametral .....	72
Figura 6.13 – Posicionamento dos transdutores de deslocamento vertical .....	72
Figura 6.14 – Camada de areia usada para regularização da superfície do tubo .....	72
Figura 6.15 – Aparelhos de apoio e aplicação da carga ao longo do comprimento do tubo .....	72
Figura 6.16 – Tubo CS (concreto simples) – Detalhe da ruptura.....	73
Figura 6.17 – Tubo FC-30 (fibras coladas) – Fissura longitudinal externa.....	73
Figura 6.18 – Tubo CA (concreto armado) – Fissura longitudinal externa.....	73
Figura 6.19 – Tubo CA (concreto armado) – Detalhe da abertura da fissura (4mm) no momento da obtenção da carga de ruptura .....	73

## LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

$\gamma$	peso específico do solo
a/c	relação água / cimento
$B_c$	diâmetro externo do tubo
$B_a$	largura da vala
$B_i$	diâmetro interno do tubo
C	coeficiente de MARSTON
CA	tubo de concreto armado (tela soldada);
CS	tubo de concreto simples (sem armadura);
d	diâmetro da fibra
$\delta$	deformação da geratriz superior do tubo
$d_m$	diâmetro médio da fibra
DN	diâmetro nominal
E	pressão sobre o tubo
FC-20	tubo de concreto reforçado com fibras coladas ( $t = 20 \text{ kg/m}^3$ );
FC-30	tubo de concreto reforçado com fibras coladas ( $t = 30 \text{ kg/m}^3$ );
$f_{ck}$	resistência à compressão característica do concreto
$f_e$	fator de equivalência
FS-20	tubo de concreto reforçado com fibras soltas ( $t = 20 \text{ kg/m}^3$ );
FS-30	tubo de concreto reforçado com fibras soltas ( $t = 30 \text{ kg/m}^3$ ).
$f_y$	tensão de escoamento
H	altura do aterro
k	coeficiente de Rankine
kN	quilonewton
l	comprimento da fibra
L	comprimento útil do tubo
$l_m$	comprimento médio da fibra
M	momento teórico nas paredes do tubo
MPa	mega pascal

$N$	fator de instalação
$p$	taxa de projeção
$Q$	peso do aterro por unidade de comprimento
$q$	relação entre a pressão lateral total e a carga vertical total
$R$	raio interno do tubo
$t$	teor de fibras incorporado
$x$	fator que depende da taxa de projeção do tubo

## RESUMO

RAMOS, Marcelo Francisco – **Análise Experimental de Tubos de Concreto Reforçado com Fibras de Aço** – Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, 2002, Dissertação de Mestrado, 140 p.

Neste trabalho são apresentados os resultados de um programa experimental desenvolvido para avaliar a resistência à compressão diametral de tubos de concreto reforçado com fibras de aço.

Foram moldados tubos com diâmetro nominal de 600 mm em concretos de resistências médias à compressão, aos 28 dias de idade, de aproximadamente 50MPa.

Os tubos foram divididos em seis séries, sendo 5 em concreto simples, 5 em concreto armado, 10 em concreto reforçado com fibras coladas em pentes (5 com teor de 20 kg/m<sup>3</sup> e 5 com teor de 30 kg/ m<sup>3</sup>) e 10 em concreto reforçado com fibras soltas (5 com teor de 20 kg/m<sup>3</sup> e 5 com teor de 30 kg/ m<sup>3</sup>).

O objetivo é avaliar o comportamento desses tubos de concreto reforçado com fibras de aço, verificando seu desempenho comparativamente à tubos de concreto simples e de concreto armado, quando submetidos ao ensaio de compressão diametral.

Foram também determinadas as resistências à compressão simples, à tração na compressão diametral, bem como a tenacidade à flexão dos concretos empregados na produção.

Os ensaios realizados demonstraram um comportamento dúctil dos tubos de concreto reforçado com fibras de aço, demonstrando que a substituição das armaduras convencionais pelas fibras de aço é possível, mantendo a mesma capacidade de suporte, com ganhos significativos de durabilidade

**Palavras Chave:** Concreto; Fibras; Tubos.

## ABSTRACT

In this work will be presented the results of an experimental program developed to evaluate the diametrical compressive strength of concrete pipes reinforced with fibers of steel.

They were moulded pipes with nominal diameter of 600 mm in concretes of medium compressive strength, to the 28 days of age, of approximately 50MPa.

The pipes were divided in six series, being 5 in plain concrete, 5 in reinforced concrete, 10 in concrete reinforced with agglutinated fibers of steel in combs (5 with 20 kg/m<sup>3</sup> and 5 with 30kg/m<sup>3</sup>) and 10 in concrete reinforced with loose fibers (5 with 20kg/m<sup>3</sup> and 5 with 30kg/m<sup>3</sup>).

The objective is to evaluate the behavior of those concrete pipes reinforced with fibers of steel, verifying its acting comparatively to pipes of plain concrete and of reinforced concrete, when submitted to the test of diametrical compressive.

They were also determined the compressive strength, to the traction in the compressive diametrical, as well as the flexural toughness to the concretes employed in the production.

The accomplished rehearsals demonstrated a ductile behavior of the concrete tubes reinforced with fibers of steel, demonstrating that the substitution of the conventional armors for the fibers of steel is possible, maintaining the same support capacity, with having won significant of durability.

## 1 INTRODUÇÃO

Dentre os materiais pré-fabricados utilizados na construção civil, os tubos de concreto, armados ou não, se constituem num dos produtos mais comuns e, simultaneamente em elementos de grande complexidade, tanto pelas condições intrínsecas de hiperestaticidade, quanto pelas dificuldades de caracterização de suas condições de carregamento e de apoio. Assim sendo, o comportamento de um tubo é pouco conhecido tanto pelo fabricante quanto pelo usuário, este último geralmente sem condições técnicas para estabelecer exigências e especificações.

O concreto é um material de natureza frágil, com baixa resistência à tração, apresentando fissuras causadas por ações térmicas e mecânicas, o que compromete seu desempenho como material estrutural, bem como sua durabilidade. A incorporação de fibras de aço aos concretos tem por finalidade controlar as aberturas e a propagação das fissuras, transformando o comportamento do material de frágil para dúctil.

É importante salientar que, com os baixos teores de fibras de aço, usualmente incorporados aos concretos, não ocorre aumento de sua resistência à tração e à compressão, ocorrendo sim uma modificação de seu comportamento na ruína, que passa a ser dúctil, graças à redistribuição das tensões, propiciada pelas fibras de aço.

As fibras de aço podem ser empregadas em elementos estruturais de concreto como armadura suplementar de combate ao cisalhamento, em elementos pré-moldados, em reparos de estruturas, em revestimentos de túneis e, principalmente, em placas apoiadas diretamente sobre o solo, onde é possível a redistribuição de tensões.

Nesta pesquisa são apresentados os resultados de um trabalho experimental desenvolvido para avaliar a resistência à compressão diametral de tubos de concreto reforçado

com fibras de aço, dando-se ênfase à sua capacidade de absorção de energia antes da ruptura, ou seja, a sua tenacidade.

Foram moldados tubos com diâmetro nominal de 600mm e comprimento nominal de 1500mm, com concretos de resistências médias à compressão aos 28 dias de idade, de aproximadamente 50 MPa.

Foram empregadas para reforço dos concretos dois tipos de fibras, ambas com ancoragens em ganchos nas extremidades, coladas em pentes ( comprimento de 60 mm e fator de forma  $l / d$  – igual a 65 ) e soltas ( comprimento de 50 mm e fator de forma igual a 45 ), com teores de 20 kg/m<sup>3</sup> e 30 kg/ m<sup>3</sup>.

Os tubos foram divididos em seis séries, sendo 5 em concreto simples, 5 em concreto armado, 10 em concreto reforçado com fibras coladas em pentes (5 com teor de 20 kg/m<sup>3</sup> e 5 com teor de 30 kg/ m<sup>3</sup> ) e 10 em concreto reforçado com fibras soltas (5 com teor de 20 kg/m<sup>3</sup> e 5 com teor de 30 kg/ m<sup>3</sup> ). Para cada série de tubos foram confeccionados 10 corpos-de-prova cilíndricos (100x200mm), para determinação da resistência à compressão e à tração por compressão diametral dos concretos. Foram, também, moldados 4 prismas (150x150x500mm) por série, para determinação das tenacidades à flexão.

## **2 OBJETIVO**

Avaliar o comportamento de tubos de concreto reforçado com fibras de aço, quando submetidos à condições de trabalho, verificando seu desempenho comparativamente a tubos de concreto simples e de concreto armado, através do ensaio de compressão diametral.

Os resultados obtidos são comparados visando o estabelecimento de parâmetros que forneçam subsídios a uma futura normatização dos tubos de concreto reforçado com fibras de aço, uma vez que, as Normas Brasileiras não contemplam especificações relativas a esses elementos pré-moldados.

## 3 CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO

### 3.1 INTRODUÇÃO

A adição de fibras ao concreto para melhorar o seu desempenho, não é uma novidade. Como se vê na natureza, o pássaro João-de-barro (*Rufus furnarius*) constrói sua casa com bolinhas de argila e acrescenta fibras vegetais na massa úmida, que auxiliam na prevenção de fissuras de retração da argila ao secar. As construções antigas de “taipa de pilão” também eram feitas com argila e fibras vegetais, moldadas entre um reticulado de galhos de árvores ou bambús. Consta que os romanos já usavam fibras vegetais em suas construções de concreto simples. (VASCONCELOS, 1998)

A utilização de materiais compósitos na construção civil já ocorria no Antigo Egito, como podemos verificar nas Sagradas Escrituras: “No mesmo dia, o Faraó deu novas ordens aos mestres de obras e aos oficiais nomeados para mandar os israelitas. As ordens foram estas: De agora em diante, vocês não podem mais dar palha aos israelitas para fazer tijolos, como antes. Eles mesmos é que terão de buscar palha para isso.” (Êxodo 5, 6-7)

O uso de palha para reforçar tijolos de barro, de crina de cavalo ou sisal para reforçar estuque, são conhecidos desde a antiguidade. Na Finlândia, o amianto era utilizado desde 2500A.C. para enrijecer material cerâmico, na fabricação de utensílios de cozinha. (TEZUKA, 1999)

A patente mais antiga sobre concreto reforçado com fibras é a de BERARD, em 1874. O cimento amianto desenvolvido por HATSCHEK, em 1899, tornou-se bastante usado para coberturas e tubos. (JOHNSTON, 1992; MINDESS, 1991)

Várias pesquisas foram realizadas e numerosas patentes em concreto reforçado com fibras de aço ou de vidro foram concedidas, mas o desenvolvimento do concreto com fibras ganhou impulso somente a partir de 1960.

Estudos sistemáticos dirigidos para as possíveis aplicações e utilização comercial do concreto reforçado com fibras foram, porém, iniciados, somente a partir de 1971 nos EUA. (ACI544, 1974), seguido pelo Reino Unido e Japão. (KOBAYASHI, 1983)

Hoje a utilização de compósitos cresceu em diversidade, podendo ser encontrados em várias aplicações na construção civil como telhas, painéis de vedação vertical e estruturas de concreto como túneis e pavimentos, onde o concreto reforçado com fibras vem progressivamente ampliando sua aplicação. Como o próprio nome já diz, os compósitos são materiais compostos basicamente por duas fases: a matriz e as fibras. Estas podem atuar como um reforço da matriz, em função das propriedades desta e das próprias fibras. (FIGUEIREDO, 1999)

Segundo VASCONCELOS (1998), baseado em publicações do ACI sobre o assunto, que já possuía uma comissão de estudos organizada em 1966 (Committee 544, 1997) e em catálogos dos fabricantes de fibras, um fator muito importante a ser esclarecido é o seguinte: as fibras adicionadas ao concreto não têm por finalidade substituir a armadura de vergalhões. Isto contudo, pode ser feito em estruturas, em que se possa garantir uma significativa redistribuição de esforços (lajes apoiadas diretamente sobre o solo, tubos).

### **3.2 MECANISMO DE REFORÇO DAS FIBRAS**

O concreto de cimento Portland já é, por si só, um compósito formado por três fases: a pasta de cimento, os agregados e a zona de transição. Tem inúmeras vantagens como a capacidade de produzir estruturas com infinitas variações de forma. Também é capaz de apresentar uma grande variação de suas propriedades em função do tipo de componentes principais e de suas proporções, bem como de utilização ou não de uma grande variedade de aditivos e adições. No entanto, o concreto apresenta algumas limitações como o comportamento de ruptura frágil e pequena capacidade de deformação, quando comparado com outros materiais

estruturais como o aço (MEHTA e MONTEIRO, 1994). Além disso, o concreto apresenta resistência à tração bem inferior à de compressão, cuja relação está, geralmente, em torno de 0,07 e 0,11. Este comportamento está associado às fissuras que se formam ou já estão presentes no concreto, que prejudicam muito mais o material quando solicitado à tração do que à compressão. (FIGUEIREDO, 1999)

Logo, pode-se associar a reduzida capacidade de resistência à tração, à muito maior dificuldade do concreto interromper a propagação das fissuras quando é submetido a este tipo de tensão. Isto ocorre pelo fato da direção de propagação das fissuras ser transversal à direção principal da tensão. Assim que se principia o crescimento de cada nova fissura, a área disponível de suporte de carga é reduzida, causando um aumento das tensões presentes nas extremidades das fissuras. Logo, a ruptura na tração é causada por algumas fissuras que se unem e não por numerosas fissuras, como ocorre quando o concreto é comprimido. (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

O aparecimento de uma fissura em uma matriz cimentícia produz concentração de tensões na sua frente de propagação (figura 3.1)

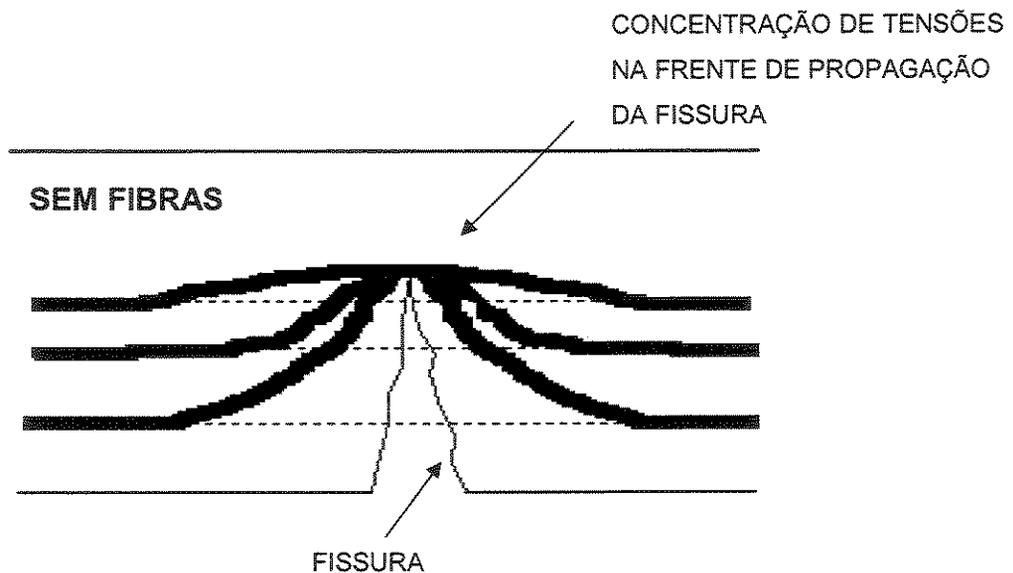


Figura 3.1 – Propagação das fissuras e concentração de tensões.

As fibras de aço, quando adicionadas ao concreto, dificultam a propagação das fissuras devido o seu elevado módulo de elasticidade. Pela capacidade portante pós-fissuração que o compósito apresenta, as fibras permitem uma redistribuição de esforços no material mesmo quando utilizada em baixos teores. Isto é particularmente interessante em estruturas contínuas como os pavimentos e os revestimentos de túneis. (FIGUEIREDO, 1997)

Em concretos reforçados com fibras, o papel principal destas se inicia após a fissuração da matriz, onde atuam como ponte de transferência de tensões entre as duas partes da matriz fissurada, aumentando a tenacidade do compósito. (BENTUR E MINDESS, 1990)

Existindo fibras cruzando a fissura, estas atuarão como ponte de transferência de tensões, controlando a abertura da fissura ou a sua propagação.

A Figura 3.2 mostra, esquematicamente, este mecanismo de controle de propagação das fissuras.

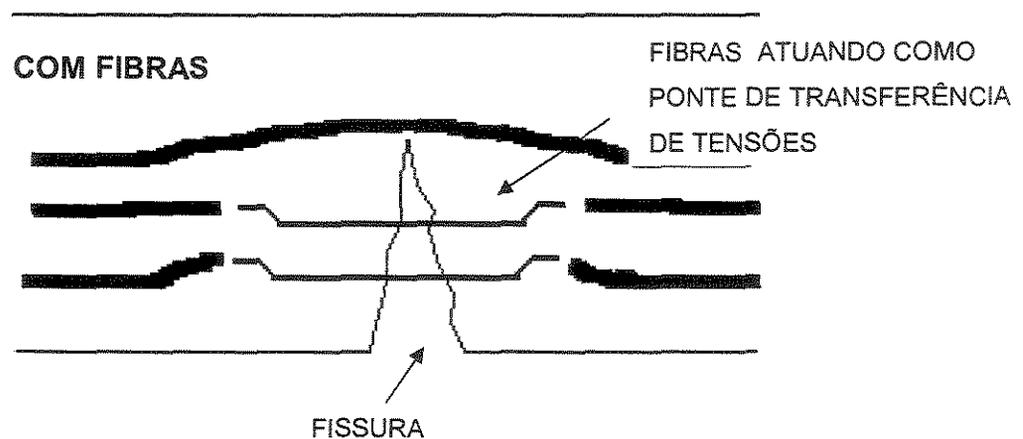


Figura 3.2 – Mecanismo de controle de propagação das fissuras

Quando se adicionam fibras ao concreto, este deixa de ter o caráter marcadamente frágil. Isto ocorre pelo fato da fibra servir como ponte de transferência de tensões através das fissuras, minimizando a concentração de tensões nas extremidades das mesmas, conforme o ilustrado na figura 3.2. Com isto, tem-se uma grande redução da velocidade de propagação das fissuras no concreto que passa a ter um comportamento pseudo-dúctil, ou seja, apresenta uma certa capacidade portante pós-fissuração.

A interação fibra-matriz, que governa o processo de transferência de tensões e consequentemente a tenacidade do compósito, é influenciada pelos seguintes parâmetros:

- Fator de forma das fibras (relação  $l / d$ )
- Ancoragem das fibras à matriz
- Resistência à tração das fibras
- Resistência de aderência
- Teor de fibras incorporado

Os três primeiros parâmetros são funções do tipo de fibra empregado. A resistência de aderência está intimamente ligada à resistência da matriz, que por sua vez é função direta da microestrutura da região de interface entre a fibra e a matriz, ou seja, da zona de transição fibra-matriz.

### 3.3 A ZONA DE TRANSIÇÃO FIBRA-MATRIZ E SUA INFLUÊNCIA NA TENACIDADE DO COMPÓSITO

Informações referentes à microestrutura da zona de transição fibra-matriz são encontradas , de forma clara e concisa, no trabalho de NUNES (1998):

A microestrutura da região de interface entre a fibra e a matriz é diferente daquela do restante da pasta, tal qual a zona de transição pasta-agregado descrita por MEHTA e MONTEIRO (1994).

As partículas de cimento se hidratam e reagem formando partículas coloidais de silicato de cálcio hidratado (C – S – H) e grandes cristais de hidróxido de cálcio (CH). Ocorre a formação de espaços preenchidos com água ao redor das fibras devido a exsudação interna e ao empacotamento ineficiente dos grãos de cimento em torno da superfície da fibra.

Como conseqüência, a relação a/c nas imediações da fibra é maior e portanto mais porosa será a matriz nas vizinhanças da fibra do que no restante.

Além disso, há uma maior quantidade de cristais grandes de CH, que são orientados perpendicularmente à superfície da fibra, criando uma zona preferencial de clivagem (BENTUR e MINDESS, 1990). Tudo isto contribui para que a resistência da matriz na interface fibra-matriz seja menor, influenciando o processo de perda de aderência, importantes no mecanismo de transferência de tensões.

Uma representação esquemática da zona de transição fibra-matriz, mostrando suas diferentes camadas, é apresentada por BENTUR e MINDESS (1990), representação esta mostrada da Figura 3.3.

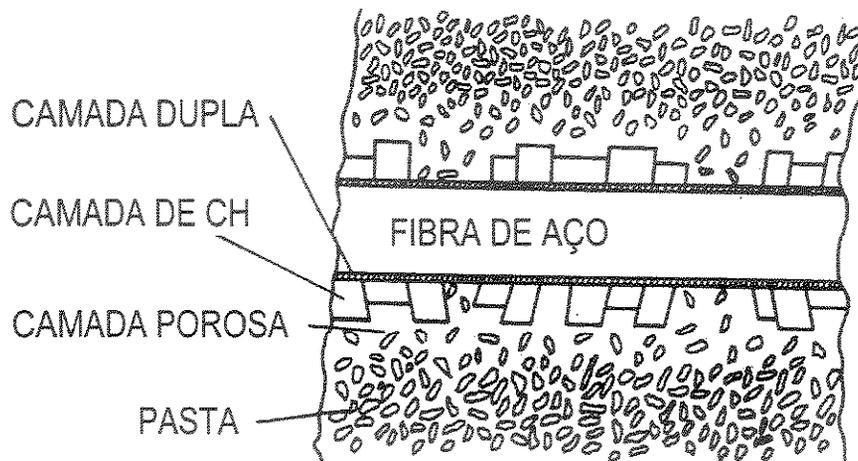


Figura 3.3 – Representação Esquemática da Zona de Transição Fibra-Matriz.

(BENTUR e MINDESS, 1990)

Nos concretos reforçados com fibras curtas e aleatoriamente distribuídas na matriz, a maior parte do trabalho total desenvolvido para que ocorra a ruptura do compósito é função da energia dissipada para a ruptura da aderência entre fibras e matriz e o posterior arrancamento dessas fibras (BENTUR e MINDESS, 1990).

A avaliação do desempenho destes compósitos é realizada através da quantificação de sua energia total de fratura, ou seja, através da medida de sua tenacidade, que é a característica mais importante dos compósitos reforçados com fibras de aço.

## **4 TUBOS DE CONCRETO**

Registros históricos mostram muitas referências de construções, nas civilizações antigas, para armazenar e transportar a água. Explorações de arqueólogos indicam que a idéia de se fazer drenagem surgiu muito cedo na história. Por exemplo, uma canalização de esgoto em arco construída aproximadamente 3750 A.C., foi revelada em uma escavação em Nippur, Índia. Em outra escavação em Conta, perto de Bagdá, foi encontrada uma canalização de esgoto aberta, construída em 2.600 A.C.

Uma das canalizações antigas mais conhecidas, são os aquedutos de Roma. A água levada por estes aquedutos era usada principalmente para beber. Os aquedutos, chamados de Cloaca Máxima, foram a principal rede de esgoto de Roma na época, construídos em 800 A.C., com blocos de pedra e cimento romano, foram o primeiro método artificial conhecido de disposição de esgoto. Depois de 2800 anos, ainda estão sendo utilizadas seções de concreto, para compor redes de esgoto e de água pluvial.

### **4.1 CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES**

Os trabalhos de MARSTON (1917) e SPANGLER (1946), originais ou deles derivados, influenciaram em muitos dos processos de dimensionamento hoje utilizados, em qualquer parte do mundo. Mesmo em países como a França e a União Soviética, onde muitos autores usam sistemas analíticos, é indisfarçável a influência dos processos empíricos, por eles pesquisados.

Os métodos empíricos sofrem muitas críticas baseadas no aspecto aparentemente antieconômico, que às vezes chegam a ser exageradas. Outros aspectos, como a durabilidade, transporte e manejo, e certas particularidades da execução são muito mais significativos que os

parâmetros estruturais. De modo que, para a grande maioria dos casos correntes permanecem satisfatórios os processos empíricos.

De qualquer forma, na maioria dos casos, eventuais aperfeiçoamentos da análise estrutural são anulados pelo emprego de processos construtivos inadequados, e isto sem desmerecer os grandes avanços nas técnicas construtivas.

O êxito de uma obra não depende, apenas, da elaboração de um bom projeto mas, e principalmente, da boa observância deste na fase da construção. Os detalhes construtivos e especificações deverão ser, no mínimo, suficientes para garantir uma execução compatível com as hipóteses de projeto. Por outro lado, face à natureza de determinados serviços, as exigências deverão ser suficientemente flexíveis para não inibir eventuais e criteriosas alterações, pela fiscalização. O que, pelo menos nos casos de maior responsabilidade, não deve dispensar o permanente contato entre projetista e construtor. Um fato amplamente comprovado é que, todos os acidentes, de quaisquer proporções, verificados em instalações de tubos, estão de alguma forma e sistematicamente, relacionados com deficiências de inspeção, ocorrendo ainda os casos em que as instruções fornecidas pela fiscalização contrariavam frontalmente as especificações. (ZAILLER, 1983)

#### **4.1.1 COEFICIENTE DE SEGURANÇA**

Um ponto de difícil conceituação é o do coeficiente de segurança de um condutor, de um lado, pela dificuldade de se definir a resistência de um tubo, por outro, pelo desconhecimento da exata natureza do sistema de solicitações em serviço.

A princípio, a primeira exigência a que devia satisfazer um tubo de concreto era dupla, resistência à primeira fissura e resistência à ruptura. A resistência à primeira fissura era definida como a carga de ensaio sob a qual ocorria a primeira fissura visível na superfície do tubo, usualmente uma fissura longitudinal isolada na face interna da base, ou muitas vezes, o fissuramento simultâneo na base e na bolsa. A carga da ruptura era definida como a maior carga de ensaio resistida pelo tubo.

Assim que os pesquisadores perceberam as dificuldades para a determinação da carga de primeira fissura, decorrentes de fatores diversos, tais como condições de iluminação do laboratório, cor e textura da superfície do espécime e até mesmo a acuidade visual do observador. No sentido de eliminar tais incertezas, propuseram então, o critério até hoje adotado, inclusive pelos métodos brasileiros, da fissura com 0,25 mm de abertura, mensurável diretamente por um calço.

Em nossos dias, é consenso técnico que as fissuras não afetam a integridade do condutor, a menos que sua abertura atinja valores capazes de permitir ou favorecer a corrosão da armadura. Registre-se, por oportuno, que o valor de 0,25 mm tradicionalmente aceito para tubos é absolutamente arbitrário, tendo sido fixado apenas em virtude da maior facilidade de medição. Da mesma forma que para as estruturas de concreto armado em geral, o assunto deve ser pesquisado com maior profundidade, de maneira a se fixar, com maior rigor, os limites e as tolerâncias para o fissuramento. (ZAILLER, 1983)

Em relação à carga de ruptura, embora não se pensasse assim nos primórdios, a tendência atual é considerá-la como informação inútil e eliminar sua exigência das especificações. Em especial para o caso de grandes diâmetros, quando o ensaio destrutivo é particularmente oneroso e, nem por isso, indicativo da capacidade de carga do tubo em serviço, em condições diferentes e, como regra, bem mais favoráveis.

Estando em serviço, à medida que aumenta o carregamento, o tubo de concreto deforma-se, vai perdendo sua rigidez, e seu funcionamento passa a aproximar-se ao de uma estrutura semi-rígida ou flexível. O diâmetro horizontal aumenta, o empuxo passivo do solo é mobilizado e, gradativamente, a resistência do tubo diminui, enquanto aumenta a contribuição do solo envolvente. E, quanto maior a deformação do tubo, maior a intensidade do empuxo passivo. De tal modo que, por ocasião da ruptura, torna-se impossível definir - no sentido em que é definida em outros tipos de estrutura - a carga de ruptura da peça. Um tubo sob carga de aterro, mesmo após experimentar acentuadas deformações pode, pela contribuição do empuxo passivo do solo, ser capaz de aceitar carregamentos adicionais de modo que, praticamente, jamais se conseguirá caracterizar sua carga de ruptura. Isto sem considerar que, muito antes do aparecimento das grandes deformações, a situação estará extremamente complicada pelo "estilhaçamento" do concreto de cobrimento das armaduras e do afrouxamento destas, na região da bolsa e da base.

O que quase não ocorre em outros setores, o problema da segurança em tubos parece ser um dos que mais exige a experiência do projetista, sendo de pouca valia recorrer a requintados métodos de análise, mesmo assim, embora não se possa negar o valor da experiência, sua importância pode ser relativa posto que, nem sempre, posições subjetivas encontram respaldo em comprovação experimental suficiente.

Apesar dos esforços de estudiosos e pesquisadores na tentativa de fixar, de modo racional, coeficientes de segurança para situações que normalmente ocorrem, o projetista defronta-se com propostas, a maior parte das vezes, irreais, inconsistentes e destituídas de significado. (ZAILLER, 1983)

SPANGLER (1967) considera, (para o dimensionamento segundo o processo de MARSTON-SPANGLER) adequada e econômica a adoção de coeficiente igual a 1 para o carga de fissura com abertura de 0,25 mm, pelas seguintes razões:

- a) a ocorrência da fissura indica uma razoável folga na capacidade de resistência até a ruptura;
- b) a ruína do tubo enterrado é localizada, e não ocorre repentinamente, oferecendo tempo e oportunidade para os devidos reparos.

O valor da carga de ruptura deve ser a carga de fissura multiplicada por 1,5, este valor proposto por SPANGLER (1967), coincide com o adotado pelo "Manual of Practice n° 37" da ASCE (1958).

## 4.2 CARGAS

### 4.2.1 TEORIA DE MARSTON-SPANGLER

A teoria de MARSTON-SPANGLER (1946), admite como carga de solo atuante sobre um tubo:

- o peso do prisma interior ou seja, do maciço diretamente assente sobre o tubo ( $Q = b.h.\gamma$ );
- o mesmo peso majorado, porém, pela consideração dos planos de fratura a  $45^\circ$  (e não mais verticais);
- o peso  $Q$  aliviado pela consideração do efeito de arco do aterro.

A teoria de MARSTON-SPANGLER (1946) toma como ponto de partida o pressuposto de que a carga de aterro atuante sobre o tubo é a do prisma interior, majorada ou reduzida pelos efeitos das forças de atrito dos prismas adjacentes. A figura 4.1 ilustra a hipótese:

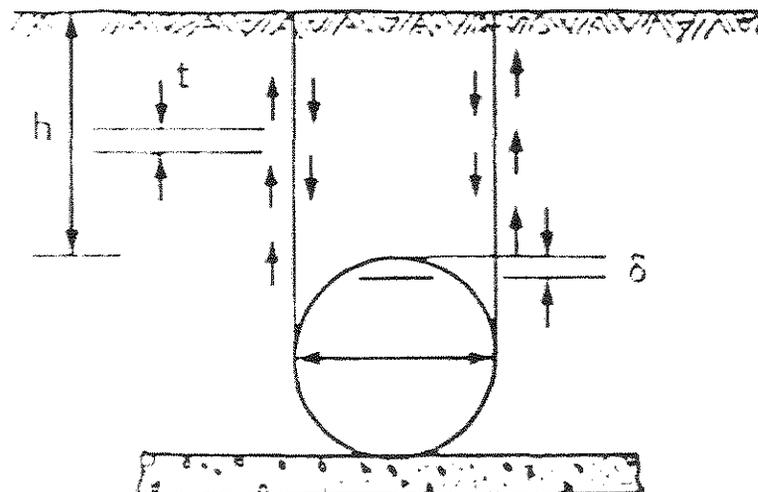


Figura 4.1 –Carga de aterro atuante sobre o tubo (ZAILLER, 1983)

Chamado  $\delta$  a deformação da geratriz superior do tubo e  $t$  a deformação do solo adjacente natural, três casos podem ocorrer:

a)  $\delta > t$  — o que significa que o “prisma interior” tende a deslocar-se para baixo, em relação aos prismas adjacentes, transmitindo a estes, em virtude do atrito, parte do seu peso, resultando numa pressão  $E$  sobre o tubo menor que  $Q$ ,  $E < Q$

b)  $\delta = t$  — o que implica ausência de atrito e, conseqüentemente,  $Q = E$

c)  $\delta < t$  — portanto, inversamente ao primeiro caso,  $E > Q$ .

Admitindo uma série de hipóteses complementares que possibilitaram a determinação da direção e intensidade das forças de atrito, MARSTON-SPANGLER estabeleceram a expressão:

$$Q = C \cdot \gamma \cdot B^2 \quad (4.1)$$

conhecida como a Equação Geral de MARSTON-SPANGLER.

onde:

$Q$  = peso do aterro por unidade de comprimento;

$\gamma$  = peso específico do solo;

$B$  = largura da vala ( $B_d$ ), ou do condutor ( $B_c$ ) conforme o caso;

$C$  = coeficiente adimensional, função dos seguintes parâmetros:

- relação entre a altura do aterro e a largura da vala (ou condutor);
- forças cortantes entre prismas interior e adjacentes;
- direção e valor do recalque diferencial entre os referidos prismas, atendidas as condições particulares de aterro.

## 4.2.2 CONDIÇÕES TÍPICAS DE CARREGAMENTO

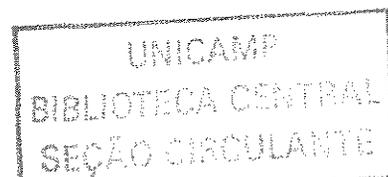
Uma das contribuições mais marcantes da Teoria de MARSTON-SPANGLER (1946) é a demonstração, por princípios racionais da Mecânica, que a carga sobre uma canalização enterrada é grandemente afetada pelas condições de execução desta e não, apenas, pela altura do terrapleno. Tais fatores de instalação é que irão determinar a grandeza e direção dos recalques dos prismas já citados, equivale dizer, a geração de forças de atrito ou cortantes que se somarão, algebricamente, ao peso do prisma interior.

Em razão da reconhecida influência das condições construtivas, as canalizações enterradas são classificadas em:

- valas ou trincheiras;
- aterro;
- pseudovalas;
- tubos em túnel ou cravados.

### 4.2.2.1 VALAS OU TRINCHEIRAS

As condições de vala ocorrem, geralmente, quando se faz a execução em “cut and cover”, em que o conduto é instalado numa vala relativamente estreita, aberta em terreno natural, posteriormente reaterrada até o nível inicial (figura 4.2 a, b, c).



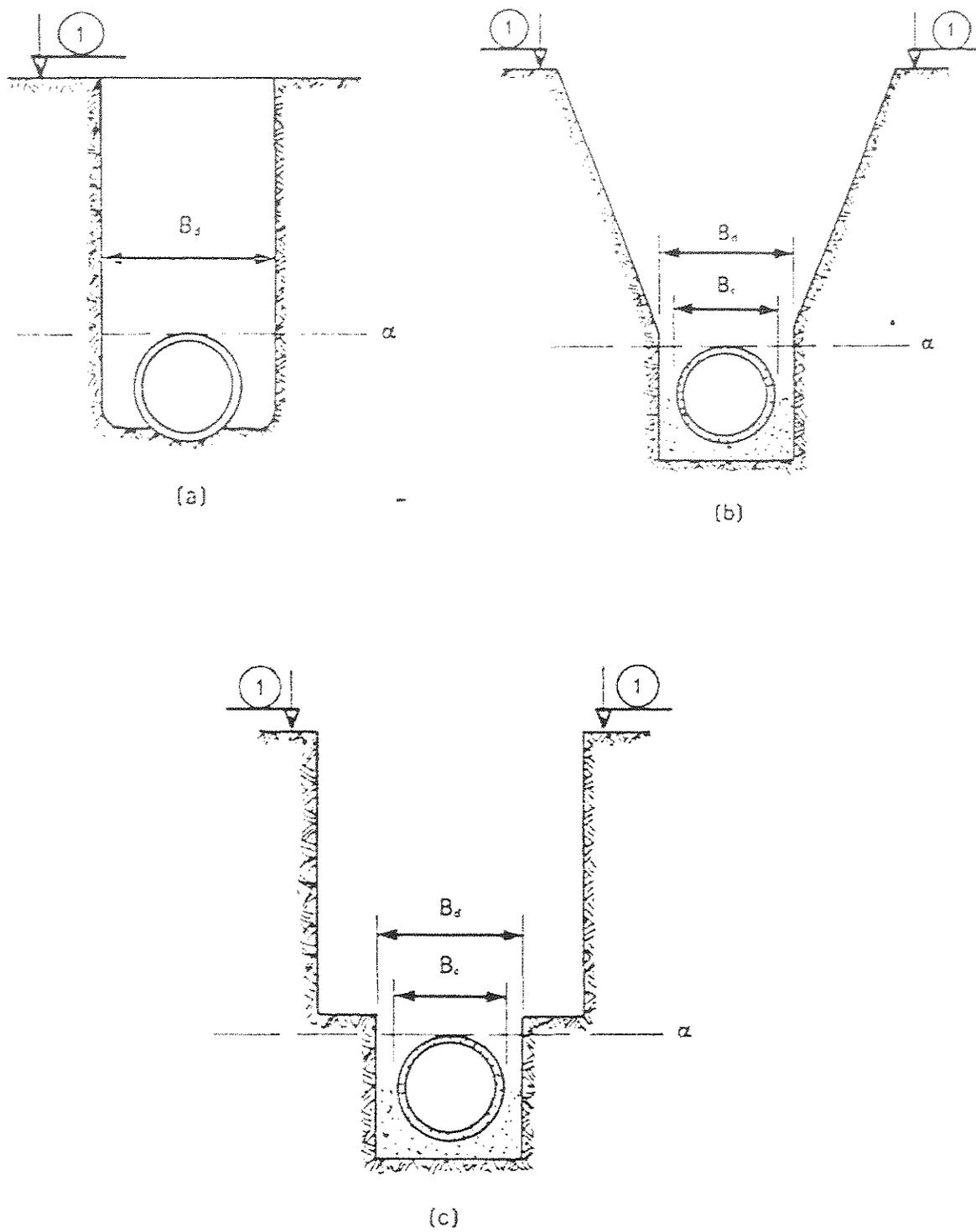


Figura 4.2 – Exemplos de valas ou trincheiras (ZAILLER, 1983)

#### 4.2.2.2 ATERRO

As condições de aterro ocorrem, basicamente, em dois casos:

- a) quando a tubulação é diretamente assentada sobre o nível do terreno, e numa segunda etapa, aterrada;
- b) quando as valas apresentam tal largura que a carga sobre o tubo não mais é afetada pelo atrito aterro-parede.

As condições de aterro podem, ainda, ser classificadas em:

- de projeção positiva (tubos salientes), quando o plano tangente à geratriz superior do tubo está acima do nível natural do terreno adjacente (figura 4.3);
- de projeção negativa (reentrantes), numa vala suficientemente estreita em relação ao diâmetro do tubo e à altura do aterro. E ainda, quando o terreno apresenta resistência para garantir o perfil da vala durante a execução do aterro (figura 4.4).

#### 4.2.2.3 PSEUDOVALAS

Nos aterros de grande altura, as cargas podem atingir valores excepcionalmente altos, nos casos em que forças cortantes, de grande intensidade, somam-se ao também elevado peso do prisma interior. Nestes casos, MARSTON-SPANGLER (1946) propõem a adoção de um método construtivo, experimentalmente comprovado, capaz de reduzir ou, mesmo, eliminar o efeito das forças cortantes. Trata-se do método denominado de pseudovalas e que consiste no seguinte, executado o aterro, normalmente, até uma certa altura acima da tubulação, cava-se uma vala, removendo-se o prisma de solo compactado diretamente assente sobre ela. Reenche-se a vala com material compressível (palha, feno, serragem de madeira, etc.) e, em seguida, prossegue-se com a execução do aterro (figura 4.5).

Uma variante do método, originalmente proposto por Marston-Spangler, tem sido aplicada com sucesso, nos anos mais recentes. Consiste, inicialmente, na execução normal do aterro até uns 30 cm acima do tubo (plano  $\alpha$ ); a seguir colocam fardos de palha ou feno diretamente sobre a tubulação e prossegue-se com a compactação, cerca de duas ou três vezes o diâmetro do tubo, para cada lado. Atingido o nível superior dos fardos, os arames que os amarram são cortados, de maneira a permitir o afofamento do material, uma segunda camada de fardos é colocada e assim, sucessivamente, até atingir a taxa p' desejada.

A finalidade do método consiste em garantir, no maciço, condições que permitam ao prisma interior recalcar mais que os adjacentes.

#### **4.2.2.4 TUBOS EM TÚNEL OU CRAVADOS**

No caso de tubos cravados, um sistema muito utilizado é o “pipe-jacking”, que consiste num método construtivo não destrutivo, que permite a execução de obras urbanas sem a paralisação do trânsito, facilitando a execução de instalações de água, esgoto, drenagem, etc.

Os tipos e a versatilidade dos equipamentos de cravação disponíveis permitem a execução de túneis maciços arenosos e argilosos com ou sem capacidades portantes, na presença ou não de água.

Na figura 4.6 indica-se o caso em que o tubo é colocado em um túnel previamente perfurado.

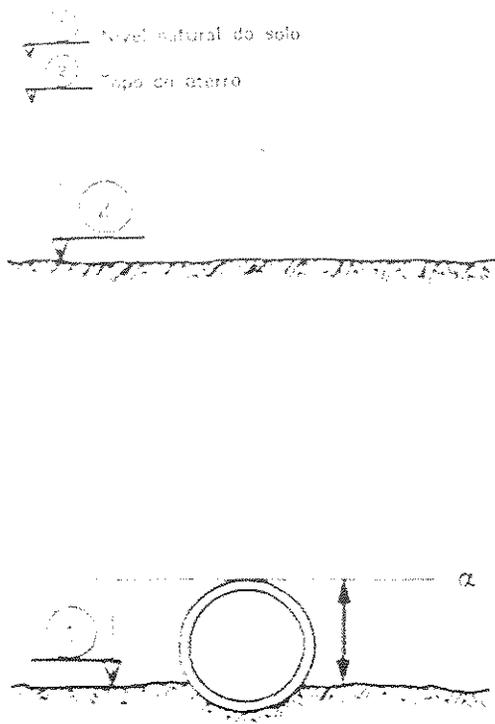


Figura 4.3 – Aterro (tubos salientes)

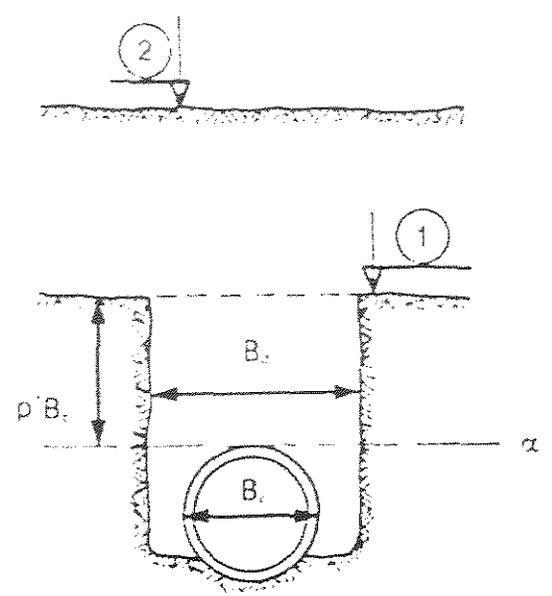


Figura 4.4 – Aterro (tubos reentrantes)

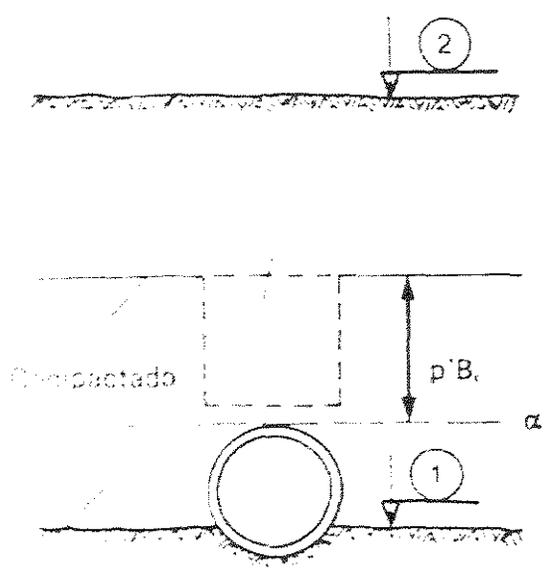


Figura 4.5 – Pseudovalas

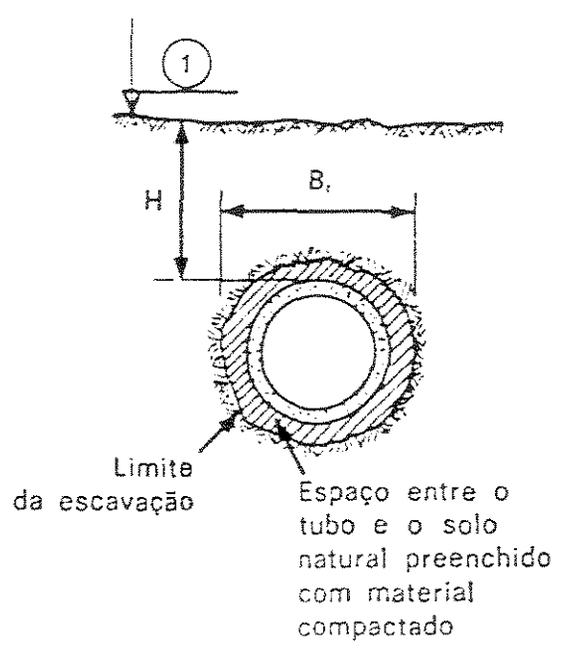


Figura 4.6 – Tubos em túnel ou cravados

(ZAILLER, 1983)



Figura 4.7 – Foto de uma linha de tubos (vala)



Figura 4.8 – Rolo compactador tipo pé-de-carneiro

## 4.3 PROJETO E DIMENSIONAMENTO

### 4.3.1 GENERALIDADES

Numerosas medições experimentais têm demonstrado que a distribuição da carga vertical, tanto em seções retangulares como circulares, é uniformemente distribuída sobre toda a largura da canalização. Regra geral, esta carga independe da forma da seção transversal ou da qualidade do material. (ZAILLER, 1983)

Contrariamente ao que acontece com as cargas, a resistência dos condutores depende da forma da seção transversal e do material que os constituem. Entretanto, nunca será suficientemente enfatizada a importância do tipo de apoio, assim como as condições ou qualidade do aterro, nas canalizações enterradas, em especial tubos circulares ou elípticos, de maneira a aproveitar-se, ao máximo, sua capacidade portante que, de resto, a própria forma lhes confere. Ao contrário da carga vertical no topo, a distribuição lateral da reação de apoio depende, antes de mais nada, do tipo de assentamento do tubo. É importante notar que a boa distribuição lateral da reação de apoio só ficará assegurada pela adequada moldagem da base, conformada ao perfil do tubo. A prática de instalar o tubo em berço plano e, depois, preencher com solo os vazios triangulares sob o mesmo, não permite uma eficiente distribuição lateral. O desenvolvimento desses princípios é ilustrado na figura 4.9, onde se indicam os valores dos momentos teóricos que se desenvolvem nas paredes de um tubo de seção circular, em função do tipo de apoio:

a) apoio não conformado ao perfil do tubo: (figura 4.9a)

$$M_1 = 0,294QR;$$

b) apoio conformado ao perfil do tubo: (figura 4.9b)

$$M_2 = 0,157QR = 0,53M_1;$$

c) idêntico ao caso b, com a consideração da influência das pressões laterais: (figura 4.9c)

$$M_3 = 0,118QR = 0,40M_1 = 0,75M_2$$

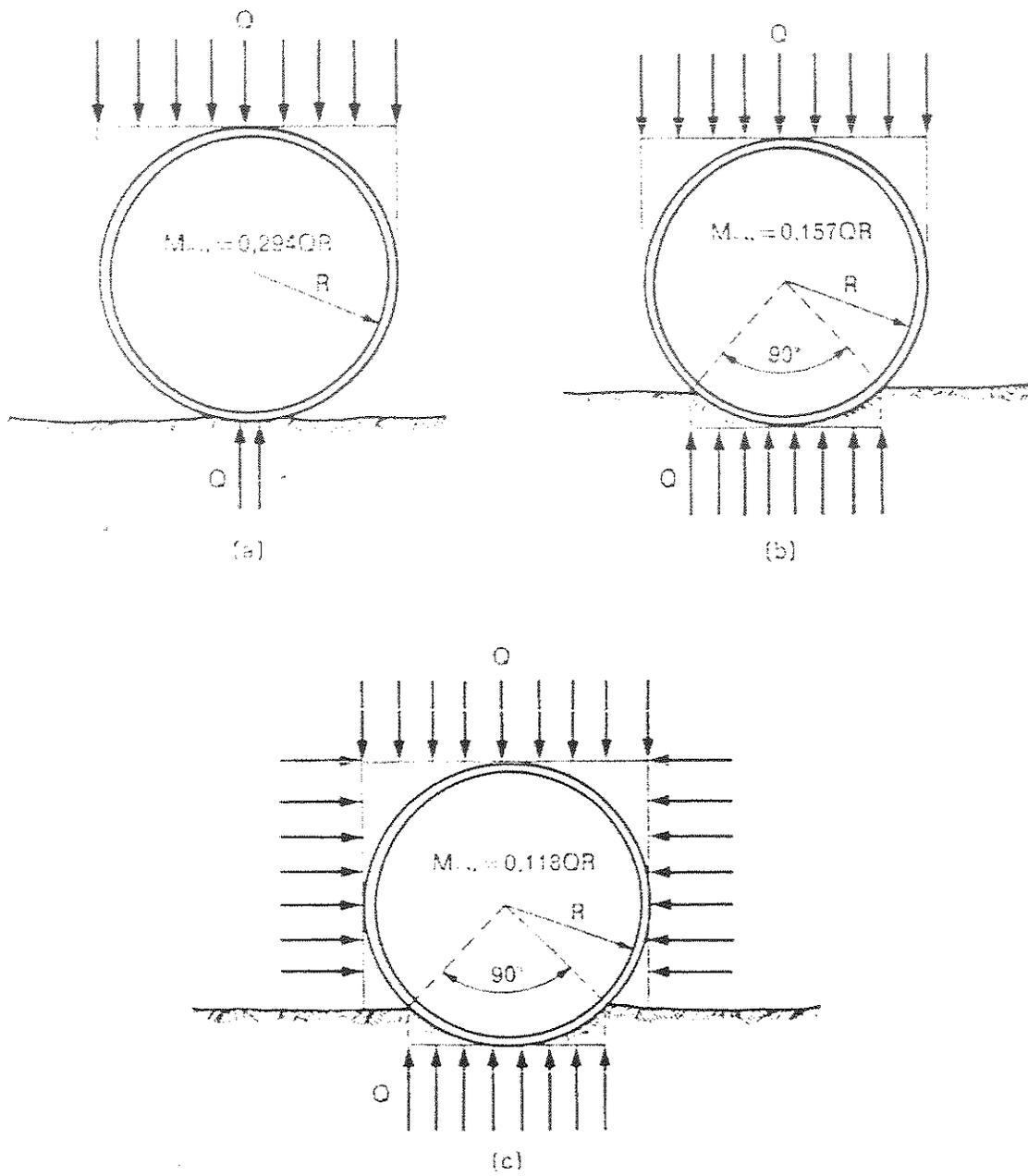


Figura 4.9 – Momentos teóricos em função do tipo de apoio. (ZAILLER, 1983)

As considerações até aqui feitas são particularmente válidas para canalizações flexíveis. Já no caso de tubos rígidos, devido a sua pequena capacidade de deformação sob a ação do carregamento vertical, nem sempre há mobilização significativa de pressões.

As dificuldades práticas da avaliação dessas pressões aliadas à precária definição de sua distribuição, assim como à complexidade matemática da análise estrutural, consagraram os ensaios de laboratório como o meio mais cômodo para determinar o comportamento real de tubos rígidos. Daí resulta que o problema do dimensionamento dos tubos, para determinadas condições de serviço, pode ser reduzido ao cálculo de um tubo capaz de resistir a certa carga num determinado ensaio de laboratório.

Este processo, conhecido como de MARSTON-SPANGLER (1946), embora seja largamente aceito, padece de uma série de limitações. Embora não sejam restrições exclusivas do processo, podemos citar:

- amplo envolvimento de conceitos subjetivos;
- alta sensibilidade às incertezas referentes à obediência do projeto na construção;
- grande probabilidade de exagero nas dimensões e conseqüente falta de economia;
- riscos na interpolação dos parâmetros empíricos para grandes diâmetros, assim como aterros de pequena ou grande altura (respectivamente menores que 0,60 m e maiores que 15,00 m);
- difícil fixação de coeficiente de segurança adequado, em virtude da impossibilidade prática de definição de critérios apropriados para ruptura;
- desconhecimento de aspectos quantitativos decorrentes da interação solo-tubo, em especial para os casos de rigidez intermediária.

### 4.3.2 ENSAIOS DE LABORATÓRIO

Dentre os vários métodos de ensaio destinados à determinação da resistência intrínseca de um tubo, quatro são os mais conhecidos:

- a) de três cutelos;
- b) de dois cutelos;
- c) de colchão de areia;
- d) de Minnesota.

A figura 4.10 indica, esquematicamente, o funcionamento dos mesmos.

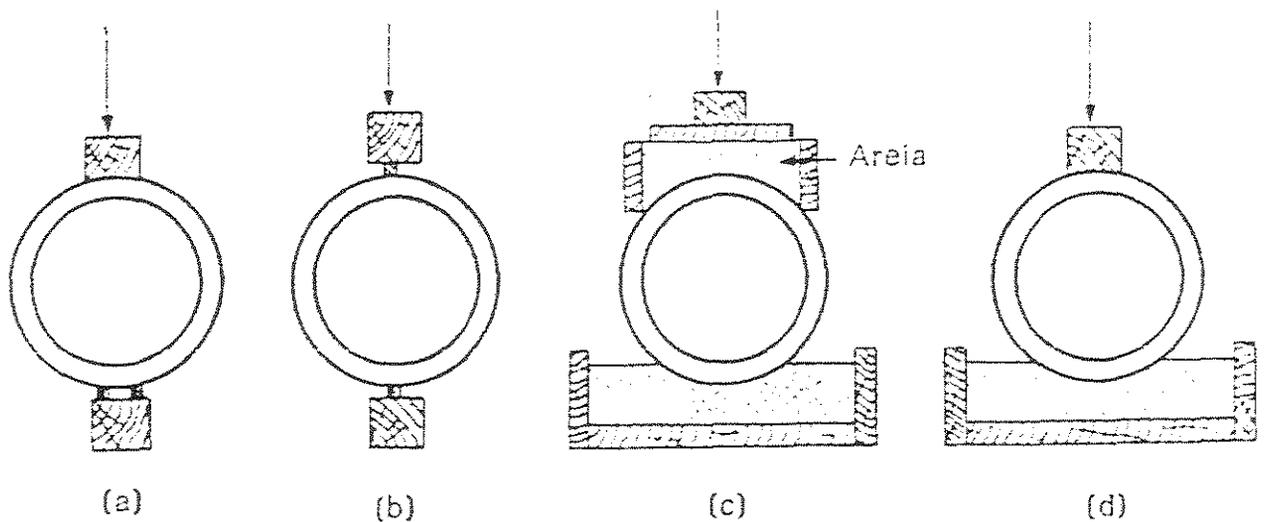


Figura 4.10 – Métodos de ensaio. (ZAILLER, 1983)

Quer pela simplicidade e facilidade de realização, quer pela exatidão e uniformidade dos resultados, o método dos três cutelos é o mais largamente usado no Brasil, normalizado pela NBR 9795/87.

### 4.3.2.1 FATORES DE EQUIVALÊNCIA

Como se pode observar na figura 4.10, tanto os carregamentos como as reações do tubo são diferentemente distribuídos em função do tipo de ensaio. O mesmo ocorre, evidentemente, com os resultados dos ensaios, em confronto com as condições reais de instalação, particularmente pelo fato, já mencionado, da contribuição das pressões laterais na resistência do tubo às cargas verticais.

Não obstante a grande variedade de situações de instalação com que se deparam, capazes de afetar os fatores envolvidos, pode-se estabelecer uma classificação das mesmas, com resultados práticos bastante satisfatórios. Simplifica-se assim a questão, pela determinação em cada caso, de um fator de equivalência, que expressa a relação entre a efetiva resistência do tubo instalado e a carga fornecida pelo ensaio de três cutelos. (ZAILLER, 1983)

#### 4.3.2.1.1 TUBOS EM VALA

a) bases condenáveis — em que os tubos são assentes sem cuidados suficientes, não tendo sido preparado o solo para que a parte inferior dos tubos seja apoiada convenientemente, e deixando de encher os vazios do seu redor, com material granular. (figura 4.11)

Fator de equivalência: 1,1

b) bases comuns — em que os tubos são colocados no fundo das valas, com bastante cuidado, sobre fundação de solo compactado para adaptar-se, perfeitamente, à parte inferior dos tubos, numa largura no mínimo igual a  $0,5B_c$ ; sendo a parte restante envolvida, até uma altura de pelo menos, 15 cm acima da geratriz superior daqueles, por material granular, colocado e socado a pá de modo a preencher os vazios. (figura 4.12)

Fator de equivalência: 1,5

c) bases de 1ª classe — em que os tubos são completamente enterrados em vala e cuidadosamente assentes sobre materiais de granulometria fina, propiciando uma fundação convenientemente conformada à parte inferior do tubo, numa largura de, pelo menos,  $0,6B_c$ . A superfície restante dos tubos é envolvida, inteiramente, até a altura mínima de 30 cm acima da sua geratriz superior, com materiais granulares colocados a mão, de modo a preencher todo o espaço periférico. O material de enchimento deve ser bem apiloado, em camadas de espessura não superior a 15 cm. (figura 4.13)

Fator de equivalência: 1,9

d) bases de concreto — em que a face inferior dos tubos é assente numa base de concreto, com  $f_{ck} \geq 14,0$  MPa e cuja espessura, sob o tubo, deve ser no mínimo  $0,25B_i$ , e estendendo-se, verticalmente, até  $0,25B_c$ . (figura 4.14)

Fator de equivalência: 2,25 a 3,4, dependendo do tipo de execução e da qualidade de compactação de enchimento.

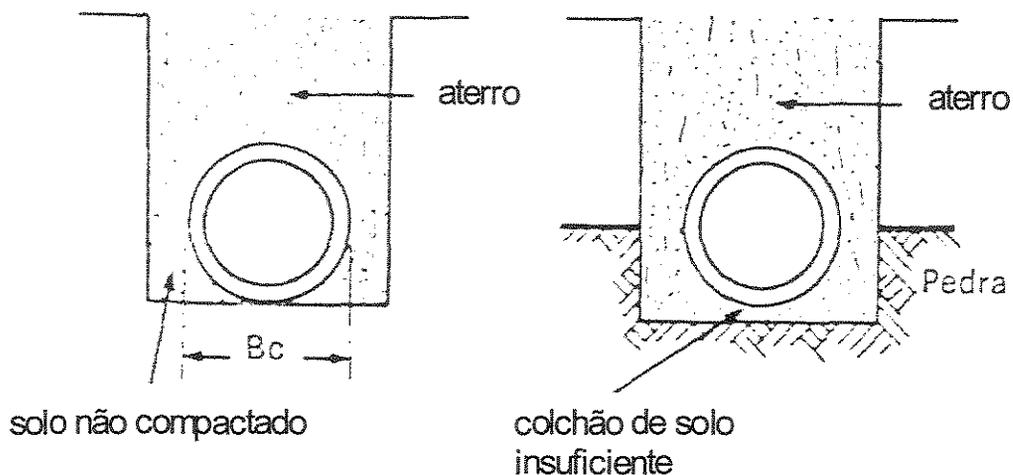


Figura 4.11 – Bases Condenáveis (valas). (ZAILLER, 1983)

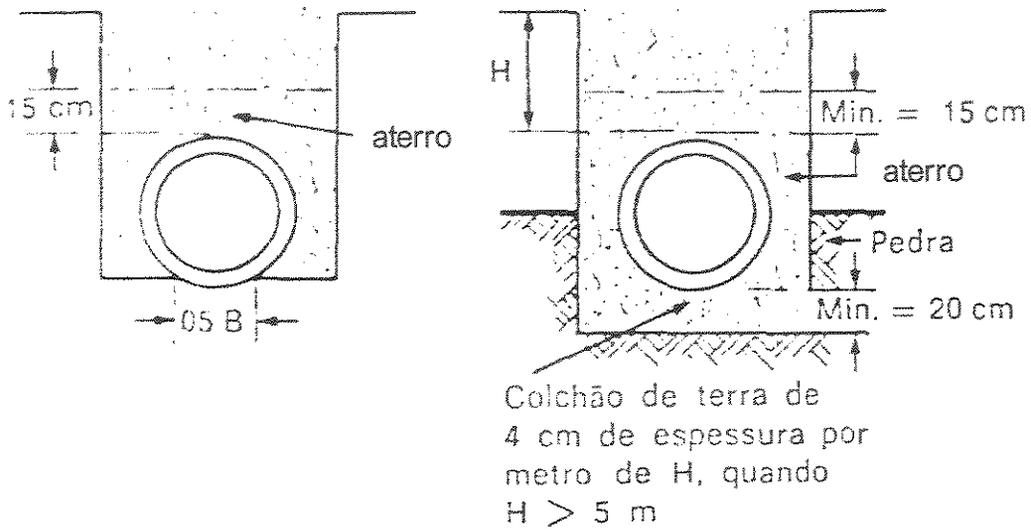


Figura 4.12 – Bases comuns (valas). (ZAILLER, 1983)

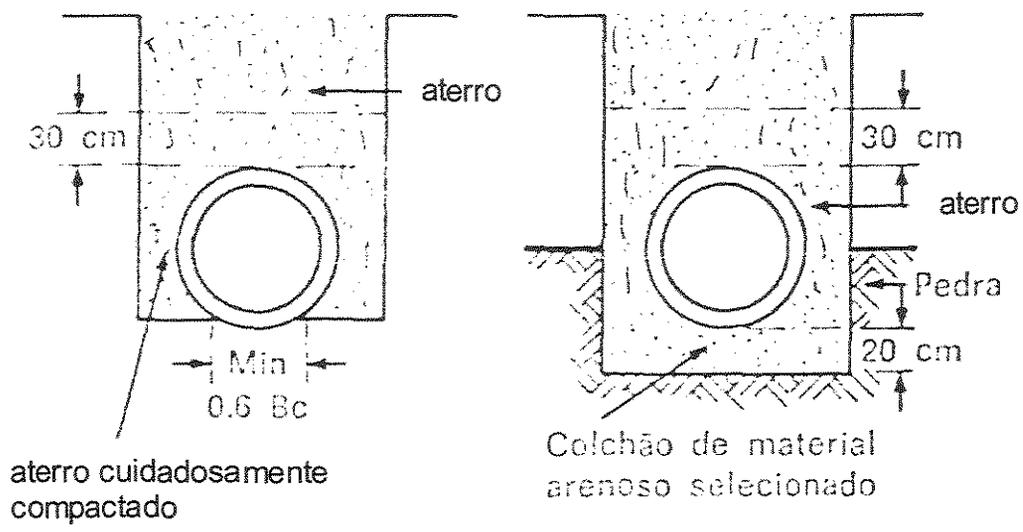


Figura 4.13 – Bases de 1ª classe (valas). (ZAILLER, 1983)

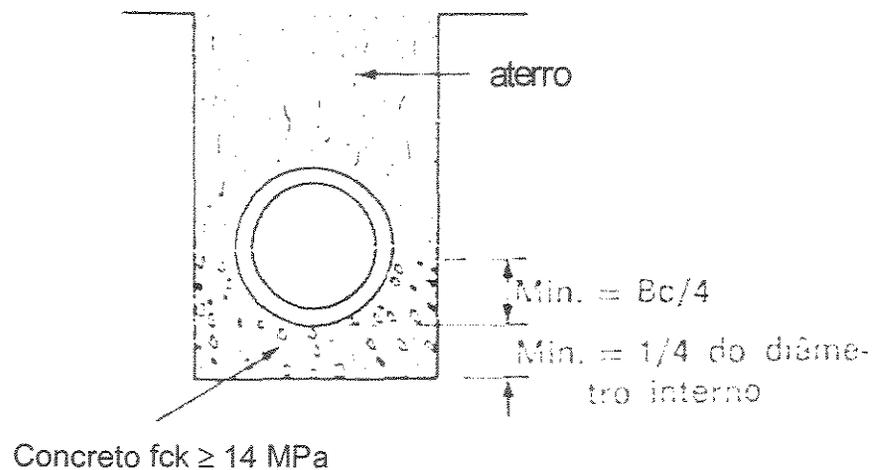


Figura 4.14 – Bases de Concreto (valas). (ZAILLER, 1983)

#### 4.3.2.1.2 TUBOS SALIENTES (PROJEÇÃO POSITIVA)

À semelhança do que ocorre com as tubulações em vala, também as bases para tubos salientes podem ser classificadas em:

- a) condenáveis; (figura 4.15)
- b) comuns; (figura 4.16)
- c) 1ª classe; (figura 4.17)
- d) concreto. (figura 4.18)

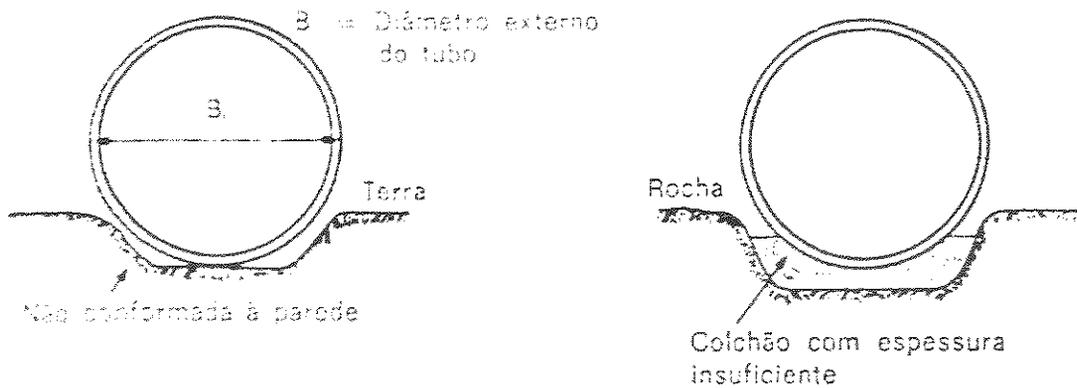


Figura 4.15 – Bases condenáveis (tubos salientes). (ZAILLER, 1983)

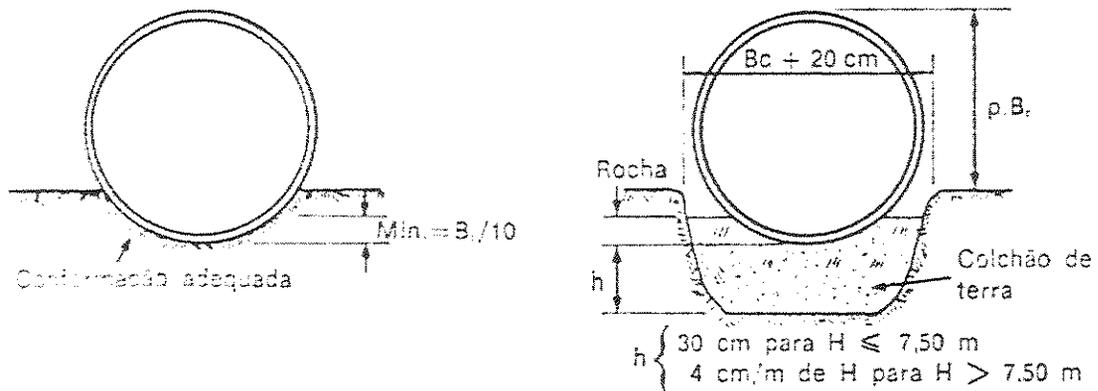


Figura 4.16 – Bases comuns (tubos salientes). (ZAILLER, 1983)

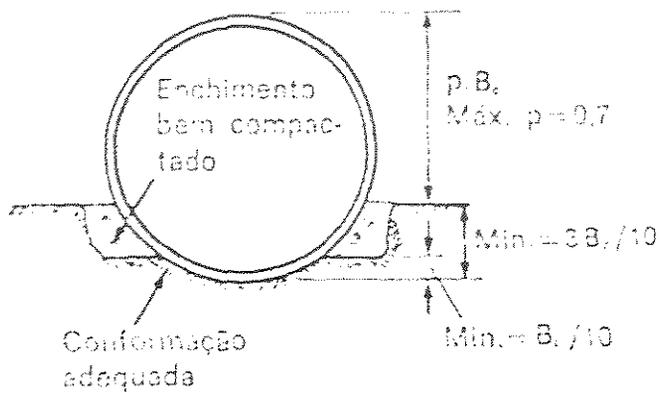


Figura 4.17 – Bases de 1ª classe (tubos salientes). (ZAILLER, 1983)

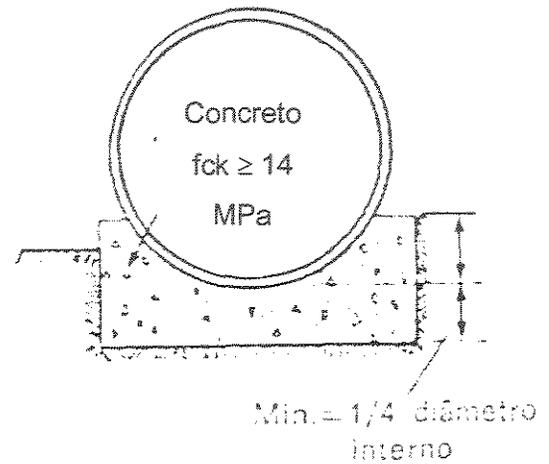


Figura 4.18 – Bases de concreto (tubos salientes). (ZAILLER, 1983)

O fator de equivalência, nestes casos e para tubos circulares é dado por:

$$f_e = \frac{1,431}{N - xq} \quad (4.2)$$

onde:

$N$  = fator de instalação, função da distribuição da reação vertical ou seja, do tipo de fundação, e que pode ser adotado como segue:

- Bases condenáveis: 1,310
- Bases comuns: 0,840
- Bases 1ª classe: 0,707
- Bases concreto: 0,505

$x$  = parâmetro que depende da taxa de projeção  $p$  do tubo, conforme a tabela:

Tabela 4.1 – Valores de x (diferentes bases). (ZAILLER, 1983)

P	Valores de x para bases	
	de concreto	Outras
0	0,150	0
0,3	0,743	0,217
0,5	0,856	0,423
0,7	0,811	0,594
0,9	0,678	0,655
1,0	0,638	0,638

$q$  = relação entre a pressão lateral total e a carga vertical total, e que pode ser calculado pela expressão:

$$q = \frac{p.k}{C_c} \left( \frac{H}{B_c} + \frac{p}{2} \right) \quad (4.3)$$

onde:

$p$  = taxa de projeção;

$k$  = coeficiente de Rankine, tomado igual a 0,33 nos casos correntes;

$C_c$  = coeficiente de Marston;

$H$  = altura do aterro, acima do topo do tubo (plano  $\alpha$ );

$B_c$  = diâmetro externo do condutor.

#### **4.3.2.1.3 TUBOS REENTRANTES (PROJEÇÃO NEGATIVA)**

Os fatores de equivalência para os tubos reentrantes, para efeitos práticos e a favor da segurança, podem ser tomados iguais aos do item tubos em vala na determinação dos quais, com exceção das bases de concreto, não são levados em conta os efeitos favoráveis da pressão lateral. Se, entretanto, puderem ser antecipadas condições de execução favoráveis, possibilitando qualidade de compactação capaz de mobilizar os empuxos laterais, poder-se-á determinar os fatores de equivalência pelas equações (4.2) e (4.3), adotando-se  $k = 0,15$ .

#### **4.3.2.1.4 TUBOS EM PSEUDOVALAS**

Os tubos instalados em condições imperfeitas de vala o são, geralmente, como os de projeção positiva antes da compactação do aterro e abertura da pseudovala. Nesta situação é manifesta a ação das pressões sobre o tubo, os fatores de equivalência podem ser calculados conforme as equações (4.2) e (4.3) .

## **5 PROGRAMA EXPERIMENTAL**

Como já foi comentado anteriormente, o objetivo deste programa é avaliar o comportamento de tubos de concreto reforçado com fibras de aço, quando submetidos à condições de trabalho, verificando seu desempenho comparativamente a tubos de concreto simples e de concreto armado, através do ensaio de compressão diametral.

Este capítulo apresenta os materiais empregados e os métodos de ensaio utilizados durante o trabalho experimental.

### **5.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS**

#### **5.1.1 CIMENTO**

A caracterização do cimento utilizado encontra-se na tabela 5.1

Tabela 5.1 – Propriedades físicas, químicas e mecânicas do cimento (CPV ARI)

Retido # 200 (NBR11579) (%)	1,5
Blaine (NBR7224) (m <sup>2</sup> /kg)	460
Tempo de início de pega (NBR11581) (min.)	120
Tempo de fim de pega (NBR11581) (min.)	360
Resistência à compressão (NBR7215) (MPa)	
3 dias	25
7 dias	37
28 dias	49
Perda ao fogo – 1000°C (NBR5743) (%)	3,0
Resíduo insolúvel (NBR5744) (%)	0,8
SO <sub>3</sub> (NBR5745) (%)	2,0

### 5.1.2 AGREGADOS

Para a realização das concretagens, foram utilizados agregados miúdo e graúdo disponíveis na região de Leme - SP. Suas características são apresentadas na tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Caracterização dos agregados (NBR 7211/83)

Material	Areia	Brita
Dimensão máxima (mm)	6,3	9,5
Módulo de Finura	2,73	5,93
Caracterização	Areia média	Brita 0

As curvas granulométricas da areia e da brita são mostradas, respectivamente, nas figuras 5.1 e 5.2.

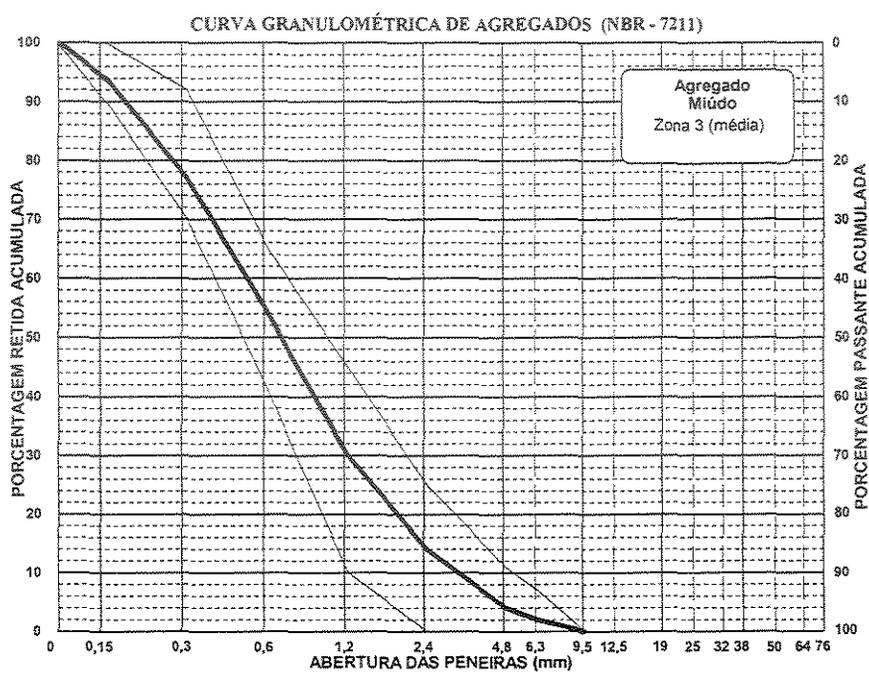


Figura 5.1 Curva granulométrica da areia

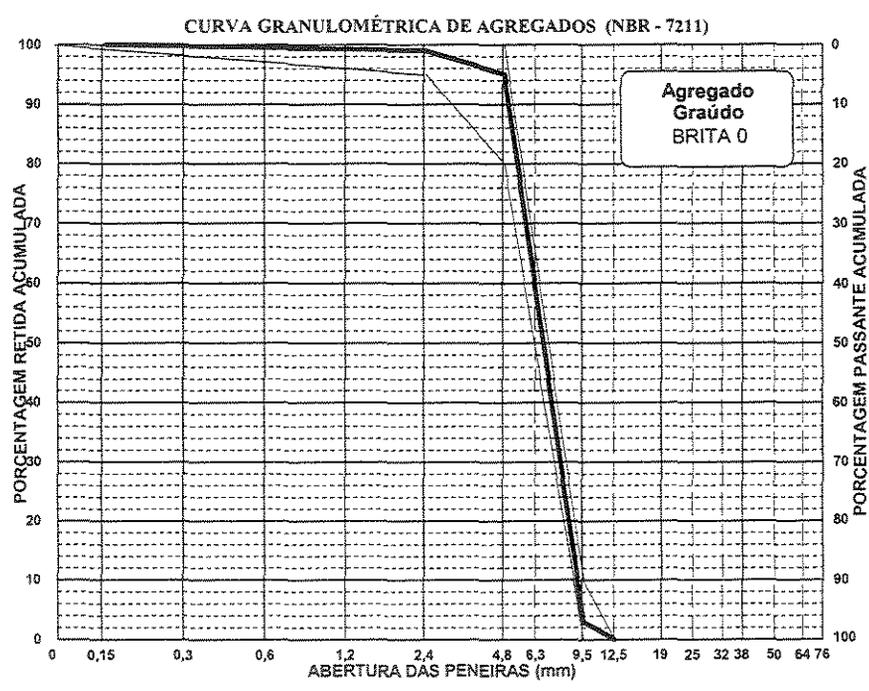


Figura 5.2 – Curva granulométrica da brita

### 5.1.3 FIBRAS

Dois tipos de fibras de aço de baixo teor de carbono, ambas com ancoragens em gancho nas extremidades, foram empregadas para reforço dos concretos.

- Fibras coladas em pentes:

Comprimento médio:	$l_m = 60 \text{ mm}$
Diâmetro médio:	$d_m = 0,92 \text{ mm}$
Fator de forma:	$l_m / d_m = 65$
Tensão de escoamento:	$f_y = 1100 \text{ MPa}$

- Fibras soltas:

Comprimento médio:	$l_m = 50 \text{ mm}$
Diâmetro médio:	$d_m = 1,05 \text{ mm}$
Fator de forma:	$l_m / d_m = 45$
Tensão de escoamento:	$f_y = 1000 \text{ MPa}$

## 5.2 DOSAGEM UTILIZADA NOS CONCRETOS

A dosagem empregada foi a mesma para as seis concretagens, sendo mostrada na tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Dosagem empregada nas concretagens

Traço (em massa)	Relação a/c	Consumo de cimento (kg/m <sup>3</sup> )
1:1,8:3	0,30	420

## 5.3 MOLDAGEM DOS TUBOS E CORPOS-DE-PROVA

Foram moldados tubos com 1500 mm de comprimento útil (L), diâmetro interno de 600mm e espessura da parede de 60mm na Fomber Industria e Comércio de Artefatos de Cimento Ltda, localizada na cidade de Conchal – SP.

As concretagens foram divididas em seis séries de 5 tubos:

- 1) **CS** - Concreto simples (sem armadura);
- 2) **CA** - Concreto armado (tela soldada);
- 3) **FS-20** - Concreto reforçado com fibras soltas ( $t = 20 \text{ kg/m}^3$ );
- 4) **FS-30** - Concreto reforçado com fibras soltas ( $t = 30 \text{ kg/m}^3$ ).
- 5) **FC-20** - Concreto reforçado com fibras coladas ( $t = 20 \text{ kg/m}^3$ );
- 6) **FC-30** - Concreto reforçado com fibras coladas ( $t = 30 \text{ kg/m}^3$ );

Obs. t – teor de fibras incorporado.

Para cada série de tubos, foram moldados 4 prismas (150 x 150 x 500 mm), a fim de determinar as tenacidades à flexão, de acordo com a Norma Japonesa JSCE – SF4 (1984).

De forma a controlar-se a resistência à compressão (NBR 5739/94) e à tração por compressão diametral (NBR 7222/83), foram moldados, para cada série de tubos, 10 corpos-de-prova cilíndricos (100 x 200 mm). A moldagem dos corpos-de-prova seguiu as instruções da NBR 5738/94 , sendo adensados em mesa vibratória. (figura 5.3)

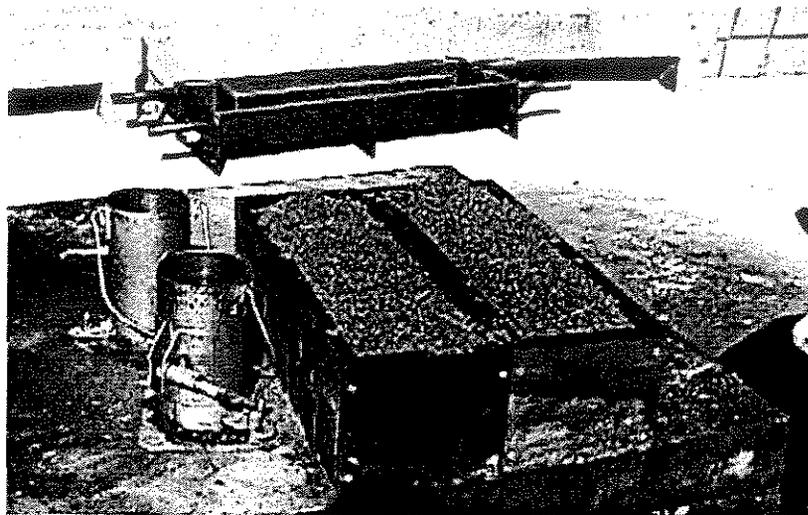


Figura 5.3 – Moldagem de corpos-de-prova cilíndricos e prismáticos.

A mistura do concreto, utilizando as fibras soltas, foi feita segundo os métodos convencionais, sendo as fibras o último componente a ser introduzido na mistura. Neste processo, a introdução foi realizada lentamente, de maneira a evitar a aglutinação (formação de “ouriços”) das fibras.

No caso das fibras coladas em pente, estas foram adicionadas juntamente com os agregados graúdos e uma porcentagem de água, antes da colocação dos materiais restantes da mistura. Com este procedimento, o efeito mecânico do atrito e o choque entre os agregados e as fibras auxiliou a separação e distribuição destas.

A mistura do concreto foi feita numa betoneira de eixo inclinado. Com o auxílio de uma caçamba, foi levado à máquina, onde realizou-se a moldagem dos tubos, através de vibração e compactação (figura 5.4).

A quantidade de tubos e corpos-de-prova moldados pode ser melhor visualizada na tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Quantificação de tubos e corpos-de-prova moldados

Série	Tubos	Prismas	CPs (cilíndricos)
CS	05	04	10
CA	05	04	10
FS-20	05	04	10
FS-30	05	04	10
FC-20	05	04	10
FC-30	05	04	10
<b>Total</b>	<b>30</b>	<b>24</b>	<b>60</b>

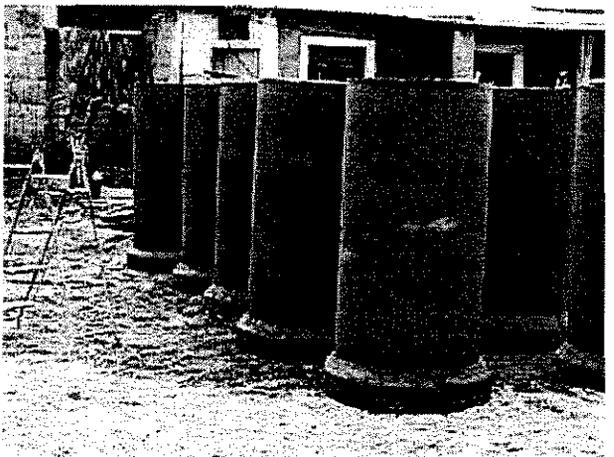
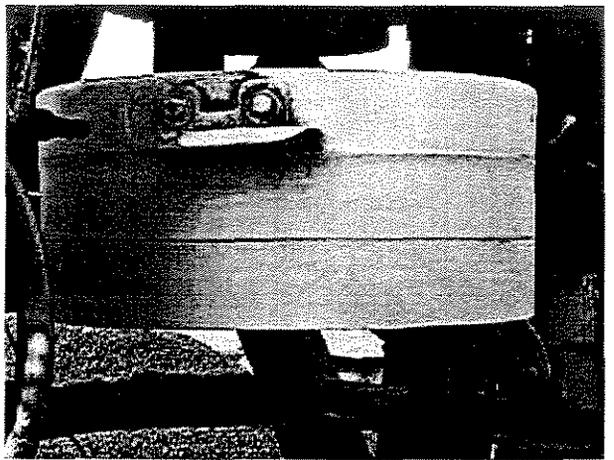
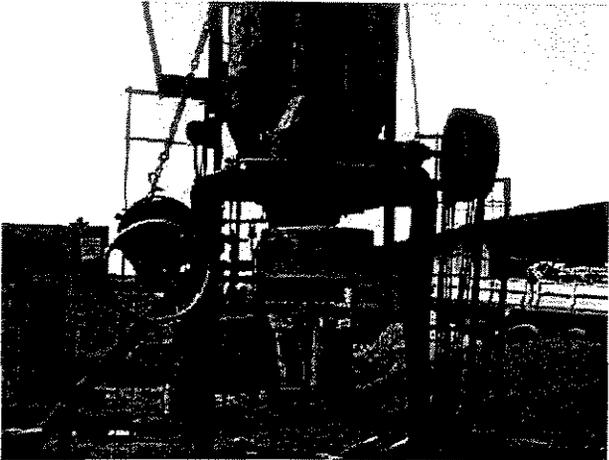
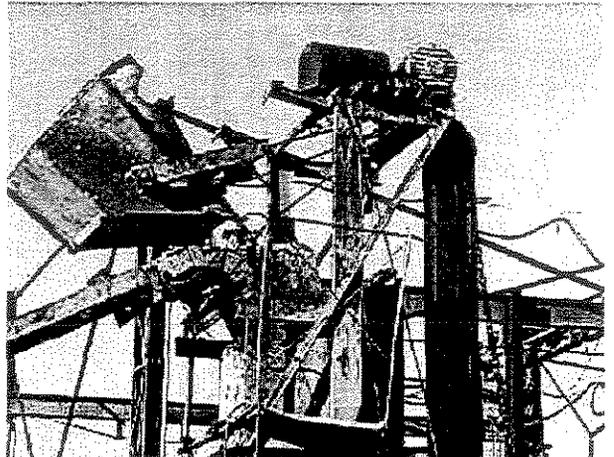
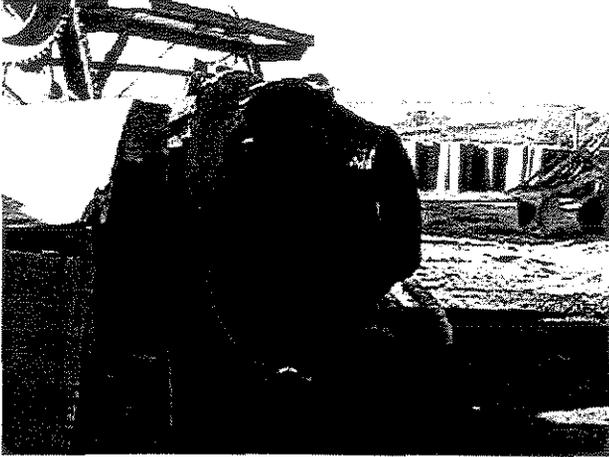


Figura 5.4 – Sistema de moldagem dos tubos.

## 5.4 AVALIAÇÃO DA TENACIDADE À FLEXÃO.

Como já foi citado anteriormente, a tenacidade é a mais importante característica dos compósitos reforçados com fibras de aço.

Sua avaliação é realizada por meio de ensaios de tração na flexão, com velocidade de deformação controlada, conforme recomendações de diversas normas internacionais. Neste trabalho optou-se pelo critério da Norma Japonesa JSCE SF-4.

Segundo este critério, a tenacidade à flexão dos concretos reforçados com fibras de aço é numericamente igual à área contida sob a curva carga x deslocamento vertical, para um deslocamento vertical máximo igual a  $L/150$ .

Na figura 5.5 é mostrado, esquematicamente a curva carga x deslocamento vertical e a forma de quantificação da tenacidade.

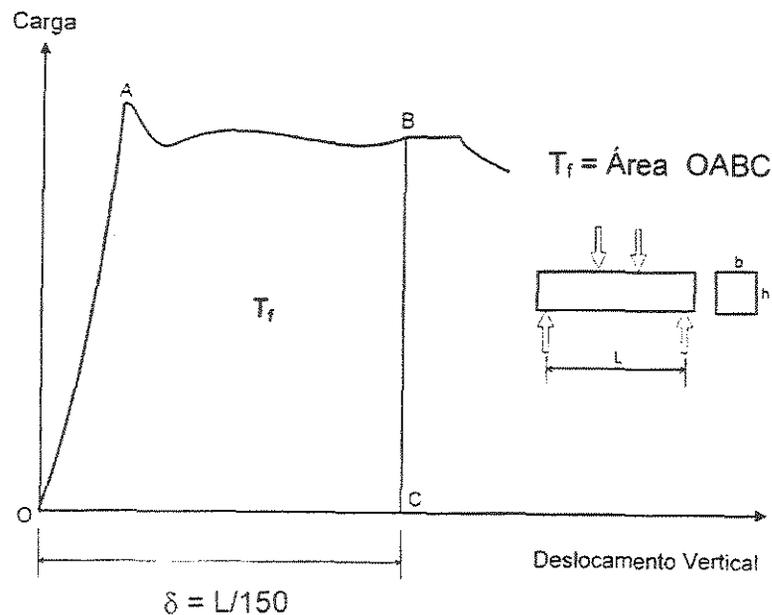


Figura 5.5 - Curva carga x deslocamento vertical (quantificação da tenacidade).  
(JSCE SF-4, 1984)

A figura 5.6 mostra, esquematicamente, como seria o comportamento de um corpo-de-prova, no ensaio de tração na flexão de um material elasto plástico perfeito.

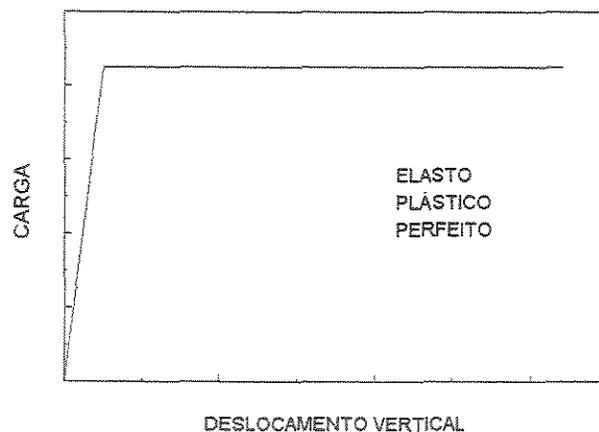


Figura 5.6 - Comportamento de um corpo-de-prova-ensaio de tração na flexão (material elasto plástico perfeito)

A figura 5.7 mostra o comportamento obtido nos ensaios de tração na flexão de corpos-de-prova prismáticos (equipamento com velocidade de deformação controlada).

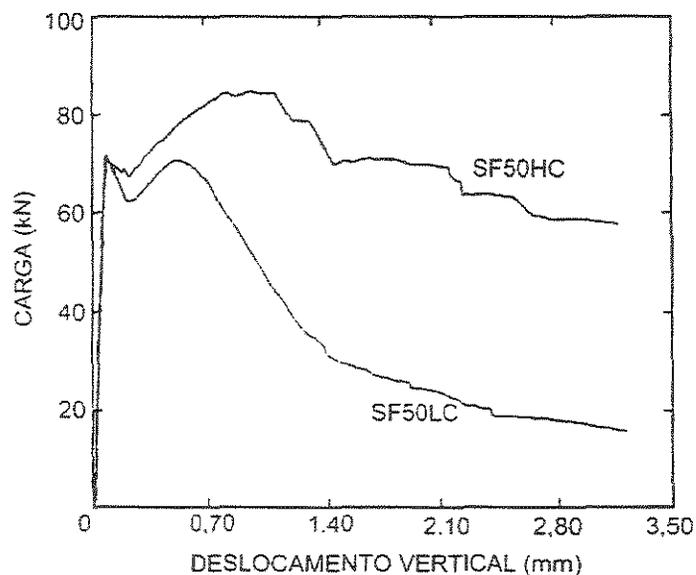


Figura 5.7- Comportamento de corpos-de-prova prismáticos de concreto reforçado com fibras de aço (ensaio de tração na flexão). (PINTO JR, MORAES e CARNIO, 1998)

Para se garantir uma maior acuidade no levantamento da curva de carga  $x$  deslocamento vertical, faz-se uso do controle eletrônico de deslocamento vertical através de um transdutor do tipo LVDT (Linear Variable Displacement Transducer). O LVDT deve ser apoiado num suporte denominado “yoke” (JSCE-SF4, 1984). Tal sistema vem sendo apontado como aquele de maior confiabilidade (BANTHIA e TROTTIER, 1995b), uma vez que o deslocamento vertical lido toma como referência o próprio corpo-de-prova.

A figura 5.8 mostra como é realizado o ensaio de tração na flexão de corpos-de-prova prismáticos, utilizando o yoke (JSCE-SF4, 1984), que consiste numa haste metálica horizontal apoiada nas extremidades dos prismas (apoios), onde é fixado um transdutor de sinal ligado a um aquisitor de dados, que registra as leituras de deslocamento vertical. Este ensaio é feito utilizando-se uma máquina com velocidade de deformação controlada.

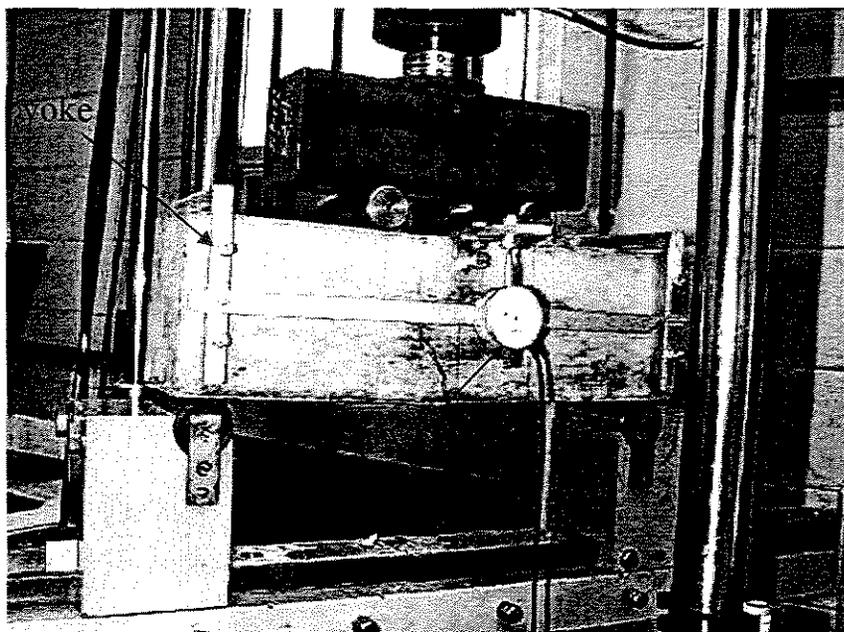


Figura 5.8 - Ensaio de tração na flexão – yoke (JSCE-SF4, 1984)

## 5.5 DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DIAMETRAL DE TUBOS DE CONCRETO (MÉTODOS DE ENSAIO)

Os métodos de ensaio para determinação da resistência à compressão diametral de tubos de concreto, prescrevem a mesma metodologia, no que se referem ao posicionamento do tubo e à aplicação da carga. (figura 5.9)

- medir o comprimento útil  $L$  do tubo;
- colocar o tubo deitado sobre apoios planos horizontais, dispostos paralela e simetricamente em relação ao seu eixo. Estes apoios consistem em sarrafos retos de madeira, de comprimento maior ou igual ao comprimento útil do tubo, afastados um do outro em uma distância igual a um décimo do diâmetro nominal do tubo;
- colocar ao longo da geratriz superior do tubo uma vigota reta de madeira, de comprimento tal que abranja o comprimento útil do tubo em ensaio;
- para evitar a localização de esforços em possíveis irregularidades da superfície do tubo, pode-se colocar uma camada de areia entre o tubo e a vigota;
- dispor o conjunto de modo que o ponto de aplicação da carga coincida com o meio do comprimento útil do tubo.

Nos ensaios de tubos de concreto simples (NBR 6583/87) e tubos de concreto simples para esgoto sanitário (NBR 8894/85), somente é determinada a carga de ruptura ou carga máxima atingida, expressa em kN/m, obtida dividindo-se a carga máxima, observada durante o ensaio, pelo comprimento útil do tubo ( $L$ ).

Já nos ensaios de tubos de concreto armado (NBR 9795/87) e tubos de concreto armado para esgoto sanitário (NBR 8891/85), são determinadas as cargas de fissura e de ruptura. A carga de fissura corresponde à carga no momento em que for verificado, em qualquer ponto do tubo em ensaio, fissura ou fissuras com 0,2 mm de abertura e 30 cm de comprimento.

A medida da abertura da fissura é realizada por meio de um calço padrão, feito de chapa de aço de 0,2 mm de espessura e 12 mm de largura, afilado na ponta para 2 mm de largura, com cantos arredondados e inclinação de 1 : 4, como ilustrado na figura 5.10.

Após a determinação da carga de fissura, deve-se prosseguir o ensaio até a obtenção da carga de ruptura.

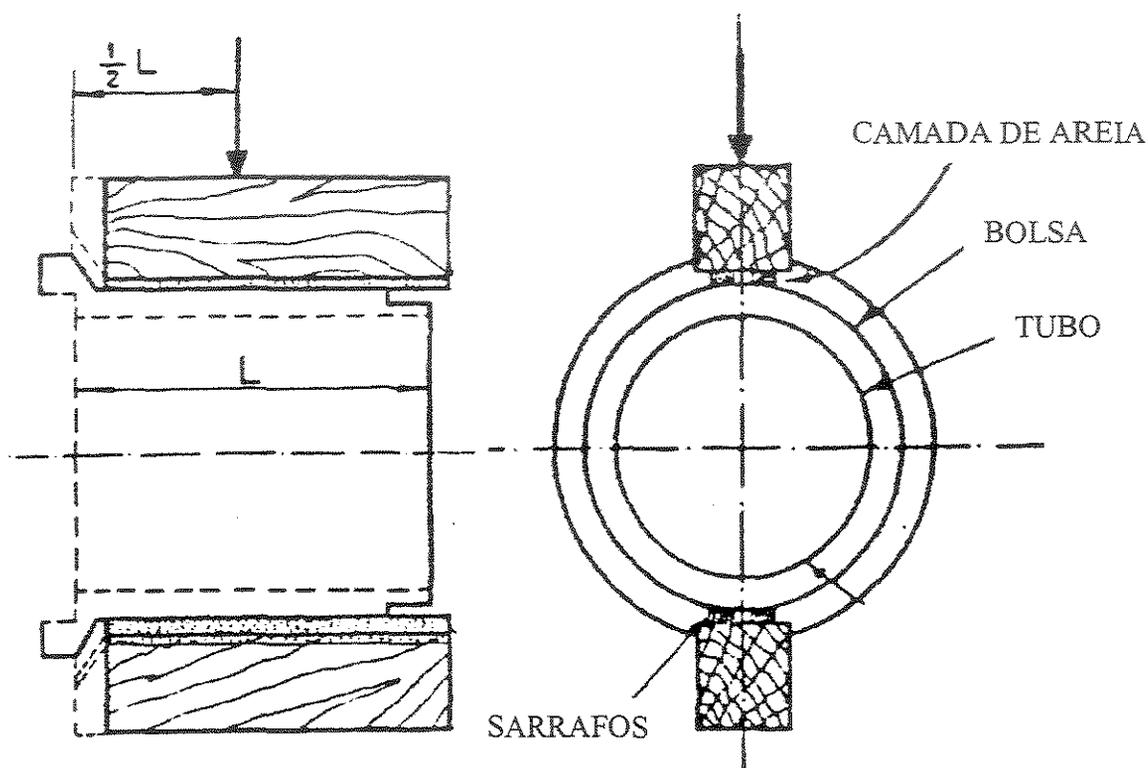


Figura 5.9 – Detalhes para execução do ensaio de compressão diametral. (NBR9795/87)

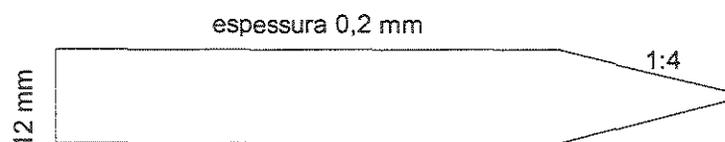


Figura 5.10 – Calço padrão para medida das fissuras. (NBR 9795/87)

## 5.6 DESENVOLVIMENTO DE ENSAIOS PRELIMINARES

Com o objetivo de verificar a influência da incorporação de fibras de aço nos concretos, e desenvolver uma metodologia para obtenção da medida do deslocamento vertical e da carga aplicada no ensaio de compressão diametral, foram realizados diversos ensaios preliminares, divididos em três etapas.

### 5.6.1 ETAPA 1 – TUBOS DE CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO (SOLTAS)

Inicialmente, foram ensaiados dois tubos de comprimento igual a 1000mm e diâmetro 600mm, reforçados com fibras soltas, variando seus teores, designados T1(1) e T2(1) - figura 5.11- e um tubo com comprimento igual a 1500mm, de igual diâmetro T3(1) - figura 5.12.

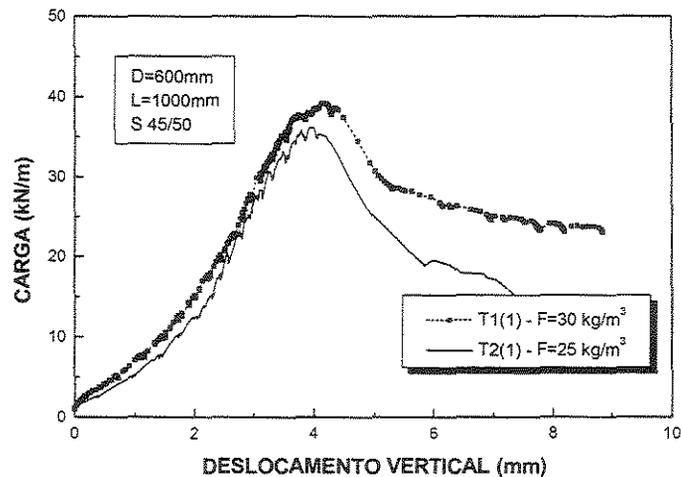


Figura 5.11– Ensaio de tubos com fibras soltas – L=1000 mm

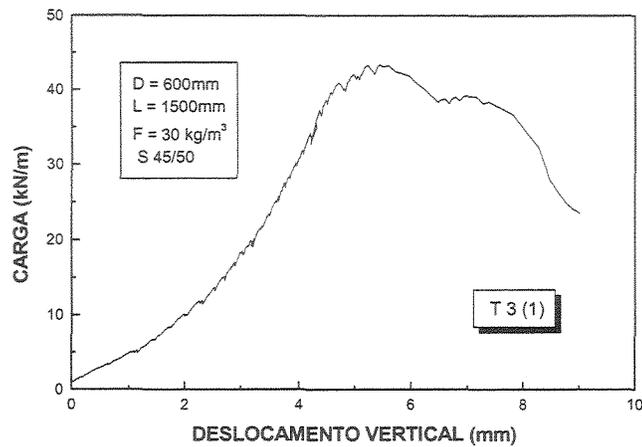


Figura 5.12 – Ensaio de tubos com fibras soltas – L=1500 mm

## 5.6.2 ETAPA 2 - TUBOS DE CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO (SOLTAS / COLADAS)

Nesta etapa, foram ensaiados tubos de comprimento de 1500mm e diâmetro 600mm, dois reforçados com fibras soltas (S 45/50), variando seus teores, designados T1(2) e T2(2) - figuras 5.13 e 5.14, e quatro tubos reforçados com fibras coladas (C 65/60), também variando os teores de fibra, denominados T3(2), T4(2), T5(2) e T6(2), mostrados nas fig 5.15 e 5.16.

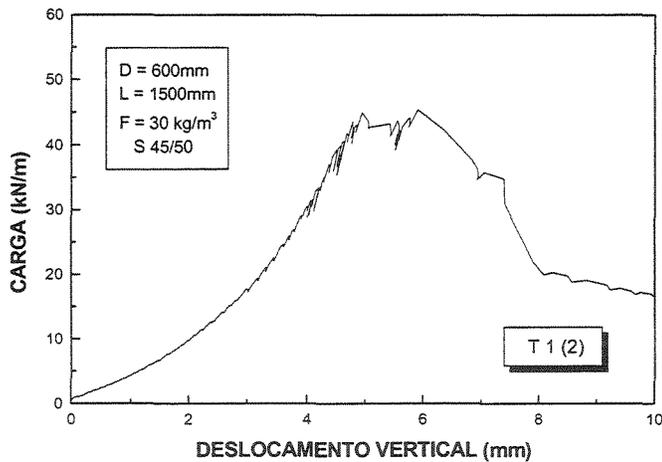


Figura 5.13 – Ensaio de tubos com fibras soltas –  $t=30 \text{ kg/m}^3$

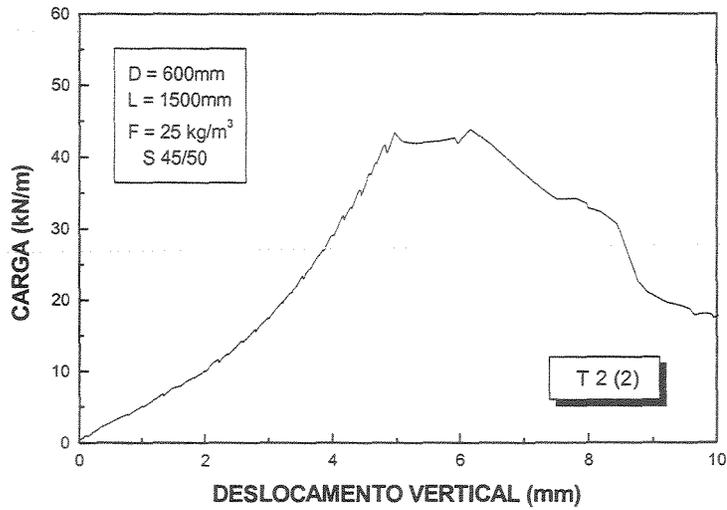


Figura 5.14 – Ensaio de tubos com fibras soltas –  $t=25 \text{ kg/m}^3$

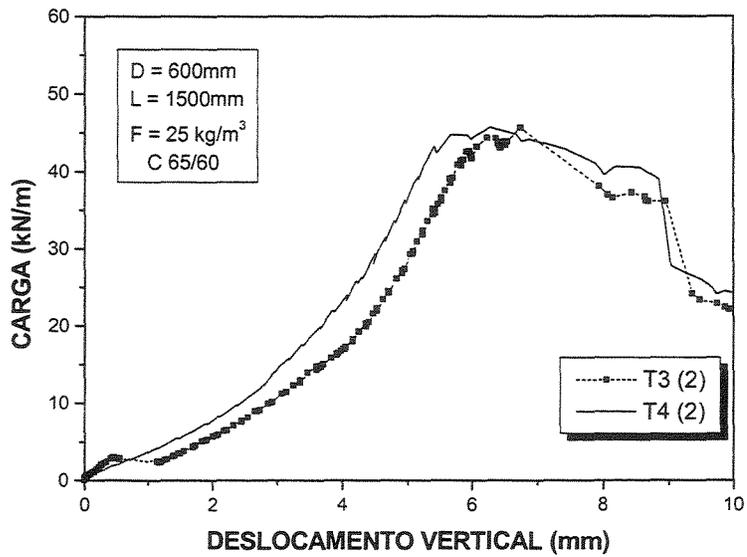


Figura 5.15 – Ensaio de tubos com fibras coladas –  $t=25 \text{ kg/m}^3$

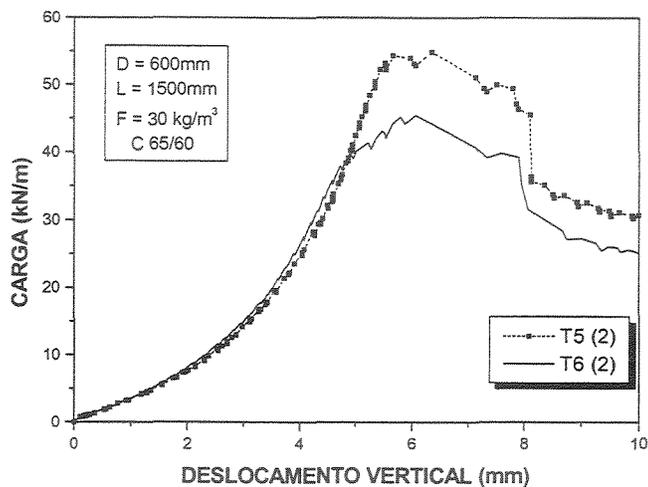


Figura 5.16 – Ensaio de tubos com fibras coladas –  $t=30\text{kg/m}^3$

### 5.6.3 ETAPA 3 - TUBOS DE CONCRETO ARMADO

Nesta fase, foram ensaiados dois tubos de concreto armado de 1500mm de comprimento e 1000mm de diâmetro, designados T1(3) e T2(3) – figuras 5.17 e 5.18 e dois tubos, também armados, com diâmetro de 800mm, denominados T3(3) e T4(3) -figuras 5.19 e 5.20.

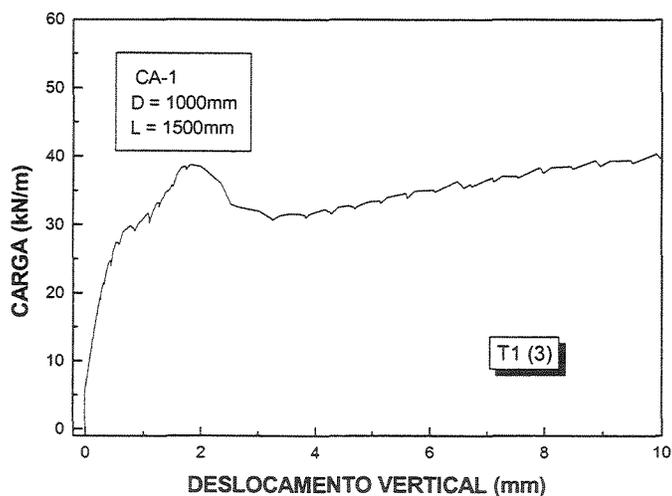


Figura 5.17 – Ensaio de tubos em concreto armado –  $D=1000\text{mm}$  - T1(3).

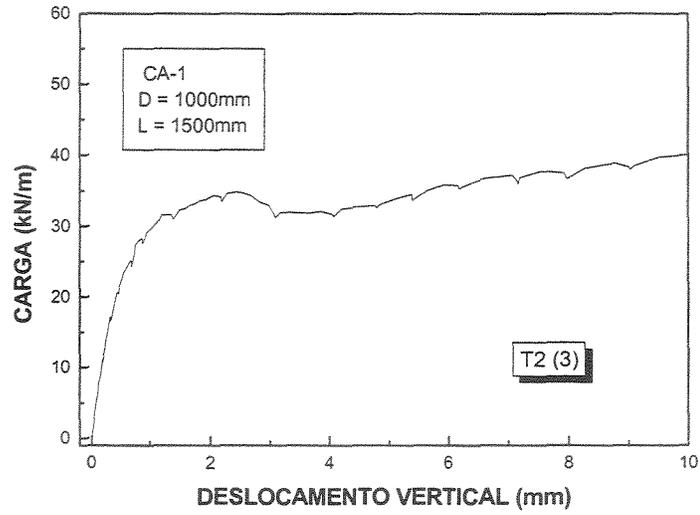


Figura 5.18 – Ensaio de tubos em concreto armado – D=1000mm - T2(3)

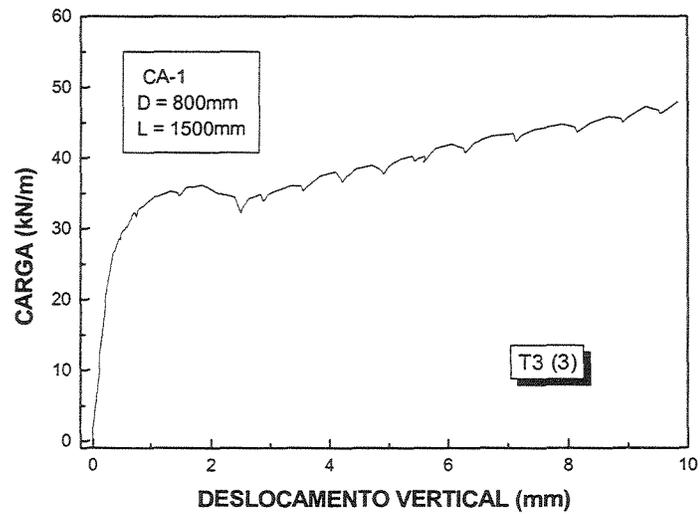


Figura 5.19 – Ensaio de tubos em concreto armado – D=800mm - T3(3).

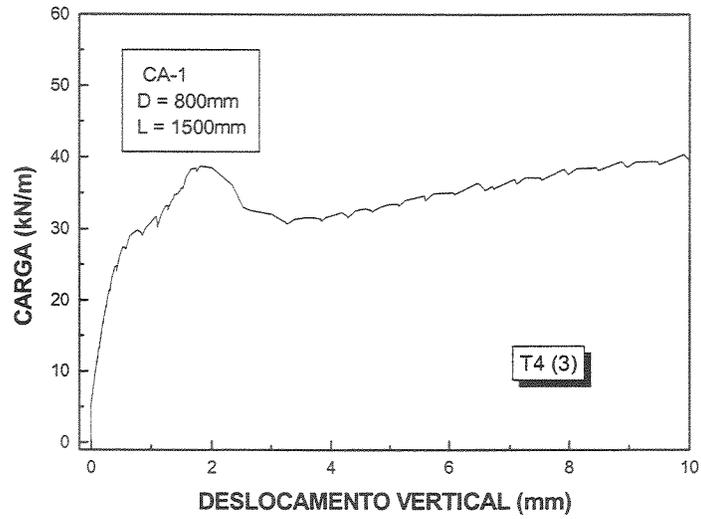


Figura 5.20 – Ensaio de tubos em concreto armado – D=800mm – T4(3).

#### 5.6.4 DOCUMENTAÇÃO FOTOGRÁFICA

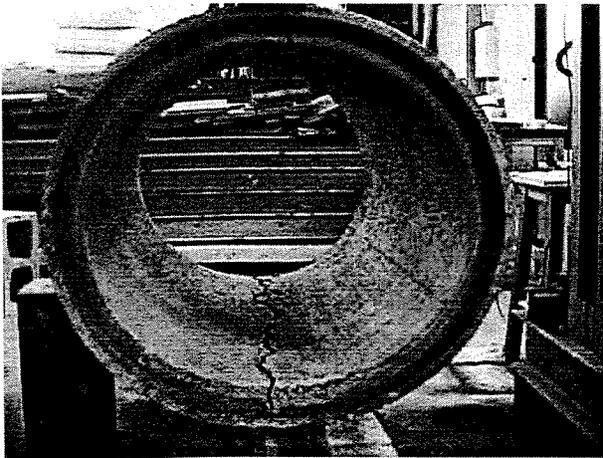


Figura 5.21 – Tubo T1(1) com fibras soltas  
L=1000 mm

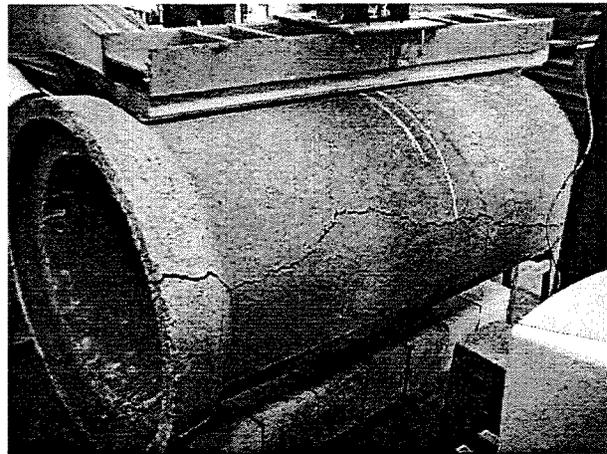


Figura 5.22 – Tubo T3(1) com fibras soltas  
L=1500 mm

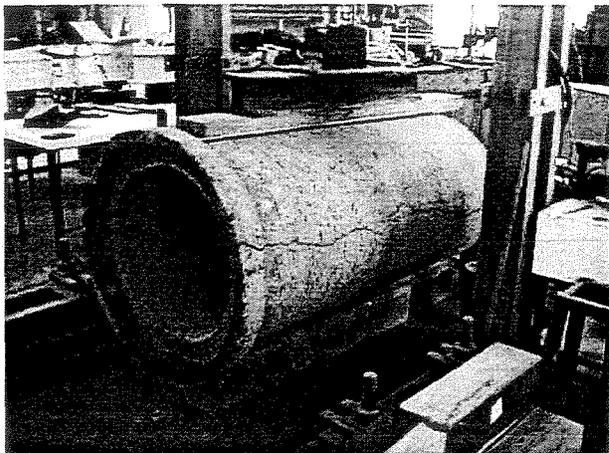


Figura 5.23 – Tubo T1(2) com fibras soltas  
L=1500 mm

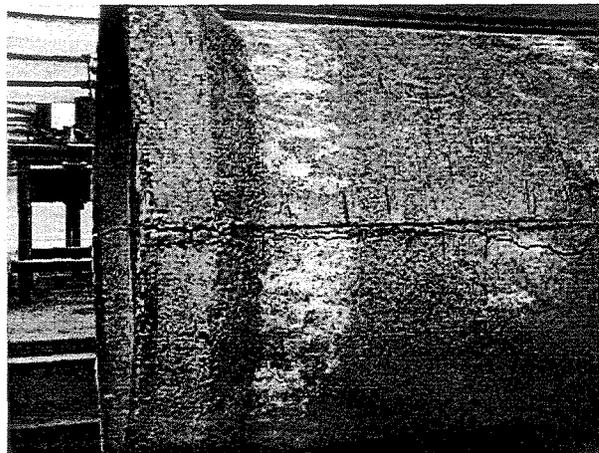


Figura 5.24 – Tubo T4(2) com fibras coladas  
L=1500 mm

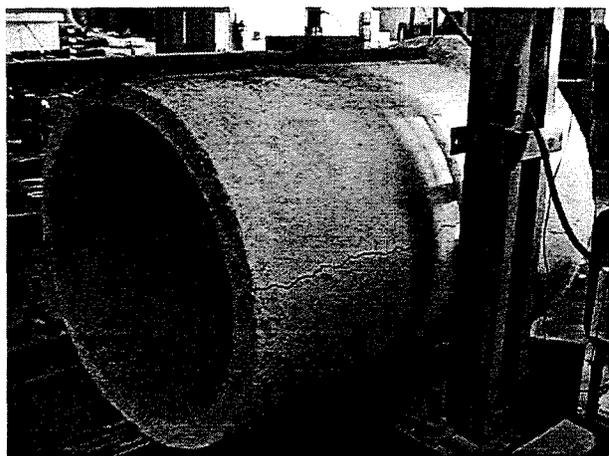


Figura 5.25 – Tubo T1(3) em concreto armado  
L=1500 mm e D=1000mm

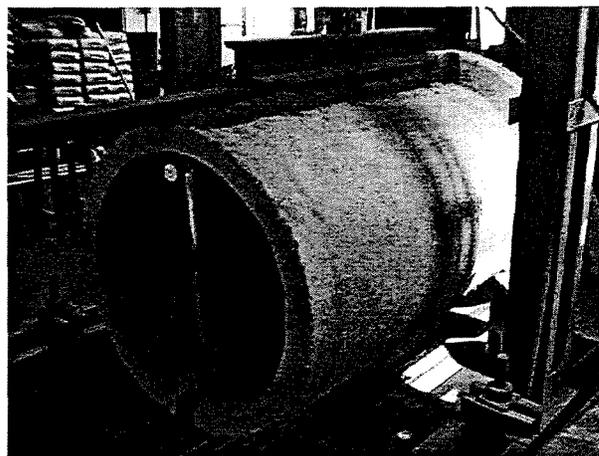


Figura 5.26 – Tubo T3(3) em concreto armado  
L=1500 mm e D=800mm

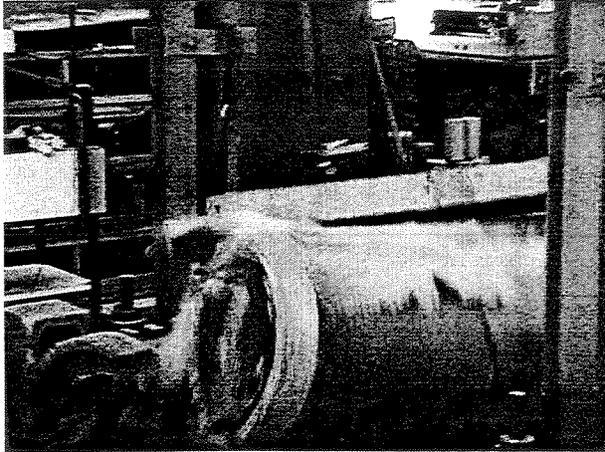


Figura 5.27 – Tubo em concreto simples – instante da ruptura.

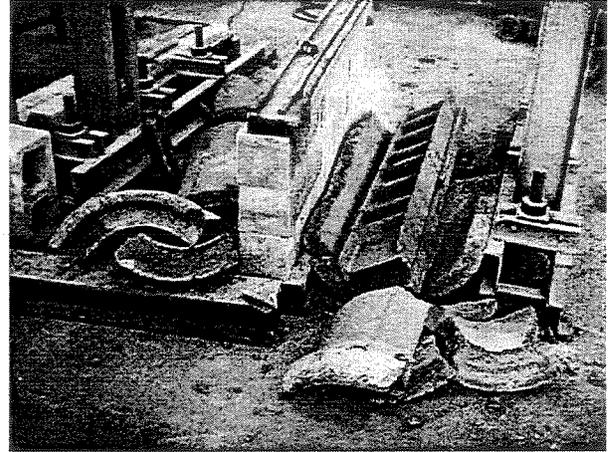


Figura 5.28 – Tubo em concreto simples – após a ruptura.

### 5.6.5 CONCLUSÕES PARCIAIS

Nos primeiros ensaios, evidenciou-se a influência da incorporação de fibras de aço no concreto, demonstrando um comportamento dúctil do compósito. Ocorreu também um incremento da tenacidade, com o aumento do teor de fibras incorporado no concreto (figura 5.11).

Com relação à medida do deslocamento vertical nos ensaios das etapas 1 e 2, o transdutor registrou o deslocamento do tubo, juntamente com a acomodação da borracha colocada no apoio da geratriz inferior (figura 5.29), já nos ensaios da terceira etapa, a forma de fixação foi alterada (figura 5.30), proporcionando a aquisição real do deslocamento das paredes do tubo, que ocorre da geratriz superior até a inferior.

O dispositivo adotado teve por finalidade excluir deformações externas do sistema de apoios, funcionando semelhantemente ao dispositivo “yoke”, que é empregado nos ensaios de flexão para determinação da tenacidade.

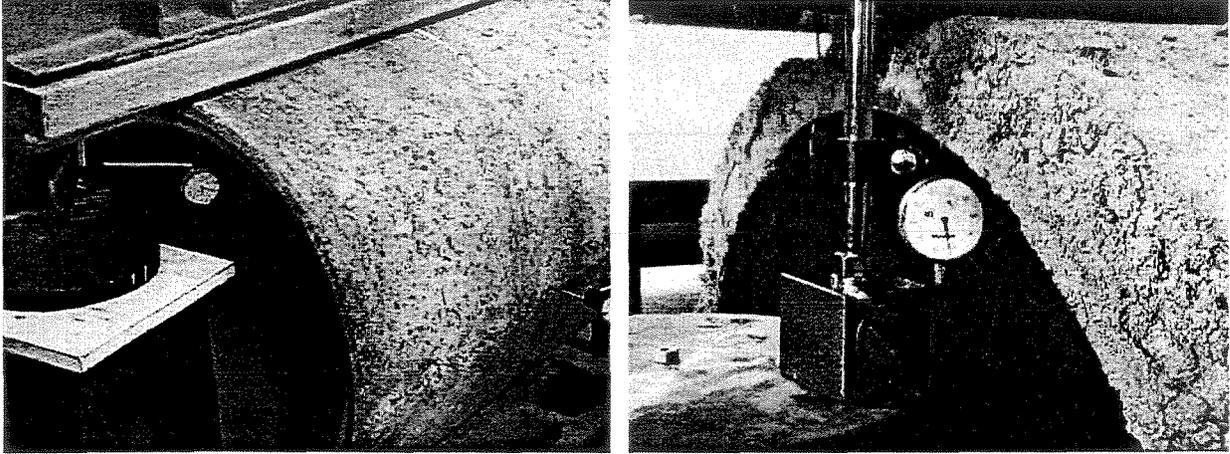


Figura 5.29 – Detalhe da fixação do transdutor de deslocamento usada nas etapas 1 e 2

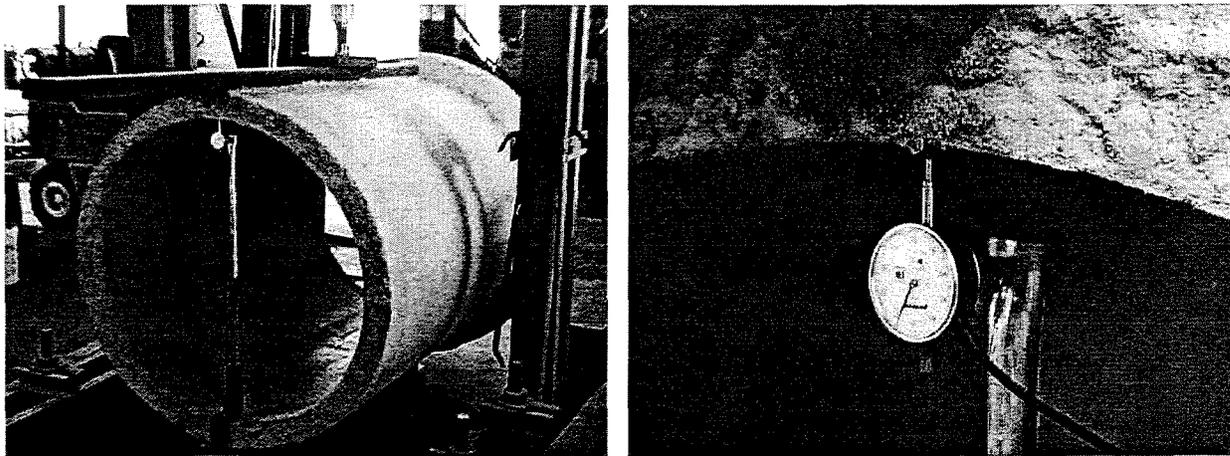


Figura 5.30 – Detalhe da fixação do transdutor de deslocamento usada na etapa 3

## **6 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS**

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos nos ensaios realizados para desenvolvimento do Programa Experimental, englobando a determinação da:

- Resistência à compressão axial (corpos-de-prova cilíndricos – 100x200mm);
- Resistência à tração na compressão diametral (corpos-de-prova cilíndricos – 100x200mm);
- Resistência à tração na flexão – Tenacidade (corpos-de-prova prismáticos – 150x150x500mm);
- Resistência à compressão diametral em tubos de concreto simples, armado e reforçado com fibras de aço (DN = 600mm e L = 1500mm).

### **6.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL**

Os resultados obtidos no ensaio de determinação da resistência à compressão axial dos diversos corpos-de-prova cilíndricos (100x200mm) moldados, retirados das concretagens realizadas para a fabricação dos tubos de concreto simples, armados e reforçados com fibras de aço, são apresentados nas tabelas 6.1, 6.2 e 6.3, e comparados na figura 6.1.

Tabela 6.1- Resistência à compressão axial (tubos em concreto simples e armados)

Tubos	CP	Carga	Resistência	Valor	Desvio
		Ruptura (kN)	Compressão (MPa)	Médio (MPa)	Relativo (%)
CS	1	305,0	38,8	<b>64,3</b>	<b>39,7</b>
	2	555,0	70,7		
	3	560,0	71,3		
	4	615,0	78,3		
	5	491,0	62,5		
CA	1	515,0	65,6	<b>69,0</b>	<b>15,5</b>
	2	458,0	58,3		
	3	615,0	78,3		
	4	505,0	64,3		
	5	615,0	78,3		

Tabela 6.2- Resistência à compressão axial (tubos reforçados com fibras soltas)

Tubos	CP	Carga	Resistência	Valor	Desvio
		Ruptura (kN)	Compressão (MPa)	Médio (MPa)	Relativo (%)
FS-20	1	290,0	36,9	<b>62,9</b>	<b>41,3</b>
	2	320,0	40,7		
	3	640,0	81,5		
	4	600,0	76,4		
	5	620,0	78,9		
FS-30	1	655,0	83,4	<b>67,3</b>	<b>31,9</b>
	2	360,0	45,8		
	3	370,0	47,1		
	4	670,0	85,3		
	5	590,0	75,1		

Tabela 6.3- Resistência à compressão axial (tubos reforçados com fibras coladas)

Tubos	CP	Carga Ruptura (kN)	Resistência Compressão (MPa)	Valor Médio (MPa)	Desvio Relativo (%)
FC-20	1	400,0	50,9	69,8	27,1
	2	570,0	72,6		
	3	610,0	77,7		
	4	630,0	80,2		
	5	530,0	67,5		
FC-30	1	440,0	56,0	61,6	32,3
	2	530,0	67,5		
	3	640,0	81,5		
	4	400,0	50,9		
	5	410,0	52,2		

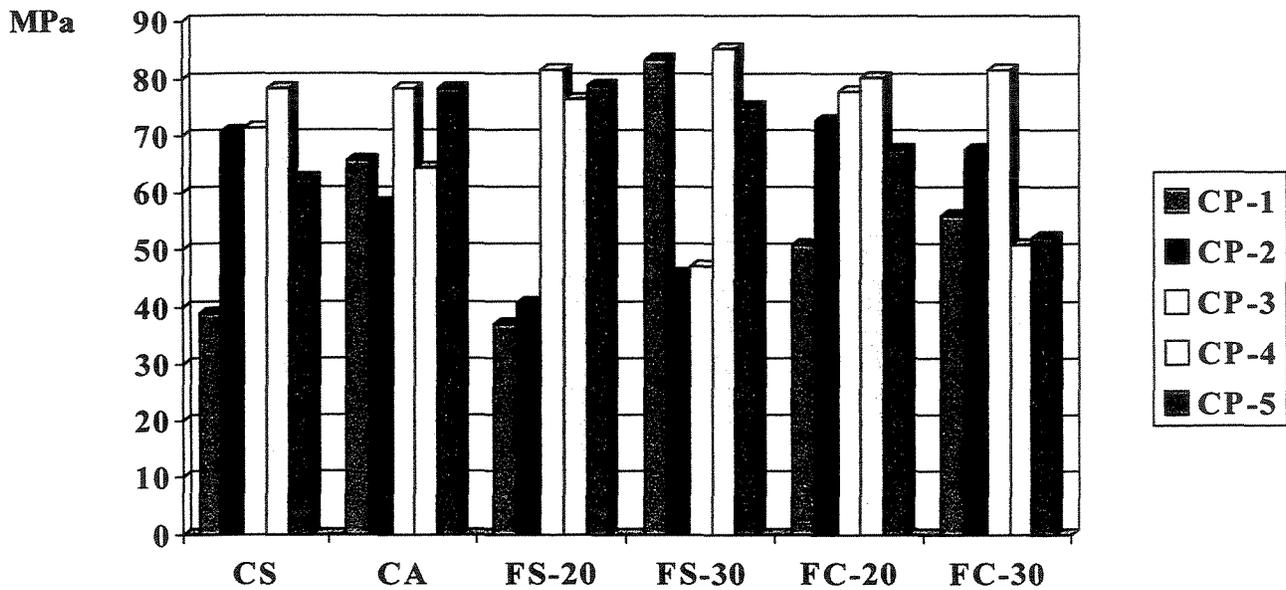


Figura 6.1 – Resistência à compressão axial (corpos-de-prova cilíndricos)

## 6.2 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA COMPRESSÃO DIAMETRAL

Nas tabelas 6.4, 6.5 e 6.6 são mostrados os resultados obtidos no ensaio de determinação da resistência à tração na compressão diametral dos corpos-de-prova cilíndricos, retirados dos concretos utilizados nos tubos simples, armados e reforçados com fibras de aço.

Tabela 6.4- Resistência à tração na compressão diametral (tubos simples e armados)

Tubos	CP	Carga Ruptura (kN)	Resistência Tração (MPa)	Valor Médio (MPa)	Desvio Relativo (%)
CS	1	185,0	5,89	5,07	16,2
	2	150,0	4,77		
	3	142,0	4,52		
	4	160,0	5,09		
	5	160,0	5,09		
CA	1	180,0	5,72	5,01	14,2
	2	135,0	4,30		
	3	155,0	4,93		
	4	158,0	5,03		
	5	160,0	5,09		

Tabela 6.5- Resistência à tração na compressão diametral (tubos com fibras soltas)

Tubos	CP	Carga	Resistência	Valor	Desvio
		Ruptura (kN)	Tração (MPa)	Médio (MPa)	Relativo (%)
<b>FS-20</b>	1	160,0	5,09	<b>4,94</b>	<b>15,6</b>
	2	141,0	4,49		
	3	165,0	5,25		
	4	131,0	4,17		
	5	180,0	5,72		
<b>FS-30</b>	1	175,0	5,57	<b>5,39</b>	<b>13,7</b>
	2	191,0	6,08		
	3	170,0	5,41		
	4	146,0	4,65		
	5	165,0	5,25		

Tabela 6.6- Resistência à tração na compressão diametral (tubos com fibras coladas)

Tubos	CP	Carga	Resistência	Valor	Desvio
		Ruptura (kN)	Tração (MPa)	Médio (MPa)	Relativo (%)
<b>FC-20</b>	1	180,0	5,73	<b>5,20</b>	<b>19,2</b>
	2	141,0	4,88		
	3	176,0	5,60		
	4	132,0	4,20		
	5	175,0	5,57		
<b>FC-30</b>	1	175,0	5,57	<b>5,29</b>	<b>21,2</b>
	2	180,0	5,72		
	3	190,0	6,05		
	4	155,0	4,93		
	5	131,0	4,17		

Os resultados obtidos nos ensaios de tração na compressão diametral são comparados na figura 6.2.

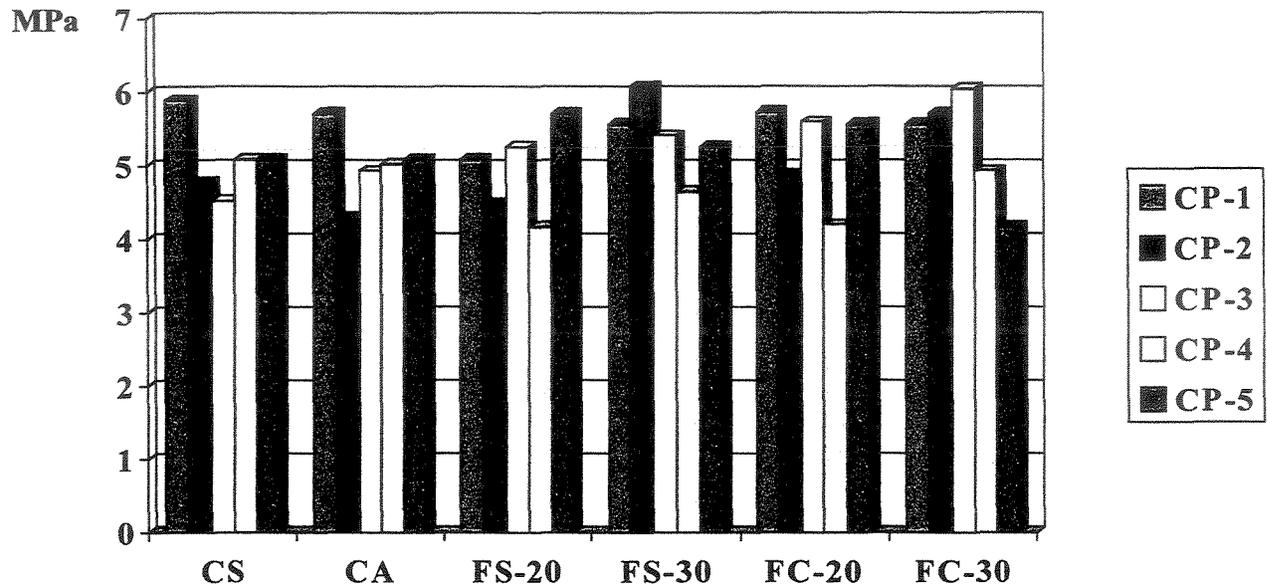


Figura 6.2 – Resistência à tração na compressão diametral (corpos-de-prova cilíndricos)

### 6.3 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO (PRISMAS)

As curvas carga x deslocamento vertical obtidas nos ensaios de tração na flexão em prismas, estão apresentadas nas figuras 6.3,6.4,6.5 e 6.6.

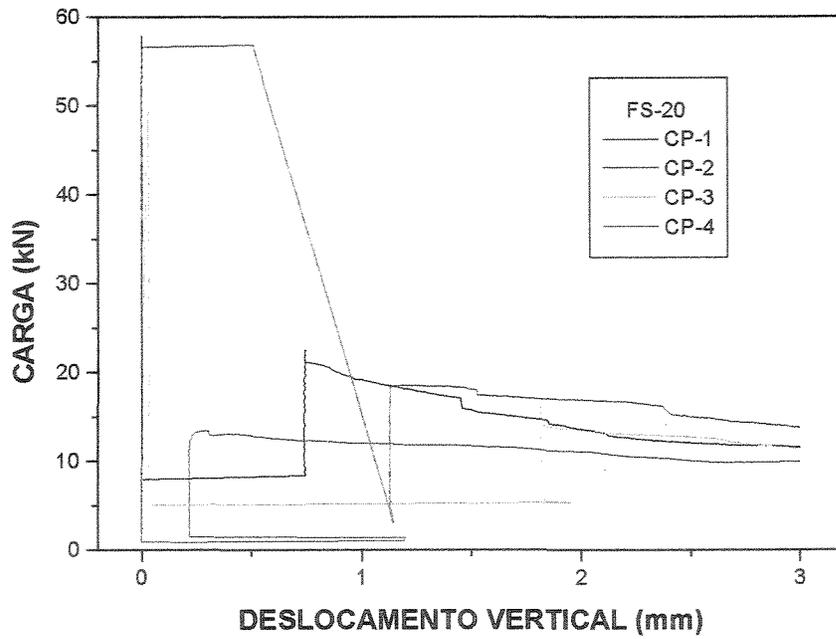


Figura 6.3-Curvas carga x deslocamento vertical – FS-20

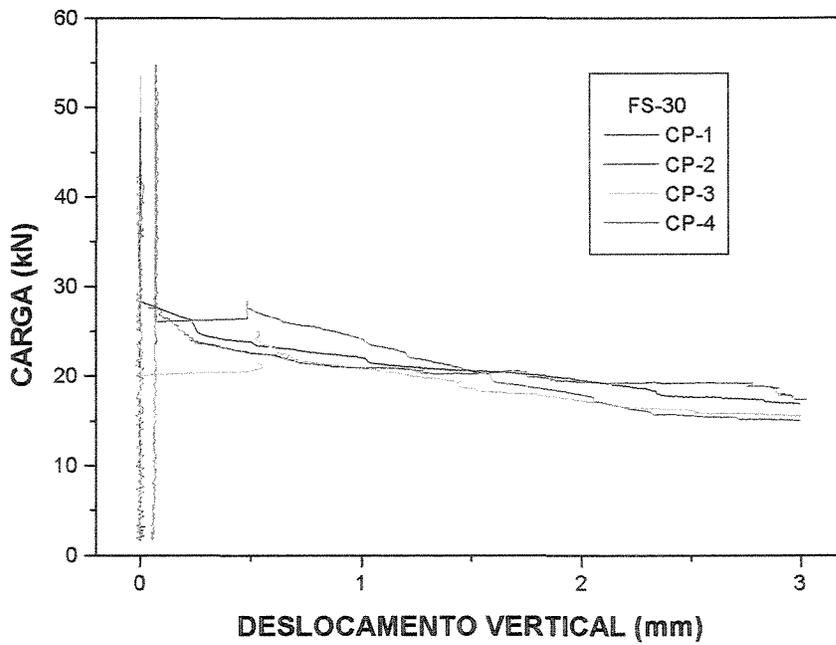


Figura 6.4-Curvas carga x deslocamento vertical – FS-30

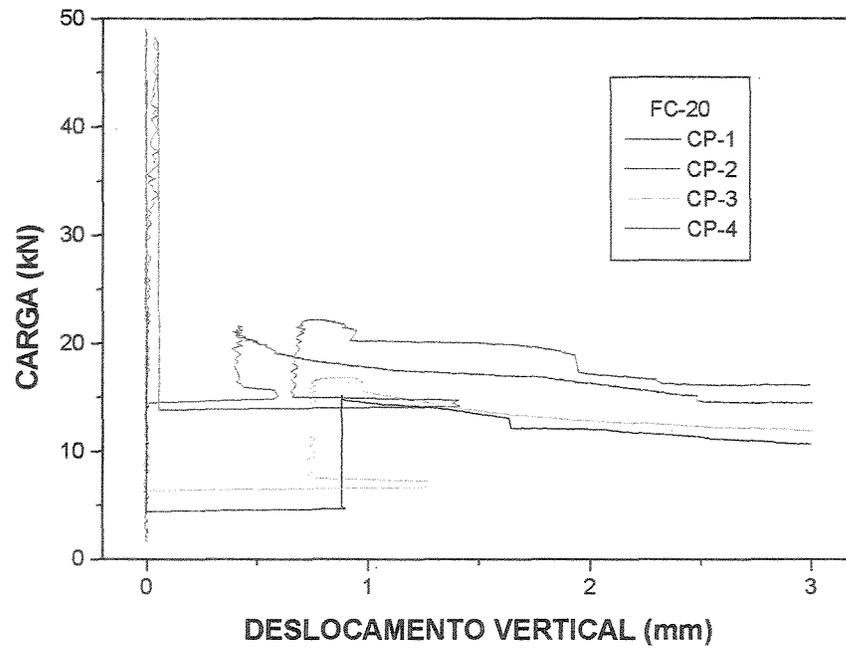


Figura 6.5-Curvas carga x deslocamento vertical – FC-20

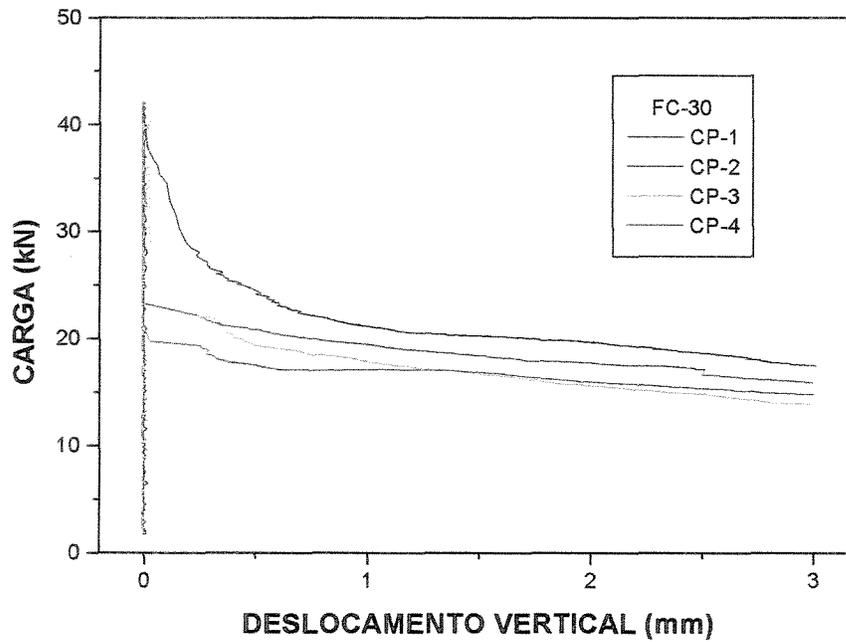


Figura 6.6-Curvas carga x deslocamento vertical – FC-30

## 6.4 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DIAMETRAL EM TUBOS

Nas figuras 6.7, 6.8 e 6.9 são apresentadas as curvas médias obtidas nos ensaios de compressão diametral, mostrando os valores de carga e os valores de deslocamento vertical que ocorreram durante os ensaios. Os resultados individuais são apresentados no Anexo 3.

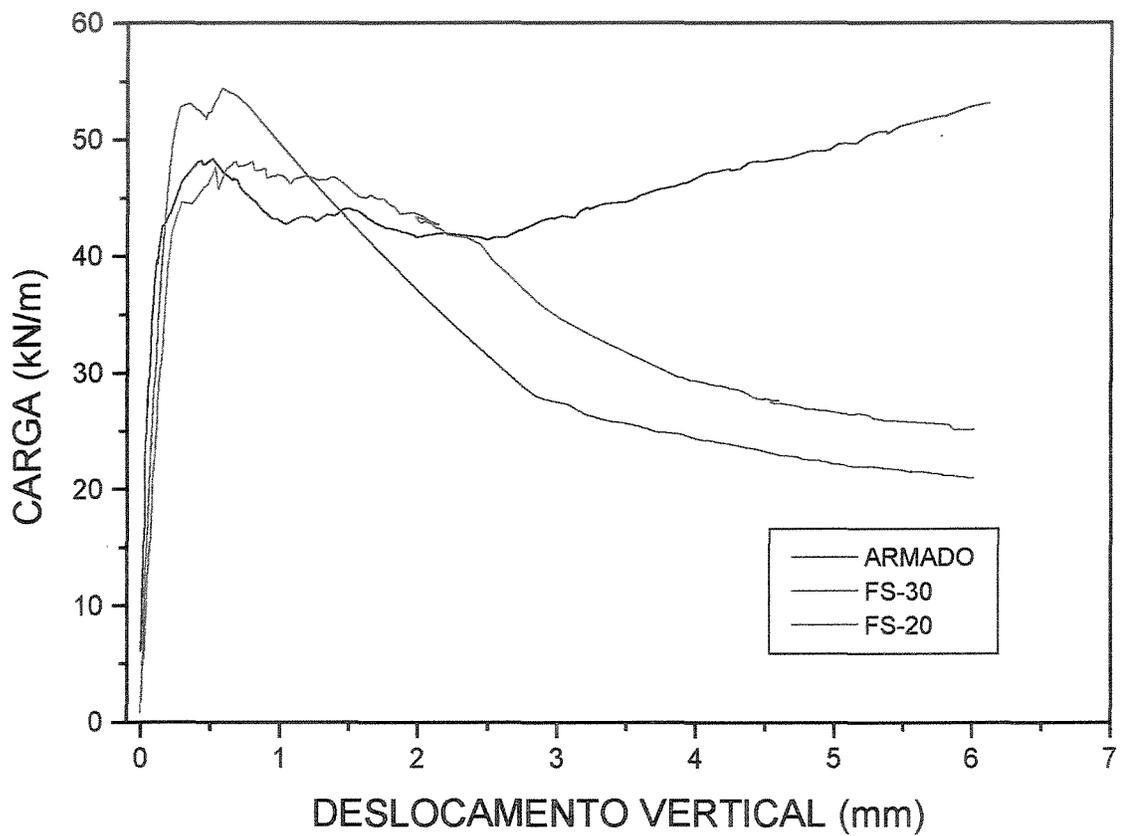


Figura 6.7-Curvas médias dos ensaios de tubos armados e tubos com fibras soltas.

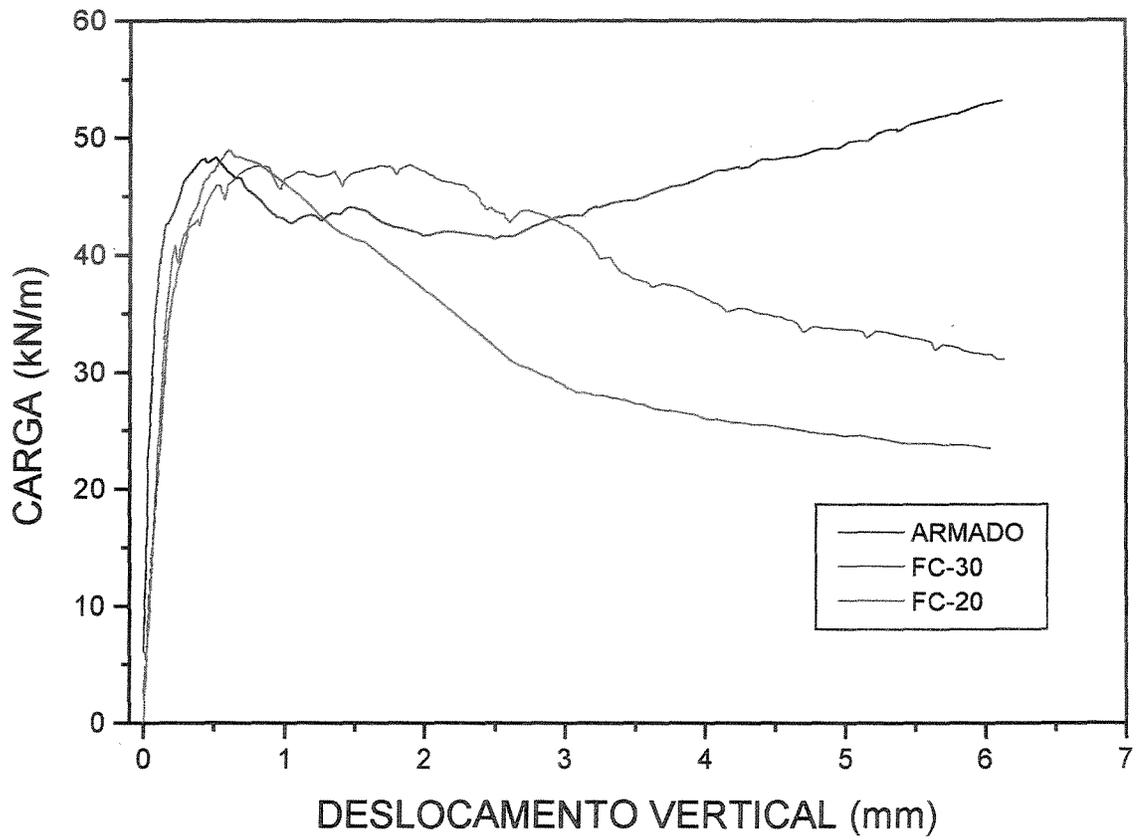


Figura 6.8-Curvas médias dos ensaios de tubos armados e tubos com fibras coladas.

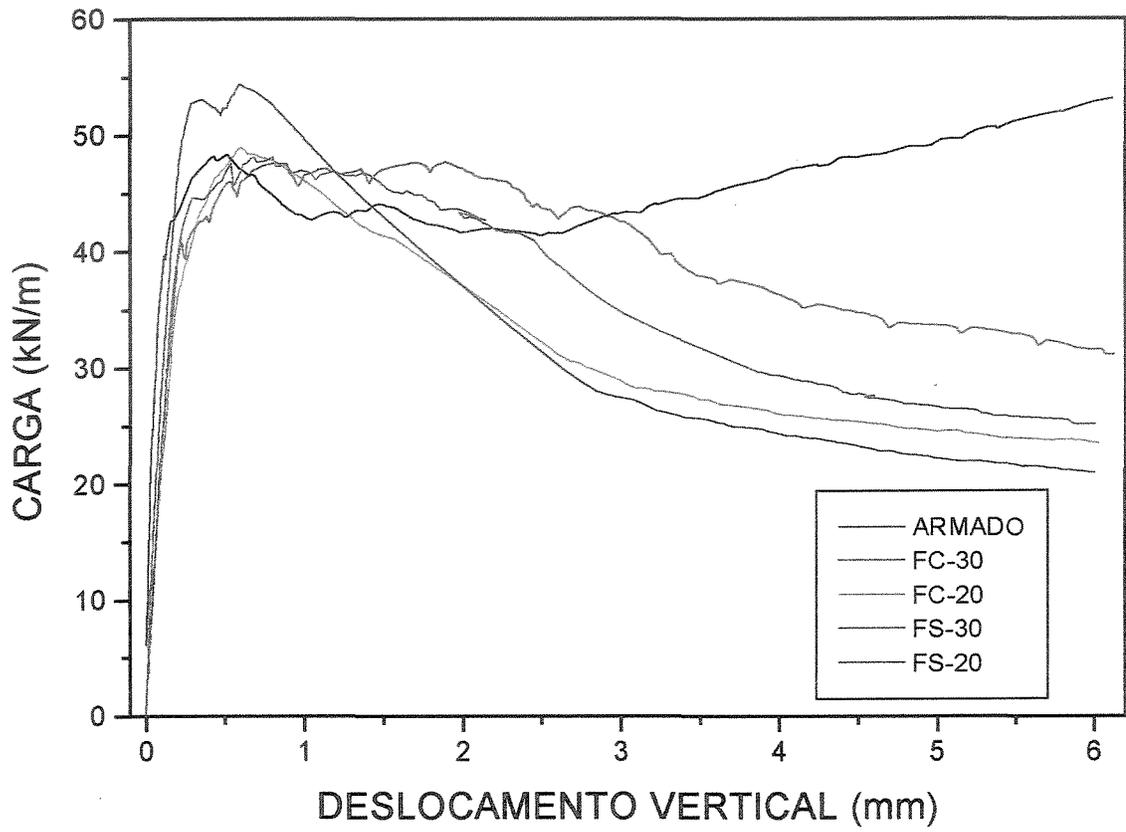


Figura 6.9-Curvas médias dos ensaios de tubos armados e tubos com fibras.

Os valores de tenacidade obtidos nas curvas carga x deslocamento vertical, são apresentados na tabela 6.7, e posteriormente são comparados na figura 6.10.

Tabela 6.7-Valores de tenacidade para os deslocamentos de 2, 4 e 6mm.

TENACIDADE (kN.mm/m)					
Deslocamentos	CA	FS-20	FS-30	FC-20	FC-30
2mm	87,85	90,37	87,63	90,91	87,69
4mm	176,50	148,84	158,80	142,10	171,37
6mm	278,86	192,38	211,76	191,98	242,05

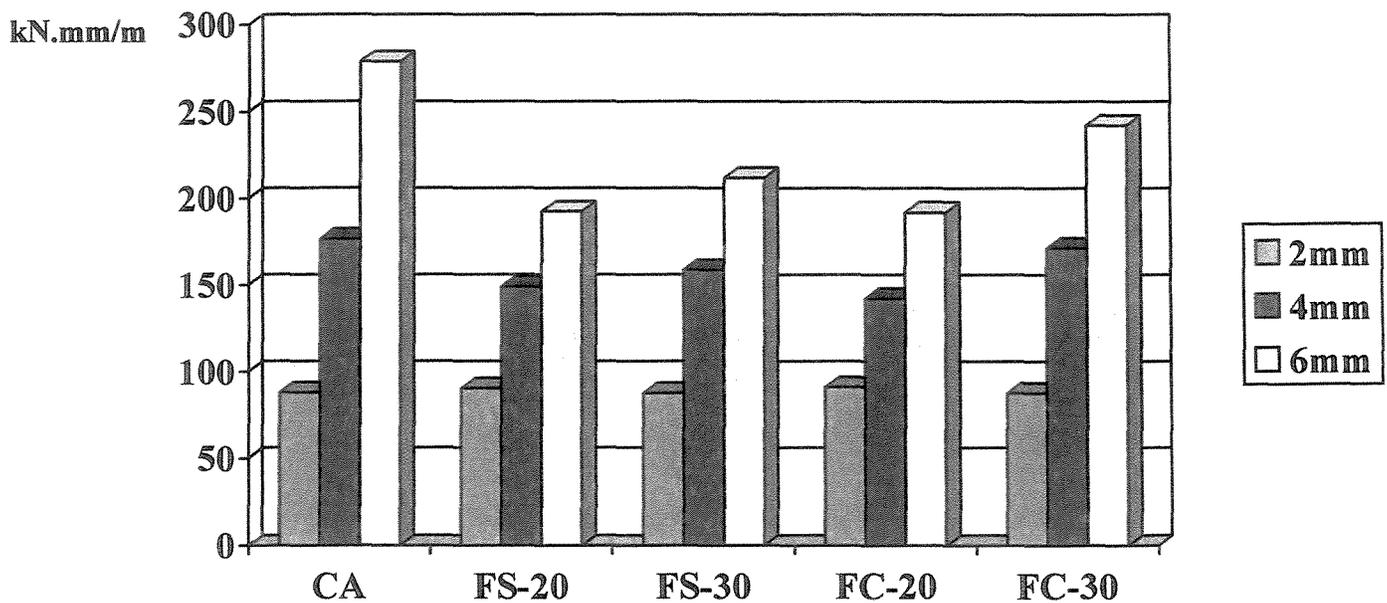


Figura 6.10 - Valores de tenacidade para os deslocamentos de 2, 4 e 6mm.

As cargas de fissura alcançadas nos ensaios de compressão diametral em tubos estão apresentadas na figura 6.11. Na série FS-20 foram realizados apenas 4 ensaios, pois o CP-5 quebrou durante o transporte.

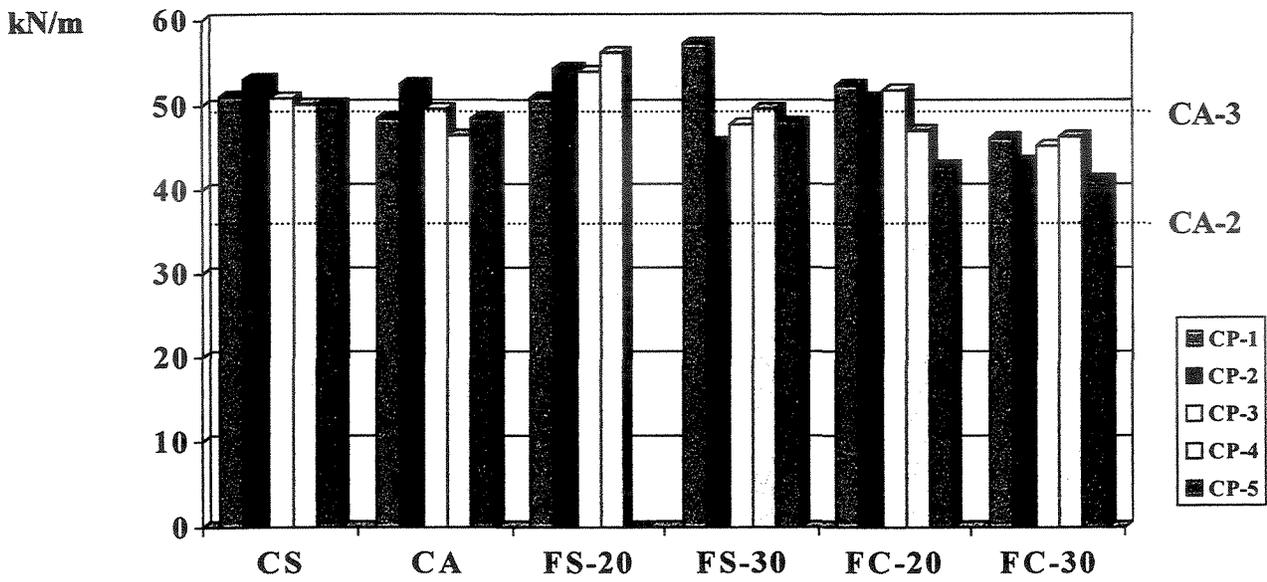


Figura 6.11 – Cargas de fissura dos tubos ensaiados.

## 6.4.1 DOCUMENTAÇÃO FOTOGRÁFICA

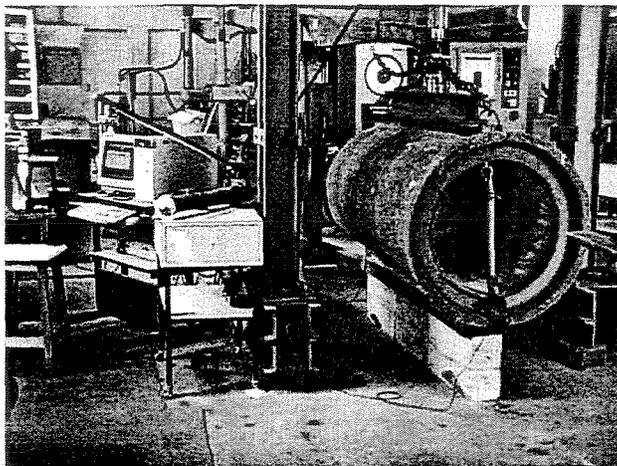


Figura 6.12 – Vista geral do ensaio de compressão diametral



Figura 6.13 – Posicionamento dos transdutores de deslocamento vertical

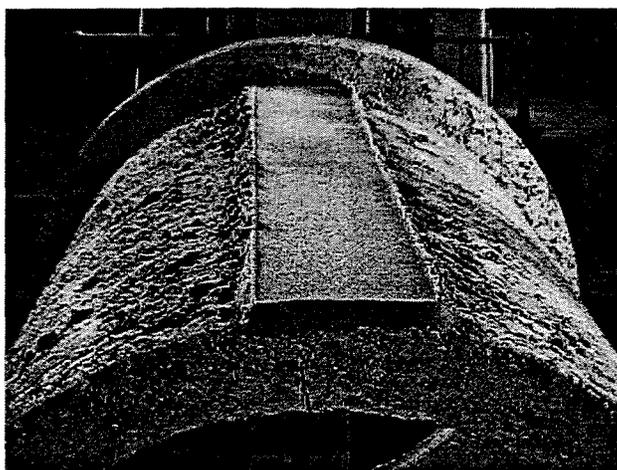


Figura 6.14 – Camada de areia usada para regularização da superfície do tubo

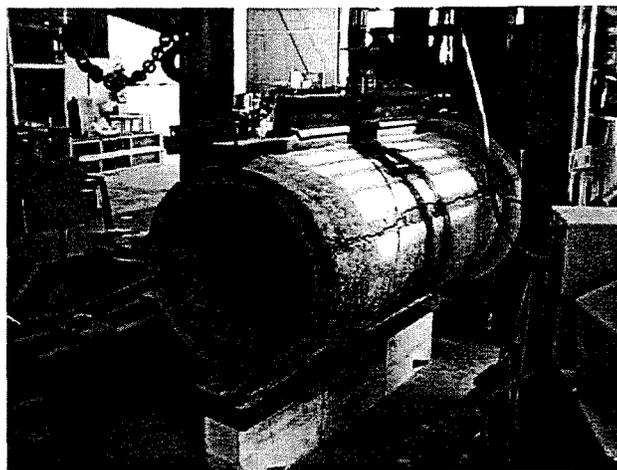


Figura 6.15 – Aparelhos de apoio e aplicação da carga ao longo do comprimento do tubo

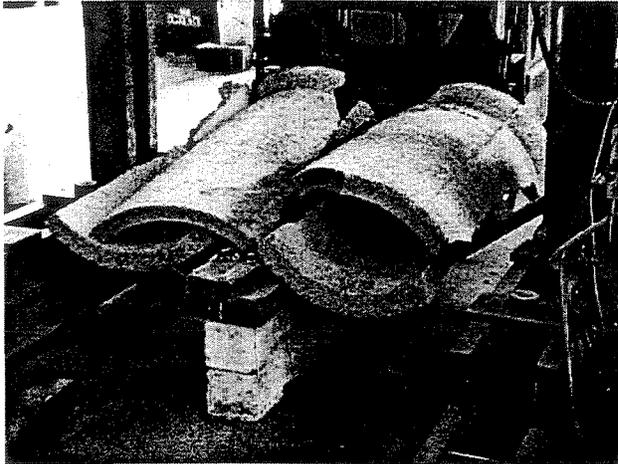


Figura 6.16 – Tubo CS (concreto simples) –  
Detalhe da ruptura

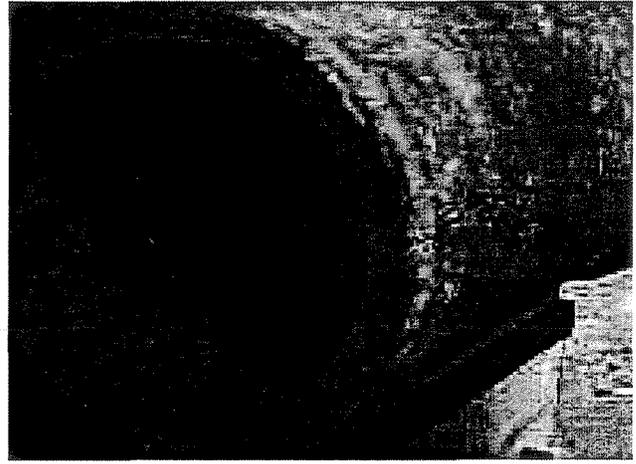


Figura 6.17 – Tubo FC-30 (fibras coladas) –  
Fissura longitudinal externa

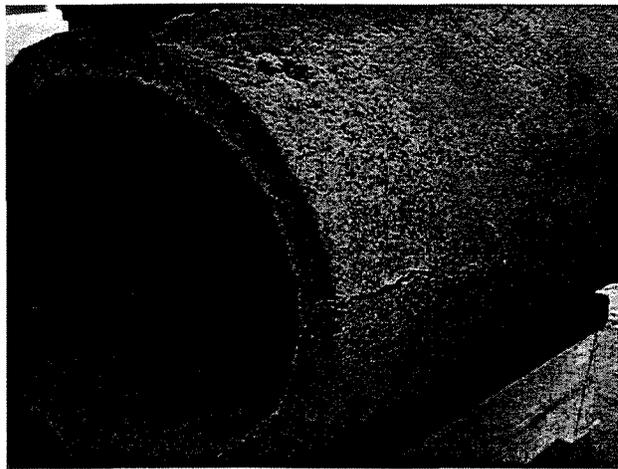


Figura 6.18 – Tubo CA (concreto armado) –  
Fissura longitudinal externa

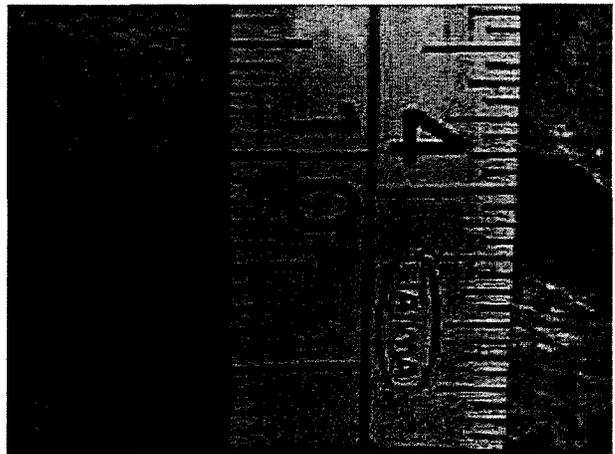


Figura 6.19 – Tubo CA (concreto armado) –  
Detalhe da abertura da fissura (4mm) no  
momento da obtenção da carga de ruptura

## **6.5 ANÁLISE DOS RESULTADOS**

### **6.5.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL**

A resistência à compressão axial média dos corpos-de-prova de 100x200mm moldados em mesa vibratória, dos concretos empregados na fabricação dos tubos simples, armados e reforçados com fibras, atingiu aproximadamente 65MPa.

Analisando os desvios relativos máximos, observa-se grande variação nos resultados, fruto da grande dificuldade na moldagem dos corpos-de-prova, apresentando muitos deles falhas de adensamento que resultaram nas chamadas “bicheiras”, pois os concretos apresentavam baixa trabalhabilidade.

O processo de fabricação dos tubos, requer concretos com tais características, sendo a moldagem realizada por sistema de prensagem ou vibro-prensagem, ocorrendo a desforma logo após a moldagem, ficando sob os tubos apenas um anel interno, que dá forma à bolsa, sendo retirado após o endurecimento do concreto.

Portanto, a determinação da resistência à compressão axial dos concretos utilizados na fabricação dos tubos de concreto, somente pode ser corretamente aferida através da extração de corpos-de-prova dos próprios tubos, que terão as mesmas características de compactação do elemento estrutural.

### **6.5.2 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA COMPRESSÃO DIAMETRAL**

A resistência média à tração na compressão diametral, medida em corpos-de-prova cilíndricos de 100x200mm, se situou ao redor de 5,2 MPa, ocorrendo também, grande variabilidade nos resultados, ocasionada por deficiências de moldagem.

### **6.5.3 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO: TENACIDADE DOS COMPÓSITOS**

Os corpos-de-prova prismáticos com 150x150x500mm, de concreto simples e reforçados com fibras, foram moldados em mesa vibratória e apresentaram os mesmos problemas de compactação dos cilíndricos.

Analisando os resultados destes ensaios, apresentados nas figuras 6.3 a 6.6 ficam ressaltados os problemas de instabilidade pós-pico, ocasionados pelo baixo teor de fibras incorporado e, principalmente, pela ruptura das fibras em lugar de seu progressivo arrancamento, principal mecanismo responsável pela tenacidade dos compósitos.

É importante destacar ainda que a condição de solicitação atuante nos prismas em nada se aproxima daquela a que são submetidos os tubos, podendo-se afirmar que tais ensaios não servem para aferir a real capacidade de redistribuição de esforços que ocorre nos tubos de concreto reforçado com fibras de aço, pois além dos problemas acima mencionados, ressalta-se novamente que não é possível reconstituir a real condição de compactação e de distribuição das fibras na matriz, não se recomendando que estes ensaios sejam realizados como forma de controle da produção.

### **6.5.4 ENSAIOS DE COMPRESSÃO DIAMETRAL EM TUBOS**

As curvas médias carga x deslocamento vertical, apresentadas na figura 6.9, demonstram o crescimento da ductilidade dos tubos com o aumento do teor de fibras.

Estas mesmas curvas mostram, também, que os tubos reforçados com fibras coladas têm melhor comportamento, ou seja, maior tenacidade que os reforçados com fibras soltas, para os mesmos teores incorporados. Isto é resultado da distribuição mais uniforme das fibras na matriz, do maior fator de forma e comprimento das fibras coladas.

Chama-se a atenção para o resultado médio obtido na série FS-20, que apresentou carga de fissura maior que os demais, fato que é comprovado analisando as cargas de fissura apresentadas na figura 6.11. Isto se deve a problemas encontrados no controle das dosagens por ocasião da fabricação dos tubos.

Para avaliar a tenacidade dos tubos foi adotado um deslocamento vertical máximo de 6mm, correspondente a um centésimo do diâmetro nominal dos tubos, fazendo-se também a análise para os níveis de 2 e 4mm de deslocamento vertical. Estes valores foram adotados em função de pequenas aberturas de fissuras quando o tubo apresentava tais deslocamentos verticais.

Até o deslocamento vertical de 2mm todos os tubos reforçados com fibras apresentaram comportamento semelhante aos armados. Para os deslocamentos de 4 e 6mm também apresentaram bons níveis de tenacidade.

Os tubos da série FC-30 (reforçados com fibras coladas com teor de incorporação de 30kg/m<sup>3</sup>) foram os que apresentaram melhor desempenho, mostrando comportamento muito semelhante aos tubos armados.

As cargas mínimas de fissura especificadas na NBR 9794/87 – Tubos de Concreto Armado de Seção Circular para Águas Pluviais, DN = 600mm, para as classes CA-2 e CA-3, são respectivamente 36 e 48 kN/m. Analisando a figura 6.11, pode-se perceber que todos os tubos se enquadram na classe CA-2 e, em alguns casos, alcançando até mesmo a carga exigida para tubo CA-3.

Nas figuras 6.18 e 6.19 observa-se que no instante da obtenção da carga de ruptura, o tubo armado apresenta excessiva abertura de fissura, numa situação real estas provocariam um processo de deterioração do compósito, prejudicando principalmente a durabilidade da canalização.

## 7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 7.1 CONCLUSÕES GERAIS

Como principais vantagens de se empregar o concreto reforçado com fibras de aço na fabricação de tubos, podem-se citar:

- ✓ por ser uma estrutura hiperestática, pode-se tirar proveito da capacidade de redistribuição de esforços, redistribuição esta proporcionada pelas fibras de aço;
- ✓ a incorporação de baixos teores de fibras proporciona, mesmo para tubos não armados, a redução de danos acidentais que ocorrem durante a fabricação, armazenamento, transporte e instalação dos tubos;
- ✓ a possibilidade de se tirar proveito de uma orientação bi-dimensional das fibras, aumentando a capacidade de reforço. Tal situação pode ser obtida utilizando-se fibras com comprimentos maiores do que a espessura da parede dos tubos.

Os resultados obtidos permitiram também concluir que a determinação da resistência à compressão axial dos concretos utilizados na fabricação dos tubos, somente pode ser corretamente aferida através da extração de corpos-de-prova dos próprios tubos, que terão as mesmas características de compactação do elemento estrutural.

Ficou também evidente que os ensaios de tração na flexão, usualmente empregados para avaliar a tenacidade dos compósitos, não devem ser empregados como forma de controle da

produção, pois não é possível reconstituir nos prismas a real condição de compactação e de distribuição das fibras existente nos tubos.

Finalmente, pode-se também concluir que é possível substituir totalmente a armadura convencional por fibras de aço, desde que sejam corretamente dosadas, reduzindo custos de mão-de-obra e obtendo-se ganhos em durabilidade da canalização.

## **7.2 ESTUDOS POSTERIORES**

Este trabalho não pretende esgotar o assunto, mas sim colaborar com o desenvolvimento de pesquisas sobre o tema e sobretudo incrementar a pequena bibliografia encontrada sobre o assunto no Brasil.

Seria oportuno ressaltar que apesar da dificuldade de se realizar o ensaio de compressão diametral nos tubos de concreto (em escala real), utilizando o método dos três cutelos, indicado tanto pelas normas nacionais como internacionais, este método é o que melhor representa a eficiência do compósito em questão.

Como continuidade dessa pesquisa, recomenda-se uma investigação mais completa, aumentando os teores de fibra incorporados, a resistência do concreto com o uso de adições, a incorporação de fibras de aço nos tubos de concreto armado com o intuito de se alcançar classes de resistências mais elevadas, etc.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AL KHALAF, M. N.; PAGE C. L. and RITCHIE, A. G. B., **Effects of Fiber Surface Composition on Mechanical Properties of Steel Fiber Reinforced Mortars**. Cement and Concrete Research, V.10, nº 1, 1980, pp.71-77.
2. AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI), **State-of-the-art Report on Fiber Reinforced Concrete**; ACI Committee 544. In: \_\_. Fiber Reinforced Concrete. Detroit, 1974, pp.535-551.
3. AMERICAN CONCRETE PIPE ASSOCIATION (ACPA), **Concrete Pipe Handbook**. Vienna, Virginia, jan/1980.
4. AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS (ASCE), **Design and Construction of Sanitary and Storm Sewers**. New York, 1958
5. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), **MB 17/1986. Comissão de Estudo de Tubos de Concreto Simples e Armado para Condução de Águas Pluviais - Rio de Janeiro, 1986.**

6. \_\_\_\_\_, **NBR 5733. Cimento Portland de Alta Resistência Inicial - Especificação** - Rio de Janeiro, 1986.
7. \_\_\_\_\_, **NBR 5738. Confeção e Cura de Corpos-de-Prova de Concreto, Cilíndricos ou Prismáticos – Método de Ensaio** - Rio de Janeiro, 1994
8. \_\_\_\_\_, **NBR 5739. Concreto – Ensaio de Compressão de Corpos-de-Prova Cilíndricos de Concreto – Método de Ensaio** - Rio de Janeiro,1994.
9. \_\_\_\_\_, **NBR 6583 – Tubo de Concreto Simples – Determinação da Resistência à Compressão Diametral – Método de Ensaio** - Rio de Janeiro, 1987.
10. \_\_\_\_\_, **NBR 7211. Agregados para Concreto – Especificação** - Rio de Janeiro,1983.
11. \_\_\_\_\_, **NBR 7222 - Argamassa e Concreto – Determinação da Resistência à Tração por Compressão Diametral de Corpos-de-Prova Cilíndricos – Método de Ensaio** - Rio de Janeiro,1983.
12. \_\_\_\_\_, **NBR 8889 – Tubo de Concreto Simples de Seção Circular para Esgoto Sanitário - Especificação** - Rio de Janeiro, 1985
13. \_\_\_\_\_, **NBR 8890 – Tubo de Concreto Armado de Seção Circular para Esgoto Sanitário - Especificação** - Rio de Janeiro, 1985

14. \_\_\_\_\_, **NBR 8891 – Tubo de Concreto Armado para Esgoto Sanitário – Método de Ensaio** - Rio de Janeiro, 1985
15. \_\_\_\_\_, **NBR 8894 – Tubo de Concreto Simples para Esgoto Sanitário – Método de Ensaio** - Rio de Janeiro, 1985
16. \_\_\_\_\_, **NBR 9793 – Tubo de Concreto Simples de Seção Circular para Águas Pluviais – Especificação** - Rio de Janeiro, 1987.
17. \_\_\_\_\_, **NBR 9794 – Tubo de Concreto Armado de Seção Circular para Águas Pluviais - Especificação** - Rio de Janeiro, 1987.
18. \_\_\_\_\_, **NBR 9795 – Tubo de Concreto Armado – Determinação da Resistência à Compressão Diametral – Método de Ensaio** - Rio de Janeiro, 1987.
19. BANTHIA, N., TROTTIER, J.F., **Concrete Reinforced With Deformed Steel Fibers Part I: Bond - Slip Mechanisms.** -ACI Materials Journal: September - October, 1994.
20. BANTHIA, N.; TROTTIER, J.F., **Concrete Reinforced With Deformed Steel Fibers - Part II : Toughness Characterization.** ACI Materials Journal, v. 92, n<sup>o</sup> 2, Mar-Abr., 1995b. pp.146-154.
21. BARTOS, P., **Review Paper; Bond in Fibre Reinforced Cements and Concretes.** Int. J. Cem. Comp. & Ltwt. Concr., 3-1981.

22. BENTUR, A., MINDESS, S., **Fiber Reinforced Cementitious Composites**. London and New York: Elsevier Science Publishers Ltd., 1990.
23. FIGUEIREDO, A. D., **Parâmetros de Controle e Dosagem do Concreto Projetado com Fibras de Aço**. São Paulo, 1997. 342p. Tese (Doutorado). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
24. FIGUEIREDO, A. D., **Concreto com Fibras de Aço**. Escola Politécnica Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Construção Civil, Materiais de Construção Civil III (PCC 338), São Paulo, 1999, 67p.
25. JAPAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS, **Methods of Test for Flexural Strength and Flexural Toughness of Steel Fiber Reinforced Concrete**. JSCE SF4. Concrete Library of JSCE. Part III-2 Method of tests for steel fiber reinforced concrete, nº3, June, 1984b., pp. 58-61.
26. JOHNSTON, C.D., **Advances in Concrete Technology**. 1ª Edição, ed. by Malhotra, V.M., Ottawa, Canada, january, 1992.
27. KOBAYASHI, K., **Development of Fibre Reinforced Concrete in Japan**. The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete, Harlow, feb, 1993, pp.27-40.
28. LAWRENCE, P., **Some Theoretical Considerations of Fibre Pull-out from an Elastic Matrix**. J. Mat. Sci, 7-1972.

29. LAWS, V., **Micromechanical Aspects of the Fibre-cement Bond. Composites**, 13-1982.
30. MARSTON, A., **The Supporting Strength of Sewer Pipe in Ditches and Methods of Testing Sewer Pipe in Laboratories to Determine their Ordinary Supporting Strength.** Bulletin Number 47, Iowa State College, 1917.
31. MEHTA, P. K., MONTEIRO, P. J. M., **Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais.** Ed. Pini, São Paulo, 1994, 573p..
32. MINDESS, S., **Why Fibre Reinforced Concrete?**. First Canadian University-Industry workshop on fibre reinforced concrete. Ed Nemkumar Banthia, Quebec, 28-29 october, 1991, pp. 1-9.
33. NUNES , N. L., **Estudo da Influência da Geometria da Fibra de Aço na Tenacidade à Flexão dos Compósitos de Matriz de Concreto.** São Paulo , Março, 1998. Exame de Qualificação de Mestrado. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
34. PINTO JR., N.O., MORAES, A.A., CARNIO, M.A., **Tenacidade e Resistência Equivalente à Tração na Flexão de Concretos de Alto Desempenho Reforçados com Fibras de Aço de Baixo e Alto Teor de Carbono.** 40º Congresso Brasileiro do Concreto, Rio de Janeiro, 1998.
35. SPANGLER, M. G., **Analisis of Loads and Supporting Strengths and Principles of Design for Highway Culverts.** Proceedings, Volume 26, Highway Research Board, 1946.

36. SPANGLER, M. G., **The Case Against the Ultimate Load Test for Reinforced Concrete Pipe.** Structural Design of Culverts and Pipe, Washington, 1967
37. TATTERSALL, G.H., and URBANOWICZ, C.R., **Bond Strength in Steel Fiber Reinforced Concrete.**, Magazine of Concrete Research, v.26, nº 87, 1974, pp. 105-113.
38. TEZUKA, Y., **Concreto Armado com Fibras.** ABCP, 2a ed., São Paulo, 1999.
39. VASCONCELOS, A.C., **Palestra sobre Concreto Armado com Fibras.** Instituto de Engenharia, São Paulo, março/1998.
40. ZAIDDLER, W., **Projetos Estruturais de Tubos Enterrados.** Ed. Pini, São Paulo, 1983, 106p.

## **ANEXO I - ESPECIFICAÇÕES DA ABNT PARA TUBOS DE CONCRETO**

### **1.1 TUBOS DE CONCRETO DE SEÇÃO CIRCULAR PARA ÁGUAS PLUVIAIS**

#### **Definições Gerais**

- Diâmetro nominal (DN) – Simple número que serve para classificar o tubo quanto a dimensão e que corresponde aproximadamente ao seu diâmetro interno, em milímetros.
- Comprimento útil (L) – Valor da distância, em milímetros, entre dois pontos quaisquer de uma geratriz qualquer da superfície cilíndrica interna do tubo.
- Carga de ruptura no ensaio de compressão diametral – Carga, expressa em newtons por metro, no momento do rompimento do tubo.
- Carga de trinca no ensaio de compressão diametral – Carga, expressa em newtons por metro, no instante em que aparecem no tubo em ensaio, trinca ou trincas com abertura de 0,2mm e comprimento de 300mm.
- Classe – Família de tubos caracterizada pelas cargas de trinca e de ruptura.

## **1.1 NBR 9793/87 – TUBO DE CONCRETO SIMPLES DE SEÇÃO CIRCULAR PARA ÁGUAS PLUVIAIS (ESPECIFICAÇÃO)**

### **1.1.1 OBJETIVO**

Esta Norma fixa as condições exigíveis para aceitação de tubo de concreto simples de seção circular, destinada à condução, sob pressão atmosférica, de águas pluviais e de líquidos não agressivos.

### **1.1.2 CONDIÇÕES GERAIS**

#### **MATERIAIS:**

O cimento deve obedecer às Normas Brasileiras.

Os agregados devem satisfazer à NBR 7211. O diâmetro do agregado deve ser no máximo um terço da espessura da parede do tubo.

A água destinada ao amassamento do concreto deve ser límpida, isenta de teores prejudiciais, de sais, óleo, alcalis e substâncias orgânicas. Presumem-se satisfatórias as águas potáveis.

## **DOSAGEM DO CONCRETO**

O concreto deve ser dosado e adensado, de acordo com o processo de fabricação, de modo que o tubo atenda às condições impostas nesta Norma. O concreto deve ter uma porcentagem mínima de argamassa, compatível com o processo de fabricação. A relação água-cimento deve ser no máximo 0,50.

## **ACABAMENTO**

As superfícies interna e externa dos tubos devem ser lisas, compatíveis com o processo de fabricação, não devendo apresentar defeitos visíveis a olho nu ou detectáveis através de percussão, que sejam prejudiciais à qualidade do tubo quanto à resistência, impermeabilidade e durabilidade.

## **PROTEÇÃO E CURA**

Os tubos devem ser protegidos e curados por processos tecnicamente adequados.

## COMPRESSÃO DIAMETRAL

A resistência à compressão diametral deve ser, no mínimo, as indicadas na tabela 1.

Diâmetro Nominal DN (mm)	Carga mínima de ruptura (kN/m)				
	C1	C2	C3	C4	C5
500	20	30	40	50	60
600	24	36	48	60	72
700	28	42	56	70	84
800	32	48	64	80	96

## **1.2 NBR 9794/87 – TUBO DE CONCRETO ARMADO DE SEÇÃO CIRCULAR PARA ÁGUAS PLUVIAIS (ESPECIFICAÇÃO)**

### **1.2.1 OBJETIVO**

Esta Norma fixa as condições exigíveis para aceitação de tubo de concreto armado de seção circular, destinada à condução, sob pressão atmosférica, de águas pluviais e de líquidos não agressivos.

### **1.2.2 CONDIÇÕES GERAIS**

As condições para materiais, dosagem do concreto, acabamento, proteção e cura são as mesmas especificadas para tubos de concreto simples.

### **ARMADURA**

A armadura principal do tubo pode ser circular simples, circular dupla ou elíptica, colocada de modo a obedecer os cobrimentos exigidos. Admitem-se outros tipos de armadura, desde que sejam com conhecimento e anuência do comprador e atenda os requisitos desta Norma.

O cobrimento da armadura, pelo concreto, no caso do tubo DN = 600 deve ser no mínimo de 15 mm.

O espaçamento entre barras consecutivas da armadura principal medido ao longo de uma mesma geratriz não deve ser maior que 150 mm. O espaçamento entre as extremidades do tubo e a barra mais próxima da armadura principal não deve ser maior do que 150 mm.

As emendas do aço da armadura quando feitas por transpasse deve ter um comprimento no mínimo igual a 40 vezes o diâmetro da barra.

## COMPRESSÃO DIAMETRAL

As resistências à compressão diametral, quanto às cargas de trinca e de ruptura devem ser, no mínimo, as indicadas na tabela 2.

Tabela 2 – Resistência à compressão diametral (NBR9794/87)

Diâmetro Nominal DN (mm)	Carga mínima de trinca (kN/m)				Carga mínima de ruptura (kN/m)			
	CA-1	CA-2	CA-3	CA-4	CA-1	CA-2	CA-3	CA-4
500	20	30	40	50	30	45	60	75
600	24	36	48	60	36	54	72	90
700	28	42	56	70	42	63	84	105
800	32	48	64	80	48	72	96	120

Nota: Outras classes podem ser admitidas mediante acordo entre comprador e fornecedor, devendo satisfazer as condições estabelecidas nesta Norma para os tubos de classe normal, inclusive a de apresentar carga de trinca no mínimo igual a 2/3 da carga de ruptura exigida.

## 2 TUBOS DE CONCRETO DE SEÇÃO CIRCULAR PARA ESGOTO SANITÁRIO

### Definições Gerais

- Diâmetro nominal (DN) – Número adimensional aproximadamente igual ao valor absoluto do diâmetro interno expresso em milímetros, que serve como referência para caracterizar o tubo.
- Comprimento útil (L) – Comprimento, em milímetros, entre dois pontos extremos de uma geratriz qualquer da superfície cilíndrica interna do tubo.
- Carga de ruptura no ensaio de compressão diametral – Carga, expressa em newtons por metro, cujo valor deixa de sofrer acréscimo mesmo com o prosseguimento do ensaio.
- Carga de trinca no ensaio de compressão diametral – Carga lida, em newtons, , no momento em que aparecem no tubo submetido ao ensaio, trinca ou trincas com abertura de 0,2mm e comprimento de 300mm. *Para efeito de projeto da linha, é esta a carga que define a resistência do tubo às solicitações externas.*
- Classe – Designação dada aos tubos de acordo com as exigências das cargas de trinca e de ruptura, como prescrito nas tabelas 3 e 4.

## **2.1 NBR 8889/85 – TUBO DE CONCRETO SIMPLES DE SEÇÃO CIRCULAR PARA ESGOTO SANITÁRIO (ESPECIFICAÇÃO)**

### **2.1.1 OBJETIVO**

Esta Norma fixa as condições exigíveis para aceitação de tubo de concreto simples, de seção circular, destinada à condução de esgotos sanitários, sob pressão atmosférica.

### **2.1.2 CONDIÇÕES GERAIS**

#### **MATERIAIS:**

O cimento deve obedecer às Normas Brasileiras em vigor, com um teor de aluminato tricálcico ( $C_3A$ ) menor do que 8%. Mediante acordo prévio entre fabricante e comprador, pode ser admitida a utilização de cimento com teor de  $C_3A$  superior a 8%, em regiões onde aquele não seja disponível.

Os agregados devem satisfazer à NBR 7211. O diâmetro do agregado deve ser menor ou igual a um terço da espessura da parede do tubo.

A água destinada ao amassamento do concreto deve ser límpida, isenta de teores prejudiciais, de sais, óleo, álcalis e substâncias orgânicas. Presumem-se satisfatórias as águas potáveis.

## **DOSAGEM DO CONCRETO**

O concreto deve ser dosado e sofrer adensamento, de acordo com o processo de fabricação, e tendo em vista que o tubo atenda às condições impostas nesta Norma. Deve ter uma porcentagem mínima de argamassa, compatível com o processo de fabricação. O consumo mínimo de cimento deve ser de 350 kg/m<sup>3</sup> de concreto, com relação água-cimento de 0,45, no máximo.

## **ACABAMENTO**

As superfícies interna e externa dos tubos devem ser lisas, compatíveis com o processo de fabricação, não devendo apresentar defeitos visíveis a olho nu ou detectáveis através de percussão, que sejam prejudiciais à qualidade do tubo quanto à resistência, impermeabilidade e durabilidade.

## **CURA**

Os tubos devem ser obrigatoriamente curados por um processo tecnicamente adequado.

## COMPRESSÃO DIAMETRAL

As resistências à compressão diametral, quanto à carga de ruptura, devem ser, no mínimo, as indicadas na tabela 3. de acordo com as exigências das cargas de ruptura, são admitidas duas classes de tubos, designadas por S-1 e S-2.

Tabela 3 – Resistência à compressão diametral (NBR8889/85)

Diâmetro Nominal DN (mm)	Carga mínima de ruptura (kN/m)	
	S-1	S-2
500	36	60
600	42	72
700	48	84
800	54	96

## **2.2 NBR 8890/85 – TUBO DE CONCRETO ARMADO DE SEÇÃO CIRCULAR PARA ESGOTO SANITÁRIO (ESPECIFICAÇÃO)**

### **2.2.1 OBJETIVO**

Esta Norma fixa as condições exigíveis para aceitação de tubos de concreto armado, de seção circular, destinada à condução de esgotos sanitários, sob pressão atmosférica.

### **2.2.2 CONDIÇÕES GERAIS**

As condições para materiais, dosagem do concreto, acabamento e cura são as mesmas especificadas para tubos de concreto simples.

### **ARMADURA**

Nos tubos de armadura circular simples ou dupla, o cobrimento interno das armaduras deve ser de no mínimo 20 mm e o cobrimento externo das armaduras, de no mínimo 15 mm.

A armadura principal do tubos deve ser circular ou helicoidal, simples ou dupla, e colocada de modo a obedecer os cobrimentos mínimos recomendados.

O espaçamento entre espiras consecutivas da armadura principal não deve ser superior a 150 mm. O espaçamento entre as extremidades do tubo (ponta ou bolsa) e a mais próxima espira não pode ser superior a 150 mm.

Para posicionar a armadura principal dos tubos dentro dos limites desta Norma, podem ser utilizados quaisquer processos tecnicamente adequados.

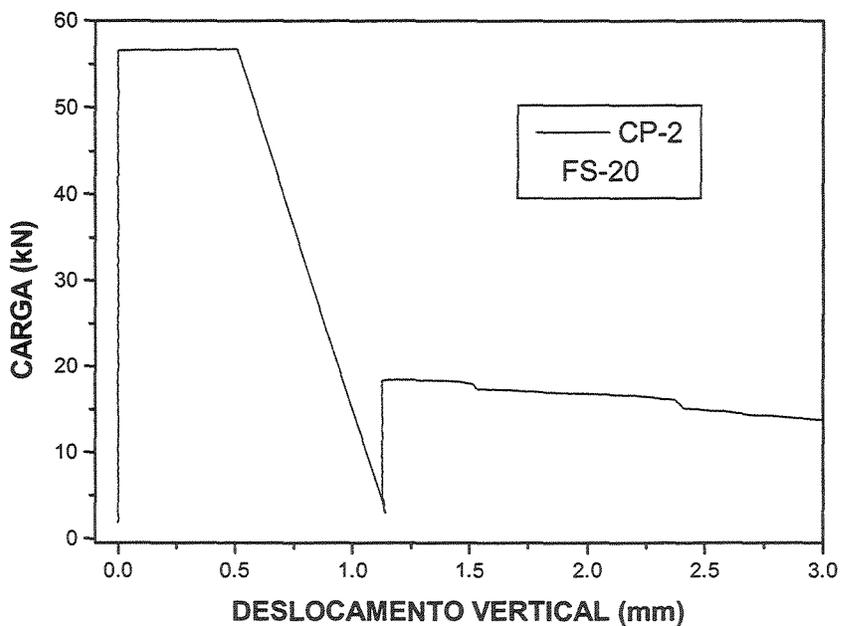
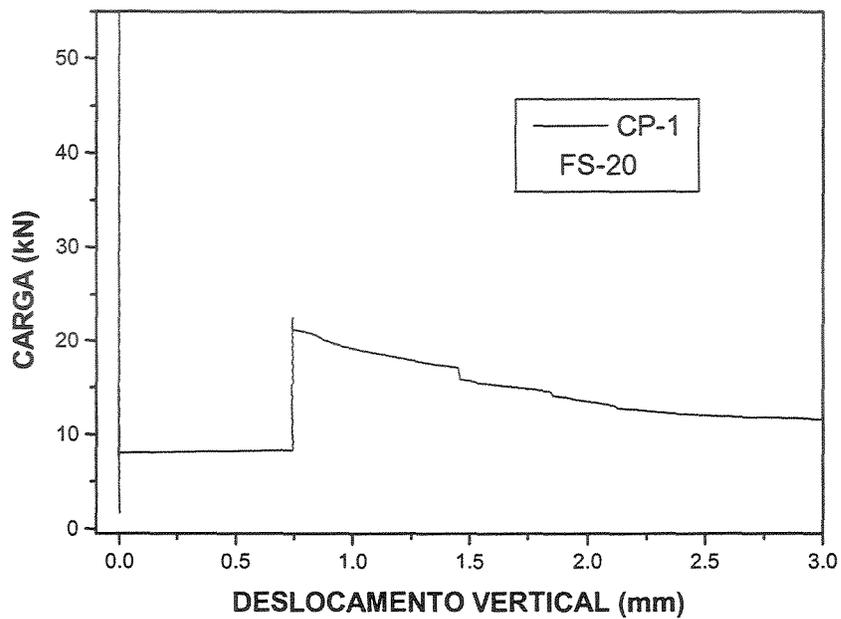
## COMPRESSÃO DIAMETRAL

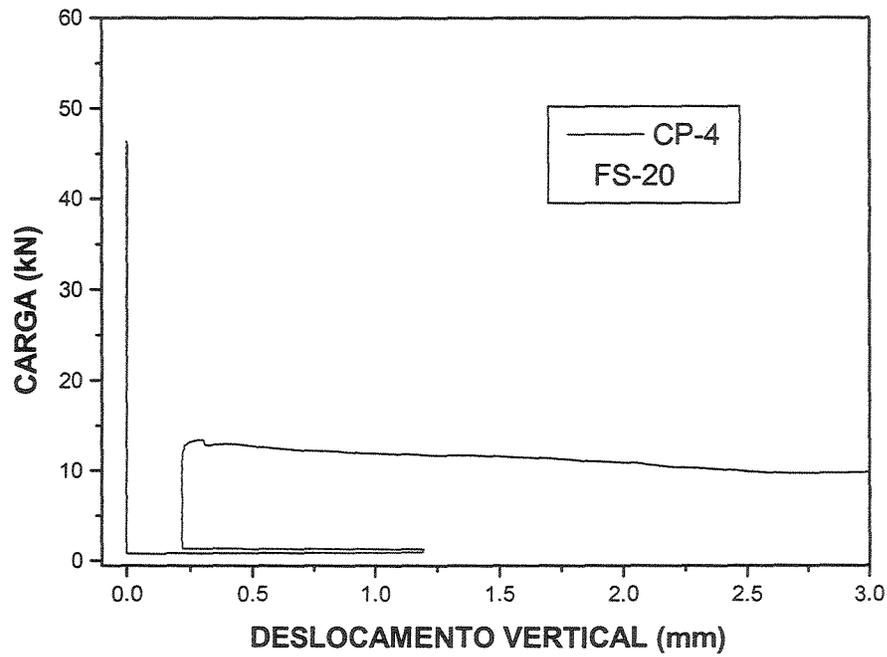
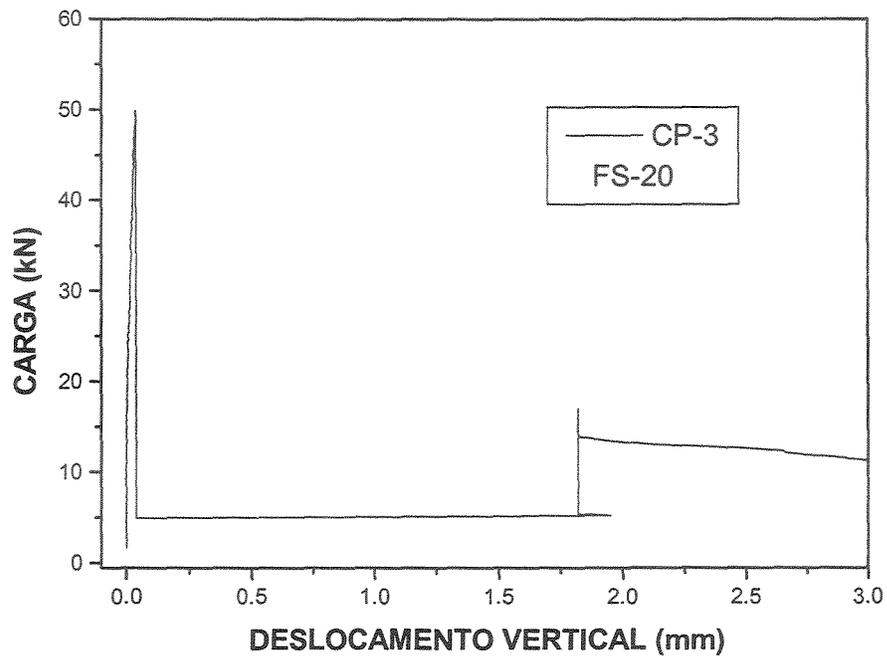
As resistências à compressão diametral, quanto às cargas de trinca e de ruptura devem ser, no mínimo, as indicadas na tabela 4.

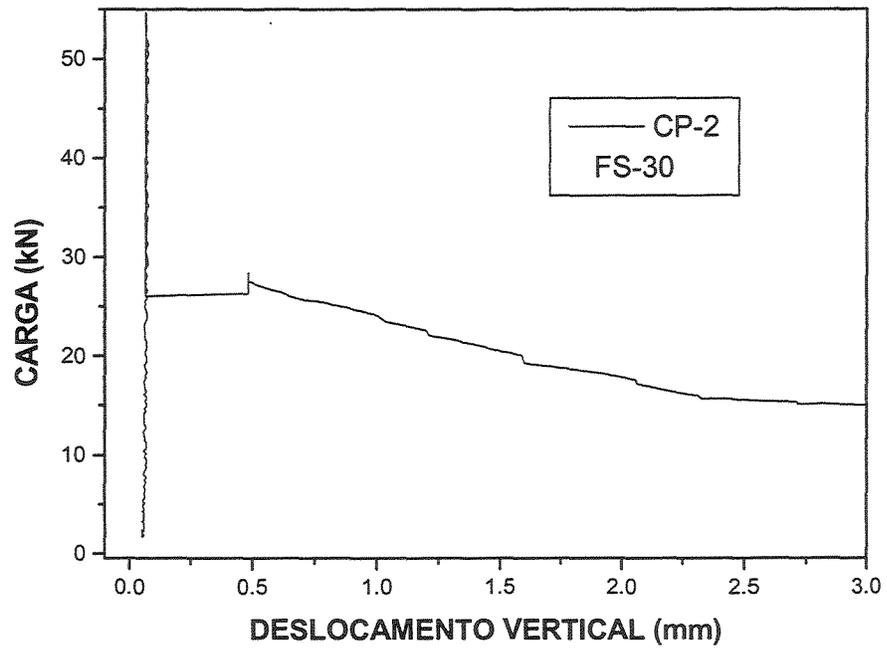
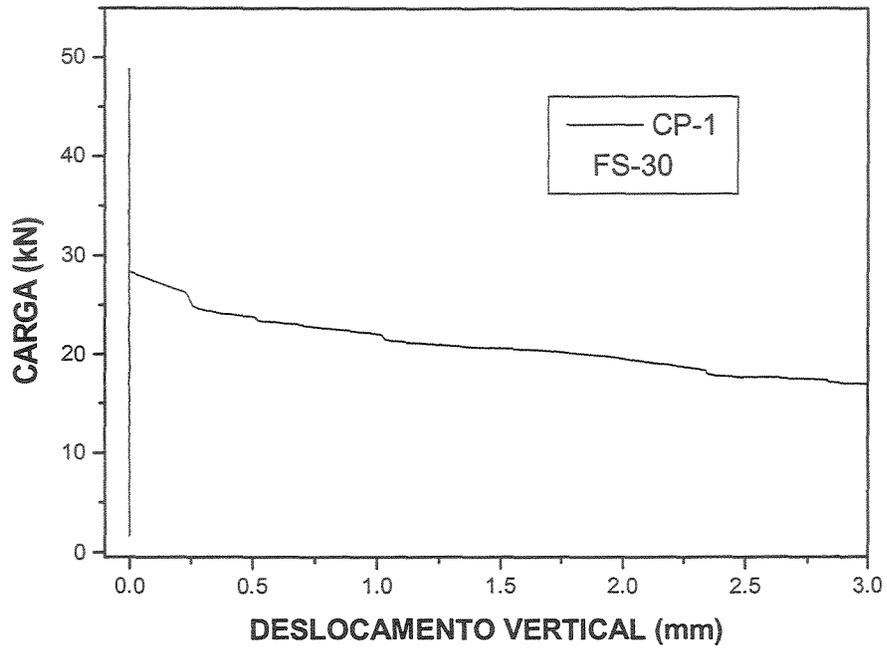
Tabela 4 – Resistência à compressão diametral (NBR8890/85)

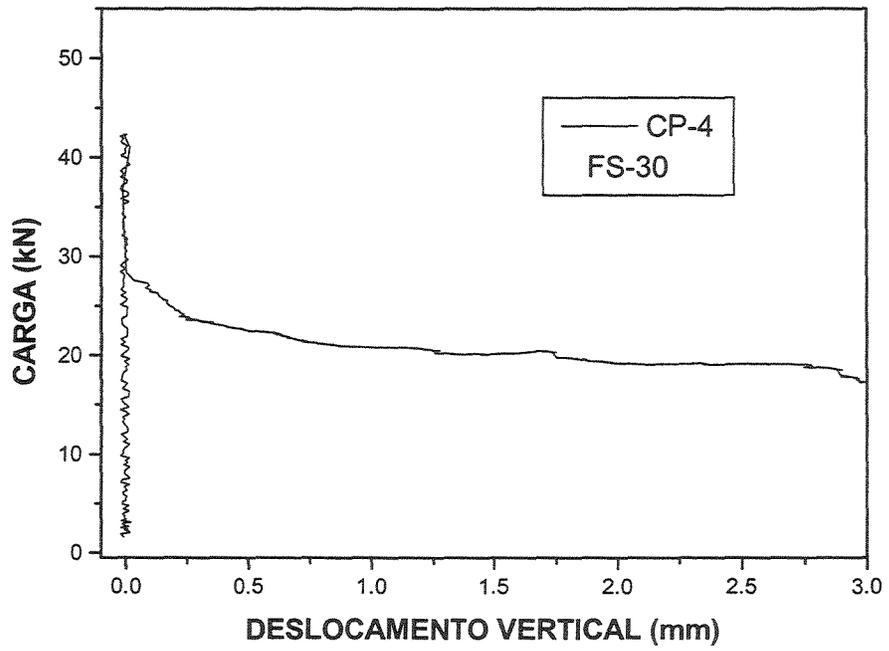
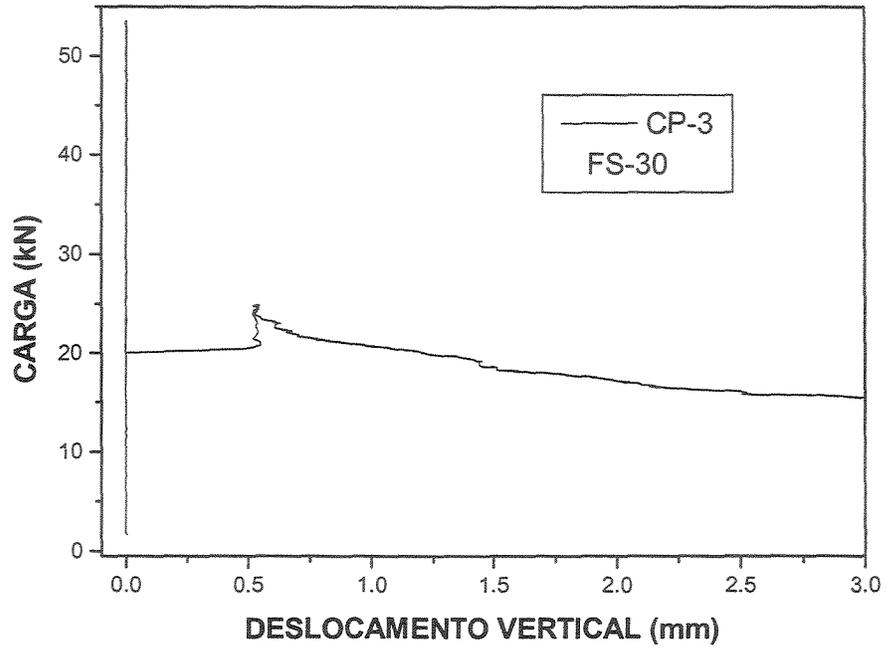
Diâmetro Nominal DN (mm)	Carga mínima de trinca (kN/m)		Carga mínima de ruptura (kN/m)	
	A-2	A-3	A-2	A-3
500	30	50	42	70
600	35	60	49	84
700	40	70	56	98
800	45	80	63	112

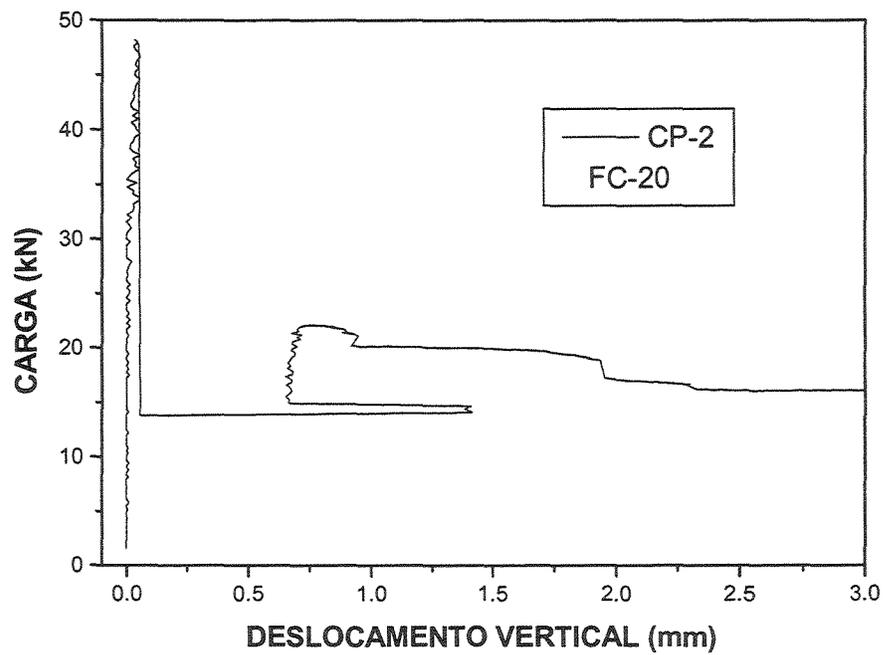
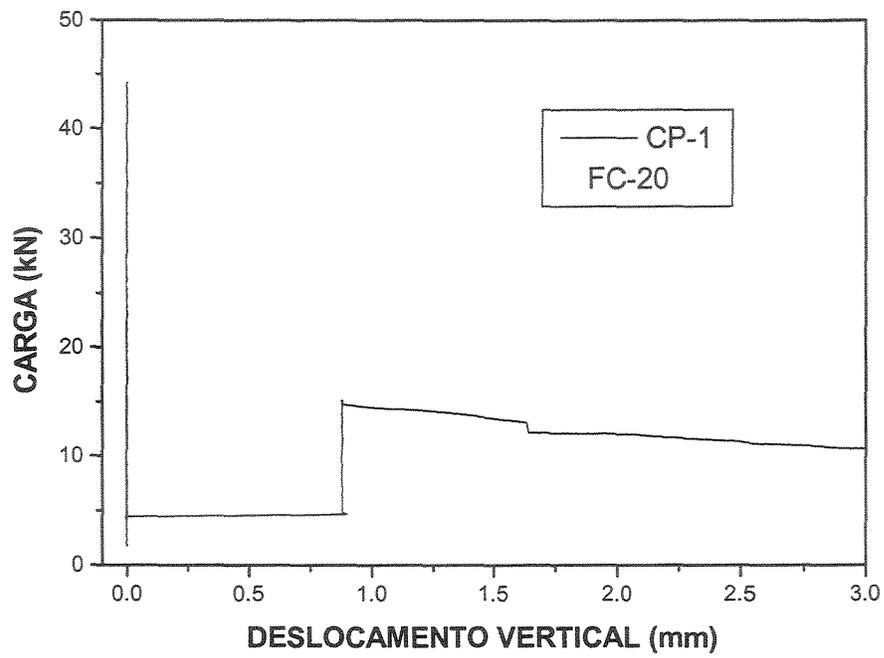
## ANEXO 2 - ENSAIOS DE TRAÇÃO NA FLEXÃO - PRISMAS (150x150x500mm)

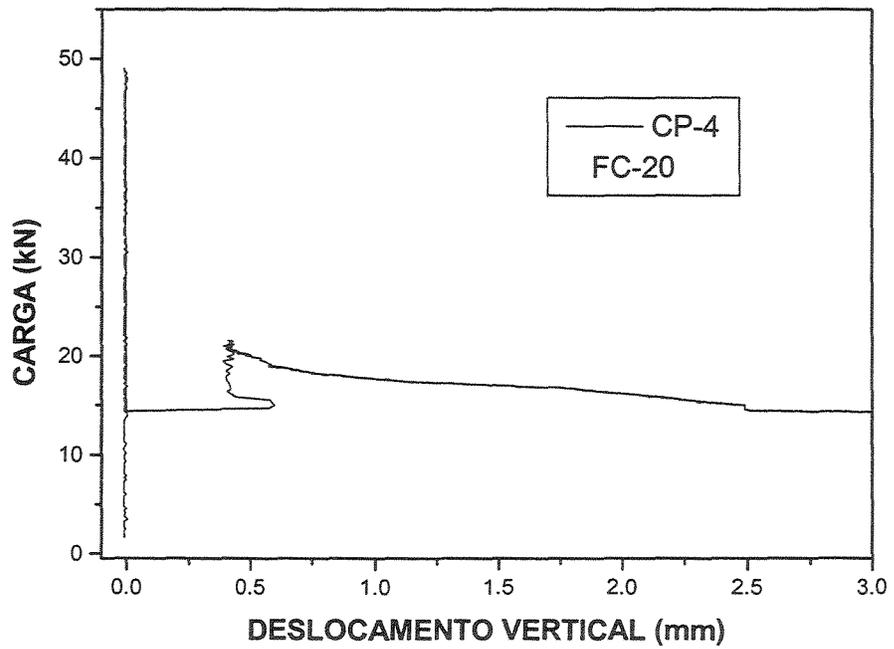
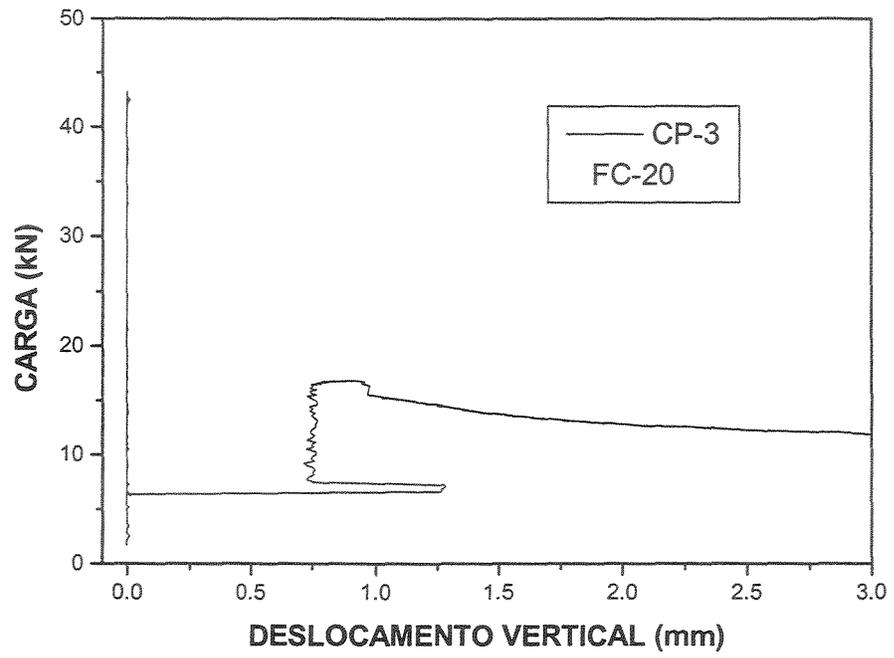


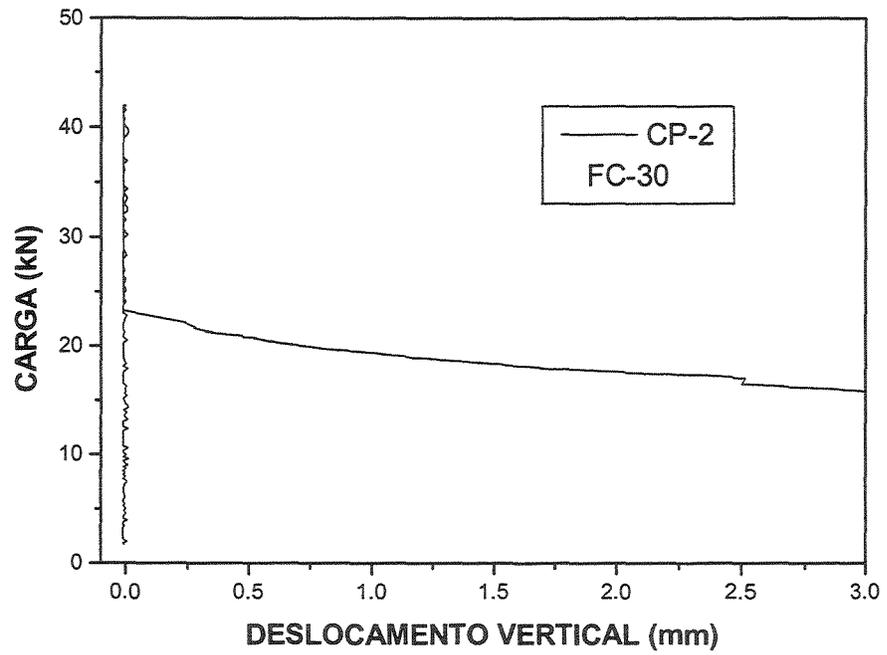
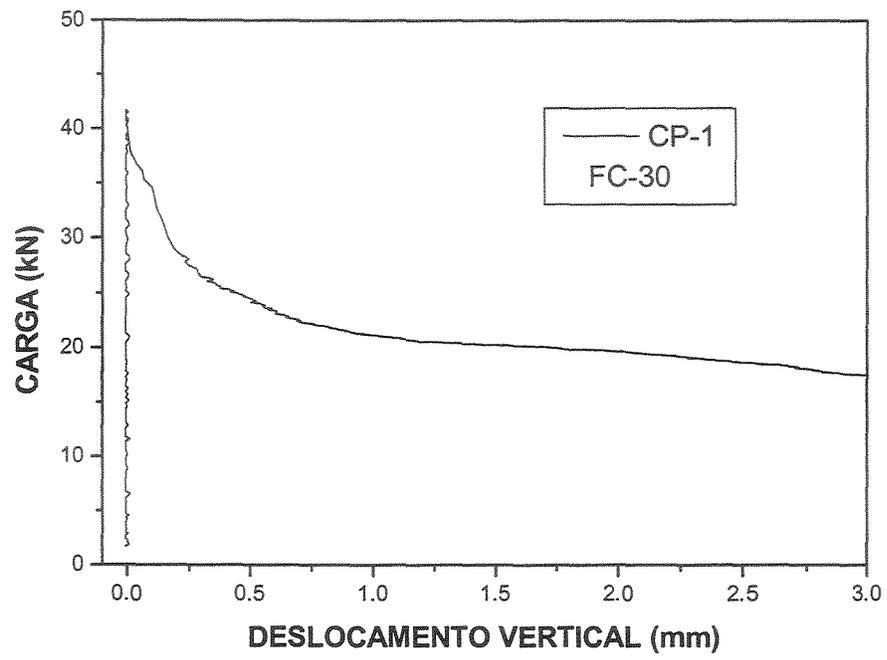


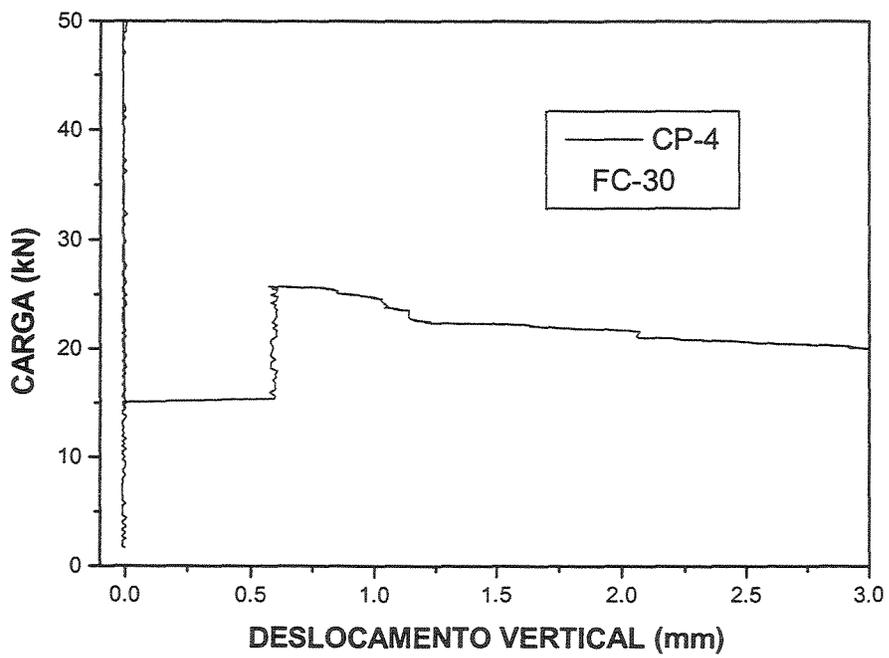
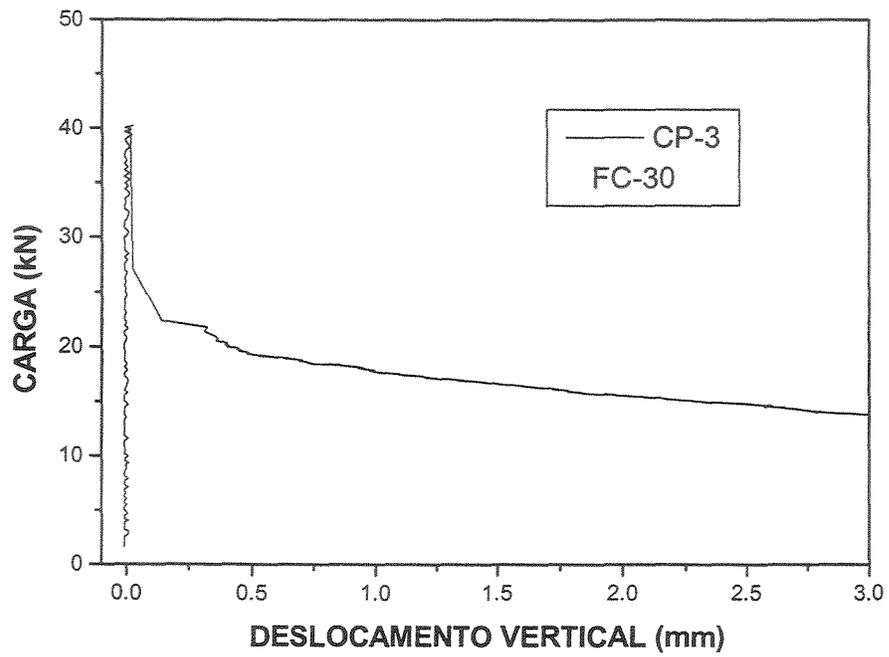












### ANEXO 3 – ENSAIOS DE COMPRESSÃO DIAMETRAL EM TUBOS

