



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

“CAMPUS” DE ILHA SOLTEIRA

FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

AVALIAÇÃO DE TUBOS DE CONCRETO
REFORÇADOS COM FIBRAS DE AÇO
SEGUNDO A NBR 8890

Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, da Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos exigidos para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de Concentração:
Engenharia de Estruturas

Discente: Eng. Ana Paula Fugii
Orientador: Prof. Dr. Jorge Luís Akasaki

Ilha Solteira-SP, maio de 2008

FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da Informação/Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação da UNESP-Ilha Solteira

Fugii, Ana Paula.

F957a Avaliação de tubos de concreto reforçados com fibras de aço segundo a
NBR 8890 / Ana Paula Fugii. -- Ilha Solteira : [s.n.], 2008
161 p. : il. (algumas color.)

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de concentração: Engenharia de Estruturas, 2008

Orientador: Jorge Luís Akasaki

Bibliografia: p.145-159

1. Tubos de concreto. 2. Fibras de aço. 3. Canalização de concreto. 4. Fibras. 5. Aço.
6. Concreto reforçado com fibras.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: AVALIAÇÃO DE TUBOS DE CONCRETO REFORÇADOS COM FIBRAS DE AÇO
SEGUNDO A NBR 8890

AUTORA: ANA PAULA FUGII

ORIENTADOR: Prof. Dr. JORGE LUIS AKASAKI

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de MESTRE em ENGENHARIA CIVIL pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. JORGE LUIS AKASAKI

Departamento de Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Prof. Dr. JEFFERSON SIDNEY CAMACHO

Departamento de Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Profa. Dra. ANTONIO DOMINGUES DE FIGUEIREDO

Departamento de Engenharia Civil / Escola Politécnica Da Usp

Data da realização: 12 de maio de 2008.


Presidente da Comissão Examinadora
Prof. Dr. JORGE LUIS AKASAKI

“ A maior genialidade da vida não é aquela que vem da carga genética nem a que é produzida pela cultura acadêmica, mas a que é construída nos vales dos medos, no deserto das dificuldades, nos invernos da existência, no mercado dos desafios”.

Augusto Cury

Dedico este trabalho aos mestres da minha vida: meus pais Paulo e Zilda. Com sabedoria me ensinaram o amor e o respeito ao próximo.

Agradecimentos

Ao meu orientador Prof. Dr. Jorge Luís Akasaki pela sua dedicação, competência, companheirismo, sabedoria e amizade fundamentais para nossa convivência diária na concretização deste trabalho.

Ao Eng. Flávio Moreira Salles, engenheiro civil responsável pela área de tecnologia do concreto do laboratório de engenharia civil da CESP, pela sua atenção e dedicação especial ao meu trabalho, disponibilidade em orientar e ajudar no que fosse preciso, pela transmissão da sua sabedoria, experiência em laboratório e principalmente pela sua preciosa amizade.

À empresa Caso Construtora Ltda, pela doação dos tubos de concreto utilizados nesta pesquisa, pelo incentivo e confiança depositados em mim, por permitir a minha interação com os demais funcionários da empresa na fabricação dos tubos. Agradeço especialmente aos proprietários da empresa Sr. Paulo Yoshitaka Fugii e Sr. Sidnei Tolentino Marques, pela enorme colaboração a esta pesquisa e disponibilidade em me orientar. Agradeço também ao Eng. Salvador da Silva Brito e ao técnico em segurança do trabalho Antonio Rodrigues Trindade.

À empresa Maccaferri do Brasil Ltda, pela doação das fibras de aço, sempre incentivando e investindo em pesquisas no Brasil e no mundo. Em especial aos engenheiros Bruno Franco e Ivan Masieiro, que ajudaram na solicitação do pedido de doação das fibras de aço.

Ao Laboratório de Engenharia Civil da CESP, pela disponibilidade de suas instalações e equipamentos para a realização dos ensaios. Agradeço a todos os técnicos que ajudaram direta e indiretamente neste trabalho, em especial aos amigos, José Antonio Michelin, Francisco Eduardo Mendes (Chico), Carlos Roberto Santos Feitosa (Lana), Iverson Dias Queiroz, Joaquim Aparecido Lima, Gilmar Dias dos Santos e Euclides Alves Marcelino.

Ao Prof. Dr. Jefferson Sidney Camacho, NEPAE (Núcleo de Ensino e Pesquisa da Alvenaria Estrutural) da UNESP de Ilha Solteira pela disponibilidade dos equipamentos de aquisição de dados.

Ao Eng. MSc. Wilson José da Silva, pelo apoio nos ensaios dos tubos de concreto e pela sua amizade.

Ao Prof. Dr. Newton de Oliveira Pinto Junior, Eng. MSc. Marcelo Francisco Ramos, Eng. MSc. Luciano Passos do Laboratório de Engenharia Civil da UNICAMP e ao tecnólogo José Luis Lisboa do Laboratório de Engenharia Mecânica da UNICAMP pela realização dos ensaios de tenacidade.

Ao Eng. MSc. Marcelo Francisco Ramos, pesquisador da área de tubos de concreto com fibras de aço pela UNICAMP, pela sua atenção, sabedoria e amizade, fornecendo-me dicas e instruções para os ensaios realizados.

Ao Eng. MSc. Pedro Jorge Chama Neto da SABESP, autor do livro "Tubos de Concreto", cuja obra contribuiu muito para o meu trabalho e principalmente pela sua amizade e orientação quanto aos problemas que surgiram durante a pesquisa.

Ao Prof. Dr. Antonio Domingues Figueiredo, da POLI-USP, pela sua orientação quanto às dúvidas que foram surgindo ao longo da pesquisa e pelo fornecimento de materiais didáticos.

Aos meus amigos do mestrado obrigado pela amizade e companheirismo de todos: Aline Botini Tavares, Ana Carolina Marques, Ana Flávia da Silva, Ana Paula Moreno Trigo, Camilo Mizumoto, Elter Botini Tavares, Guido José Denipotti, Leonardo de Souza, Marcelo Botini Tavares, Marcela Jodas, Maria Lidiane Marques, Netúlio Fiorati, Odilon Martins, Pamela, Sueila Cruz e Victor Marcuz de Moraes.

Ao meu amigo e irmão Eng. MSc. Mauro Tashima pelo seu carinho e cuidado com meu trabalho e pela sua amizade e companheirismo que levarei por toda a vida.

Ao meu namorado Jair José Pereira Junior pelo seu amor, paciência, carinho e dedicação, principalmente nos meses em que apresentei mais cansaços físicos e mentais, ajudando-me a não desanimar e a seguir em frente.

Ao meu tio Izaías Menezes das Chagas, pela moradia durante todo o meu mestrado e principalmente pela sua inestimável amizade, preocupação com meu bem estar e confiança.

E por fim quero agradecer as pessoas mais importantes da minha vida, meus pais Paulo e Zilda Fugii, pelo amor, compreensão e respeito, pelo apoio financeiro, pela confiança no meu trabalho, pelo tempo de companhia e lazer que lhes furtei em virtude desta pesquisa. Por estarem ao meu lado nos momentos bons e difíceis, abdicando de suas horas de descanso em prol do meu bem estar e da minha felicidade. Obrigada por deixarem seus sonhos para depois para que eu pudesse sonhar agora.

Sumário

CAPÍTULO 1	24
1.1. IMPORTÂNCIA DO TEMA	24
1.2. OBJETIVO	25
1.3. JUSTIFICATIVA	26
CAPÍTULO 2	28
2.1. CONCRETO	28
2.2. TUBOS DE CONCRETO	29
2.2.1. HISTÓRIA	29
2.2.1.1. Período pré-1800	30
2.2.1.2. Período de 1800 a 1880	31
2.2.1.3. Período de 1880 a 1930	31
2.2.1.4. Período posterior a 1930	33
2.2.2. APLICAÇÕES	33
2.2.2.1. Abastecimento de água e Rede de esgoto sanitário	33
2.2.2.2. Drenagem de água pluvial	36
2.2.2.3. Bueiro e Travessia	37
2.2.3. TIPOS DE TUBOS DE CONCRETO	39
2.2.4. PROJETO	41
2.2.5. FABRICAÇÃO, ARMAZENAMENTO, TRANSPORTE E MONTAGEM ...	
.....	42
2.2.5.1. FABRICAÇÃO	42
2.2.5.1.1. Traço e dosagem do concreto	42
2.2.5.1.2. Armaduras	43
2.2.5.1.3. Tipos de Processo de Fabricação de Tubos de Concreto	44
2.2.5.2. ARMAZENAMENTO	52
2.2.5.3. TRANSPORTE	54
2.2.5.4. MONTAGEM	55
2.2.6. CONTROLE DE QUALIDADE	58
2.3. CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO (CRFA)	59
2.3.1. INTRODUÇÃO AOS COMPÓSITOS À BASE DE CIMENTO	
REFORÇADOS COM FIBRAS	60
2.3.1.1. Matriz	61
2.3.1.2. Fibras	61
2.3.1.2.1. Fibras de aço	64
2.3.1.3. Interação fibra-matriz	66
2.3.1.3.1. Volume crítico de fibras	69
2.3.1.3.2. Comprimento crítico	71
2.3.2. DOSAGEM DO CRFA	72
2.3.3. TECNOLOGIA PARA PRODUÇÃO DE CRFA	72
2.3.4. CONTROLE DO CRFA	74
2.3.4.1. Trabalhabilidade	74
2.3.4.2. Durabilidade	76
2.3.4.3. Temperaturas extremas	76
2.3.4.4. Condutividade térmica	77
2.3.5. PROPRIEDADES MECÂNICAS ESTÁTICAS	77
2.3.5.1. Resistência à compressão	77
2.3.5.2. Resistência à tração	78
2.3.5.3. Resistência à flexão	78

2.3.5.4	Tenacidade.....	79
2.3.5.5	Cisalhamento e Torção	82
2.3.5.6	Carregamento multiaxial	82
2.3.5.7	Abrasão, Erosão, Cavitação e Fricção	83
2.3.5.8	Retração e Fluência	84
2.3.6.	PROPRIEDADES MECÂNICAS DINÂMICAS	84
2.3.6.1	Fadiga	84
2.3.6.2	Impacto	86
2.3.7.	APLICAÇÕES DO CRFA.....	86
2.4.	TUBOS DE CONCRETO REFORÇADOS COM FIBRAS DE AÇO	87
CAPÍTULO 3	.....	90
3.1.	CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL.....	90
3.1.1.	CIMENTO	90
3.1.2.	AREIA	91
3.1.3.	BRITA	92
3.1.4.	ÁGUA.....	93
3.1.5.	FIBRAS DE AÇO	93
3.2.	TRAÇO DO CONCRETO.....	94
3.3.	ENSAIOS REALIZADOS	95
3.4.	MÉTODOS DE ENSAIO	97
3.4.1.	ENSAIO DE COMPRESSÃO AXIAL.....	97
3.4.2.	ENSAIO DE TRAÇÃO NA COMPRESSÃO DIAMETRAL	100
3.4.3.	ENSAIO DE COMPRESSÃO DIAMETRAL	101
3.4.4.	ENSAIO DE TENACIDADE	108
3.4.5.	ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA.....	111
CAPÍTULO 4	.....	113
4.1.	APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS.....	113
4.1.1.	COMPRESSÃO AXIAL	113
4.1.2.	TRAÇÃO NA COMPRESSÃO DIAMETRAL	115
4.1.3.	COMPRESSÃO DIAMETRAL.....	116
4.1.4.	TENACIDADE.....	131
4.1.5.	ABSORÇÃO.....	134
4.2.	ANÁLISE DOS RESULTADOS	136
4.2.1.	COMPRESSÃO AXIAL	136
4.2.2.	TRAÇÃO NA COMPRESSÃO DIAMETRAL	137
4.2.3.	COMPRESSÃO DIAMETRAL.....	138
4.2.4.	TENACIDADE.....	140
4.2.5.	ABSORÇÃO.....	143
CAPÍTULO 5	.....	144
5.1.	CONCLUSÕES FINAIS	144
5.2.	TRABALHOS FUTUROS	145
REFERÊNCIA	.....	147
BIBLIOGRAFIA	.....	153
ANEXO	.....	162

Lista de figuras

Figura 1: Aspecto do lixo e esgoto das ruas no período pré-1800	30
Figura 2:	32
(a)1º Teste de compressão diametral em setembro de 1924 em Neville Island, Pensilvânia, nos EUA	32
(b) Ensaio de compressão diametral utilizado atualmente	32
Figura 3: Municípios brasileiros que possuem saneamento básico.....	34
Figura 4:	35
(a) Rede de abastecimento de água	35
(b) Rede de esgoto sanitário	35
Figura 5: Esquema de um sistema de galeria de água pluvial	36
Figura 6: Sistema de galeria pluvial.....	37
(a) Boca de lobo dupla	37
(b) Poço de visita.....	37
Figura 7: Travessias	38
(a) Travessia de Estrada Rural.....	38
(b) Travessia de Ponte	38
Figura 8: Tipos de tubos de concreto	39
Figura 9: Encaixes do tipo ponta e bolsa e do tipo macho e fêmea	40
Figura 10: Tubos de concreto com encaixe do tipo ponta e bolsa	40
(a) Tubo de concreto com junta elástica (anel de borracha) do tipo ponta e bolsa .	40
(b) Tubo de concreto com junta rígida do tipo ponta e bolsa.....	40
Figura 11: Armação de aço para tubos de diâmetro de 600 mm	44
Figura 12: Fôrma externa.....	45
Figura 13: Local onde ficam as fôrmas internas (vibradores)	45
Figura 14: Fôrma Interna (vibradores para tubos $\varnothing=600\text{mm}$).....	46
Figura 15: Anel - serve como base de sustentação para o tubo de concreto durante a cura	46
Figura 16: Produção de tubos de concreto utilizando prensa hidráulica automática	47
Figura 17: Encaixe da armadura e do anel na fôrma externa	48
Figura 18: Colocação da fôrma externa, que contém a armadura e o anel, na fôrma interna (é o vibrador).....	48
Figura 19: Fabricação do concreto e manuseio deste até o local do sistema produtivo através de esteira rolante	49
Figura 20: Concreto sendo colocado no sistema produtivo	49
Figura 21: Adensamento do concreto através do sistema produtivo por vibração	50
Figura 22: Içamento do tubo de concreto para ser levado até o local de cura.....	50

Figura 23:	Acabamento por dentro do tubo.....	51
Figura 24:	Colocação do tubo no local de cura e retirada da fôrma externa.....	51
Figura 25:	Acabamento externo do tubo, sendo que neste momento o tubo é sustentado apenas pelo anel	52
Figura 26:	Apoio dos tubos quando estocados na posição horizontal	53
Figura 27:	Armazenamento de tubos de concreto na posição vertical.....	53
Figura 28:	Transporte dos tubos de concreto da fábrica ao consumidor final.....	54
Figura 29:	Transporte de tubos de concreto	55
Figura 30:	Montagem da tubulação para galeria de água pluvial.....	56
Figura 31:	Continuação da montagem da tubulação para galeria de água pluvial.....	57
Figura 32:	Mecanismo de controle de propagação das fissuras	60
Figura 33:	Diagrama tensão por deformação elástica de matriz e fibras de alto e baixo módulo de elasticidade trabalhando em conjunto.....	63
Figura 34:	Fibras de aço coladas e soltas e definição de fator de forma	65
Figura 35:	Tipos de fibras de aço.....	65
Figura 36:	Esquema de deformações ao longo da interface fibra-matriz.....	68
Figura 37:	Distribuição de tensões de cisalhamento elásticas ao longo da interface fibra-matriz	68
Figura 38:	Configuração de uma fibra parcialmente descolada e diagrama das tensões de cisalhamento e atrito na interface fibra-matriz	69
Figura 39:	Compósitos reforçados com fibras em teores abaixo (A), acima (B) e igual (C) ao volume crítico de fibras durante um ensaio de tração na flexão (tenacidade)	70
Figura 40:	Formação de novelos em concretos com fibras de aço.....	73
Figura 41:	Esquema de ensaio para determinação da tenacidade na compressão segundo a norma JSCE-SF5	78
Figura 42:	Representação esquemática do comportamento à flexão de um concreto convencional e de um concreto reforçado com fibras	79
Figura 43:	Curva carga x deslocamento vertical - quantificação da tenacidade através da norma japonesa JSCE-SF4	80
Figura 44:	Ensaio de tração na flexão utilizando o sistema yoke.....	81
Figura 45:	Distribuição granulométrica da areia.....	91
Figura 46:	Distribuição granulométrica da brita 1	92
Figura 47:	Fibra de aço colada em pente.....	94
Figura 48:	Produção de concreto com fibras de aço.....	95
Figura 49:	Corpos-de-prova sendo moldados no núcleo de vibração e depois totalmente imersos em água até atingirem a idade de 28 dias para a ruptura...98	

Figura 50:	Ensaio de compressão axial em corpo-de-prova cilíndrico	99
Figura 51:	Ensaio de tração na compressão diametral	100
Figura 52:	Lâmina padrão para medida de abertura de fissura 0,25mm	101
Figura 53:	Cutelo de madeira com tira de borracha de 5 mm de espessura.....	102
Figura 54:	Sistema de aplicação de carga composto pelo pistão, célula de carga e rótula	103
Figura 55:	Relógio comparador colocado nas duas extremidades opostas do tubo para medir as deformações diametraís	104
Figura 56:	Prensa hidráulica	104
Figura 57:	Sistema de aquisição de dados da marca lotech (Daqbook 120) conectado a um micro-computador através do software DasyLab (versão 6.0).....	105
Figura 58:	Esquema do plano de carregamento do ensaio de compressão diametral para tubos reforçados com fibras de aço	106
Figura 59:	Esquema do ensaio de compressão diametral para tubos de concreto do tipo ponta e bolsa	106
Figura 60:	Esquema do ensaio de compressão diametral para tubos de concreto do tipo macho e fêmea.....	107
Figura 61:	Tubo de concreto reforçado com fibra de aço após a ruptura	107
Figura 62:	Moldagem dos corpos-de-prova prismáticos	108
Figura 63:	Corpos-de-prova prismáticos utilizados na pesquisa	109
(a)	Cura imersa dos corpos-de-prova prismáticos	109
(b)	Corpo-de-prova antes do ensaio de tenacidade	109
Figura 64:	Máquina com deformação controlada para realizar o ensaio de tenacidade da marca MTS - capacidade de 20 toneladas	110
Figura 65:	Corpo-de-prova para o ensaio de tenacidade.....	110
Figura 66:	Corpo-de-prova prismático após o ensaio de tenacidade	111
Figura 67:	Amostras dos tubos de concreto.....	112
Figura 68:	Estufa – para secar as amostras de concreto do ensaio de absorção.....	112
Figura 69:	Resultados do ensaio de compressão axial em corpos-de-prova cilíndricos	114
Figura 70:	Resultados do ensaio de tração na compressão diametral em corpos- de-prova cilíndricos	115
Figura 71:	Resultados do ensaio de compressão diametral em tubos de concreto	117
Figura 72:	Resultado do ensaio de compressão diametral para tubos com fibras – teor de fibra – F1=10kg/m³	117

Figura 73: Resultado do ensaio de compressão diametral para tubos com fibras – teor de fibra – F1=10kg/m³	118
Figura 74: Resultado do ensaio de compressão diametral para tubos com fibras – teor de fibra – F1=10kg/m³	118
Figura 75: Resultado do ensaio de compressão diametral para tubos com fibras – teor de fibra – F2=15kg/m³	119
Figura 76: Resultado do ensaio de compressão diametral para tubos com fibras – teor de fibra – F2=15kg/m³	119
Figura 77: Resultado do ensaio de compressão diametral para tubos com fibras – teor de fibra – F2=15kg/m³	120
Figura 78: Resultado do ensaio de compressão diametral para tubos com fibras – teor de fibra – F3=20kg/m³	120
Figura 79: Resultado do ensaio de compressão diametral para tubos com fibras – teor de fibra – F3=20kg/m³	121
Figura 80: Resultado do ensaio de compressão diametral para tubos com fibras – teor de fibra – F3=20kg/m³	121
Figura 81: Resultado do ensaio de compressão diametral para tubos com fibras – teor de fibra – F4=25kg/m³	122
Figura 82: Resultado do ensaio de compressão diametral para tubos com fibras – teor de fibra – F4=25kg/m³	122
Figura 83: Resultado do ensaio de compressão diametral para tubos com fibras – teor de fibra – F4=25kg/m³	123
Figura 84: Resultado do ensaio de compressão diametral para tubos com fibras – teor de fibra – F5=30kg/m³	123
Figura 85: Resultado do ensaio de compressão diametral para tubos com fibras – teor de fibra – F5=30kg/m³	124
Figura 86: Resultado do ensaio de compressão diametral para tubos com fibras – teor de fibra – F5=30kg/m³	124
Figura 87: Resultado do ensaio de compressão diametral para tubos com fibras – CargaxDeslocamento - teor de fibra – F3=20kg/m³	126
Figura 88: Resultado do ensaio de compressão diametral para tubos com fibras – CargaxDeslocamento - teor de fibra – F3=20kg/m³	127
Figura 89: Resultado do ensaio de compressão diametral para tubos com fibras – CargaxDeslocamento - teor de fibra – F3=20kg/m³	127
Figura 90: Resultado do ensaio de compressão diametral para tubos com fibras – CargaxDeslocamento - teor de fibra – F4=25kg/m³	128
Figura 91: Resultado do ensaio de compressão diametral para tubos com fibras – CargaxDeslocamento - teor de fibra – F4=25kg/m³	128

Figura 92:	Resultado do ensaio de compressão diametral para tubos com fibras – CargaxDeslocamento - teor de fibra – F4=25kg/m³	129
Figura 93:	Resultado do ensaio de compressão diametral para tubos com fibras – CargaxDeslocamento - teor de fibra – F5=30kg/m³	129
Figura 94:	Resultado do ensaio de compressão diametral para tubos com fibras – CargaxDeslocamento - teor de fibra – F5=30kg/m³	130
Figura 95:	Resultado do ensaio de compressão diametral para tubos com fibras – CargaxDeslocamento - teor de fibra – F5=30kg/m³	130
Figura 96:	Resultado do ensaio de tenacidade – Teor de fibra – F1=10kg/m³ ...	131
Figura 97:	Resultado do ensaio de tenacidade – Teor de fibra – F2=15kg/m³ ...	131
Figura 98:	Resultado do ensaio de tenacidade – Teor de fibra – F3=20kg/m³ ...	132
Figura 99:	Resultado do ensaio de tenacidade – Teor de fibra – F4=25kg/m³ ...	132
Figura 100:	Resultado do ensaio de tenacidade – Teor de fibra – F5=30kg/m³	133
Figura 101:	Ensaio de Tenacidade para teor 20 kg/m ³	141
Figura 102:	Ensaio de Tenacidade para teor 25 kg/m ³	141
Figura 103:	Ensaio de Tenacidade para teor 30 kg/m ³	142

Lista de tabelas

Tabela 1:	Empilhamento máximo dos tubos de concreto quando colocados na posição horizontal	53
Tabela 2:	Propriedades mecânicas de diferentes fibras e matriz de cimento	62
Tabela 3:	Valores para o fator de eficiência (η_1) majorador do volume crítico em função da direção da fibra	71
Tabela 4:	Características físicas e químicas do cimento CPV (ARI PLUS RS) ...	90
Tabela 5:	Caracterização da areia	92
Tabela 6:	Caracterização da brita 1	93
Tabela 7:	Características das fibras de aço utilizadas para reforço estrutural, cujos valores foram obtidos no catálogo do fabricante (FFG1 - Wirand)	93
Tabela 8:	Traço do concreto utilizado na fabricação dos tubos (em volume)	94
Tabela 9:	Quantidade de tubos de concreto para o ensaio de compressão diametral	96
Tabela 10:	Quantidade de corpos-de-prova cilíndricos e prismáticos	96
Tabela 11:	Resultados do ensaio de compressão axial	113
Tabela 12:	Resultados do ensaio de tração na compressão diametral	115
Tabela 13:	Resultado do ensaio de compressão diametral para tubos armados - quanto à carga de fissura	116
Tabela 14:	Resultado do ensaio de compressão diametral para tubos armados, simples e com fibras de aço - quanto à carga de ruptura	116
Tabela 15:	Resultado do ensaio de compressão diametral para tubos com fibras de aço	125
Tabela 16:	Resultados da tenacidade e do fator de tenacidade para corpos-de-prova prismáticos com diferentes teores de fibras de aço	133
Tabela 17:	Resultados do ensaio de absorção para os tubos simples e armados	134
Tabela 18:	Resultados do ensaio de absorção para os tubos com fibras de aço	135
Tabela 19:	Compressão diametral de tubos armados e/ou reforçados com fibras de aço para tubos de águas pluviais	162
Tabela 20:	Compressão diametral de tubos armados e/ou reforçados com fibras de aço para tubos de esgotos sanitários	163
Tabela 21:	Compressão diametral de tubos simples para tubos de águas pluviais e de esgotos sanitários	163

Lista de abreviaturas

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABTC: Associação Brasileira dos Fabricantes de Tubos de Concreto
ACI: American Concrete Institute
ACPA: American Concrete Pipe Association
ASTM: American Society of Testing and Materials
ATHA: Asociación Española de Fabricantes de Tubos de Hormigón Armado
CESP: Companhia Energética de São Paulo
CHS: Silicato de cálcio hidratado
CRFA: Concreto Reforçado com Fibras de Aço
DAE: Departamento de Águas e Esgotos de São Paulo
EFNARC: European Federation of Producers and Applicators of Specialist Products for Structures
IBGE: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
JSCE: Japan Society of Civil Engineers
LVDT: Linear Voltage Differential Transducer
NBR: Normas Técnicas Brasileiras
NCA: Norwegian Concrete Association
PCA: Portland Cement Association
PNSB: Pesquisa Nacional de Saneamento Básico
RAE: Repartição de Águas e Esgotos de São Paulo
UNE: Asociación Española de Normalización y Certificación
UNESP: Universidade Estadual Paulista
USP: Universidade de São Paulo

Lista de símbolos

a/c: relação água cimento

l/d: fator de forma

DN: diâmetro nominal

L: comprimento útil mínimo do tubo

B: comprimento mínimo da bolsa ou da fêmea

D: espessura mínima da parede

PWc_{crit}: porcentagem crítica de fibras

SG_f: peso específico da fibra

SG_c: peso específico da matriz de concreto

d/l: relação inversa do fator de forma

W_m: peso da fração de argamassa

W_a: peso da fração de agregado

ε_{um}: deformação última da matriz

V_{fcrit}: volume crítico de fibras

σ_{uf}: tensão última das fibras

E_c: módulo de elasticidade do compósito

η₁: majorador do volume crítico em função da direção da fibra

η₂: redução de desempenho de fibras descontínuas

L_c: comprimento crítico

FT: fator de tenacidade na flexão

T_b: tenacidade na flexão

δ_{tb}: deflexão equivalente a L'/150

b: largura do corpo-de-prova prismático

h: altura do corpo-de-prova prismático

L': vão do corpo-de-prova prismático

A: índice de absorção de água

M₁: massa do corpo-de-prova após ensaio saturado (g)

M₀: massa do corpo-de-prova seca (g)

F1: teor de fibra=10 kg/m³

F2: teor de fibra=15 kg/m³

F3: teor de fibra=20 kg/m³

F4: teor de fibra=25 kg/m³

F5: teor de fibra=30 kg/m³

PS1: tubo simples – classe 1

PA1: tubo armado – classe 1

MPa: Mega Pascal

GPa: Giga Pascal

AVALIAÇÃO DE TUBOS DE CONCRETO REFORÇADOS COM FIBRAS DE AÇO SEGUNDO A NBR 8890

Ana Paula Fugii

Orientador: Prof. Dr. Jorge Luís Akasaki

RESUMO

Os tubos de concreto são utilizados em larga escala nas canalizações dos sistemas de abastecimento de água em diâmetros superiores a 400 mm, esgoto sanitário, drenagem pluvial, bueiro e travessia. Suas vantagens e aplicabilidade têm motivado diversas pesquisas sobre esse produto, dentre as quais podemos destacar a utilização de tubos de concreto reforçados com fibras de aço em substituição total da armadura.

As fibras de aço quando adicionadas ao concreto melhoram algumas propriedades, tais como: tenacidade, limitação de abertura de fissuras e resistência ao impacto.

A pesquisa objetiva analisar o comportamento mecânico de protótipos de tubos de concreto confeccionados com diferentes teores de adições de fibras de aço, tais como: 10 kg/m³, 15 kg/m³, 20 kg/m³, 25 kg/m³ e 30 kg/m³, em substituição total da armadura. Também foram fabricados tubos de concreto simples e armados para uma análise comparativa do comportamento mecânico entre aqueles e os tubos com fibras.

Os tubos de concreto possuem 600 mm de diâmetro nominal e 1,5 m de comprimento, destinados aos sistemas de drenagem de águas pluviais. As fibras de aço utilizadas possuem fator de forma igual a 75 e apresentam as seguintes características: 60 mm de comprimento médio e 0,80 mm de diâmetro médio.

Os corpos-de-prova cilíndricos foram submetidos aos ensaios: resistência à compressão axial, resistência à tração na compressão diametral, e os corpos-de-prova prismáticos foram submetidos aos ensaios de tenacidade enquanto os tubos de concreto foram submetidos aos ensaios: resistência à compressão diametral e absorção de água (amostras retiradas dos tubos após ensaio de compressão diametral).

Dos ensaios realizados se destaca o ensaio de compressão diametral pelo fato de ser ensaiado o tubo, sendo possível o estudo em escala real e com todas as peculiaridades que se pode observar.

A norma brasileira NBR 8890 (ABNT, 2007) normatiza o ensaio de compressão diametral para tubos de concreto, aplicado aos tubos reforçados com fibras de aço, que consiste em carregar, descarregar e re-carregar o tubo, de modo a se possibilitar a verificação da sua capacidade resistente pós-fissuração. Para os tubos simples e armados continua válido a obtenção do valor de carga de fissura e de ruptura como a norma anterior NBR 8890 (ABNT, 2003) previa.

Os resultados obtidos do ensaio de compressão diametral para tubos com fibras de aço foram satisfatórios, provando a aplicação das fibras como um reforço principal em pré-moldados de concreto. Sendo que dos teores de fibras de aço utilizados que obtiveram melhores resultados foram os teores: 20 e 25 kg/m³, obtendo 100% de resultados satisfatórios de todos os tubos ensaiados. Os teores de 10 e 30 kg/m³ obtiveram resultados semelhantes, 67% de resultados satisfatórios de todos os tubos ensaiados. Apenas o teor de 15 kg/m³ não conseguiu completar o plano de carregamento, sendo assim todos os tubos de concreto com fibras deste teor foram rejeitados. Os tubos simples e armados obtiveram resultados em torno de 53 kN/m enquadrando-se na classificação da norma em PS1 para os tubos simples e PA1 para os tubos armados.

O ensaio de tenacidade, ensaio que objetiva a análise do comportamento das fibras de aço no concreto, obteve bons resultados sendo que o fator de tenacidade cresceu conforme o aumento da quantidade de fibras, o que era esperado.

Com esta pesquisa, pode-se, concluir, a aplicação das fibras de aço em substituição total da armadura é possível e bem sucedida, desde que, estudado o teor ideal para cada tipo de concreto e sua destinação. A importância da norma NBR 8890 tratar de fibras de aço é a possibilidade do uso das fibras na produção em série de tubos de concreto e sua aplicação na prática, sendo que a maioria dos compradores particulares e órgãos públicos quando do ato da compra, torna obrigatório o ensaio dos tubos. Portanto, a adição de fibras de aço aos tubos de concreto é uma inovação tecnológica que sai dos laboratórios direto para as fábricas de tubos.

Palavras-chave: *tubos de concreto, fibras de aço, tenacidade e compressão diametral.*

EVALUATION OF CONCRETE PIPES REINFORCED WITH STEEL FIBERS ACCORDING TO NBR 8890

Ana Paula Fugii

Advisor: Prof. Dr. Jorge Luís Akasaki

ABSTRACT

The concrete pipe is widely used in plumbing systems in water supplying in higher diameters 400 mm, sewage, water rain drainage, storm drain and crossing. Its advantages and functions have motivated a lot of researches about this product, among them can point out used concrete pipes reinforced with steel fibers replacing the conventional framework.

The steel fibers when added concrete improvement some properties, such as: flexural toughness, limitation crack width and high strain rates strength.

The current text refers to a study developed to evaluate the mechanical behavior of manufactured prototypes with steel fibers added in different contents, such as: 10 kg/m³, 15 kg/m³, 20 kg/m³, 25 kg/m³ e 30 kg/m³, replacing the conventional framework. Also were manufactured simple concrete pipes and concrete pipes with framework for analysis to compare the mechanical behavior between that one and steel fibers.

The pipes used have 600 mm nominal diameter and 1,5 m length, used in systems in water rain drainage. The steel fibers used have aspect ratio 75 and present characteristics: 60 mm medium length and 0,80 mm medium diameter.

The circular specimens were submitted the testing for: compressive strength, tensile strength by diametrical compressive, and the rectangular specimens were submitted the testing for flexural toughness while the concrete pipes were submitted the testing for: diametrical compressive strength and absorption of water (sample retreat of pipes after the testing for diametrical compressive strength).

The testing for realized to point for diametrical compressive strength because the testing for the same concrete pipe and all particular characteristics for observed.

The Brazilian specification NBR 8890 (ABNT, 2007) specify the testing for diametrical compressive strength for concrete pipes applied to the pipes reinforced with fibers consists of loading, unloading and re-loading the pipe, in way facilitating the verification of its resistant capacity post-crack. For simple and framework pipes

continuous valid to obtain the crack loading and rupture loading the previous specification NBR 8890 (ABNT, 2003).

The results obtained the testing for diametrical compressive for concrete pipes with steel fibers were satisfactory for all pipes, proving the application the steels how principal reinforced for concrete of manufactured. The added contents 20 and 25 kg/m³ were the best results that obtained 100% the results satisfactory for all pipes. The added contents 10 and 30 kg/m³ obtained similar results, 67% satisfactory results the all pipes. Only the added content 15 kg/m³ didn't complete the plan of loading, all concrete pipes were rejected. The simple and framework pipes obtained results about 53 kN/m, the Brazilian specification classified PS1 for simple pipes and PA1 for framework pipes.

The testing for flexural toughness lens the analysis behavior the steel fibers in concrete, obtained good results, factor of flexural toughness grew according to increase the amount the fibers, were hoped.

The research, to concluded, the application steel fibers for reinforced concrete pipes is possible and very good, since, study the ideal addition for each kind of concrete. The importance to treat steel fibers is the possible application the practice, the most of purchasers and public organs make compulsory the testing for pipes. Therefore, the addition steel fibers in concrete pipes are an innovation technology that goes out laboratories for pipes factories.

Key words: *concrete pipes, steel fibers, flexural toughness and diametrical compressive.*

Organização da Dissertação

A organização da dissertação foi elaborada de modo a simplificar e facilitar o entendimento dos conceitos que serão abordados em cinco capítulos.

Capítulo 1 - Introdução

O capítulo 1 aborda de maneira sucinta o objetivo da dissertação e a importância do tema.

Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica

Este capítulo apresenta uma revisão bibliográfica dos temas mais relevantes para a pesquisa, tais como: concretos, tubos de concreto, concretos reforçados com fibras de aço e tubos de concreto reforçados com fibras de aço.

Capítulo 3 – Programa Experimental

No capítulo 3 serão apresentados os procedimentos e detalhes dos ensaios realizados em laboratório.

Capítulo 4 - Resultados

Neste capítulo serão mostrados e analisados os resultados dos ensaios realizados no laboratório. Os dados obtidos são tratados estatisticamente para serem posteriormente analisados e discutidos.

Capítulo 5 – Conclusão

Neste capítulo, breve discussão e conclusão sobre a análise dos resultados.

Posteriormente ao capítulo 5 encontram-se as referências bibliográficas, em seguida o anexo.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1. IMPORTÂNCIA DO TEMA

Até o início do século XIX, a população mundial não tinha noções de higiene e saúde pública, depositavam seus dejetos pessoais e lixos nas ruas e calçadas. Quando chovia, as águas das chuvas misturavam-se com os dejetos e as ruas pareciam montes de lama. Essa atitude colaborou para as epidemias que se alastravam por toda a Europa e EUA ocasionando inúmeras mortes.

A sociedade consciente dos males que a falta de infra-estrutura das cidades ocasionava iniciou um processo de implantação de redes de esgoto nas grandes cidades e, posteriormente, de galerias de águas pluviais. Essas obras foram fundamentais para o controle das doenças e hoje são essenciais para que a população não sofra com problemas de saúde pública.

Para a realização dos sistemas de infra-estruturas citados é fundamental que as tubulações apresentem os seguintes requisitos: resistência, durabilidade e impermeabilidade. A escolha do material constituinte do conduto é extremamente importante e deve atender aos requisitos básicos para as tubulações. A utilização dos tubos de concreto em canalizações de redes de esgoto e galerias de águas pluviais começou por volta de 1840, na Alemanha, e continua sendo um produto largamente utilizado nas canalizações enterradas devido sua característica tanto estrutural quanto hidráulica.

Os tubos de concreto podem ser simples (sem armadura) e armados, sua utilização será de acordo com a classe de resistência requerida no projeto. Os tubos de concreto quando enterrados desempenham a função de resistirem às solicitações de compressão, principal função do material concreto. Quando os tubos de concreto são armados, o aço tem a função de auxiliar o concreto a absorver os esforços de tração e de flexão que podem ocorrer durante a fabricação, o manuseio, o transporte e a montagem dos tubos.

Nos últimos trinta anos, estudos realizados com fibras de aço adicionadas ao concreto comprovaram a melhora de algumas propriedades do concreto e a possível substituição total da armadura pelas fibras de aço. Atualmente encontra-se no mercado brasileiro uma variedade de fibras metálicas disponíveis para utilização como reforço estrutural em concretos. Essas podem ser utilizadas como reforço para túneis de concreto, pavimentos rígidos, concreto projetado e tubos de concreto.

As fibras de aço não têm como finalidade principal o aumento da resistência do concreto quanto aos esforços solicitantes, mas servir como ponte de transferências de tensões através das fissuras e melhorar a tenacidade, isto é, a capacidade de suportar maiores deformações após o começo da fissuração do material, melhorar a capacidade de resistência ao impacto e limitar a abertura de fissuras. O comportamento do concreto com fibras de aço na ruptura, passa de frágil para pseudodúctil, isto significa que a estrutura antes de se romper apresenta sinais de ruptura visíveis.

1.2. OBJETIVO

O objetivo desta pesquisa é realizar uma análise comparativa do comportamento mecânico entre tubos de concreto simples, tubos de concreto armados e tubos de concreto com fibras de aço.

1.3. JUSTIFICATIVA

O tubo de concreto é um produto industrializado utilizado em larga escala pelos sistemas de abastecimento de água a partir de 400 mm de diâmetro, esgoto sanitário, drenagem de água pluvial, bueiro e travessia. Porém, quando se pesquisa sobre o tema *tubo de concreto* a bibliografia encontrada é escassa.

Nos últimos seis anos foram produzidos estudos sobre tubos de concreto e houve a revisão da Norma Técnica Brasileira - NBR 8890 no ano de 2003. As pesquisas realizadas com tubos de concreto com fibras de aço mostraram a possibilidade de substituição total da armadura por fibras de aço desde que o concreto seja bem dosado e observaram um comportamento mecânico semelhante aos tubos de concreto armados. Devido às pesquisas sobre tubos de concreto com fibras, em 2007 ocorreu a revisão da Norma Técnica Brasileira - NBR 8890 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT), que passou a normalizar os tubos de concreto fabricados com fibras de aço.

Uma das dificuldades presentes na fabricação de tubos armados encontra-se na necessidade de investimentos em equipamentos de corte, dobramento e montagem das armações quando se utiliza tela metálica ou na substituição destes equipamentos por mão-de-obra qualificada. As fibras de aço quando adicionadas ao concreto para fabricação dos tubos eliminam a etapa de fabricação da armadura, pois estas são adicionadas ao concreto como se fosse um elemento adicional do concreto.

Uma importante característica do tubo de concreto com fibras de aço é sua capacidade portante pós-fissuração, ou seja, depois de apresentar fissuras significativas o tubo suporta maior carregamento, isto significa uma melhora na durabilidade e vida útil do mesmo. Outro aspecto relevante é sua capacidade de resistência ao impacto, além de propiciar uma abertura menor das fissuras,

vantagem para os tubos de concretos destinados à canalização de esgoto sanitário.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. CONCRETO

Segundo Cohen (1988) citado por Isaia (2005, p.2), a argila foi o primeiro material manipulado pelo homem de modo intencional. Depois da argila, o homem começou a manipular outros materiais aglomerantes, tais como: o gesso utilizado pelos antigos egípcios e a cal utilizada pelos gregos e romanos, que posteriormente, aprenderam a misturar cal e água, areia e pedra britada.

O cimento Portland, principal componente do concreto, é o produto obtido pela pulverização de clinker constituído essencialmente de silicatos hidráulicos de cálcio, com uma certa proporção de sulfato de cálcio natural, contendo, eventualmente, adições de certas substâncias que modificam suas propriedades ou facilitam seu emprego (OLIVEIRA, 2000a, p.35).

O concreto de cimento Portland foi descoberto no final do século XIX e seu uso intensivo no século XX tornou-o mais importante material estrutural da atualidade, transformando-o material mais consumido pelo homem depois da água (HELENE e TIBÉRIO, 2007, p.905).

O concreto desde os primórdios é constituído essencialmente de um meio contínuo aglomerante e agregados, sendo que o meio aglomerante é formado por uma mistura de cimento hidráulico e água (METHA e MONTEIRO, 1994, p.8). Atualmente, com o progresso da ciência dos materiais observam-se concretos com

algumas diferenças dos chamados concretos básicos, porém a essência dos materiais constituintes do concreto continua a mesma. Essas diferenças ocorrem quando se podem utilizar o concreto com aditivos, pigmentos, fibras, agregados especiais e adições de minerais, sendo freqüentemente utilizados nos concretos atuais (HELENE e TIBÉRIO, 2007, p.921).

O concreto possui alta resistência aos esforços de compressão, em contrapartida possui baixa resistência aos esforços de tração. Com a necessidade de construir estruturas de concreto resistentes tanto aos esforços de compressão quanto aos esforços de tração, surgiu o concreto armado. Ao material concreto cabe a função de absorver as tensões de compressão e proteger o aço de ataques externos, por isso utiliza-se cobertura mínimo de armadura para garantir a proteção ao aço. Ao material aço, também chamado de armadura passiva, cabe a função de absorver as tensões de tração e auxiliar o concreto a absorver as tensões de compressão quando necessário (CAMACHO, 2006).

O concreto é um material que apresenta um comportamento frágil ou quase-frágil na ruptura, isto é, não apresenta sinais de alerta antes de romper. O aço é um material de comportamento dúctil, em situação de ruína apresenta sinais de aviso, na forma de deformação acentuada e fissuração intensa. Logo, o concreto armado possui comportamento pseudodúctil, apresentando sinais na ruptura, como fissuração e deformação intensas (HANAI, 2005, p.174).

2.2. TUBOS DE CONCRETO

2.2.1. HISTÓRIA

Nos registros históricos foram encontrados relatos sobre o modo como as civilizações antigas armazenavam e transportavam água, esgotavam as águas das chuvas e tratavam os seus próprios resíduos. Nesses registros, constatou-se que o

tubo de concreto começou a ser utilizado desde a antiguidade e continua sendo o material mais usado nas canalizações de rede de esgoto sanitário e de água pluvial.

Segundo Chama Neto (2004, p.4), a história da relação entre a população e a necessidade das canalizações enterradas, pode ser contada do ponto de vista da indústria de tubos de concreto, dividida em quatro períodos.

2.2.1.1. Período pré-1800

As canalizações construídas tinham a função de removerem as águas das chuvas, enquanto os despejos eram depositados nas ruas acumulando-se até que as águas das chuvas os conduzissem para dentro das canalizações. Nesse período, ainda não se utilizava nas canalizações materiais como o concreto, o plástico e o aço (PORTLAND CEMENT ASSOCIATION - PCA, 1968 citado por CHAMA NETO, 2004, p.5).

As obras deste período são: construção de galeria de esgotos e drenagem em Nippur, na Índia (3750 a.C); conduto subterrâneo para esgotamento das águas servidas de Tell-Asmar, em Bagdá (2600 a.C) e o coletor de águas pluviais e residuárias de Roma, chamado Cloaca Máxima, com diâmetro máximo de 4,3 metros, construído com blocos de pedra e cimento romano (800 a.C).



Figura 1: Aspecto do lixo e esgoto das ruas no período pré-1800

Fonte: AMERICAN CONCRETE PIPE ASSOCIATION - ACPA (1980) citado por CHAMA NETO (2004, p.5)

2.2.1.2. Período de 1800 a 1880

Este período é caracterizado por inúmeras epidemias no mundo, por exemplo, a epidemia de cólera asiática na Inglaterra por volta de 1854 e em seguida na França. Devido às várias mortes ocorridas, as construções das canalizações de esgotos foram aceleradas por toda a Europa, para solucionar este problema. Com a necessidade de um produto durável e resistente para a construção de esgotos sanitários surge a indústria de tubos de concreto. O primeiro e moderno coletor de esgotos foi construído no início da década de 1840, na cidade de Hamburgo, Alemanha (AZEVEDO NETTO, 1959 citado por CHAMA NETO, 2004, p.6).

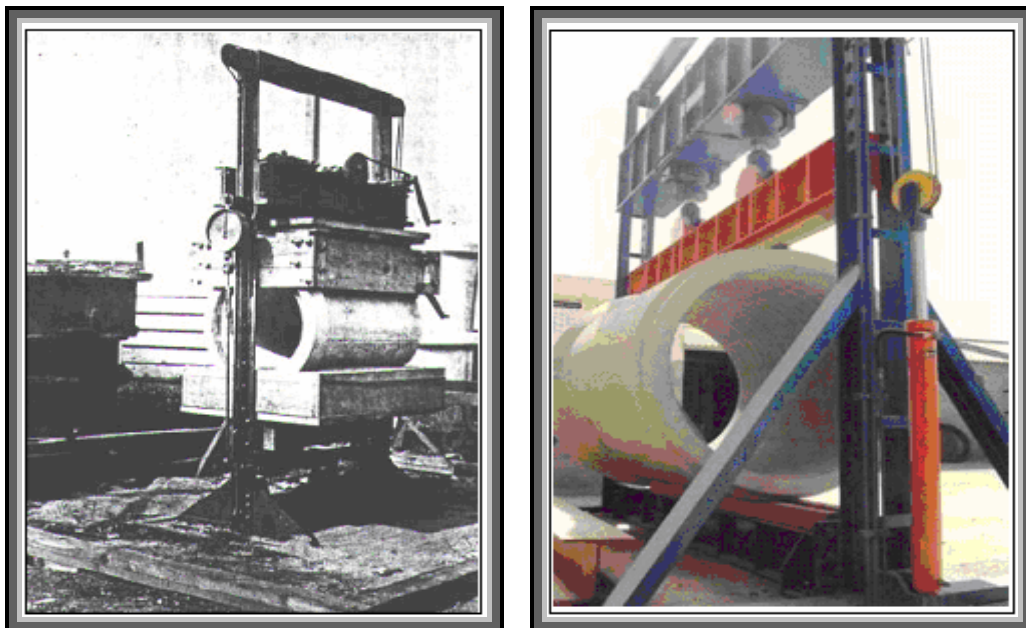
Segundo Chama Neto (2004, p.6), no Brasil foram realizadas obras de esgotos sanitários nas seguintes cidades: Rio de Janeiro (1857), Recife (1873) e São Paulo (1876).

2.2.1.3. Período de 1880 a 1930

Conforme ACPA (1980) citado por Chama Neto (2004, p.7), este período foi marcado por grandes acontecimentos ligados a indústria de tubos de concreto, tais como:

- Crescimento da indústria de tubos de concreto e desenvolvimento do mercado;
- Modernização dos projetos e técnicas de construção de redes de esgotos e de galerias de águas pluviais;
- Modernização nos projetos e produção dos tubos de concreto;
- 1889: Construída rede de esgoto em Santos;
- 1892: Construída rede de esgoto em Campinas;
- 1893: Foi criada a R.A.E.-Repartição de Águas e Esgotos de São Paulo, hoje denominado D.A.E.-Departamento de Águas e Esgotos;
- 1896: Construída rede de esgoto em Belo Horizonte;

- 1898: Fundação da American Society of Testing and Materials – ASTM, começou a história da padronização dos tubos de concreto com o comitê de estudo C4, precursor do comitê C13 que trata sobre tubos de concreto;
- 1907: Foi formada a Interstate Cement Tile Manufacturers Association que em 1914 passou a ser chamada de American Concrete Pipe Association - ACPA;
- Início da adoção do sistema separador absoluto em São Paulo;
- 1913: Marston e Anderson publicaram teorias para estimar as cargas atuantes nos tubos, posteriormente aprimorados por Marston e Talbot;
- 1924: No mês de setembro foi realizado o primeiro teste de resistência à compressão, em um tubo de 700 mm de diâmetro e 1500 mm de comprimento, na fábrica da Companhia Americana de Produtos de Concreto, em Neville Island, Pensilvânia, EUA;
- 1930: Marston se uniu a M.G.Spangler e W.J.Schlick para continuarem os trabalhos de avaliação das cargas e publicaram “The Theory of External Loads on Closed Conduits in The Light of The Latest Experiments”.



(a)

(b)

Figura 2:

(a) 1º Teste de compressão diametral em setembro de 1924 em Neville Island, Pensilvânia, nos EUA

Fonte: ACPA (1980) citado por CHAMA NETO (2004, p.7)

(b) Ensaio de compressão diametral utilizado atualmente

Fonte: CHAMA NETO (2004, p.7)

2.2.1.4. Período posterior a 1930

- Entre 1980 e 1995: Ocorreu uma crise econômica na Europa, afetando a indústria de tubos de concreto, obrigando os fabricantes de tubos diminuírem seus custos de produção (ANDRE, 1995 citado por CHAMA NETO, 2004, p.8);
- 2001: Foi criada no Brasil a Associação Brasileira de Fabricantes de Tubos de Concreto – ABTC.

2.2.2. APLICAÇÕES

Os tubos de concreto podem ser utilizados em:

- Sistemas de abastecimento de água;
- Esgoto sanitário;
- Drenagem de água pluvial;
- Bueiro;
- Travessia;
- Outros;
 - ✓ Poços de inspeção;
 - ✓ Poços de lençol freático;
 - ✓ Passagem de instalações subterrâneas;
 - ✓ Passagem de animais e pedestres;
 - ✓ Dispositivos de playground.

2.2.2.1. Abastecimento de água e Rede de esgoto sanitário

O abastecimento de água potável é um serviço público essencial e indispensável, a distribuição de água através da rede pública tem como conseqüência a necessidade de coleta e o afastamento das águas servidas, que acontece pelos sistemas de

esgotos sanitários. Logo, as cidades necessitam de adequados sistemas de esgotos sanitários e de drenagem de águas pluviais (AZEVEDO NETTO, PERA, MARTINS et al, 1977 p.1).

Saneamento básico é um conceito que engloba o abastecimento de água e o esgotamento das águas servidas. A Pesquisa Nacional de Saneamento Básico - PNSB, divulgada no ano de 2000, constatou que 97,9% dos municípios brasileiros possuem abastecimento de água, 78,6% possuem serviços de drenagem urbana, 99,4% tem coleta de lixo e apenas 52,2% possuem serviços de esgotos sanitários, como mostra figura 3. O gráfico não mostra o valor da drenagem urbana, pois ela foi computada apenas na PNSB de 2000 (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE, 2007).

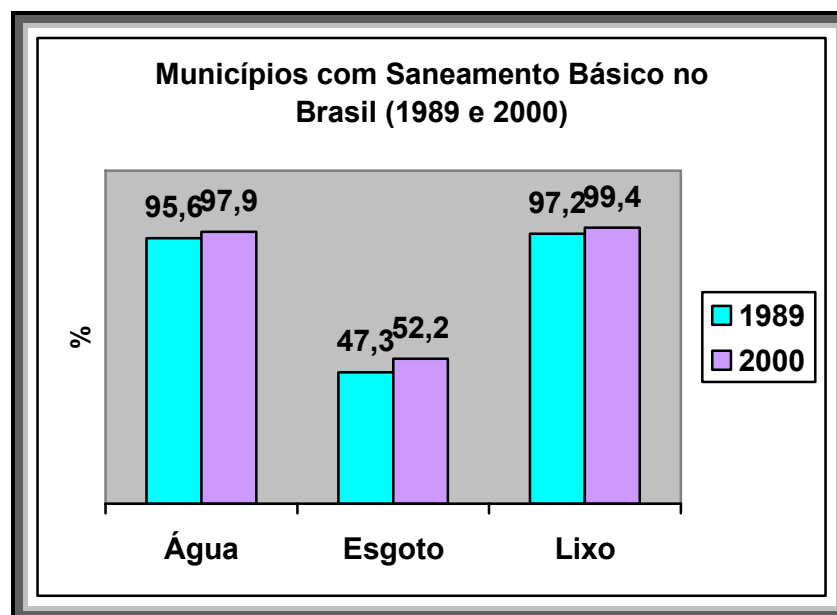
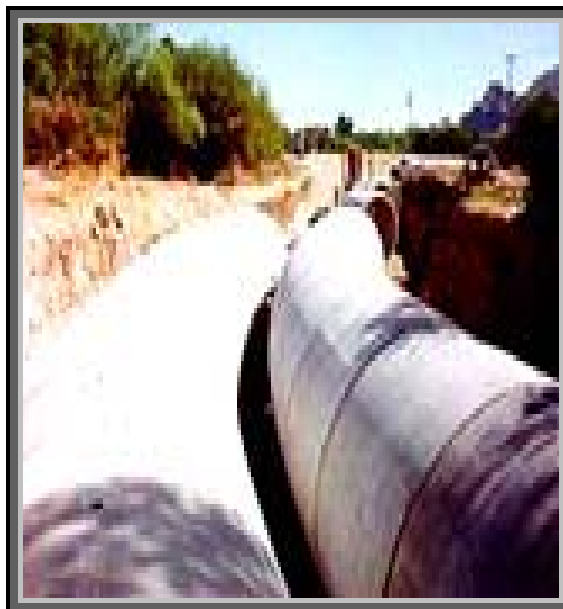


Figura 3: Municípios brasileiros que possuem saneamento básico

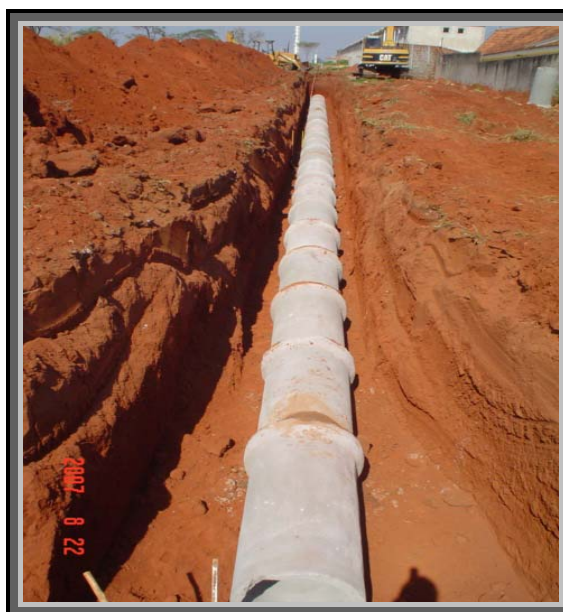
Fonte: IBGE (2007)

Através da análise do gráfico apresentado na figura 3 percebe-se que embora a maior parte dos municípios brasileiros possua água servida, metade daqueles possuem o esgotamento das águas servidas, conseqüentemente a falta de esgoto sanitário nas cidades ocasiona diversas doenças entre outros problemas para a população.

Na figura 4 observa-se fotos das canalizações de água potável e de esgoto sanitário produzidas em concreto.



(a)



(b)

Figura 4:

(a) Rede de abastecimento de água

Fonte: ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE FABRICANTES DE TUBOS DE HORMIGÓN ARMADO - ATHA (2008)

(b) Rede de esgoto sanitário

Fonte: CASO CONSTRUTORA LTDA (2007)

2.2.2.2. Drenagem de água pluvial

Com a crescente urbanização e loteamento de áreas antes sem interferência da ação do homem, cria-se uma nova situação de equilíbrio para o ambiente modificado. Com a nova situação, as vazões superficiais que ocorrerão depois da impermeabilização do ambiente serão maiores que antes da ocupação, parte da chuva que infiltrava na área permeável existente agora será escoada. Para que as águas das chuvas sejam captadas são necessários sistemas de drenagem de águas pluviais, assim evita-se que a água da chuva se acumule em pontos baixos das cidades e conseqüentemente provoquem as enchentes (BOTELHO, 1998, p.2).

De acordo com Gebara (2004), as águas provenientes das chuvas são coletadas e conduzidas pelos sistemas de galerias de águas pluviais, conhecidos como drenagem urbana. O sistema de drenagem urbana é o conjunto de obras destinadas ao controle das águas pluviais excessivas devido à urbanização não planejada e à diminuição dos prejuízos sociais, econômicos e sanitários que variam conforme as proporções das inundações. As partes constituintes de um sistema de drenagem de águas pluviais são: macro-drenagem e micro-drenagem, sendo este último sistema subdividido em: captação, bocas de lobo, galerias e poços de visita.

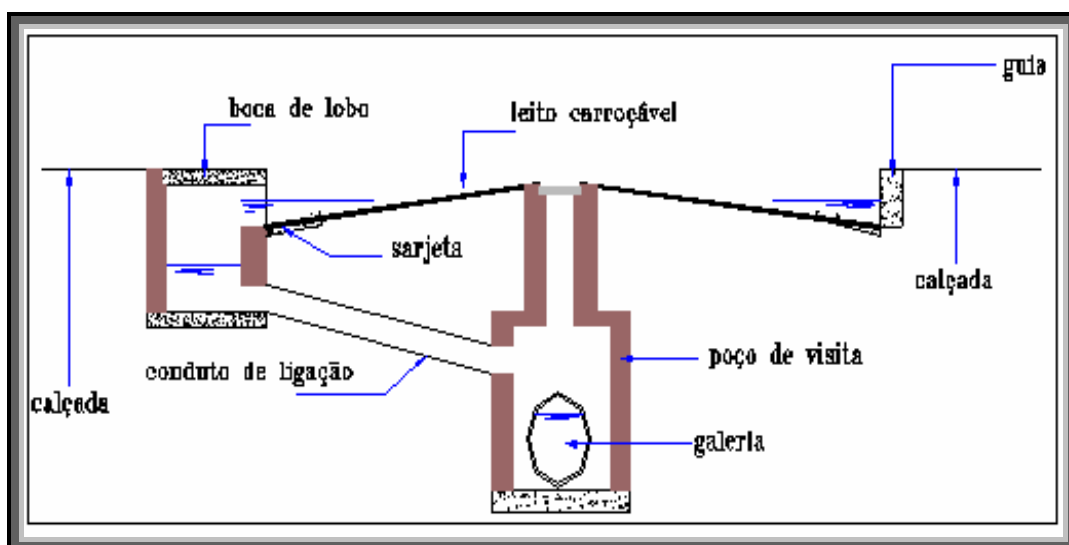


Figura 5: Esquema de um sistema de galeria de água pluvial

Fonte: GEBARA (2004)



(a)



(b)

Figura 6: Sistema de galeria pluvial

(a) Boca de lobo dupla

(b) Poço de visita

Fonte: CASO CONSTRUTORA LTDA (2005)

2.2.2.3. Bueiro e Travessia

Outro tipo de aplicação ao tubo de concreto é sua utilização em travessias e em bueiros, como mostra a figura 7 (a) e (b).



(a)



(b)

Figura 7: Travessias

(a) Travessia de Estrada Rural

Fonte: CASO CONSTRUTORA LTDA (2006)

(b) Travessia de Ponte

Fonte: ACPA (2008)

2.2.3. TIPOS DE TUBOS DE CONCRETO

Segundo a figura 8 os tipos de tubos de concreto de acordo com a sua destinação:

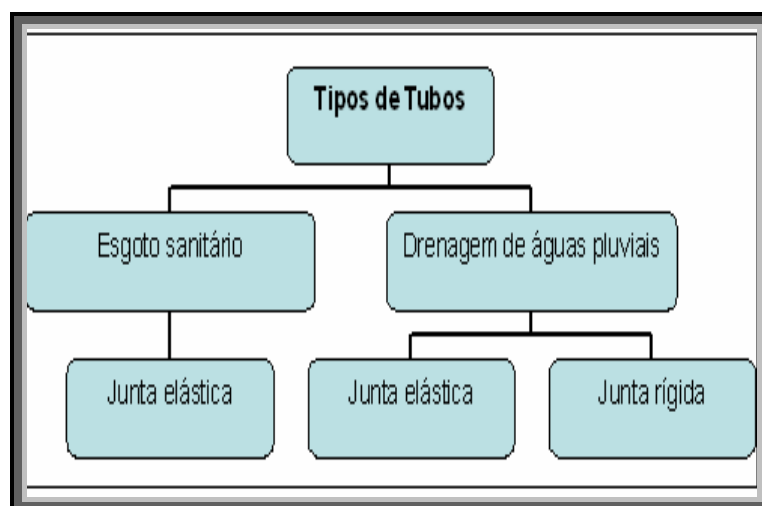


Figura 8: Tipos de tubos de concreto

Os tubos de junta elástica são providos de anel de borracha para promover o adequado encaixe das partes do tubo. Os tubos para esgoto sanitário possuem encaixe do tipo ponta e bolsa, os tubos destinados a águas pluviais possuem encaixe de dois tipos: macho e fêmea e ponta e bolsa.

A figura 9 mostra os dois tipos de encaixe macho e fêmea e ponta e bolsa. A figura 10 mostra tubos de concreto com encaixe macho e fêmea com junta rígida e junta elástica (borracha).

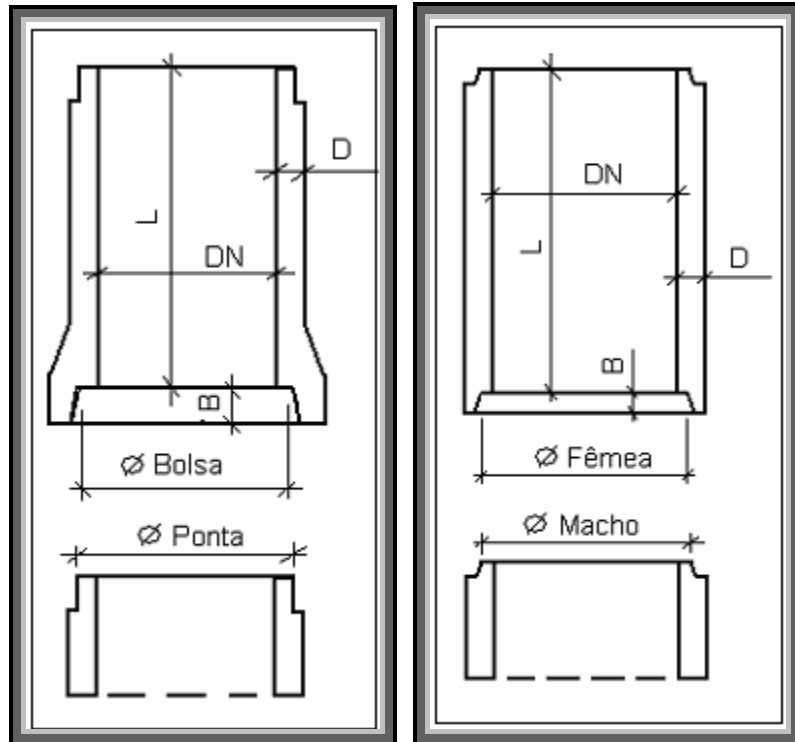


Figura 9: Encaixes do tipo ponta e bolsa e do tipo macho e fêmea

Fonte: NBR 8890 (ABNT, 2007)

Onde:

DN: diâmetro nominal;

L: comprimento útil mínimo do tubo;

B: comprimento mínimo da bolsa ou da fêmea;

D: espessura mínima da parede (valor tabelado).



(a)

(b)

Figura 10: Tubos de concreto com encaixe do tipo ponta e bolsa

(a) Tubo de concreto com junta elástica (anel de borracha) do tipo ponta e bolsa

(b) Tubo de concreto com junta rígida do tipo ponta e bolsa

Fonte: FERMIX (2008)

Segundo a ABTC (2008) e ATHA (2008), as vantagens da utilização de tubos de concreto nas canalizações de condutos enterrados são:

- Durabilidade;
- Paredes dos tubos praticamente impermeáveis;
- Baixo custo quando comparado a outros materiais;
- Estanqueidade das juntas;
- Facilidade e rapidez de execução das obras;
- Resistência a líquidos agressivos;
- Resistência a esforços dinâmicos e de impacto;
- Resistência mecânica;
- Resistência a pressões interiores;
- Flexibilidade de produção;
- Requer mínima conservação posterior;
- Ruptura quase-dúctil (tubos de concreto armado);
- Não necessita de medidas especiais contra corrosão.

Uma desvantagem da utilização de tubos de concreto nas canalizações de condutos enterrados é elevado peso próprio do concreto, da ordem de 25 kN/m³.

2.2.4. PROJETO

O projeto de tubos de concreto envolve duas etapas:

- Projeto Estrutural
- Projeto Hidráulico

O projeto estrutural de tubos de concreto resume-se à determinação dos carregamentos sobre a tubulação enterrada e o dimensionamento desta, predominando os conceitos e teorias decorrentes dos trabalhos de Marston e Spangler (CHAMA NETO, 2004, p.21).

No projeto hidráulico são tomadas as decisões necessárias à garantia do bom desempenho funcional do condutor, com a definição de suas características

geométricas (secção de vazão, locação em planta e corte), medidas de proteção contra erosão, entupimentos, riscos de inundação; levando-se em conta todas as ações hidráulicas capazes de agir sobre a estrutura (ZAILLER, 1983, p.11).

2.2.5. FABRICAÇÃO, ARMAZENAMENTO, TRANSPORTE E MONTAGEM

2.2.5.1. FABRICAÇÃO

O processo de fabricação dos tubos de concreto inicia-se com a adequada seleção dos materiais a serem utilizados no concreto e ensaios em laboratório para a caracterização dos mesmos. Depois de caracterizado o material inicia-se o processo de dosagem do concreto para determinação das quantidades dos materiais que irão compor o traço (CHAMA NETO, 2004 p.59).

Em uma fábrica de tubos de concreto enquanto uma equipe cuida dos materiais para dosagem do concreto, outra equipe prepara as armaduras para a fabricação dos tubos, ou a fábrica adota a utilização de telas soldadas ao invés da fabricação das armaduras *in loco*. Em seguida, inicia-se o processo de fabricação dos tubos que consiste em: colocar a armadura na fôrma e em seguida encaixá-la ao sistema de produção, que pode ser por vibração simples, vibração com prensagem ou centrifugação radial, adicionar o concreto na fôrma por meio de esteiras rolantes que fazem a ponte entre a unidade dosadora e o local do sistema produtivo.

2.2.5.1.1. Traço e dosagem do concreto

Traço é um conjunto de proporções dos materiais constituintes do concreto, expressas em massa ou volume, relativamente à quantidade de cimento, ou em valores absolutos (CHAMA NETO, 2004 p.60). A definição do traço depende da consistência e trabalhabilidade do concreto desejado, no caso dos tubos de concreto, deseja-se concreto de consistência seca, na qual a forma de adensamento interfere nas propriedades requeridas do concreto.

Dosagem em tecnologia do concreto é a rotina para estabelecer quantidades ótimas dos componentes de um concreto ou argamassa para atender determinadas propriedades; o objetivo comum desta rotina é proporcionar uma mistura com menor porosidade e máxima densidade (SCANDIUZZI e ANDRIOLO, 1986 p.49). Para escolha do método de dosagem são fundamentais as propriedades: consistência e trabalhabilidade. O método escolhido pode ser ideal para dosar concretos plásticos, mas quando utilizado para dosar um concreto de consistência seca este pode não satisfazer as peculiaridades do concreto seco.

Para concreto de consistência seca leva-se em conta, o adequado adensamento do concreto, utilizando um processo de adensamento energético (vibro-prensagem) para a moldagem dos tubos, por esta razão, os concretos de consistência seca não podem ser totalmente reproduzidos em laboratórios, devido à inexistência de equipamentos que reproduzam a energia dos equipamentos da fábrica (CHAMA NETO, 2004, p.60). A relação água/cimento - a/c deve ser no máximo 0,50 para tubos destinados a águas pluviais e no máximo 0,45 para tubos destinados a esgotos sanitários, segundo a NBR 8890 (ABNT, 2007).

2.2.5.1.2. Armaduras

Segundo a NBR 8890, a armadura principal do tubo deve ser posicionada de forma a garantir o atendimento aos cobrimentos mínimos exigidos, para isto, utiliza-se espaçadores, conforme mostrado na figura 11. As barras transversais da armadura (barras ou telas) não devem afastar-se entre si ou das extremidades do tubo por mais de 150 mm, sendo que na bolsa este afastamento não pode ser maior que 50 mm, tendo pelo menos duas espiras em sua extremidade. As emendas de barras podem ser feitas por transpasse ou solda, por metodologias que garantam a continuidade da capacidade estrutural do conjunto (ABNT, 2007).

Na prática para garantir o espaçamento adequado utiliza-se espaçadores redondos envolto a armação fabricados com material de polietileno de alta densidade, como mostra a figura 11.



Figura 11: Armação de aço para tubos de diâmetro de 600 mm
Fonte: CASO CONSTRUTORA (2008)

2.2.5.1.3. Tipos de Processo de Fabricação de Tubos de Concreto

Os concretos utilizados para a fabricação de tubos possuem consistência seca (slump zero) e isso se deve a falta de permanência da fôrma por um tempo prolongado, ou seja, assim que o tubo é fabricado, a fôrma é retirada para dar continuidade ao processo de fabricação.

A fôrma é constituída de três partes, sendo uma interna, outra externa e por último o chamado anel, que serve como base para o tubo durante a moldagem. A fôrma interna é o núcleo vibratório, ou seja, é o responsável pela vibração do concreto quando este é lançado do misturador planetário/betoneira para a fôrma. A fôrma externa é constituída de aço com a forma do tubo e pode ser desmontada. Assim que termina o processo de adensamento, a fôrma externa é içada pelo guincho juntamente com o anel e levados ao local de cura do tubo. Este local deve possuir um piso nivelado para que durante o processo de cura o tubo não se deforme (GUIMARÃES, RECENA, PEREIRA, 2007, p.963).

A fôrma externa então é retirada através de sua desmontagem parcial, e o tubo permanece apenas com o anel, sendo sustentado pelo seu próprio peso, por isso a necessidade de se utilizar concreto de consistência seca, caso contrário, não haveria a possibilidade da retirada da fôrma externa.



Figura 12: Fôrma externa



Figura 13: Local onde ficam as fôrmas internas (vibradores)



Figura 14: Fôrma Interna (vibradores para tubos $\text{Ø}=600\text{mm}$)



Figura 15: Anel - serve como base de sustentação para o tubo de concreto durante a cura

Atualmente os tipos de sistemas que envolvem o adensamento do concreto na fabricação dos tubos consistem em: vibração simples, vibração com prensagem e centrifugação radial.

O procedimento de prensagem simples é utilizado para a fabricação de tubos de diâmetros menores e sem armadura, sendo normalmente associado com vibração

simples. No processo de vibração, os vibradores podem ser colocados na fôrma externa ou na fôrma interna. No adensamento por centrifugação radial a fôrma interna é móvel provido de massas que giram com alguma excentricidade juntamente com a mesma, comprimindo o concreto contra a fôrma externa.

A figura 16 mostra o sistema produtivo de tubos de concreto utilizando o adensamento por centrifugação radial.



Figura 16: Produção de tubos de concreto utilizando prensa hidráulica automática

Fonte: MENEGOTTI EQUIPAMENTOS (2008)

Para a pesquisa foi utilizado o processo de vibração do tubo, com o núcleo vibratório (fôrma interna) fixa e a fôrma externa móvel, como é mostrada nas figuras abaixo.



Figura 17: Encaixe da armadura e do anel na fôrma externa



Figura 18: Colocação da fôrma externa, que contém a armadura e o anel, na fôrma interna (é o vibrador)



Figura 19: Fabricação do concreto e manuseio deste até o local do sistema produtivo através de esteira rolante

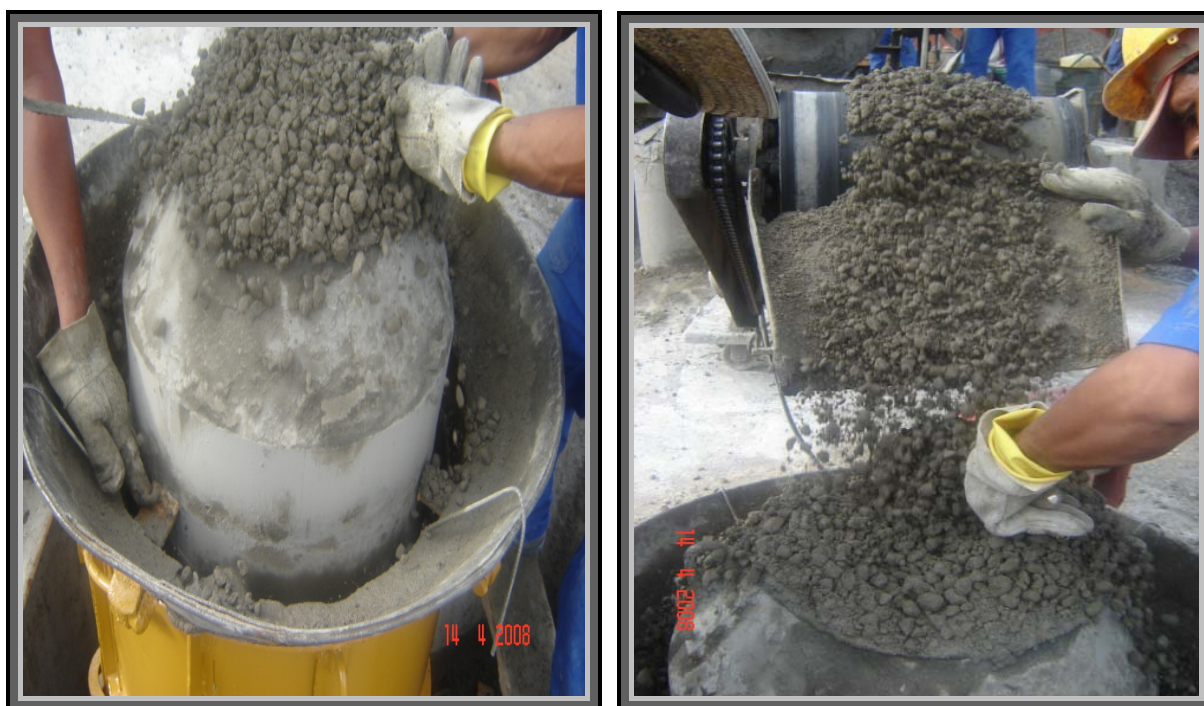


Figura 20: Concreto sendo colocado no sistema produtivo



Figura 21: Adensamento do concreto através do sistema produtivo por vibração



Figura 22: Içamento do tubo de concreto para ser levado até o local de cura



Figura 23: Acabamento por dentro do tubo



Figura 24: Colocação do tubo no local de cura e retirada da fôrma externa



Figura 25: Acabamento externo do tubo, sendo que neste momento o tubo é sustentado apenas pelo anel

2.2.5.2. ARMAZENAMENTO

Segundo a NBR 8890, após a moldagem, os tubos devem ser transportados da área de fabricação até a área destinada à cura e estocados na posição vertical sobre um piso nivelado e, depois do período de cura, devem ser transportados até o pátio de estocagem através de equipamentos com amortecimento de impactos para não danificar as extremidades dos tubos. Caso ocorra a necessidade da estocagem na posição horizontal, por motivos de segurança, a mesma deve ocorrer após 3 dias da data de fabricação ou quando atingirem características de resistência para tal, sendo que os tubos devem ser apoiados em terrenos nivelados sobre tábuas de madeira, conforme figura 26 (ABNT, 2007).

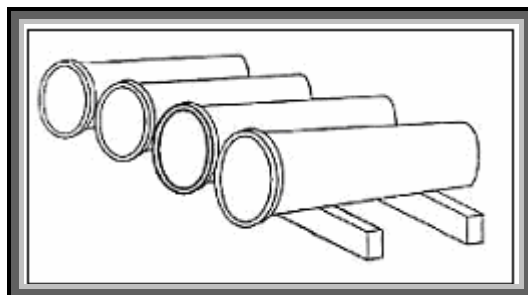


Figura 26: Apoio dos tubos quando estocados na posição horizontal
Fonte: NBR 8890 (ABNT, 2007)

A tabela 1 mostra a quantidade máxima de pilha de tubos de concreto quando armazenados na posição horizontal, segundo a NBR 8890 (ABNT, 2007).

Tabela 1: Empilhamento máximo dos tubos de concreto quando colocados na posição horizontal
Fonte: NBR 8890 (ABNT, 2007)

Diâmetro nominal (mm)	Número máximo de pilhas
200 a 400	4
500 a 600	3
700 a 1000	2
> 1000	1

A figura 27 mostra o armazenamento de tubos de concreto no pátio de uma fábrica, local de armazenamento e cura dos tubos.



Figura 27: Armazenamento de tubos de concreto na posição vertical
Fonte: CASO CONSTRUTORA LTDA (2008)

2.2.5.3. TRANSPORTE

Segundo a NBR 8890, para o içamento do tubo até o veículo que será transportado, utilizar preferencialmente equipamentos que não danifiquem a integridade dos tubos de concreto e sempre que possível transportá-los na posição vertical (ABNT, 2007).



Figura 28: Transporte dos tubos de concreto da fábrica ao consumidor final
Fonte: CASO CONSTRUTORA LTDA (2008)



Figura 29: Transporte de tubos de concreto
Fonte: CASO CONSTRUTORA LTDA (2008)

2.2.5.4. MONTAGEM

De acordo com a NBR 8890, os tubos devem ser descarregados na obra com equipamentos adequados evitando-se danos mecânicos e dimensionais por choques e impactos. Através dos cabos e ganchos, os tubos de concreto serão içados e colocados nas instalações destinadas a ele, em vala ou em aterro (ABNT, 2007).

No caso de tubos de concreto de junta rígida, não há necessidade de se colocar o anel de borracha, sua instalação realiza-se com o devido encaixe da ponta na bolsa, utilizando uma argamassa envolta ao tubo, para que não ocorra vazamento dos líquidos que serão transportados através dos tubos. Quanto à fabricação desse tipo de tubo, devem-se tomar cuidados para que a ponta e a bolsa estejam nas suas corretas dimensões, para evitar falhas no momento da instalação dos tubos. No caso de tubos de junta elástica devem-se tomar os devidos cuidados no encaixe da borracha, caso esta não venha encaixada previamente.

Nas figuras 30 e 31, as fotos mostram a montagem de tubos de concreto em uma galeria de águas pluviais.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 30: Montagem da tubulação para galeria de água pluvial



(e)



(f)



(g)



(h)

Figura 31: Continuação da montagem da tubulação para galeria de água pluvial
Fonte: CASO CONSTRUTORA LTDA (2006)

2.2.6. CONTROLE DE QUALIDADE

O concreto como qualquer outro produto industrial que desempenha função de responsabilidade, precisa ser submetido ao controle de qualidade. Devido às inúmeras variáveis que influem nas suas características, é indispensável a rigorosa seleção dos materiais e estudos de dosagens, controle de execução e das características do concreto armado (OLIVEIRA, 2000b, p.289).

O controle de qualidade dos tubos de concreto é de responsabilidade tanto do fabricante quanto do comprador, por isso o comprador deverá realizar ensaios de inspeção para verificar se o fabricante atendeu aos requisitos da norma de tubos de concreto. De acordo com a norma brasileira para tubos de concreto NBR 8890 (ABNT, 2007), deve-se retirar de cada lote, de forma aleatória, a quantidade necessária de amostras para realização dos seguintes ensaios:

- Absorção;
- Compressão diametral;
- Permeabilidade e estanqueidade da junta;
- Dimensões, tolerâncias e aspectos visuais.

De acordo com Chama Neto (2004, p.55), as normas internacionais são semelhantes, em alguns aspectos, à norma brasileira, por exemplo, quanto ao tipo de cimento, fabricação dos tubos, limite máximo do índice de absorção, máxima relação a/c, e quanto ao ensaio de compressão diametral, todas as normas especificam o valor da carga de fissura (ou trinca) e ruptura em função da classe do tubo e do diâmetro nominal. As normas internacionais de tubos de concreto vigentes são:

- Americanas: ASTM C14-99 e ASTM C76-99
- Inglesa: BS 5911: Part 100:1988
- Japonesa: JIS A 5302-90
- Espanhola: UNE 127 010 EX:1995
- Européia: NBN EN1916:2002

2.3. CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO (CRFA)

Os materiais compósitos utilizados atualmente na construção civil têm seu berço no antigo Egito, como revelam as Sagradas Escrituras, no livro de Êxodo, capítulo 5 versículos 6 e 7: “ Naquele mesmo dia, pois, deu ordem Faraó aos superintendentes do povo e aos seus capatazes, dizendo: daqui a diante não torneis a dar palha ao povo, para fazer tijolos, como antes; eles mesmos que vão e ajuntem para si a palha” (BÍBLIA SAGRADA citada por BENTUR e MINDESS, 1990, p.1).

O Homem aprendeu com a natureza a saciar seus anseios construtivos através da observação. O pássaro *Rufus furnarios* (conhecido popularmente como João-de-barro) constrói sua casa com bolinhas de argila e acrescenta na massa úmida fibras vegetais que auxiliam na prevenção de fissuras de retração da argila ao secar (METHA e MONTEIRO, 1994, p.434).

Há aproximadamente quarenta anos, a comunidade científica despertou-se para a utilização de pedaços curtos de arames metálicos adicionados ao concreto para a melhoria da resistência ao esforço de tração, segundo o conceito de mecânica da fratura (ROMUALDI e MANDEL, 1964 citados por NUNES, 2006, p.58). Tempos depois, os pesquisadores Hannant (1986) e Bentur e Mindess (1990) comprovaram que as adições de fibras metálicas ao concreto não melhoram a resistência à compressão e nem a resistência à tração, mas, sim, o comportamento do material na iminência da ruptura, ou seja, transformam o comportamento do concreto de frágil para pseudodúctil.

No caso do concreto simples, uma fissura irá representar uma barreira à propagação de tensões. Devido à barreira imposta, ocorrerá uma concentração de tensões na extremidade da fissura e quando esta tensão superar a resistência da matriz de concreto acontece a ruptura abrupta (sem aviso) do concreto. Quando são adicionadas as fibras de aço ao concreto, estas servem como ponte de transferência

de tensões através das fissuras e dificultam a propagação e concentração das fissuras, devido ao seu elevado módulo de elasticidade. O concreto fibroso passa a ter um comportamento pseudodúctil, ou seja, apresenta uma capacidade portante pós-fissuração (FIGUEIREDO, 2000, p.11).

A figura 32 mostra a atuação das fibras de aço como ponte de transferência de tensões quando ocorre a fissura no concreto.

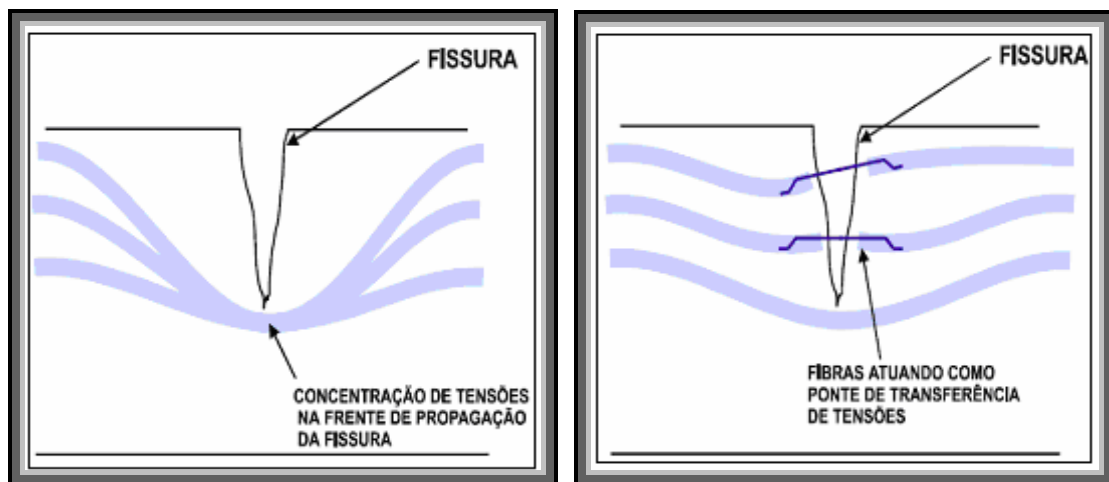


Figura 32: Mecanismo de controle de propagação das fissuras

Fonte: NUNES (2006, p.11)

Logo, o concreto fibroso quando comparado ao concreto convencional é muito mais tenaz e mais resistente ao impacto (METHA e MONTEIRO, 1994, p.435). Com a utilização das fibras será assegurada uma menor fissuração do concreto, portanto é pertinente recomendar a utilização dessas, mesmo para concretos convencionalmente armados (MINDESS, 1995 citado por FIGUEIREDO, 2000, p.11).

2.3.1. INTRODUÇÃO AOS COMPÓSITOS À BASE DE CIMENTO REFORÇADOS COM FIBRAS

Segundo Bentur e Mindess (1990, p.15), as propriedades dos materiais cimentícios reforçados com fibras são dependentes da estrutura do compósito. Portanto, segundo as regras para analisar estes compósitos e para prever o seu desempenho em diversas condições de carregamento, a sua estrutura interna tem que ser bem

caracterizada. Os três componentes a serem considerados são: a estrutura da matriz cimentícia, a forma e distribuição das fibras e por fim a estrutura da interface fibra-matriz.

2.3.1.1 Matriz

O volume da matriz cimentícia não é muito diferente de outros materiais cimentícios, e pode ser dividido em três tipos, tais como: pastas, argamassas e concretos. A matriz é constituída de um esqueleto sólido e poros, sendo o principal componente do esqueleto sólido o silicato de cálcio hidratado - CSH. Nas pastas o CSH é o único elemento do esqueleto, já nas argamassas e nos concretos o CSH faz uma ponte entre os agregados graúdos e miúdos componentes do esqueleto sólido. As matrizes podem ter resistência normal (até 50 MPa), alta (de 50 MPa até 100 MPa) e altíssima (maior que 100 MPa). A resistência está associada à compacidade e a quantidade de hidratos de cálcio formados, estando diretamente relacionado com a aderência fibra-matriz (LOPES, 2005, p.4).

2.3.1.2 Fibras

A primeira fibra utilizada como reforço de matrizes cimentícias na produção de compósitos industriais foi a fibra de amianto, que data de 1900 (LOPES, 2005, p.4). Segundo Figueiredo (2000, p.6), diversas fibras têm sido utilizadas para controle da fissuração do concreto e como reforço de matrizes à base de cimento, tais como:

- Fibras minerais: fibras de amianto e de vidro;
- Fibras orgânicas: fibras de origem vegetal (sisal, coco e celulose) e fibras sintéticas (polipropileno e nylon);
- Fibras metálicas: fibras de aço.

O módulo de elasticidade constitui um parâmetro importante para classificar as fibras. Essas podem ser classificadas em:

- Fibras de baixo módulo de elasticidade: são as fibras de polipropileno, nylon e polietileno (baixa resistência mecânica).

- Fibras de alto módulo de elasticidade: são as fibras de aço.

Bentur e Mindess (1990, p.2), compararam em uma tabela valores de resistências mecânicas e módulos de elasticidade de diversos tipos de fibras com uma matriz de cimento, conforme mostra a tabela 2.

Tabela 2: Propriedades mecânicas de diferentes fibras e matriz de cimento

Fonte: BENTUR e MINDESS (1990, p.2)

Fibra	Diâmetro (μm)	Densidade (g/cm^3)	Módulo de elasticidade (GPa)	Resistência à tração (GPa)	Deformação na ruptura (%)
Aço	5--500	7,84	190--210	0,5--2,0	0,5--3,5
Vidro	9--15	2,6	70--80	2,0--4,0	2,0--3,5
Amianto	0,02--0,4	3,4	160--200	3,5	2,0--3,0
Polipropileno	20--200	0,9	1--7,7	0,5--0,75	8
Kevlar	10	1,45	65-133	3,6	2,14,0
Carbono	9	1,9	230	2,6	1
Nylon		1,1	4	0,9	13--15
Celulose		1,2	10	0,3--0,5	
Acrílico	18	1,18	14-19,5	0,4--1,0	3
Polietileno		0,95	0,3	0,7.10-3	10
Madeira		1,5	71	0,9	
Sisal	10--50	1,5		0,8	3
Matriz de Cimento		2,5	10--45	3,7	0,02

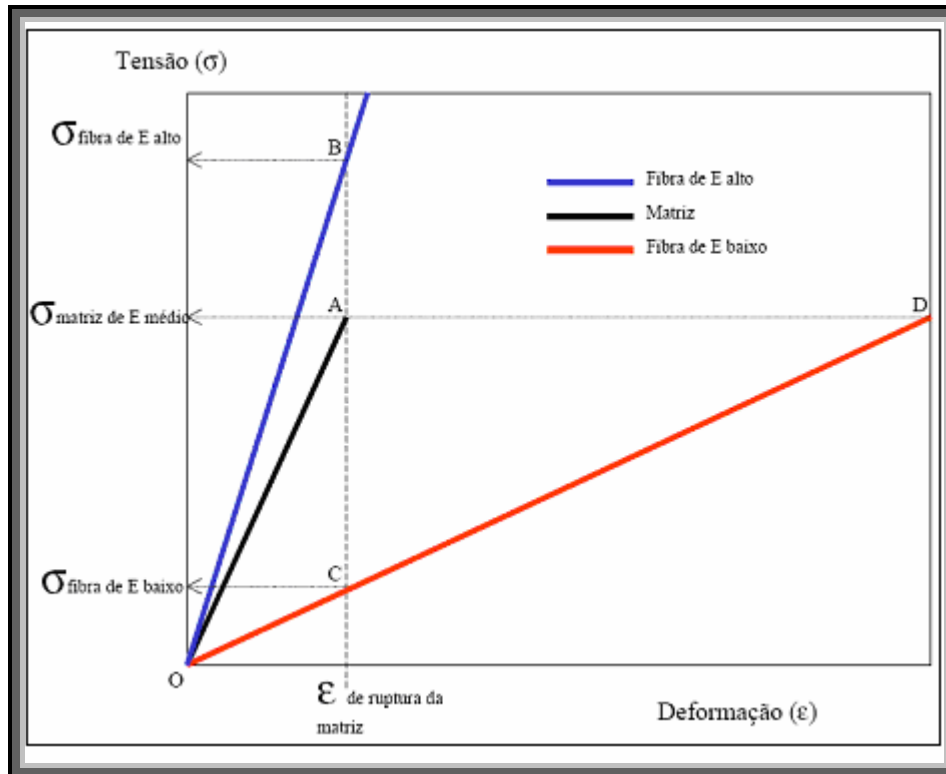


Figura 33: Diagrama tensão por deformação elástica de matriz e fibras de alto e baixo módulo de elasticidade trabalhando em conjunto

Fonte: FIGUEIREDO (2000, p.5)

De acordo com Figueiredo (2000, p.5), a figura 33 representa o trabalho de uma matriz hipotética reforçada com dois tipos de fibras, uma de módulo de elasticidade alto e outra de módulo de elasticidade baixo, sendo todas de comportamento elástico-perfeito. A curva de tensão por deformação da matriz está representada pela linha O-A, as linhas O-B e O-C representam o trabalho elástico da fibra de alto módulo e baixo módulo, respectivamente.

No momento em que a matriz se rompe (ponto A) e transfere a tensão para a fibra de baixo módulo (ponto C); esta ($\sigma_{\text{fibra de E baixo}}$) é pequena para mesmo nível de deformação ($\epsilon_{\text{de ruptura da matriz}}$), ou seja, devendo ser deformada até atingir o ponto D, para garantir o mesmo nível de tensão da matriz ($\sigma_{\text{matriz de módulo de elasticidade médio}}$). Portanto a fibra de baixo módulo não poderá oferecer uma capacidade de reforço após a fissuração da matriz para um dado carregamento. Em contrapartida, a fibra de alto módulo oferece resistência maior que a matriz de cimento quando esta se rompe.

As fibras de baixo módulo de elasticidade podem ser aplicadas quando o reforço da matriz não é o principal objetivo, por exemplo, a proteção contra danos físicos durante incêndios em túneis. Por outro lado as fibras de alto módulo de elasticidade servem tanto para controle de fissuração quanto para reforço do concreto. Elas apresentam elevado nível de tensão acima da tensão da matriz (σ_{matriz} de módulo de elasticidade médio), no momento da ruptura da matriz, permitindo atuar como reforço a partir do ponto B.

2.3.1.2.1 Fibras de aço

A aplicação das fibras de aço como reforço estrutural em peças de concreto continua crescendo, e a norma brasileira sobre concreto com fibras de aço NBR 15530 entrou em vigor no dia 08 de novembro de 2007 (ABNT, 2007). Para a fabricação das fibras utilizam-se dois tipos de aço: o aço carbono (mais usado) ou o aço liga. A tensão de tração varia entre 345 a 2100 MPa, o módulo de elasticidade de 200 a 210 GPa e a deformação de ruptura de 0,5% a 3,5% (LOPES, 2005, p.4).

Nas fibras de aço, o comprimento (L) é maior que o seu diâmetro (D), sendo esta relação definida como fator de forma ou relação de aspecto (L/D). As fibras de aço podem ser soltas ou coladas em pentes (ou feixes) de 10 a 30 fibras, solúveis em água. A sua seção transversal pode ser retangular ou circular e quanto à sua forma podem ser retas, ancoradas em gancho, onduladas ou pontas alargadas, tipo “halteres”, como mostra a figura 35.

No mercado brasileiro atualmente existem três tipos de fibras de aço, tais como (FIGUEIREDO, 2000, p.7):

- **Fibra de aço corrugada:** produzida a partir do fio chato que sobra da produção de lâ de aço, este fio é cortado no comprimento desejado variando entre 25 mm e 50 mm. Seu objetivo é melhorar a aderência da fibra com a matriz e sua vantagem é o baixo custo e a pouca interferência na consistência do concreto;

- **Fibra de aço retangular com ancoragem em gancho:** produzida a partir de chapas de aço que são cortadas na largura da fibra e conformadas de modo a obter o formato de ancoragem. Ela é produzida com o objetivo específico de reforço de concreto, possui seção transversal retangular;
- **Fibra de aço circular com ancoragem em gancho:** produzida a partir de fios trefilados progressivamente até se chegar ao diâmetro desejado, apresentando maior resistência mecânica, podendo ser ainda maior quando da utilização de aços com maior teor de carbono. É similar ao segundo tipo de fibra de aço com a diferença básica na forma circular da seção transversal.

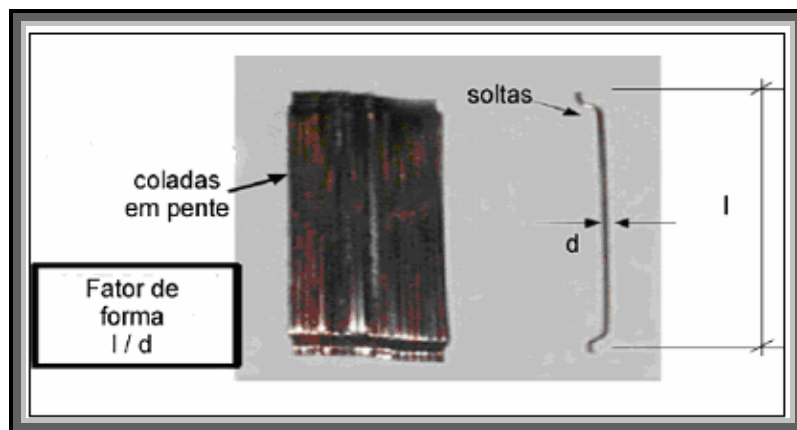


Figura 34: Fibras de aço coladas e soltas e definição de fator de forma
 Fonte: PINTO JUNIOR (2004) citado por SCOARIS (2005, p.30)

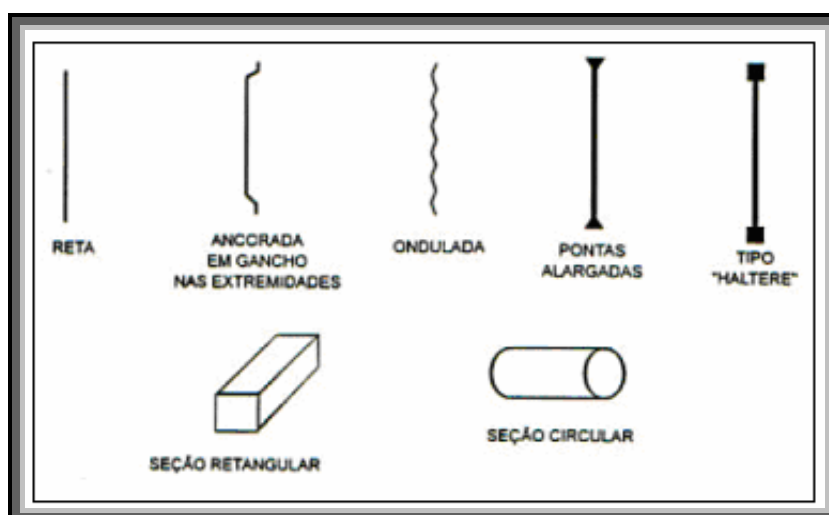


Figura 35: Tipos de fibras de aço
 Fonte: SCOARIS (2005, p.30)

2.3.1.3 Interação fibra-matriz

Os compósitos cimentícios são caracterizados pela zona de transição nas proximidades inclusive do reforço, na qual a microestrutura da matriz de pasta de cimento é considerada diferente do resto de volume de pasta de cimento. Para concretos com baixa relação a/c, como os tubos de concreto, o volume e tamanho de vazios na zona de transição serão maiores que na matriz de argamassa nas primeiras idades, portanto a zona de transição é mais fraca em resistência. Com o aumento da idade a resistência da zona de transição pode tornar-se igual ou mesmo maior do que a resistência da matriz de argamassa (METHA e MONTEIRO, 1994, p.36).

A natureza e o tamanho da zona de transição dependem do tipo de fibra e da tecnologia de produção, em alguns casos podem mudar consideravelmente com o passar do tempo. Essas características da interface fibra-matriz exercem vários efeitos, os quais deveriam ser considerados, especialmente no que diz respeito à união fibra-matriz e ao processo de ruptura da interface (BENTUR e MINDESS, 1990, p.22). A compreensão da interação entre as fibras e a matriz é necessária, para estimar a contribuição das fibras para o desempenho do compósito e prever o seu comportamento (BALAGURU e SHAH, 1992 citados por NUNES, 2006, p.64).

A interação fibra-matriz, responsável pela transferência das tensões, é influenciada pelos seguintes parâmetros (MORAES; CARNIO; PINTO JUNIOR, 1998 citado por CHAMA NETO, 2002, p.32; NUNES, 2006, p.65):

- A condição da matriz, isto é, antes da fissuração e após a fissuração;
- Geometria da fibra: comprimento, diâmetro, fator de forma e mecanismo de ancoragem;
- Tipo de material das fibras e sua respectiva resistência e módulo de elasticidade;
- Resistência mecânica da matriz;
- Resistência de aderência;

- Volume das fibras no compósito ou teor de fibras incorporado, que está relacionado com a sua distribuição na matriz.

A micro-estrutura da matriz na zona de transição é diferente do resto da matriz e não é uniforme. A natureza e o tamanho da zona de transição dependem do tipo de geometria e volume das fibras, da composição da matriz e do processo de produção do compósito (LOPES, 2005, p.5).

Quando as fibras de aço são utilizadas como reforço de matrizes cimentícias, a micro-estrutura da zona de transição em torno da fibra é similar ao observado em torno dos agregados no concreto, ou seja, esta região é caracterizada por uma alta porosidade e grandes depósitos de hidróxido de cálcio - CH em torno da fibra. Logo, existe interesse em modificar a micro-estrutura da zona de transição para melhorar a aderência da fibra-matriz e isto é possível com alguns cuidados, tais como: cura adequada, dosagem adequada da matriz, e uso de aditivos minerais e de materiais poliméricos (BENTUR e MINDESS, 1990, p.24).

Segundo Bentur e Mindess (1990), na abordagem clássica da interação fibra-matriz, a qual considera as fibras de aço retas sem ancoragem, existem dois mecanismos básicos de transferência de tensões:

- **Mecanismo elástico:** corresponde a etapa de pré-fissuração do compósito, quando não há ainda deslocamentos relativos entre fibra e matriz. Como a fibra de aço possui módulo de deformação elástica maior que da matriz, desenvolvem-se tensões de cisalhamento na interface fibra-matriz, a qual distribui a carga externa entre a fibra e a matriz, sendo esta distribuição não uniforme. As tensões de cisalhamento ainda são menores que o limite de resistência ao cisalhamento. Até esta etapa, a fibra não atua como ponte de transferência de tensões através da fissura. Após a ruptura da matriz o mecanismo de transferência de tensões passa do mecanismo elástico para o mecanismo por atrito.

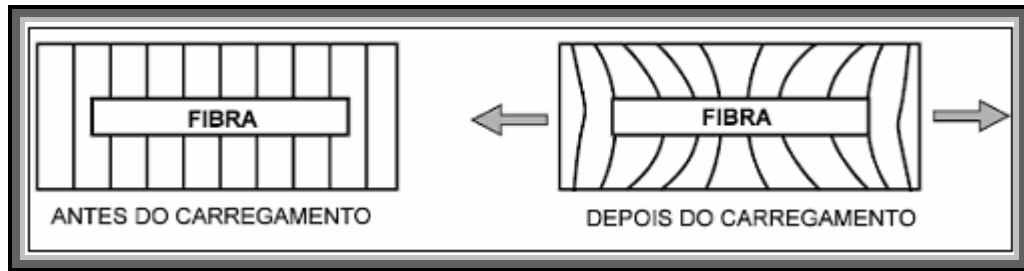


Figura 36: Esquema de deformações ao longo da interface fibra-matriz
 Fonte: BENTUR e MINDESS (1990, p.38)

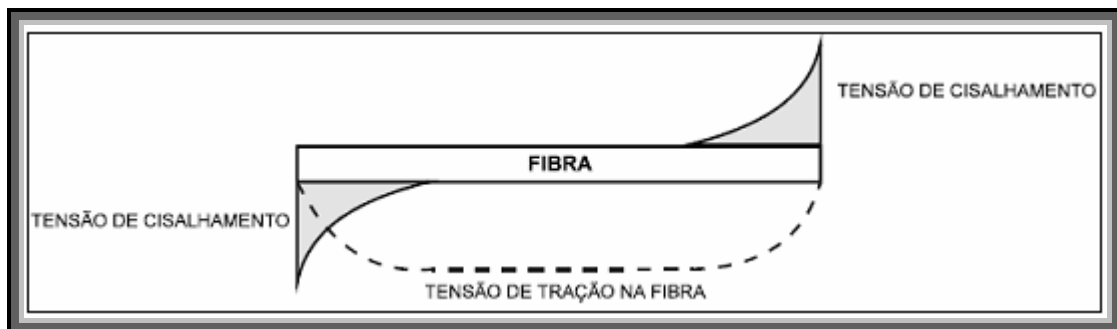


Figura 37: Distribuição de tensões de cisalhamento elásticas ao longo da interface fibra-matriz
 Fonte: BENTUR e MINDESS (1990, p.38)

- **Mecanismo por atrito:** quando ocorre a fissuração da matriz, o mecanismo de transferências de tensões altera gradualmente de elástico para atrito. Em função das características peculiares da zona de transição fibra-matriz, a tensão de cisalhamento por aderência elástica supera a resistência ao cisalhamento na interface, provocando o início do descolamento da fibra e posterior arrancamento da mesma. Há o deslocamento relativo entre a fibra e a matriz e as tensões são transferidas somente através do atrito fibra-matriz.

As tensões de cisalhamento por atrito desenvolvidas são uniformemente distribuídas ao longo da interface fibra-matriz. Nesta etapa ocorre efetivamente a transferência de tensões por atrito e a característica predominante deste processo é o gasto energético elevado para o arrancamento da fibra, o qual caracteriza elevada tenacidade do compósito.

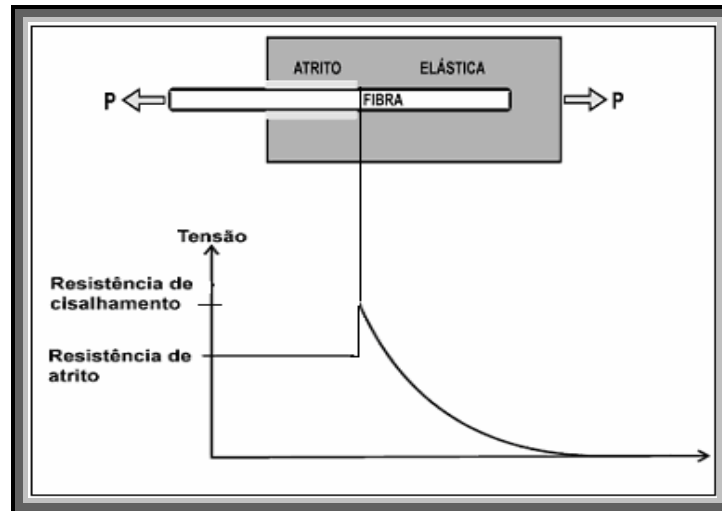


Figura 38: Configuração de uma fibra parcialmente descolada e diagrama das tensões de cisalhamento e atrito na interface fibra-matriz

Fonte: BENTUR e MINDESS (1990, p.46)

Para as fibras com ancoragem em ganchos, além dos mecanismos elásticos e por atrito já explicitados, existe também o mecanismo de transferência de tensões através da ancoragem mecânica da fibra na matriz, devido aos ganchos existentes nas fibras de aço. As fibras que atuam como reforços do concreto que estão disponíveis no mercado são ancoradas em ganchos.

O nível de tensões que a fibra consegue transferir pelas fissuras depende de alguns aspectos, tais como: comprimento e o teor de fibras. Para entender esse aspecto, deve-se analisar o conceito de volume crítico de fibras (FIGUEIREDO, 2000, p.13).

2.3.1.3.1 Volume crítico de fibras

O volume crítico corresponde ao teor de fibras que mantém a mesma capacidade portante para o compósito a partir da ruptura da matriz. Abaixo do volume crítico, quando ocorre a ruptura da matriz, há uma queda na capacidade resistente do material. Acima do volume crítico, o compósito continua aceitando níveis de carregamentos crescentes mesmo após a ruptura da matriz. Na maioria dos casos deverá utilizar volumes de fibras abaixo do volume crítico para reforço do concreto, assim a principal contribuição da fibra será na pós-fissuração, com a redução da propagação das fissuras e pelo aumento da tenacidade (FIGUEIREDO, 2000, p.12).

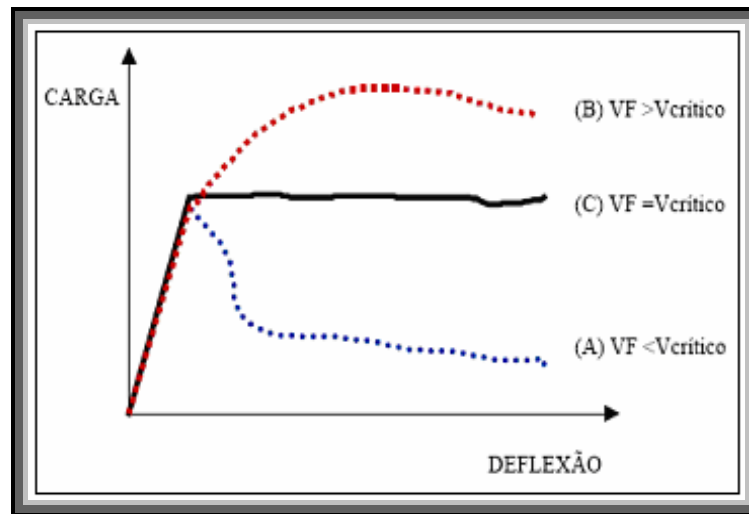


Figura 39: Compósitos reforçados com fibras em teores abaixo (A), acima (B) e igual (C) ao volume crítico de fibras durante um ensaio de tração na flexão (tenacidade)

Fonte: FIGUEIREDO (2000, p.14)

A determinação do volume crítico está associada à modelagem proposta por Aveston, Cupper e Kelly (1971), que planejaram um compósito ideal, com fibras contínuas e alinhadas na direção do esforço principal. A determinação algébrica do volume crítico de fibras pode ser dada por:

$$(1) \quad V_{fcrit} = \frac{(\varepsilon_{um} * E_c)}{\sigma_{uf}}$$

Onde:

ε_{um} : deformação última da matriz;

V_{fcrit} : volume crítico de fibras (%);

σ_{uf} : tensão última das fibras;

E_c : módulo de elasticidade do compósito.

Este modelo não representa com precisão a realidade das fibras, pois estas são descontínuas e distribuídas aleatoriamente. Para considerar essas peculiaridades utilizam-se dois fatores de eficiência, para permitir uma aproximação ao valor real do volume crítico (V_{fcrit}). Os fatores de eficiência utilizados são: o η_1 e o η_2 . O parâmetro η_1 está associado ao efeito da orientação das fibras e o parâmetro η_2 está associado ao comprimento crítico, que será analisado mais adiante.

Tabela 3: Valores para o fator de eficiência (η_1) majorador do volume crítico em função da direção da fibra

Fonte: HANNANT (1978) citado por FIGUEIREDO (2000, p.14)

Orientação	Valores de η_1	
	cox	Krenchel
1 direção	1	1
2 direções	0,333	0,375
3 direções	0,17	0,2

Logo, o valor do volume crítico corrigido em função da orientação da fibra:

$$(2) \quad V_{fcrit} = \frac{(\varepsilon_{um} * E_c)}{\sigma_{uf}} * \eta_1$$

2.3.1.3.2 Comprimento crítico

O segundo fator de eficiência (η_2) está associado à redução de desempenho provocado pela utilização de fibras descontínuas de comprimento reduzido, ou seja, este fator é determinado através do estabelecimento do comprimento crítico (L_c).

Segundo Figueiredo (2000, p.16), o comprimento crítico de uma fibra pode ser definido como aquele que, quando ocorre uma fissuração perpendicular à fibra e posicionada na região média do seu comprimento, proporciona uma tensão no seu centro igual à sua tensão de ruptura. Quando a fibra tem um comprimento menor que o crítico, com o aumento da deformação e abertura de fissura, a fibra que estará atuando como ponte de transferência será arrancada do lado que possuir menor comprimento embutido. Isso acontece em concretos de baixa ou moderada resistência, quando possui um concreto de alta resistência mecânica, a condição de aderência fibra-matriz é melhorada.

2.3.2. DOSAGEM DO CRFA

A adição de fibras de aço no concreto pode encarecer o produto e impedir a utilização das fibras como material alternativo. Para garantir a viabilidade econômica do CRFA, deve-se estudar uma metodologia de dosagem que otimize o consumo mínimo de fibra necessário para atender às exigências estruturais. No Brasil é freqüente especificar as fibras de aço num consumo fixo, por exemplo, 30 kg/m³ (30 kg de fibras por m³ de concreto), independentemente do tipo de fibra utilizado. Uma vantagem da utilização de CRFA em pequeno volume (inferior a 1% em volume ou 80 kg/m³) é a sua pouca ou nenhuma influência na matriz de concreto (FIGUEIREDO, 2000, p.50-52).

2.3.3. TECNOLOGIA PARA PRODUÇÃO DE CRFA

O CRFA, em geral, pode ser produzido utilizando técnicas convencionais de concreto, observando algumas diferenças importantes. O problema que acontece na maioria das misturas é a obtenção dos volumes de fibras suficientes de maneira a obter a dispersão uniforme das fibras, garantindo a melhoria desejada no comportamento mecânico, conservando a trabalhabilidade do concreto fresco para permitir a adequada mistura, compactação e acabamento (BENTUR e MINDESS, 1990, p.173).

Uma das principais dificuldades de se obter a uniforme distribuição é a tendência das fibras de aço se agruparem formando novelos. Uma solução seria adotar fibras de aço coladas em pente para minimizar o efeito de empelotamento ou agrupamento. Essas fibras coladas são misturadas aos materiais cimentícios e tem a sua cola dissolvida permitindo uma homogeneização fácil para o compósito (METHA e MONTEIRO, 1994, p.440; BENTUR e MINDESS, 1990, p.174).

Esse agrupamento (novelos) das fibras pode ser causado por inúmeros fatores, tais como (BENTUR e MINDESS, 1990, p.174):

- As fibras podem estar agrupadas antes de serem introduzidas na mistura;

- As fibras são adicionadas rapidamente na mistura, tendo que se dispersar dentro do misturador;
- Grande volume de fibras adicionadas;
- O misturador (betoneira) pode estar desgastado ou ser ineficiente para dispersar as fibras;
- A introdução de fibras no misturador antes de outro componente do concreto.

A formação dos novelos em matrizes contendo fibras de aço não é somente função do fator de forma e do volume de fibras utilizado, mas também é função da granulometria do agregado, da geometria das fibras, do procedimento de adição de fibras no misturador e o tipo de misturador empregado (LOPES, 2005, p.7).

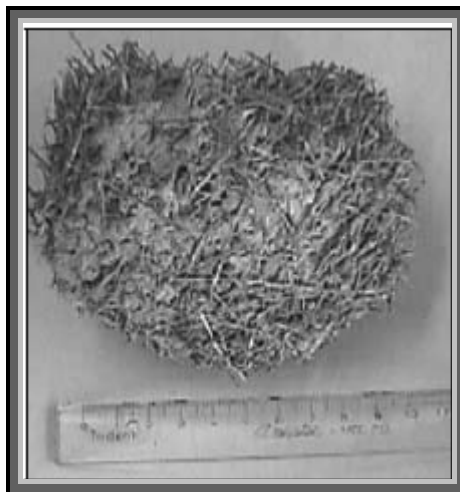


Figura 40: Formação de novelos em concretos com fibras de aço
Fonte: FIGUEIREDO (2000, p.44)

Para a produção do CRFA podem-se utilizar os mesmos equipamentos de fabricação de concretos simples. O CRFA parece mais rígido que o concreto convencional porque as fibras têm a tendência de dificultar o escoamento, contudo quando vibrado, o material escoará facilmente para dentro das fôrmas (BENTUR e MINDESS, 1990, p.175). Separado das técnicas de mistura e compactação convencionais, um número maior de técnicas especializadas tem sido utilizado para a produção do CRFA, tais como: a extrusão, o jateamento, a infiltração e o premix.

A técnica do premix é a mais utilizada e foi empregada para a realização das misturas relatadas nesta dissertação. O premix consiste na inserção das fibras de

aço como se fosse um dos materiais constituintes do concreto. O problema é a falta de uniformidade de dispersão das fibras no concreto, diminuindo a trabalhabilidade deste. Para a pesquisa, utilizaram-se fibras de aço coladas em pente, dificultando a formação de novelos na mistura.

2.3.4. CONTROLE DO CRFA

2.3.4.1 Trabalhabilidade

A trabalhabilidade do concreto fresco é uma medida da facilidade de ser misturado, manuseado, transportado e moldado. A adição de qualquer tipo de fibra no concreto simples reduz a trabalhabilidade, independente do tipo de fibra, a perda de trabalhabilidade é proporcional à concentração volumétrica de fibras no concreto (METHA e MONTEIRO, 1994, p.438). Porém, quando o concreto é submetido à vibração, a mistura de concreto com fibras pode ser manuseado quase da mesma forma que o concreto simples (LOPES, 2005, p.55).

De acordo com Bentur e Mindess (1990, p.182), Hannant (1986, p.55), Lopes (2005, p.8) e Figueiredo (2000, p.41), outros fatores que afetam a trabalhabilidade:

- A trabalhabilidade decresce com o aumento do fator de forma (l/d), na prática é muito difícil atingir a uniformidade da mistura com fator de forma acima de 100;
- A relação a/c pode ser aumentada para que a trabalhabilidade seja atingida, contudo deverão ocorrer cuidados extras no aumento da água para que não ocorra água em demasia, o que ocasionaria uma segregação, na qual refletiria um concreto poroso, de baixa resistência e durabilidade;
- Algumas práticas inglesas, americanas e canadenses indicam a adição de superplastificantes na mistura do concreto para aumentar a trabalhabilidade deste. Contudo o tipo e a quantidade de superplastificante empregados deverão ser compatíveis com os materiais cimentícios;

- O tipo de misturador empregado para realização da mistura é importante e costuma-se recomendar a utilização de misturadores planetários, cujos movimentos das pás ocorrem nas duas direções, evitando a tendência de aglutinação das fibras;
- A quantidade de fibra na mistura também é importante e influencia na trabalhabilidade. Existe uma fórmula para estimar a porcentagem crítica de fibras na qual esta não influenciaria de maneira significativa a trabalhabilidade e compactação da mistura.

Edgington et al (1974), citados por Bentur e Mindess (1990, p.181), demonstraram que a trabalhabilidade da mistura diminui conforme aumentam a quantidade e o tamanho dos agregados com diâmetro acima de 5 mm; a presença de agregados inferiores a 5 mm afeta menos a trabalhabilidade da mistura. Os estudiosos propuseram uma equação para estimar a porcentagem crítica de fibras a partir da qual o concreto não terá mais a trabalhabilidade adequada. Os autores recomendam que, para obter melhor compactação, a quantidade de fibras não deve ultrapassar $0,75 PW_{crit}$.

$$(3) \quad PW_{crit} = 75 * \frac{\pi * SG_f * d}{SG_c * l} * K$$

$$(4) \quad K = \frac{W_m}{(W_m + W_a)}$$

Onde:

PW_{crit} : porcentagem crítica de fibras, em peso;

SG_f : peso específico da fibra;

SG_c : peso específico da matriz de concreto;

d/l : relação inversa do fator de forma;

W_m : peso da fração de argamassa (partículas com tamanho inferior a 5 mm);

W_a : peso da fração de agregado (partículas com tamanho superior a 5 mm).

A quantidade de fibras de aço é limitada à cerca de 2% em volume, com um fator de forma máximo de cerca de 100. Mesmo com 2% de volume, as fibras dificultam a

trabalhabilidade do concreto e esta dificuldade aumenta à medida que aumenta o tamanho do agregado. Agregados maiores que 19 mm não são recomendados para o uso em concretos com fibras de aço (METHA e MONTEIRO, 1994, p.440).

2.3.4.2 Durabilidade

As fibras de aço podem parecer suscetíveis a corrosões severas, particularmente quando estão próximas às superfícies do concreto, onde o cobrimento é muito pequeno. Logo, o diâmetro das fibras pode ser efetivamente reduzido pela corrosão, o que levaria a uma considerável diminuição das resistências e da tenacidade do CRFA (BENTUR e MINDESS, 1990, p.205).

Estudos realizados por Metha e Monteiro (1994, p.446) envolvendo ensaios de durabilidade, em longo prazo, mostraram que as fibras encontradas no concreto após sete anos de exposição a ataques de sais de descongelamento apresentavam sinais mínimos de corrosão e nenhum efeito deletério nas propriedades do concreto.

2.3.4.3 Temperaturas extremas

Purkiss (1984 e 1988) citado por Bentur e Mindess (1990, p.209), demonstrou que para temperaturas elevadas (acima de 600°C), os concretos reforçados com fibras de aço têm melhor desempenho, ou seja, maior resistência que os concretos comuns, independentemente do tipo e da quantidade de fibras utilizadas.

Para temperaturas muito baixas, próximas daqueles gases naturais liquefeitos, Rostasy e Sprenger (1984), citados por Bentur e Mindess (1990, p.209), ensaiaram estruturas de CRFA submetidos a ciclos repetidos de temperaturas abaixo de -170°C e concluíram que a adição de fibra reduz de maneira significativa as perdas tanto de resistência à compressão quanto de resistência à tração.

2.3.4.4 Condutividade térmica

Segundo Balaguru e Shah (1992), citados por Lopes (2005, p.25), a condutividade térmica dos concretos aumenta com a adição de fibras de aço em relação ao concreto simples. Em seus estudos, verificaram que adições de fibras para volume igual a 1% proporcionaram um certo aumento dessa propriedade, contudo não quantificaram o incremento de condutividade.

2.3.5. PROPRIEDADES MECÂNICAS ESTÁTICAS

As propriedades mecânicas dos concretos reforçados com fibras de aço são influenciadas pelos seguintes fatores: tipo de fibra, geometria da fibra, volume de fibra, distribuição e orientação das fibras; resistência e tamanho máximo do agregado e interação fibra-matriz.

2.3.5.1 Resistência à compressão

Em concretos simples e armados, a adição das fibras de aço tem pequeno efeito em relação à resistência à compressão. As fibras podem aumentar a resistência à compressão como também podem diminuir, dependerá da otimização da dosagem do concreto com fibras, da vibração e compactação do concreto. Na utilização do procedimento “premix” deve-se atentar para a trabalhabilidade e uniformidade do concreto (FIGUEIREDO, 2000, p.40).

Contudo, as fibras apresentam um aumento substancial na ductilidade pós-fissuração, tornando o compósito capaz de absorver energia maior que a matriz, isto é, aumento da tenacidade (BENTUR e MINDESS, 1990, p.191).

O comportamento do concreto com relação à tenacidade na compressão pode ser medido segundo o procedimento de ensaio descrito pela Norma Japonesa JSCE-

SF5 (1984b). Consiste no acoplamento de dois Linear Voltage Differential Transducer - LVDT a um corpo-de-prova cilíndrico, para levantar a curva de carga por deslocamento, como mostra a figura 41.

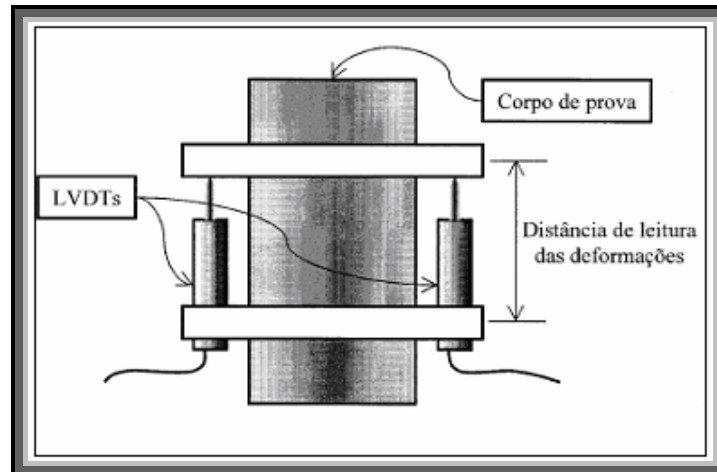


Figura 41: Esquema de ensaio para determinação da tenacidade na compressão segundo a norma JSCE-SF5

Fonte: JSCE-SF5 (1984b)

2.3.5.2 Resistência à tração

As fibras de aço longas e alinhadas na direção da tensão de tração aplicada podem aumentar a resistência à tração direta das matrizes. Contudo esse aumento de resistência é menor para fibras com distribuição randômica. De maneira semelhante à resistência à compressão, a adição das fibras de aço não melhora a resistência à tração, contudo apresentam vantagens no comportamento pós-fissuração ou tenacidade dos compósitos (BENTUR e MINDESS, 1990, p.192).

2.3.5.3 Resistência à flexão

As fibras de aço têm, geralmente, melhor efeito com relação à resistência à flexão, do que a resistência à tração ou à compressão, com aumentos de mais de 100%. O aumento da resistência à flexão é particularmente sensível, não apenas ao volume de fibras, mas também ao fator de forma destas, com o aumento do fator de forma

ocorre o aumento da resistência (BENTUR e MINDESS, 1990, p.193). A figura 42 mostra um gráfico de carga x deflexão, comparando um concreto simples e um concreto com fibras de aço em um ensaio de flexão.

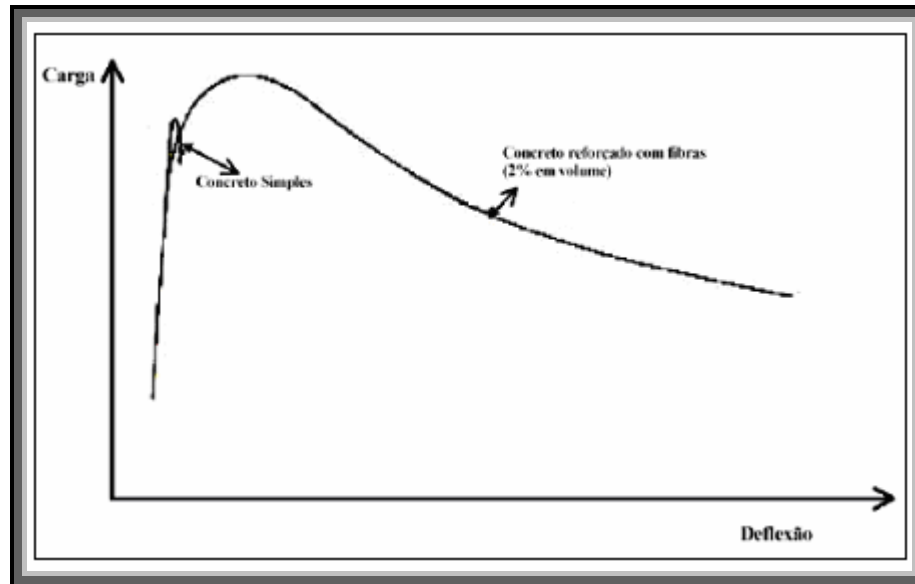


Figura 42: Representação esquemática do comportamento à flexão de um concreto convencional e de um concreto reforçado com fibras

Fonte: METHA e MONTEIRO (1994, p.436)

2.3.5.4 Tenacidade

A tenacidade é uma característica importante dos concretos fibrosos. Os métodos de ensaio para determinação da tenacidade são: American Society of Testing and Materials - ASTM (C 1018), Japan Society of Civil Engineers – JSCE (SF4), Norwegian Concrete Association – NCA e European Federation of Producers and Applicators of Specialist Products for Structures - EFNARC. Como visto, existem inúmeros caminhos para se medir a tenacidade do CRFA, porém o método utilizado no Brasil é o método da norma japonesa JSCE-SF4 (1984a). Os métodos da ASTM e JSCE são ensaiados à tração na flexão em corpos-de-prova prismáticos e carregados segundo quatro cutelos, posicionados a cada terço do corpo-de-prova e com velocidade de deflexão controlada. Na pesquisa foi utilizado o método da norma japonesa JSCE-SF4 (1984a).

Segundo o critério apresentado na norma japonesa JSCE-SF4 (1984a), a tenacidade à flexão do CRFA é numericamente igual à área contida sob a curva carga x deslocamento vertical, para um deslocamento vertical máximo igual a $\delta_{tb}=L'/150$, como mostra a figura 43.

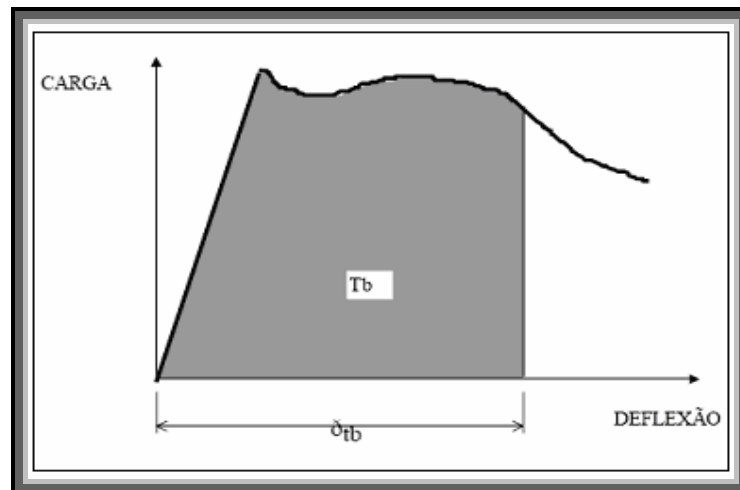


Figura 43: Curva carga x deslocamento vertical - quantificação da tenacidade através da norma japonesa JSCE-SF4

Fonte: JSCE-SF4 (1984a)

O cálculo da tenacidade baseia-se na determinação do fator de tenacidade, que representa a resistência residual média do compósito até um deslocamento equivalente a $L'/150$, sendo L' o vão do corpo-de-prova. O fator de tenacidade obedece à seguinte equação:

$$(5) \quad FT = \frac{T_b}{\delta_{tb}} * \frac{L}{b * h^2}$$

Onde:

FT: fator de tenacidade na flexão;

T_b : tenacidade na flexão;

δ_{tb} : deflexão equivalente a $L/150$;

b: largura do corpo-de-prova;

h: altura do corpo-de-prova;

L' : vão do corpo-de-prova durante o ensaio.

A figura 44 mostra o esquema do ensaio de tração na flexão de corpos-de-prova prismáticos utilizando o LVDT que foi apoiado no suporte yoke; consiste numa haste metálica horizontal apoiada nas extremidades dos prismas onde é fixado um transdutor de sinal ligado a um aparelho de aquisição de dados onde se registram as leituras de deslocamento vertical.

No ensaio é utilizada uma máquina de velocidade de deformação controlada (FIGUEIREDO e HELENE, 1997, p.14).

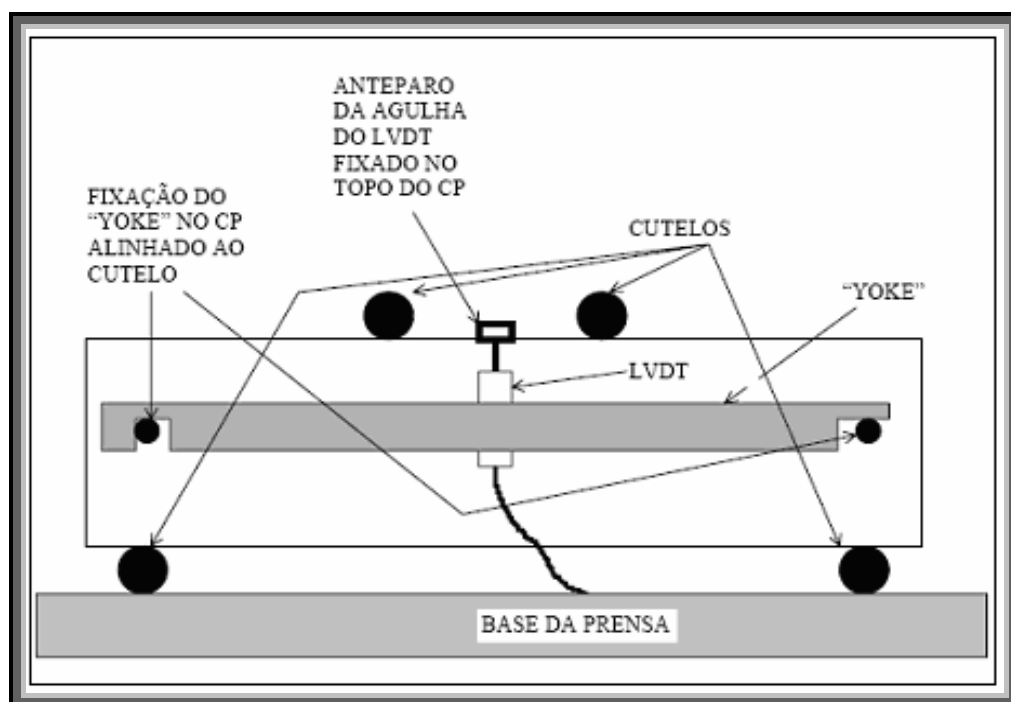


Figura 44: Ensaio de tração na flexão utilizando o sistema yoke
Fonte: FIGUEIREDO e HELENE (1997, p.14)

Uma das críticas feitas ao critério japonês da JSCE-SF4 (1984a), é o fato de não diferenciar matrizes com grandes diferenças de módulo de elasticidade e comportamento pós-fissuração; quando apresentarem o mesmo nível de consumo de energia, ele também é influenciado pela instabilidade pós-pico, numa intensidade menor quando comparado ao critério ASTM C 1018 (1994).

A instabilidade pós-pico consiste em uma superestimação da carga suportada pelo corpo-de-prova imediatamente após a ruptura da matriz, estando o teor de fibras abaixo do crítico. A remoção da região de instabilidade não é uma garantia de

precisão do ensaio e sim a intenção de mostrar a susceptibilidade e a incerteza da medida da tenacidade para os CRFA dependendo do critério adotado (FIGUEIREDO, 2000, p.25).

2.3.5.5 Cisalhamento e Torção

Segundo Gordon (1994), citado por Lopes (2005, p.23), as vantagens de se utilizar fibras de aço para melhorar a resistência aos esforços de cisalhamento são: aumento da resistência à tração de primeira fissura e da resistência à tração última, aumento na adesão friccional através da resistência das fibras ao arrancamento e a sua capacidade de atravessar as fissuras transferindo tensões de um lado para o outro da matriz e a distribuição randômica das fibras com espaçamento menor que usualmente utilizado com os estribos.

Mindess (1980) demonstrou que a adição de fibras de aço no concreto apresentou uma melhora insignificante na resistência à torção e Barr (1987) fundamentou que a resistência ao cisalhamento do CRFA foi independente do conteúdo de fibras (BENTUR e MINDESS, 1990, p.194).

Outros autores defendem a melhoria da adição de fibras de aço na resistência à torção. Mansur e Paramasivam (1982) demonstraram aumentos de até 27% com a utilização de 3% de fibras metálicas no concreto, enquanto Narayanan e Kareem-Palanjian (1983), encontraram incremento de até 100% e Narayanan e Toorani-Goloosalar (1979) encontram apenas um incremento de até 25%. A explicação para essas grandes variações de resultados provavelmente é devido às diferenças entre procedimentos de ensaios e corpos-de-prova (BENTUR e MINDESS, 1990, p.194).

2.3.5.6 Carregamento multiaxial

Brandt et al (1981), citados por Bentur e Mindess (1990, p.195), investigaram concretos reforçados com fibras de aço submetido às tensões triaxiais incluindo a tensão de tração e demonstraram que os compósitos analisados eram mais

resistentes que o concreto comum, principalmente quando tensões de tração estavam envolvidas.

Tanigawa et al (1983), citados por Bentur e Mindess (1990, p.195), desenvolveram um modelo constitutivo para CRFA baseado na regra das misturas: devido o efeito de confinamento das fibras, o comportamento inelástico dos concretos reforçados com fibras de aço submetidos a grandes deformações uniaxiais de compressão foi análogo do concreto submetido ao estado de tensões multiaxiais.

2.3.5.7 Abrasão, Erosão, Cavitação e Fricção

Os concretos com fibras de aço são mais resistentes à abrasão que os concretos comuns, mas esta diferença não é muito grande e dependerá da velocidade do ensaio. Se o ensaio for realizado com velocidade baixa do jato de água, será a qualidade dos agregados e a rigidez do concreto que determinarão a resistência do concreto e não a adição das fibras. Caso contrário, a velocidades elevadas, que induzem também a cavitação e o impacto das partes que se soltam do concreto, o CRFA será mais resistente que o concreto comum (BENTUR e MINDESS, 1990, p.195).

A erosão proveniente do desgaste provocado pelo atrito de pequenas partículas ou pelo trânsito de pessoas ou veículos que não estão associados aos esforços de impacto pode ser até maior no CRFA. Isto ocorre pelo fato de se reduzir a quantidade de agregado graúdo no CRFA. Por outro lado, quando o concreto está sujeito ao desgaste associado aos esforços de impacto ou cavitação, ocorre um ganho de desempenho para CRFA (FIGUEIREDO, 2000, p.49).

Alguns exemplos da eficácia do CRFA em relação à cavitação e a erosão podem ser observados nos reparos estruturais nas represas de Dworshak, nos EUA, Libby, no Canadá e Tarbella, no Paquistão, onde utilizaram fibras de aço adicionadas ao concreto. As três represas foram construídas com a utilização de concretos comuns de boa qualidade, porém, após certo tempo, as estruturas começaram a apresentar danos devido à erosão e à cavitação. Logo, utilizaram CRFA para reparos nas

estruturas e observaram que as represas puderam desempenhar suas funções satisfatoriamente (SCHRADER e MUNCH, 1976 e ICOLD, 1982 citados por LOPES, 2005, p.25).

Balaguru e Shah (1992), citados por Lopes (2005, p.25), mostraram que em testes realizados em concretos comuns e em concretos fibrosos, a resistência à fricção foi praticamente a mesma, quando não havia deterioração nas superfícies analisadas. Quando o material fosse submetido primeiramente à erosão e suas superfícies deterioravam-se, os concretos com fibras apresentam maior resistência à fricção do que os concretos comuns, constatando uma melhora de aproximadamente 15%.

2.3.5.8 Retração e Fluência

Segundo Figueiredo (2000, p.49), a retração e a fluência são pouco afetadas pela adição de fibras de aço. A fibra apresenta pouca ou nenhuma influência quando o concreto permanece não fissurado, porém, quando a retração é restringida, as fibras podem contribuir para reduzir a quantidade de fissuras bem como a abertura média.

Dos resultados dos testes de fluência realizados no período de 12 meses descobriu-se que a adição de fibras de aço ao concreto não significa redução da variação da dimensão do compósito (HANNANT, 1986, p.74).

2.3.6. PROPRIEDADES MECÂNICAS DINÂMICAS

2.3.6.1 Fadiga

Caso a tensão atuante em um dado material não ultrapasse a tensão de escoamento, o material teoricamente estaria na fase elástica. Logo, quando retirasse a carga aplicada ao material, a deformação seria reversível. Sendo assim o material poderia ser carregado inúmeras vezes, desde que as tensões fiquem dentro do regime elástico. Esta hipótese é válida para um numero baixo de repetições do

carregamento, por outro lado, para milhares de repetições, ela deixa de ser válida segundo a mecânica da fratura. Nesses casos pode ocorrer a ruptura por fadiga do material, a falha por fadiga é catastrófica e ocorre repentinamente sem avisos, para praticamente todos os materiais (ANDRADE, 2007, p.222).

No caso do concreto, as mudanças estruturais internas e permanentes representam propagações de microfissuras, resultando em deformações permanentes no concreto (LOPES, 2005, p.26).

A cada ciclo de carregamento, as fissuras tendem a se propagar e diminuir a área útil para transferências de tensões; quanto mais próxima a carga cíclica estiver da resistência do material, menor será o número de ciclos necessários para atingir a ruptura do concreto. Como já foi citada, a fibra de aço atua como ponte de transferência de tensões pelas fissuras, reduzindo a propagação das mesmas e permitindo o trabalho da estrutura de concreto por um maior número de ciclos ou mesmo um maior nível de tensão para a mesma vida útil (FIGUEIREDO, 2000, p.47).

Segundo Grzybowski e Meyer (1993), citados por Lopes (2005, p.26), as fibras podem ter efeito oposto no comportamento cíclico do concreto, tais como: são capazes de servirem como ponte de transferência de tensões e retardar o crescimento de fissuras e, por outro lado, podem diminuir a resistência do concreto devido ao aumento da porosidade deste devido à presença de fibras. O resultado final destes dois efeitos irá depender do volume de fibras de aço empregadas no concreto.

O concreto simples não apresenta limite em relação à fadiga, espera-se que este limite seja atingido com concretos reforçados com fibras de aço. Ramakrishnan et al (1987) sugeriram que este limite fosse de aproximadamente $2 \cdot 10^6$ ciclos (BENTUR e MINDESS, 1990, p.198). Johnston e Zemp (1991) propuseram testes de até $10 \cdot 10^6$ ciclos para confirmar a existência do limite à fadiga. Contudo a discussão sobre limite à fadiga permanece sem solução (LOPES, 2005, p.26).

Analisando as transcrições acima se observa um conflito de opiniões dos autores quanto à melhora ou não da adição de fibras de aço no concreto quanto à fadiga,

pode-se concluir que a maioria dos pesquisadores acredita que a adição das fibras possa beneficiar um melhor desempenho quanto à propriedade da fadiga.

2.3.6.2 Impacto

O American Concrete Institute - ACI (1988) citado por Figueiredo (2000, p.49), apresentou uma série de pesquisas tais como: resistência dos esforços dinâmicos a cargas explosivas, queda de massa, cargas dinâmicas de compressão, flexão e tração de 3 a 10 vezes maiores que os valores obtidos para o concreto sem adição de fibras. Isto se deve ao CRFA ser um material pseudodúctil e assim irá requerer um maior gasto energético para a sua ruptura por esforço dinâmico.

Os concretos reforçados com fibras de aço apresentam melhor comportamento do que os concretos comuns quando submetidos a carregamentos de impacto, tanto em termos de resistência quanto em termos de energia de fratura (BENTUR e MINDESS, 1990, p.198), sendo as fibras com ganchos nas pontas mais efetivas que as fibras lisas (LOPES, 2005, p.27). O papel das fibras é essencialmente o controle das fissuras através da ponte de transferências de tensões através das fissuras (BENTUR e MINDESS, 1990, p.198).

2.3.7. APLICAÇÕES DO CRFA

Segundo Bentur e Mindess (1990, p.209), Figueiredo (2000, p.61) e Sarzalejo, Rossi, Perri, Winterberg, Aristeguieta (2007, p.196) os concretos reforçados com fibras de aço podem ser utilizados nas seguintes estruturas:

- Concreto para pavimentos rodoviários, aeroportuários e portuários;
- Concreto projetado para túneis;
- Recuperação de estruturas de concreto armado e protendido;
- Concreto refratário;
- Pré-moldados;
- Estabilização de cortes, encostas e taludes em rocha e solo;

-
- Escoramento de escavações subterrâneas e a céu aberto;
 - Tubos de concreto;
 - Concreto compactado com rolo (RCC);
 - Estacas e placas de concreto para fundação;
 - Estruturas expostas a ações sísmicas;
 - Cobertura para lajes com chapas onduladas metálicas ou pré-fabricadas.

As vantagens da aplicação de CRFA são:

- Concreto com capacidade de absorção de energia devido à redistribuição de tensões;
- Facilidade de utilização;
- Redução do tempo de execução de pisos e revestimento de túneis;
- Reforço em toda a secção, proporcionando controle eficaz de fissuras;
- Redução do tempo destinado à fabricação e colocação de armaduras nas fôrmas;
- Economia de espaço na obra, antes necessário para estocar a armadura;
- Redução do número de operários;
- Durabilidade da estrutura, devido à redução de fissuração;
- Aumento da resistência ao impacto.

O aumento do risco de empenamento do pavimento por retração diferencial (cuidados relativos à cura) é uma desvantagem da aplicação do CRFA.

2.4. TUBOS DE CONCRETO REFORÇADOS COM FIBRAS DE AÇO

Conforme Ramos (2002, p.77) e Chama Neto (2002, p.80) concluíram, as principais vantagens da utilização de fibras de aço em tubos de concreto podem ser: redução de danos acidentais durante a fabricação, o manuseio, o transporte e a instalação dos tubos; possibilidade de substituição total das armaduras pelas fibras de aço, aproveitamento a orientação bidimensional das fibras e o aumento da capacidade de reforço.

De acordo com Ramos, Pinto Junior e Franco (2007, p.9), os ensaios de compressão diametral realizados em tubos com fibras nos teores de 25 kg/m^3 e 30 kg/m^3 , segundo a Norma Espanhola UNE 127 010 EX (1995), constataram a possibilidade de substituição total da armadura convencional pelas fibras de aço, pois os tubos reforçados com fibras de aço apresentaram comportamento dúctil mantendo significativa capacidade suporte pós-fissuração.

Segundo Fugii, Akasaki e Salles (2007, p.13), trabalhar com concreto de consistência seca como é o caso do tubo de concreto dificulta a trabalhabilidade, pelo fato das fibras de aço quando adicionadas ao concreto aumentarem a área de molhagem do mesmo, contribuindo para diminuição da trabalhabilidade.

Em 22 de novembro de 2007 entrou em vigor a revisão da norma de tubos de concreto NBR 8890 (ABNT, 2007), que traz como inovação a normalização de tubos de concreto fabricados com fibras de aço.

A norma prevê distinção de tratamento entre tubos armados e tubos com fibras. Para os tubos armados, o ensaio de compressão diametral continua igual à norma anterior, porém, para os tubos com fibras, a norma se parece com as normas espanhola e europeia, porém um pouco mais rígida. A norma é válida para tubos com fibras de diâmetros até 1000 mm.

A norma restringe a limitação da dimensão máxima do agregado graúdo a um terço da espessura do tubo, exige que as fibras sejam de aço trefilado, resistência mínima do aço 1000 MPa, de acordo com a NBR 6207 (ABNT, 1982) ancoradas em gancho e fator de forma mínimo de 40. A norma admite fibras aparentes na superfície externa do tubo não definindo isto como causa de rejeição do tubo, todavia não admite fibras aparentes na superfície interna e na ponta do tubo.

Os tubos produzidos com fibras deverão atender a todos os requisitos estabelecidos para o concreto, tais como: compressão diametral, permeabilidade, estanqueidade das juntas, absorção e tolerância dimensional.

Segundo Figueiredo e Chama Neto (2007, p.8), a nova norma de tubos de concreto para água pluvial e esgoto pode ser considerada uma das grandes conquistas brasileiras nesta área de tecnologia do concreto. Esta é a primeira norma brasileira a regular a utilização de fibras de aço tendo sido desenvolvida concomitante com a norma de especificação da fibra de aço para reforço do concreto.

CAPÍTULO 3

PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1. CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL

3.1.1. CIMENTO

O cimento utilizado é CP V (ARI PLUS RS) escolhido pela empresa, devido a sua alta resistência nas primeiras idades e resistência ao sulfato.

Tabela 4: Características físicas e químicas do cimento CPV (ARI PLUS RS)

Fonte: COMPANHIA ENERGÉTICA DE SÃO PAULO – CESP

Ensaio Realizado			Valor Obtido	Norma	
				min.	máx.
Finura Peneira 200	(% retida)		0,20	-	6,0
Finura Peneira 325	(% retida)		0,28	-	-
Superf. espec. Blaine	(cm ² /g)		4733	3000	-
Densidade aparente	(g/cm ³)		0,97	-	-
Densidade absoluta	(g/cm ³)		3,14	-	-
Água de consistência	gramas		157	-	-
	da pasta	(%)	31,4	-	-
Início de pega (h:min)			02:05	01:00	-
Expansão em auto-clave (%)			exp	-	0,8 *
Resistência à Compressão Axial	Consistência	gramas	150	-	-
	argamassa	a / c	0,48	-	-
	Data de moldagem		05.12.06	-	-
	Tensão (MPa)	03 dias	35,4	24,0	-
		07 dias	41,9	34,0	-
28 dias		48,5	-	-	
Análise Química (%)	Perda ao fogo		3,89	-	4,5
	Insolúveis		0,53	-	1,0
	SiO ₂		18,97	-	-
	Fe ₂ O ₃		2,52	-	-
	Al ₂ O ₃		4,80	-	-
	CaO		59,17	-	-
	MgO		5,30	-	6,5
	SO ₃		3,53	-	3,5
	Na ₂ O		0,13	-	-
K ₂ O		0,87	-	-	

O cimento está de acordo com as recomendações feitas pelas normas NBR 5733 (ABNT, 1991) e NBR 5737 (ABNT, 1992).

3.1.2. AREIA

A areia utilizada é proveniente da cidade de Adolfo-SP. A caracterização foi realizada segundo as normas técnicas brasileiras:

- Análise granulométrica: NBR NM 248 (ABNT, 2003);
- Absorção de água: NM 30 (ABNT, 2001);
- Massa específica seca e massa específica aparente: NM 52 (ABNT, 2003);
- Massa específica unitária e espaços vazios: NM 45 (ABNT, 2006);
- Matéria orgânica: NM 49 (ABNT, 2001);
- Materiais pulverulentos: NM 46 (ABNT, 2003).

Os valores obtidos no ensaio de caracterização da areia natural podem ser observados na figura 45 e na tabela 5.

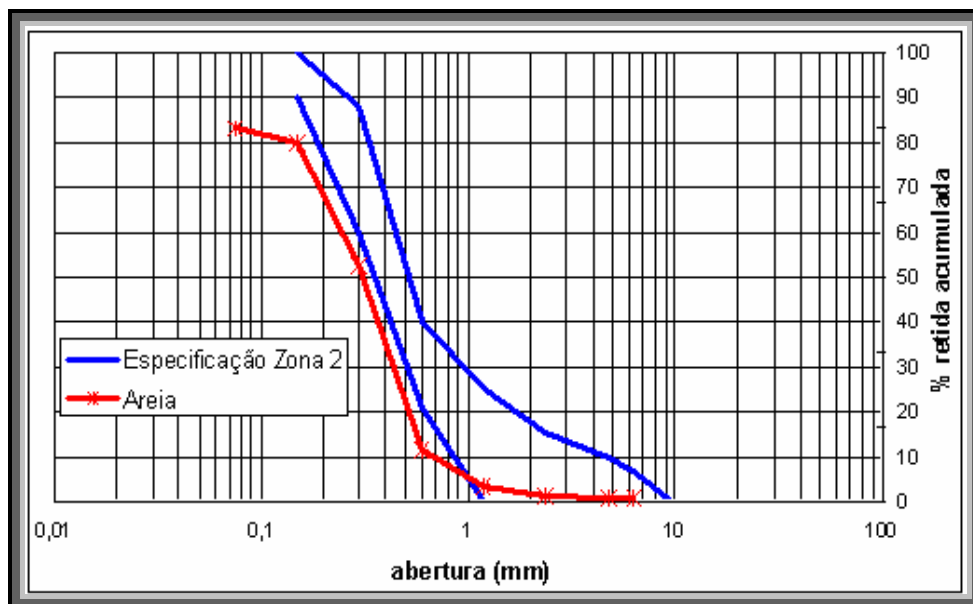


Figura 45: Distribuição granulométrica da areia

Fonte: CESP

Tabela 5: Caracterização da areia

Fonte: CESP

Φ máx (mm)	Módulo de finura	Massa específica		Massa unitária		Absorção (%)	Pulveru- lento (%)	Matéria Orgânica			
		s.s.s (g/cm ³)	seca (g/cm ³)	solta (g/cm ³)	solta 4% (g/cm ³)						
1,190	1,800	2,634	2,628	1,537	1,137	0,260	0,400	clara			
Peneiras (mm)	% Retida Acumulada										
	0,075	0,149	0,297	0,595	1,19	2,38	4,76	6,3	9,51	12,7	19
Areia	100	96,1	63,1	14	3,9	1,7	0	0	0	0	0

3.1.3. BRITA

O agregado graúdo utilizado foi a brita 1, proveniente da cidade de Icem - SP. A caracterização da brita 1 foi realizada segundo as normas técnicas brasileiras:

- Análise granulométrica: NBR NM 248 (ABNT, 2003);
- Massa específica seca e massa específica aparente e absorção de água: NM 53 (ABNT, 2003);
- Massa específica unitária e espaços vazios: NM 45 (ABNT, 2006);

Os valores obtidos no ensaio de caracterização da areia natural podem ser observados na figura 46 e na tabela 6.

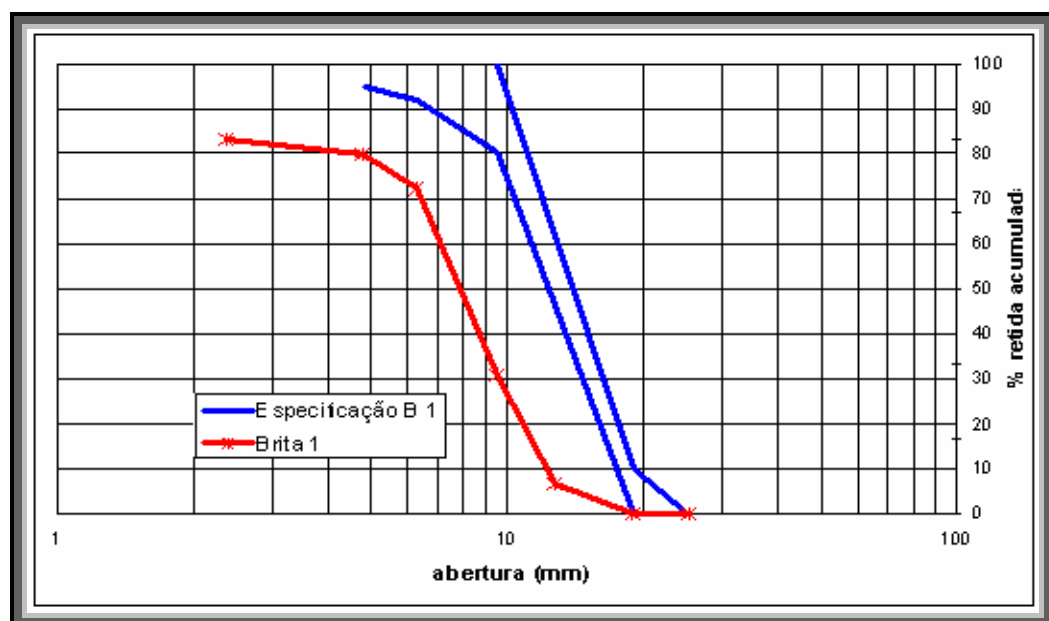


Figura 46: Distribuição granulométrica da brita 1

Fonte: CESP

Tabela 6: Caracterização da brita 1

Fonte: CESP

Φ máx (mm)	Módulo de finura	Massa específica				Absorção (%)	Pulveru- lento (%)					
		s.s.s (g/cm ³)	seca (g/cm ³)	solta (g/cm ³)	solta 4% (g/cm ³)							
19,00	6,36	2,904	2,875	2,963	1,418	1,03	1,60					
Peneiras (mm)	% Retida Acumulada											
	0,075	0,149	0,297	0,595	1,19	2,38	4,76	6,3	9,51	12,7	19	25,4
Brita 1	100	100	100	100	100	100	95,7	86,8	37,1	7,7	0	0

3.1.4. ÁGUA

A água utilizada é potável, proveniente de um poço artesiano da cidade de São José do Rio Preto-SP, onde está situada a fábrica dos tubos fornecidos para a pesquisa.

3.1.5. FIBRAS DE AÇO

Nesta pesquisa foram utilizadas fibras de aço de baixo teor de carbono, com ancoragem em gancho nas extremidades e coladas em pente, com as seguintes características, apresentadas na tabela 7:

Tabela 7: Características das fibras de aço utilizadas para reforço estrutural, cujos valores foram obtidos no catálogo do fabricante (FFG1 - Wirand)

Fonte: FABRICANTE MACCAFERRI DO BRASIL LTDA

Comprimento	Diâmetro	Fator de forma	Resistência à tração do aço	Deformação na ruptura	Módulo de elasticidade
60 mm	0,80 mm	75	> 1100 MPa	< 4%	210 GPa

Na figura 47 observa-se as fibras coladas em pente.

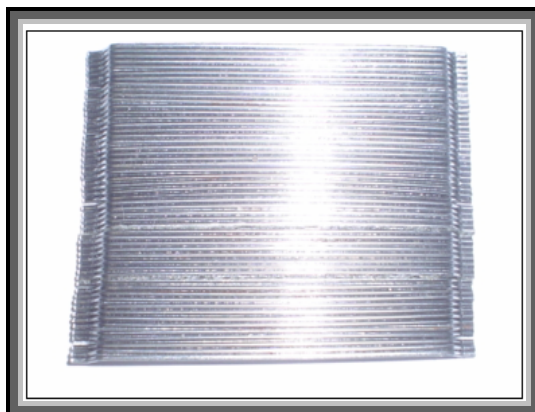


Figura 47: Fibra de aço colada em pente

3.2. TRAÇO DO CONCRETO

O traço do concreto utilizado pela fábrica de tubos é apresentado com a composição dos concretos para 1 saco de cimento (40 kg).

Tabela 8: Traço do concreto utilizado na fabricação dos tubos (em volume)

Fonte: CASO CONSTRUTORA LTDA

Materiais	Tipo de Concreto - Consumo					
	Convencional	CRFA - F1	CRFA - F2	CRFA - F3	CRFA - F4	CRFA - F5
Cimento CPV (ARIPUS RS) (kg)	40	40	40	40	40	40
Areia Natural (l)	81	81	81	81	81	81
Brita 1 (l)	108	108	108	108	108	108
Água (l)	16	16	16	16	16	16
a/c	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Fibra de aço (kg)	0	1,4	2,0	2,7	3,5	4,0

Para a fabricação do concreto reforçado com fibras de aço adotou-se uma ordem de colocação dos materiais para obter o resultado desejado. Primeiro foi colocada metade da água da mistura e em seguida adicionaram-se as fibras de aço e a brita 1 durante 1 minuto na betoneira, para que as fibras coladas em pente se soltassem.

Em seguida adicionaram-se a areia e o cimento e misturou-se por mais 1 minuto. A massa ficou por três minutos descansando e em seguida misturou-se por mais 3 minutos com o restante da água.

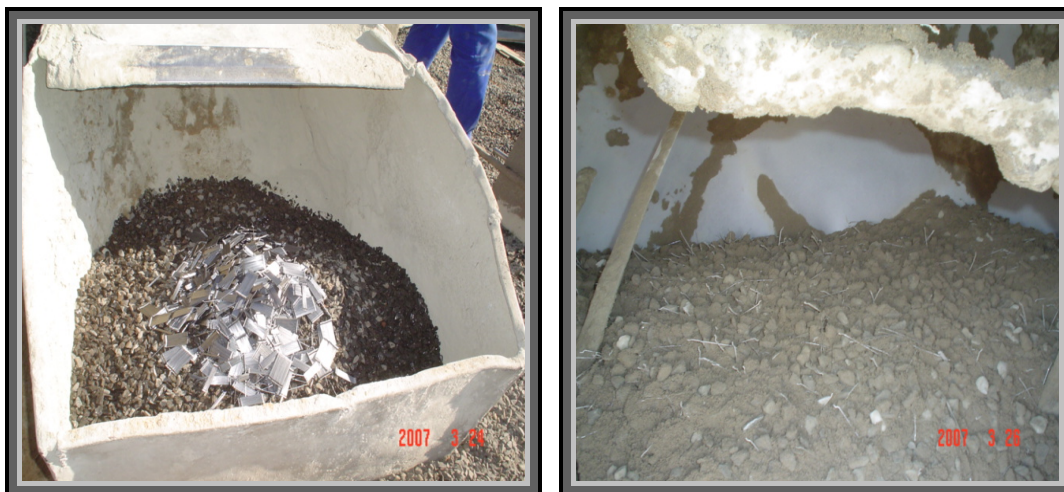


Figura 48: Produção de concreto com fibras de aço

3.3. ENSAIOS REALIZADOS

Os tubos de concreto utilizados nesta pesquisa possuem 600 mm de diâmetro nominal e 1,5 m de comprimento, destinados à utilização em canalizações de drenagem de águas pluviais. Os ensaios realizados para a pesquisa são:

- Compressão axial (corpos-de-prova cilíndricos);
- Tração na compressão diametral (corpos-de-prova cilíndricos);
- Compressão diametral; (próprio tubo de concreto);
- Tenacidade; (corpos-de-prova prismáticos);
- Absorção. (amostras retiradas dos tubos após ensaio de compressão diametral);

Para a pesquisa foram fabricados tubos simples, tubos armados, tubos com fibras, também foram retiradas amostras de concreto dos respectivos tubos e moldados em corpos-de-prova cilíndricos e prismáticos para os cinco diferentes teores de fibras (F1, F2, F3, F4 e F5).

Tabela 9: Quantidade de tubos de concreto para o ensaio de compressão diametral

Tubos	Compressão diametral (tubos)
PS1	3
PA1	3
F1	3
F2	3
F3	3
F4	3
F5	3
Total	21

Tabela 10: Quantidade de corpos-de-prova cilíndricos e prismáticos

Descrição	Compressão Axial (cp)	Tração compressão diametral (cp)	Tenacidade (prisma)
PS1			
PA1	3	3	-
F1	3	3	3
F2	3	3	3
F3	3	3	3
F4	3	3	3
F5	3	3	3
Total	18	18	15

Onde:

cp: corpo-de-prova cilíndrico (10cm x 20cm)

prisma: corpo-de-prova prismáticos (15cm x 15cm x 50cm)

PS1: Tubo simples

PA1: Tubo armado

F1: Tubo com fibras de aço - teor de fibras 10 kg/m³;

F2: Tubo com fibras de aço - teor de fibras 15 kg/m³;

F3: Tubo com fibras de aço - teor de fibras 20 kg/m³;

F4: Tubo com fibras de aço - teor de fibras 25 kg/m³;

F5: Tubo com fibras de aço - teor de fibras 30 kg/m³.

Para o ensaio de absorção foram retiradas amostras de três regiões de cada tubo ensaiado, com tamanho aproximadamente de 150 cm² de área de superfície.

3.4. MÉTODOS DE ENSAIO

Os ensaios de laboratório realizados foram: compressão axial, tração na compressão diametral, compressão diametral, tenacidade e absorção de água.

A moldagem dos corpos-de-prova seguiu a norma NBR 5738 (ABNT, 2003) e a cura foi realizada com os corpos-de-prova totalmente imersos, sendo que, para os tubos de concreto, a cura foi por aspersão. O traço do concreto da pesquisa é o mesmo utilizado pela fábrica de tubos. Para a vibração dos corpos-de-prova utilizou-se o núcleo vibratório (mesmo local de vibração dos tubos). Os ensaios foram realizados em 28 dias.

3.4.1. ENSAIO DE COMPRESSÃO AXIAL

No ensaio de compressão axial, utiliza-se um cilindro como corpo-de-prova, colocado com seu eixo em posição vertical entre os pratos da prensa e aplica-se uma carga paralela ao comprimento do corpo-de-prova (força axial) até a ruptura deste. Este ensaio atende às especificações feitas na norma NBR 5739 (ABNT, 1994).

A figura 49 (a) mostra a moldagem dos corpos-de-prova cilíndricos no núcleo vibratório, mesmo local de vibração dos tubos de concreto e figura 49 (b) mostra a cura imersa durante 28 dias da data de fabricação.



(a)



(b)

Figura 49: Corpos-de-prova sendo moldados no núcleo de vibração e depois totalmente imersos em água até atingirem a idade de 28 dias para a ruptura

A figura 50 (a) mostra o corpo-de-prova cilíndrico na prensa para o ensaio de compressão axial. A figura 50 (b) mostra o relógio analógico que fornece a leitura da carga aplicada na prensa.



(a)



(b)

Figura 50: Ensaio de compressão axial em corpo-de-prova cilíndrico
Fonte: CESP (2008)

3.4.2. ENSAIO DE TRAÇÃO NA COMPRESSÃO DIAMETRAL

Neste ensaio, um cilindro do mesmo tipo utilizado no ensaio de compressão é colocado com o seu eixo em posição horizontal entre os pratos de uma prensa; coloca-se madeira entre o prato e o cilindro e aplica-se uma carga progressivamente até à ruptura do corpo-de-prova por fendimento no plano vertical (NEVILLE, 1982, p.521). O ensaio atendeu às exigências da norma NBR 7222 (ABNT, 1994).

A figura 51 mostra o ensaio de tração na compressão diametral com corpos-de-prova cilíndricos.



Figura 51: Ensaio de tração na compressão diametral

Fonte: CESP (2008)

3.4.3. ENSAIO DE COMPRESSÃO DIAMETRAL

3.4.3.1 TUBOS ARMADOS

A norma NBR 8890 regulariza o ensaio de compressão diametral realizado em tubos de concreto (ABNT, 2007). O ensaio de compressão diametral em tubos de concreto objetiva a determinação dos valores efetivos da carga de fissura e de ruptura do tubo submetido ao ensaio. A abertura da fissura é medida por meio de uma lâmina padrão feita de chapa de aço de 0,25 mm de espessura e largura de 12,7 mm afinada na ponta para 1,6 mm (em que o raio mede 0,8 mm) de largura, com cantos arredondados e com inclinação de 1:4, conforme apresentado na figura 51 considera-se a fissura de 0,25 mm de abertura quando a ponta da lâmina padrão penetrar sem dificuldade 1,6 mm, com pequenos intervalos, na distância de 300 mm.

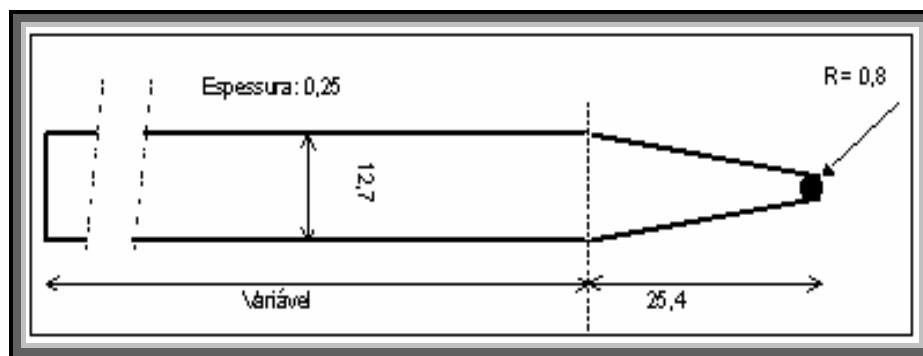


Figura 52: Lâmina padrão para medição de abertura de fissura 0,25mm

Fonte: NBR 8890 (ABNT, 2007)

Inicia-se o ensaio com a medição do comprimento útil (L) do tubo em três geratrizes defasadas entre si em um ângulo de 120 graus, sendo o valor do comprimento útil a média das três medidas. Coloca-se o tubo deitado sobre apoios planos e horizontais, que consiste em sarrafos retos de madeira de comprimento igual ou superior ao tubo; ao longo da geratriz do tubo, coloca-se uma vigota reta de madeira de comprimento maior ou igual ao do tubo. Para evitar a localização de esforços em possíveis irregularidades do tubo, pode-se intercalar entre o tubo e cada cutelo uma tira de borracha com cerca de 5 mm de espessura ou uma camada de areia.



Figura 53: Cutelo de madeira com tira de borracha de 5 mm de espessura

Fonte: CESP (2007)

Dispor o conjunto de modo que o ponto de aplicação da carga coincida com o meio do comprimento útil do tubo de maneira a garantir a distribuição uniforme da carga ao longo do seu comprimento, aplicando a carga com taxa de variação constante e não inferior a 5 kN/min nem superior a 35 kN/min, por metro de tubo.

Ao iniciar o ensaio, quando o tubo começar a apresentar fissuras visíveis, deve-se utilizar a lâmina-padrão para determinar a carga de fissura e, a partir desta carga, o ensaio deve continuar à mesma taxa de aplicação de carga, elevando-se a carga até atingir a ruptura do tubo, determinando-se a carga de ruptura.

3.4.3.2 TUBOS COM FIBRAS DE AÇO

O ensaio foi realizado no laboratório da CESP em escala real (1:1) e dois medidores (relógios comparadores) de deslocamentos foram posicionados um em cada geratriz superior do tubo, um relógio na região da ponta e outro na região da bolsa do tubo. O ensaio foi realizado com velocidade de carregamento controlada para medir os deslocamentos correspondentes a cada incremento de carga.

O monitoramento do ensaio foi realizado através de um aquisitor de dados da marca lotech (Daqbook 120) conectado a um micro-computador através do Software DasyLab (versão 6.0), como mostra a figura 57 que fornece a leitura de carga aplicada no tubo através de uma célula de carga (50 toneladas) acoplada entre o pistão do macaco hidráulico e a viga de distribuição de tensões, como mostram a figura 54. O aquisitor também faz as leituras dos deslocamentos diametrais obtidos através dos relógios comparadores, figura 55, que estão ligados ao sistema de aquisição de dados, sendo que os dados obtidos foram a uma velocidade de duas leituras por segundo. Para o ensaio foi utilizada uma rótula para permitir a acomodação das deformações levando-se em conta que o tubo não tem suas dimensões perfeitamente cilíndricas.

Na figura 56 observa-se a prensa hidráulica que aplica a força através do pistão e também se pode ler a carga atuante através de um manômetro analógico.

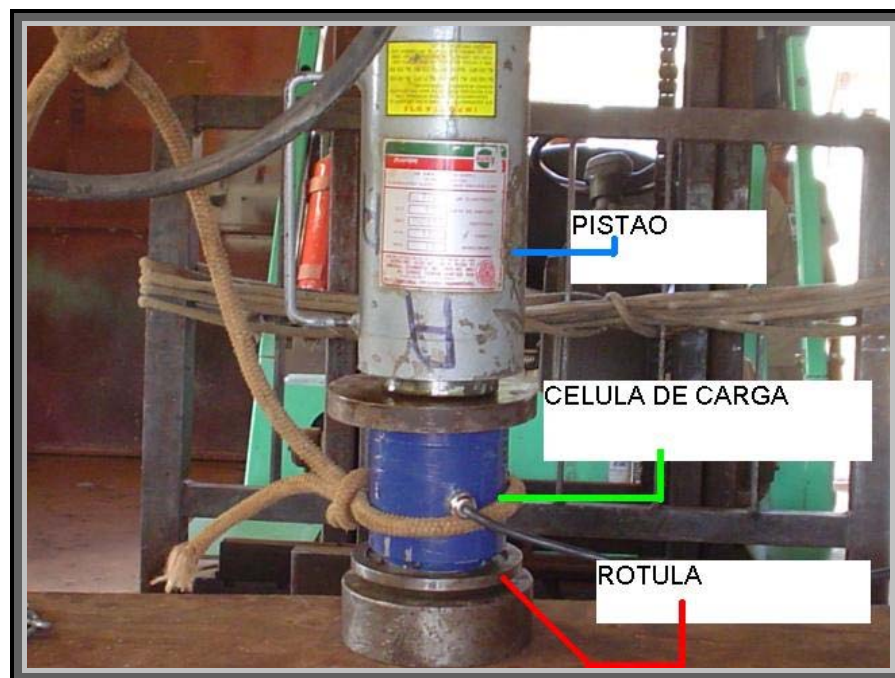


Figura 54: Sistema de aplicação de carga composto pelo pistão, célula de carga e rótula



Figura 55: Relógio comparador colocado nas duas extremidades opostas do tubo para medir as deformações diametrais



Figura 56: Prensa hidráulica



Figura 57: Sistema de aquisição de dados da marca Iotech (Daqbook 120) conectado a um micro-computador através do software DasyLab (versão 6.0)

Em tubos de concreto reforçados com fibras deve-se obedecer ao plano de carregamento apresentado na figura 58. Esse plano de carregamento para tubos com fibras consiste em, depois de obtida a carga mínima isenta de dano (valor tabelado), permanecer por 1 minuto nesta carga e depois prosseguir o carregamento até atingir a carga de ruptura, em seguida descarregar e carregar novamente até o valor da carga mínima isenta de dano e esperar mais 1 minuto. Em seguida carregar até atingir 5% a mais do valor da carga mínima isenta de dano.

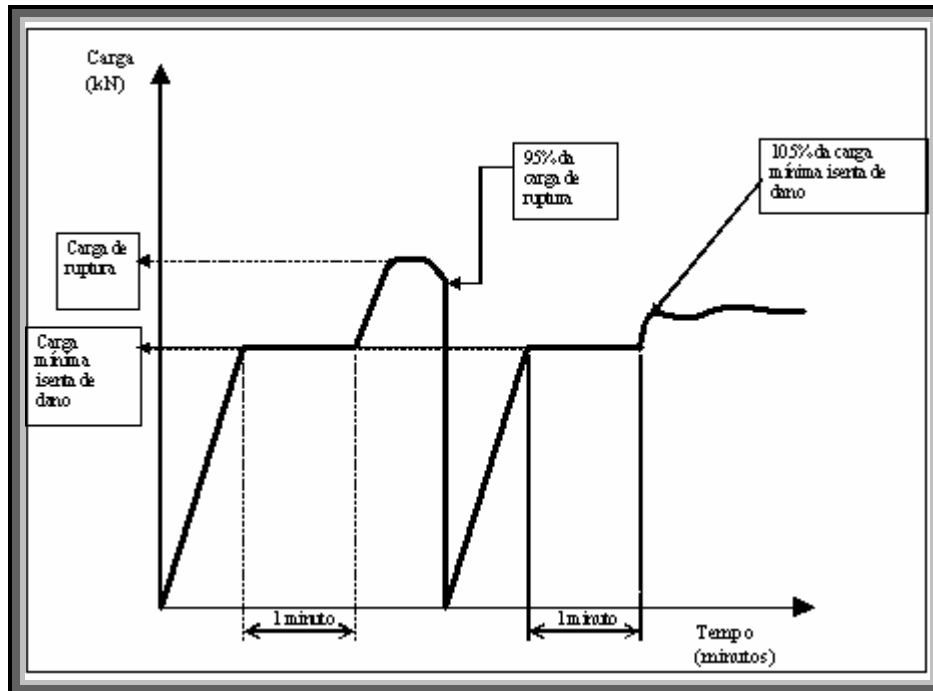


Figura 58: Esquema do plano de carregamento do ensaio de compressão diametral para tubos reforçados com fibras de aço

Fonte: NBR 8890 (ABNT, 2007)

As figuras 59 e 60 mostram o esquema do ensaio de compressão diametral, o local de aplicação da carga, as vigotas de madeira necessárias para apoiar o tubo durante o ensaio.

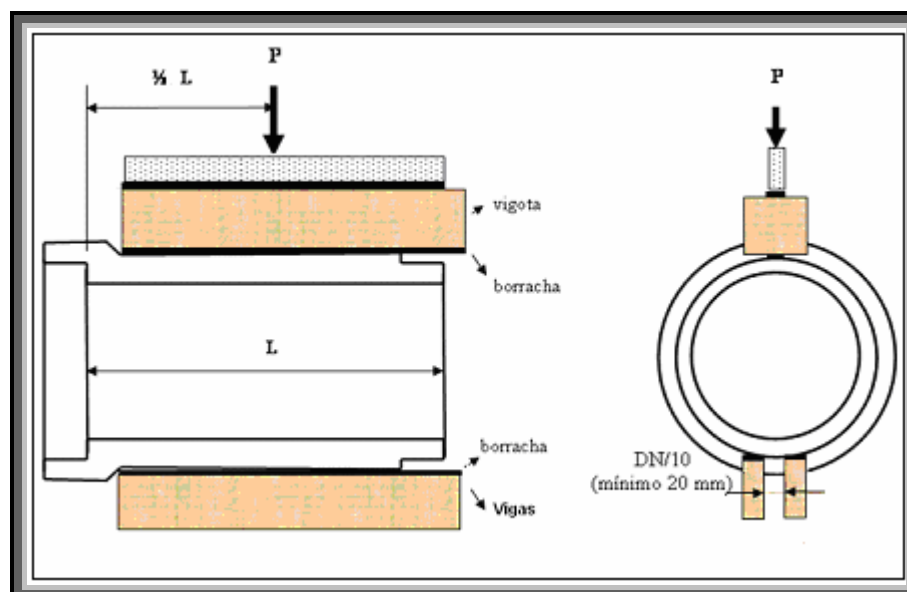


Figura 59: Esquema do ensaio de compressão diametral para tubos de concreto do tipo ponta e bolsa

Fonte: NBR 8890 (ABNT, 2007)

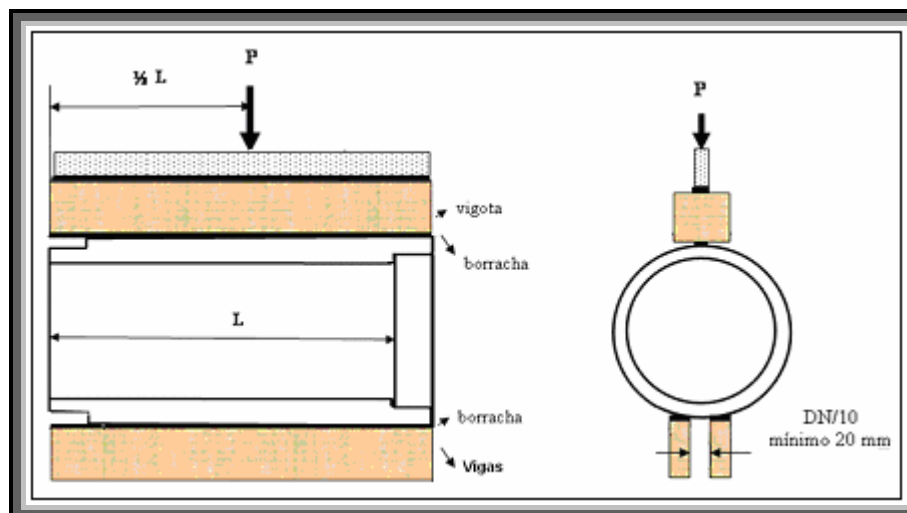


Figura 60: Esquema do ensaio de compressão diametral para tubos de concreto do tipo macho e fêmea

Fonte: NBR 8890 (ABNT, 2007)

A figura 61 mostra o tubo de concreto reforçado com fibra de aço após a ruptura.



Figura 61: Tubo de concreto reforçado com fibra de aço após a ruptura

3.4.4. ENSAIO DE TENACIDADE

O ensaio de tenacidade foi realizado segundo a norma japonesa JSCE-SF4 (1984a). No ensaio foi utilizado o suporte *yoke*, que consiste numa haste metálica horizontal apoiada nas extremidades dos prismas onde é fixado um transdutor de sinal ligado a um aparelho de aquisição de dados, registrando as leituras de deslocamento vertical. Para a leitura das deformações utilizaram-se dois relógios comparadores, um de cada lado do prisma e obteve-se a média dos valores dos dois relógios, ligados a um aparelho de aquisição de dados. No ensaio foi utilizada uma máquina de velocidade de deformação controlada.

A moldagem dos corpos-de-prova prismáticos foi realizada no próprio núcleo vibratório, onde foram fabricados os tubos de concreto. Pois assim foi possível a real situação de vibração do concreto seco. A fôrma utilizada foi 15cmx15cmx50cm. A cura foi totalmente imerso em água durante 28 dias.



Figura 62: Moldagem dos corpos-de-prova prismáticos



(a)



(b)

Figura 63: Corpos-de-prova prismáticos utilizados na pesquisa
(a) Cura imersa dos corpos-de-prova prismáticos
(b) Corpo-de-prova antes do ensaio de tenacidade



Figura 64: Máquina com deformação controlada para realizar o ensaio de tenacidade da marca MTS - capacidade de 20 toneladas

A figura 65 mostra um dos dois relógios comparadores, o sistema yoke e os dois cutelos.

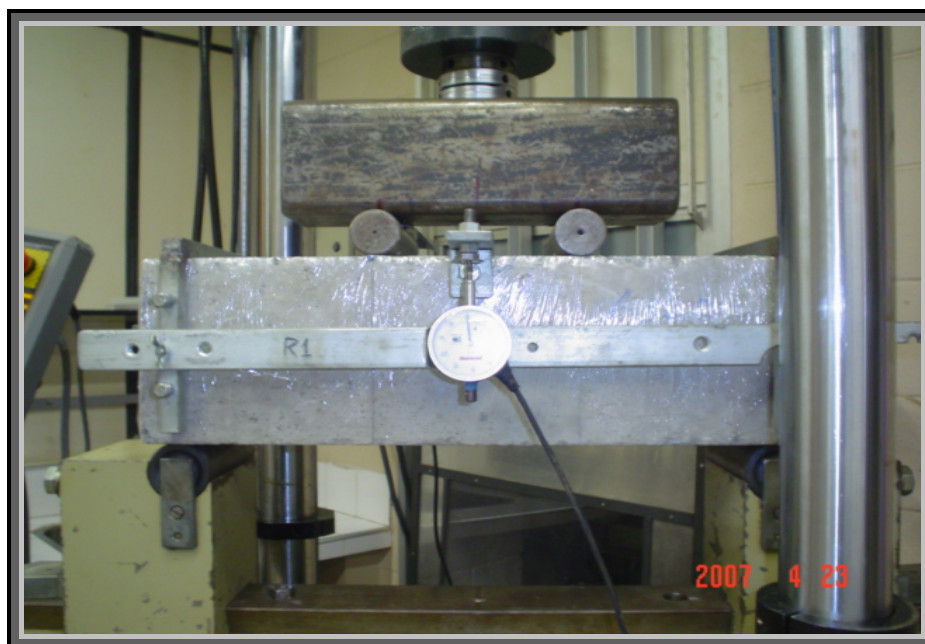


Figura 65: Corpo-de-prova para o ensaio de tenacidade

Nota: Como mostra a figura 65, o corpo-de-prova prismático foi envolto a um papel film para proteger a máquina de resíduos de concreto.

A figura 66 mostra o corpo-de-prova prismático após o ensaio de tenacidade e a visível fissura.



Figura 66: Corpo-de-prova prismático após o ensaio de tenacidade

3.4.5. ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA

Segundo a NBR 8890 (ABNT, 2007), o ensaio de absorção de água destina-se a determinação do índice de absorção de água em tubos de concreto destinados a esgoto sanitário e água pluvial. Dos tubos submetidos ao ensaio de compressão diametral, retiram-se dois corpos-de-prova indeformáveis por tubo, que resulte em uma área superficial de 100 cm² a 150 cm² e isentos de fissuras visíveis.

Os corpos-de-prova devem ser secos em estufa com temperatura mantida no intervalo de $(105 \pm 5)^{\circ}\text{C}$, pelo período mínimo de oito horas, até que em duas pesagens consecutivas, com intervalo não inferior a duas horas, indiquem variação de perda de massa inferior a 0,1% da sua massa original. Depois de secos são colocados em recipientes apropriados, imersos em água potável em ebulição (100 °C) e mantida a água em fervura por cinco horas; após, deixam-se os corpos-de-prova esfriarem junto com a água em seus respectivos recipientes até a temperatura ambiente e em seguida pesá-los.

$$(6) \quad A = \frac{M_1 - M_0}{M_0} * 100$$

Onde:

A: índice de absorção de água (%);

M_0 : massa do corpo-de-prova seco (g);

M_1 : massa do corpo-de-prova após o ensaio saturado (g).

A retirada dos corpos-de-prova para o ensaio de absorção foi realizada após o término do ensaio de compressão diametral.



Figura 67: Amostras dos tubos de concreto



Figura 68: Estufa – para secar as amostras de concreto do ensaio de absorção

CAPÍTULO 4

RESULTADOS

4.1. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

4.1.1. COMPRESSÃO AXIAL

Tabela 11: Resultados do ensaio de compressão axial

Tubos	CP	Resistência à compressão axial (MPa)	Valor Médio (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente de Variação (%)	Acréscimo de carga-controlado (%)
PS1/PA1 controle	1	45,3	49,0	3,0	6,1	—
	2	49,0				
	3	52,6				
F1	1	68,6	63,4	3,7	5,9	30,0
	2	60,3				
	3	61,3				
F2	1	70,7	69,2	2,4	3,5	41,0
	2	71,0				
	3	65,8				
F3	1	63,3	60,7	7,1	11,7	24,0
	2	67,8				
	3	51,0				
F4	1	61,7	59,8	4,6	7,7	22,0
	2	53,4				
	3	64,2				
F5	1	60,3	57,4	2,7	4,7	17,0
	2	58,0				
	3	53,8				

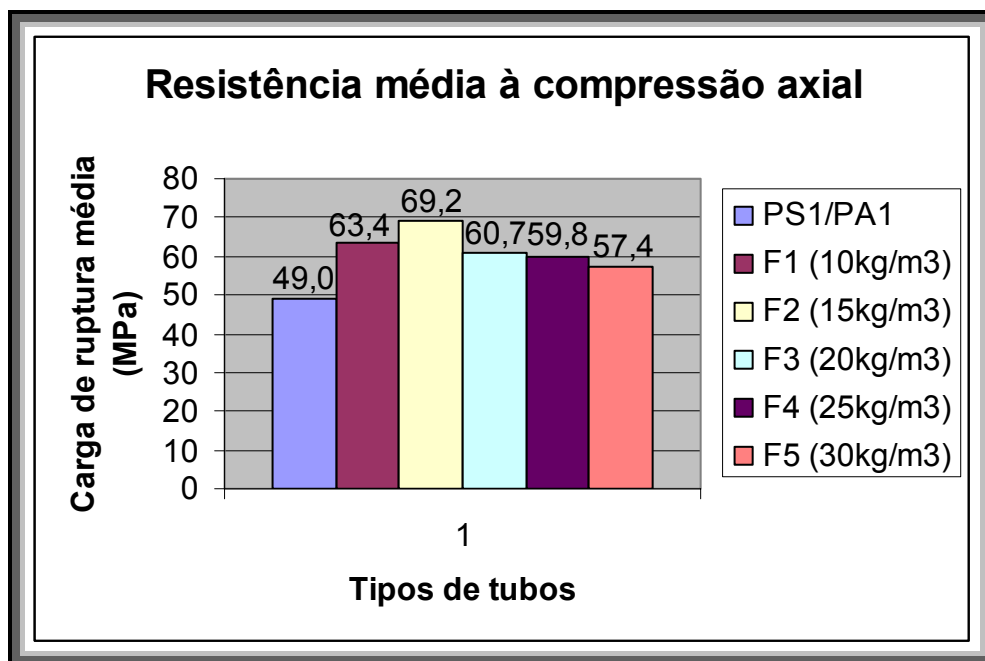


Figura 69: Resultados do ensaio de compressão axial em corpos-de-prova cilíndricos

4.1.2. TRAÇÃO NA COMPRESSÃO DIAMETRAL

Tabela 12: Resultados do ensaio de tração na compressão diametral

Tubos	CP	Resistência à tração na compressão diametral (MPa)	Valor Médio (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente de Variação (%)	Acréscimo de carga- controle(%)
PS1/PA1 controle	1	5,31	5,02	0,21	4,20	—
	2	4,92				
	3	4,82				
F1	1	6,21	6,48	0,22	3,40	29,00
	2	6,50				
	3	6,74				
F2	1	7,76	6,86	0,69	10,00	37,00
	2	6,74				
	3	6,07				
F3	1	7,76	7,41	0,26	3,50	32,00
	2	7,13				
	3	7,33				
F4	1	7,56	7,52	0,30	4,00	50,00
	2	7,13				
	3	7,86				
F5	1	6,01	5,78	0,17	2,95	15,00
	2	5,68				
	3	5,64				

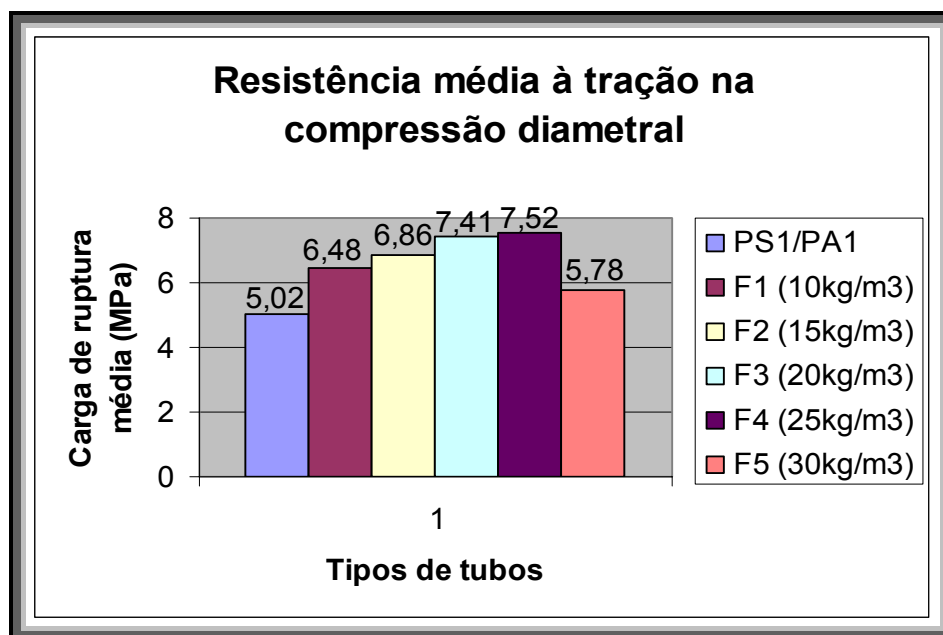


Figura 70: Resultados do ensaio de tração na compressão diametral em corpos-de-prova cilíndricos

4.1.3. COMPRESSÃO DIAMETRAL

Tabela 13: Resultado do ensaio de compressão diametral para tubos armados - quanto à carga de fissura

Tubos	CP	Carga de fissura- Norma (kN/m)	Resistência à compressão diametral (kN/m)	Valor Médio (kN/m)	Desvio Padrão (kN/m)	Coefficiente de Variação (%)
PA1	1	24	50,0	53,7	2,63	4,90
	2		56,0			
	3		55,0			

Tabela 14: Resultado do ensaio de compressão diametral para tubos armados, simples e com fibras de aço - quanto à carga de ruptura

Tubos	CP	Carga de ruptura- Norma (kN/m)	Resistência à compressão diametral (kN/m)	Valor Médio (kN/m)	Desvio Padrão (kN/m)	Coefficiente de Variação (%)	Acréscimo- Decréscimo carga-controle PS1 (%)
PS1	1	24	50,0	51,3	1,25	2,44	
	2		53,0				
	3		51,0				
PA1	1	36	50,0	53,7	2,63	4,90	
	2		56,0				
	3		55,0				
F1	1	36	48,0	45,3	1,89	4,17	-13,00
	2		44,0				
	3		44,0				
F2	1	36	52,0	48,3	2,63	5,44	-6,00
	2		47,0				
	3		46,0				
F3	1	36	53,0	54,0	1,41	2,61	5,00
	2		53,0				
	3		56,0				
F4	1	36	55,0	54,0	0,82	1,52	5,00
	2		54,0				
	3		53,0				
F5	1	36	58,0	54,7	2,5	4,57	7,00
	2		52,0				
	3		54,0				

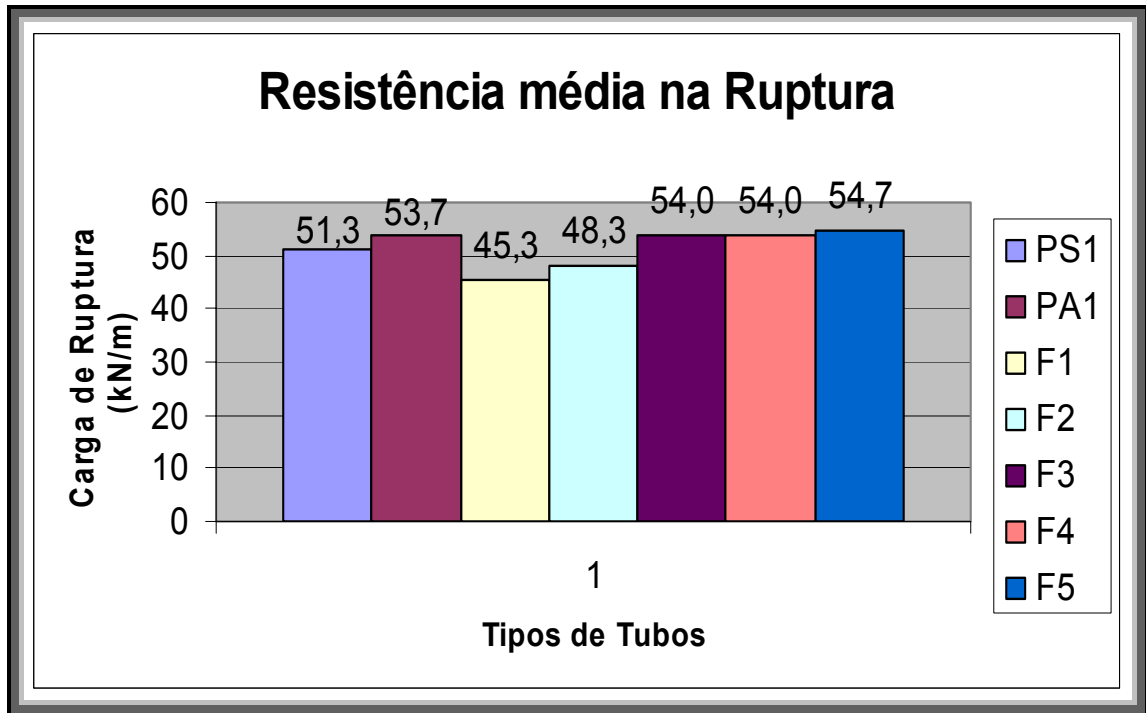


Figura 71: Resultados do ensaio de compressão diametral em tubos de concreto

4.1.3.1. GRÁFICOS CARGA (kN) X TEMPO (minutos) – TUBOS COM FIBRAS DE AÇO SEGUNDO NBR 8890:2007

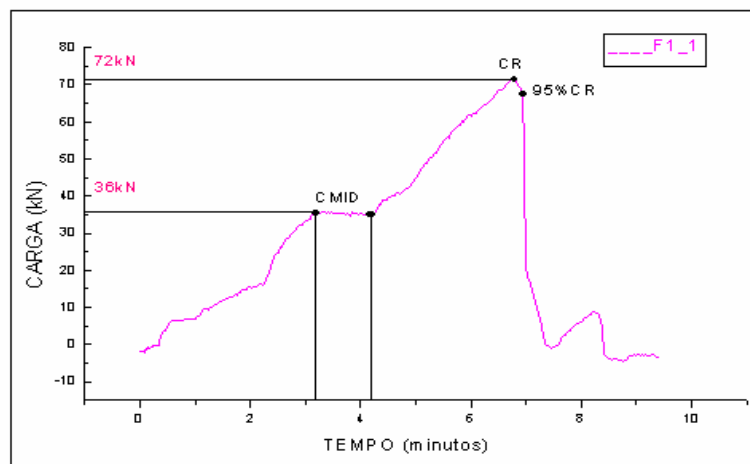


Figura 72: Resultado do ensaio de compressão diametral para tubos com fibras – teor de fibra – $F1=10\text{kg/m}^3$

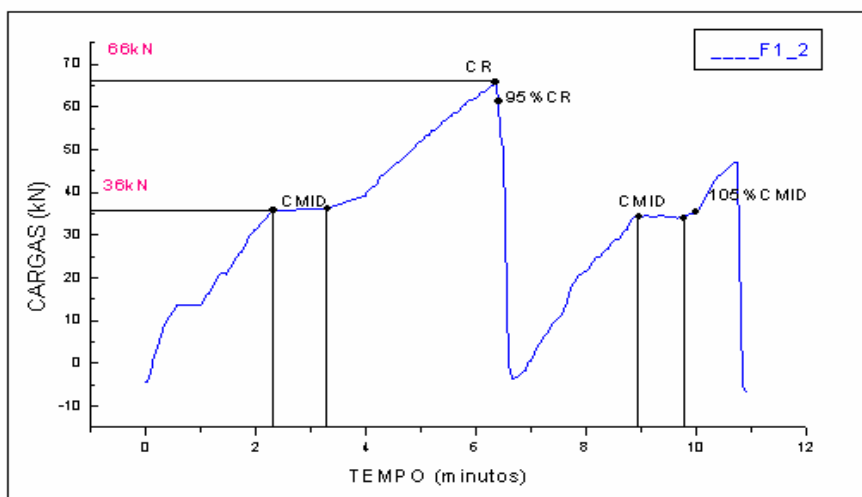


Figura 73: Resultado do ensaio de compressão diametral para tubos com fibras – teor de fibra – **F1=10kg/m³**

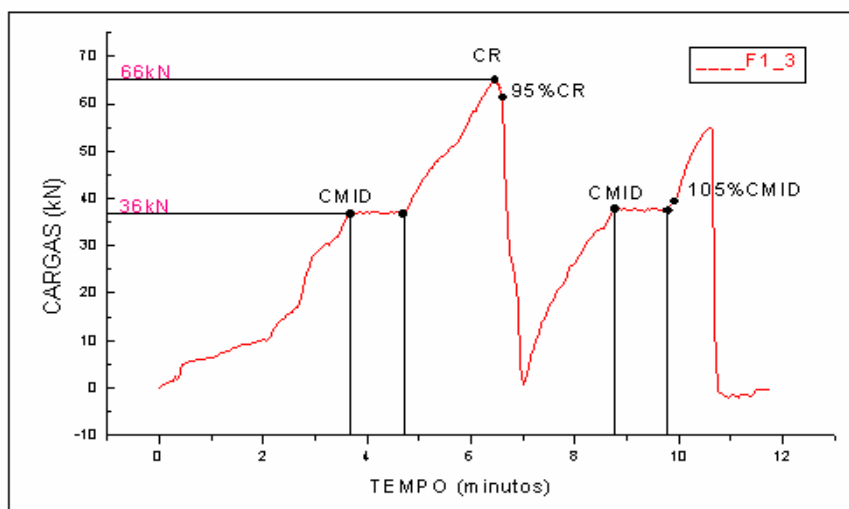


Figura 74: Resultado do ensaio de compressão diametral para tubos com fibras – teor de fibra – **F1=10kg/m³**

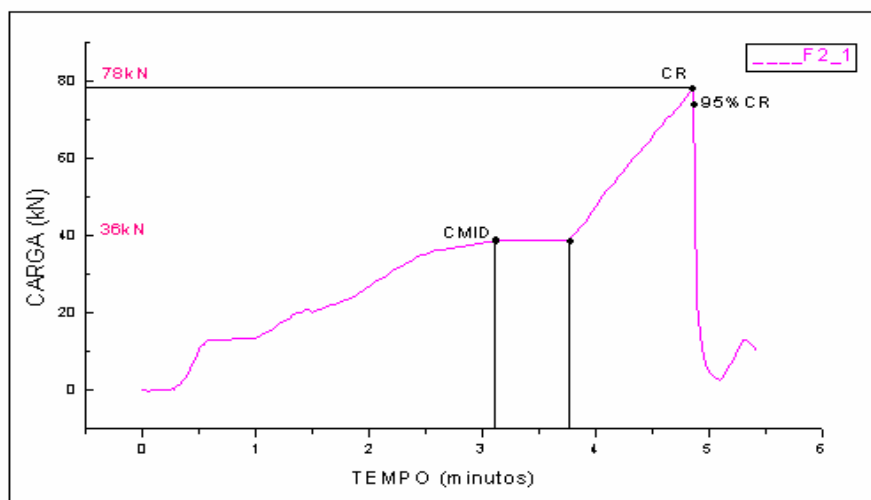


Figura 75: Resultado do ensaio de compressão diametral para tubos com fibras – teor de fibra – $F2=15\text{kg/m}^3$

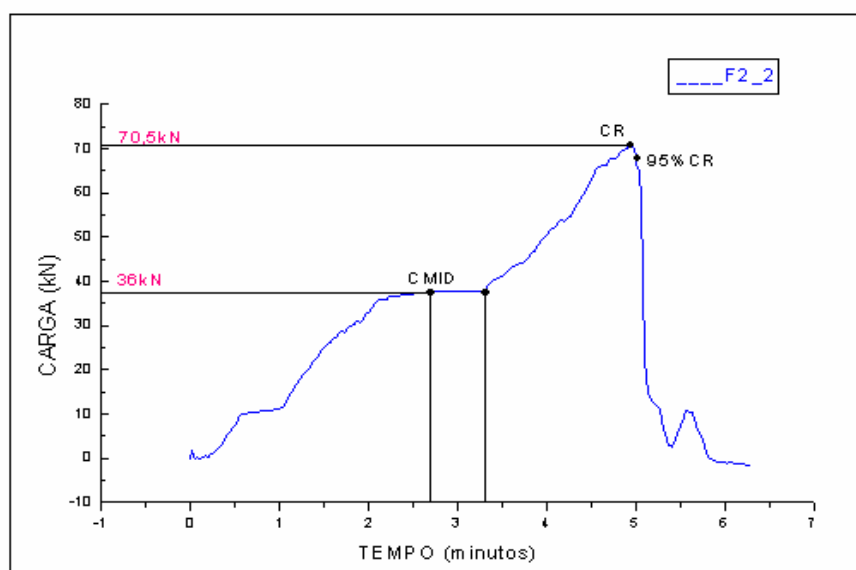


Figura 76: Resultado do ensaio de compressão diametral para tubos com fibras – teor de fibra – $F2=15\text{kg/m}^3$

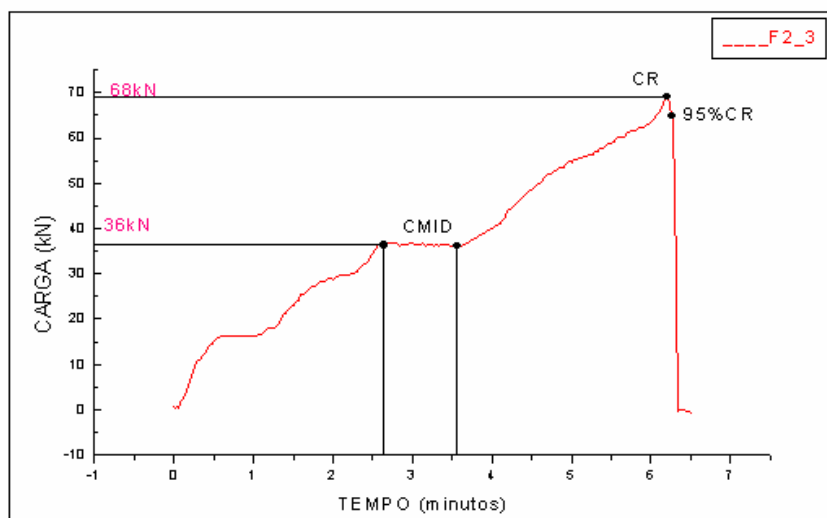


Figura 77: Resultado do ensaio de compressão diametral para tubos com fibras – teor de fibra – **F2=15kg/m³**

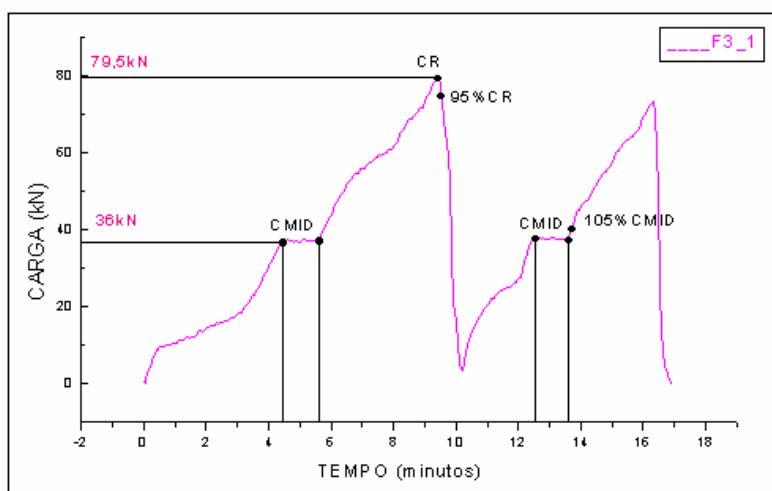


Figura 78: Resultado do ensaio de compressão diametral para tubos com fibras – teor de fibra – **F3=20kg/m³**

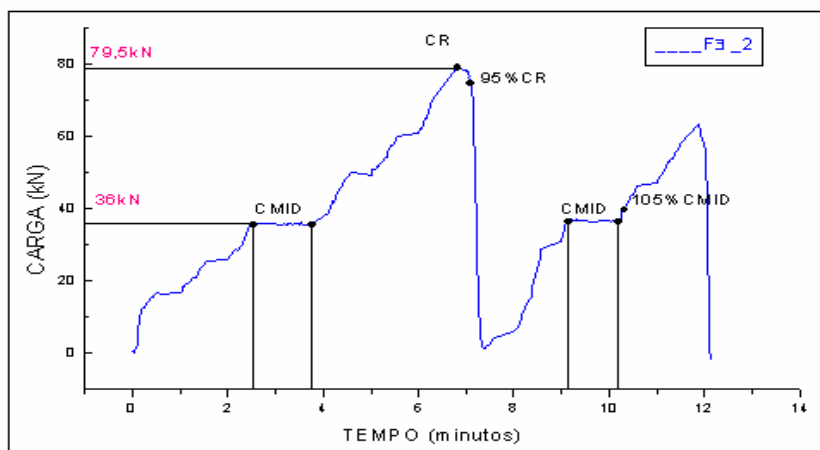


Figura 79: Resultado do ensaio de compressão diametral para tubos com fibras – teor de fibra – $F3=20\text{kg/m}^3$

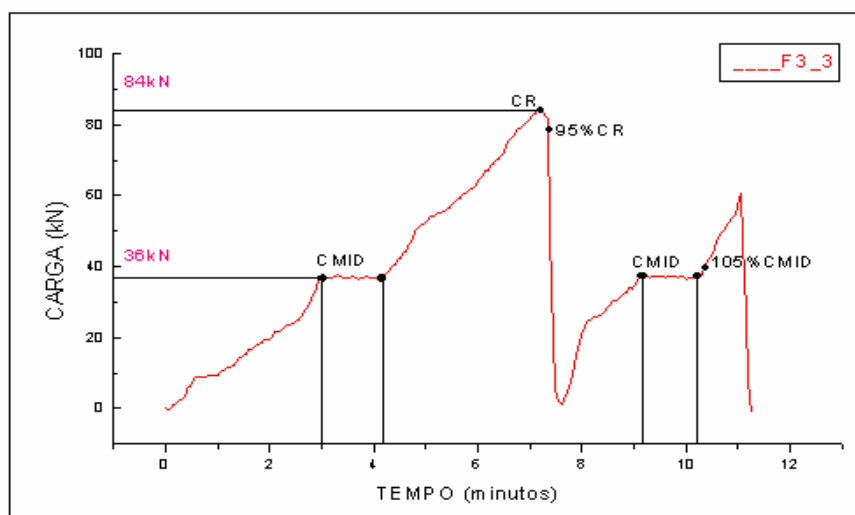


Figura 80: Resultado do ensaio de compressão diametral para tubos com fibras – teor de fibra – $F3=20\text{kg/m}^3$

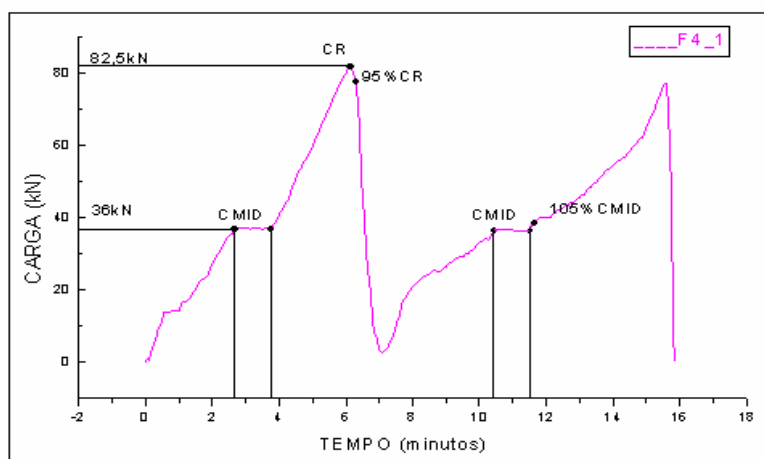


Figura 81: Resultado do ensaio de compressão diametral para tubos com fibras – teor de fibra – $F4=25\text{kg/m}^3$

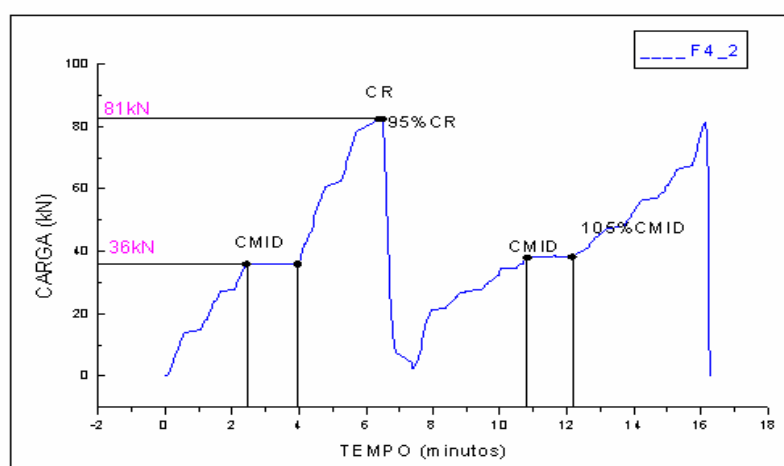


Figura 82: Resultado do ensaio de compressão diametral para tubos com fibras – teor de fibra – $F4=25\text{kg/m}^3$

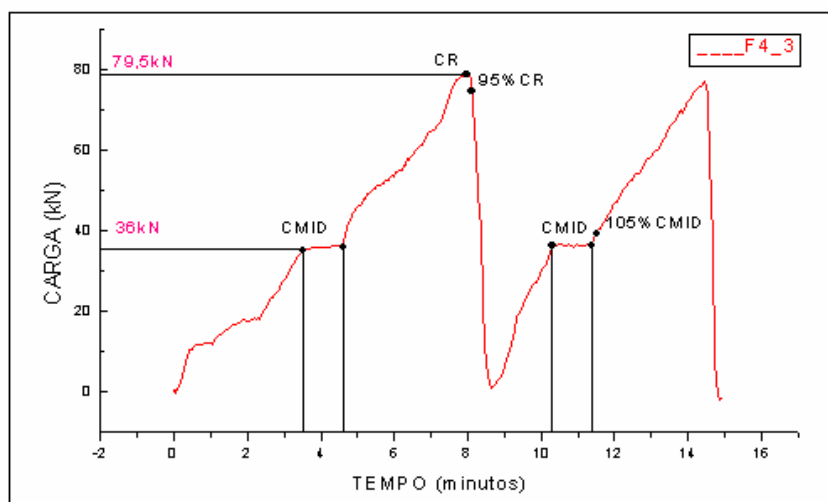


Figura 83: Resultado do ensaio de compressão diametral para tubos com fibras – teor de fibra – $F4=25\text{kg/m}^3$

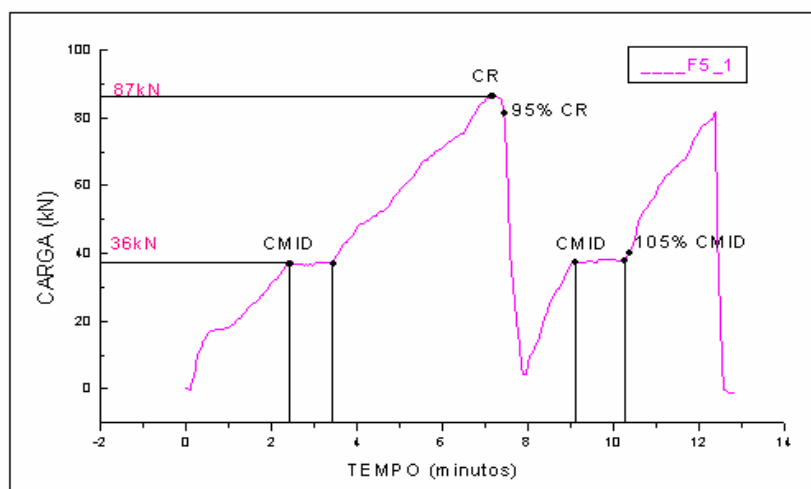


Figura 84: Resultado do ensaio de compressão diametral para tubos com fibras – teor de fibra – $F5=30\text{kg/m}^3$

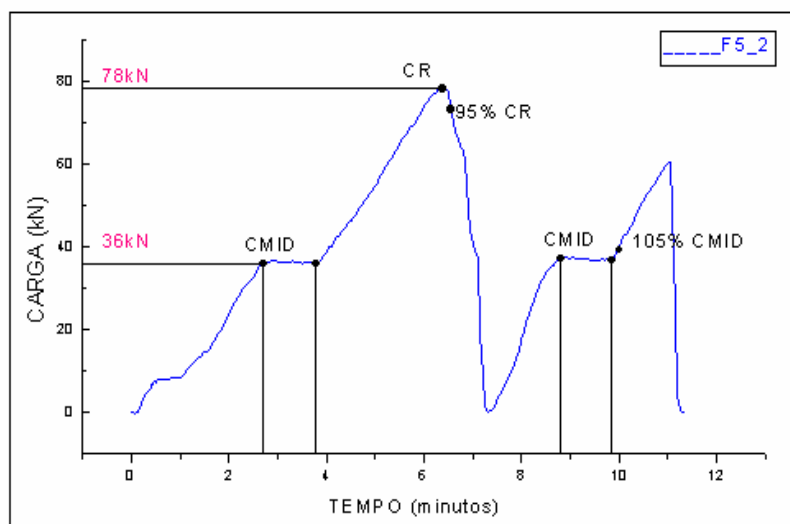


Figura 85: Resultado do ensaio de compressão diametral para tubos com fibras – teor de fibra – **F5=30kg/m³**

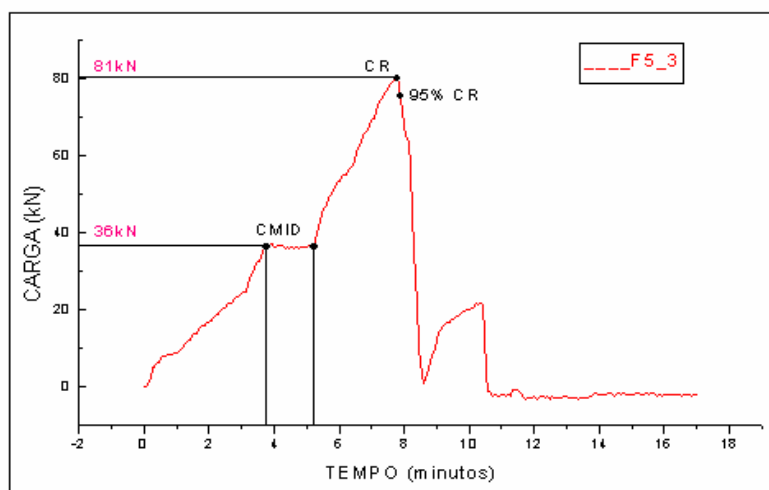


Figura 86: Resultado do ensaio de compressão diametral para tubos com fibras – teor de fibra – **F5=30kg/m³**

Na tabela 15 observa-se as cargas de ruptura e as cargas no recarregamento dos tubos com fibras.

Tabela 15: Resultado do ensaio de compressão diametral para tubos com fibras de aço

Tubos	CP	Carga Mínima Isenta de Dano (kN/m)	Carga na	Carga de recarre
			Ruptura (kN/m)	gamento (kN/m)
F1	1	24	48,0	6,0
	2		44,0	31,5
	3		44,0	36,5
F2	1	24	52,0	9,0
	2		47,0	0,0
	3		46,0	0,0
F3	1	24	53,0	49,0
	2		53,0	41,0
	3		56,0	42,0
F4	1	24	55,0	52,0
	2		54,0	43,0
	3		53,0	51,0
F5	1	24	58,0	54,0
	2		52,0	41,0
	3		54,0	15,0

Analisando a tabela 15 verifica-se que o teor de fibras F2 não completou o carregamento que a norma determina em nenhum dos três protótipos de tubos ensaiados. Os teores de fibras F1 e F3 dos três tubos ensaiados apenas 67% completaram o plano de carregamento. Isto é, as cargas no recarregamento sublinhadas na cor azul na tabela 15 tinham que apresentar no mínimo 25,2 kN/m, que corresponde a 105% do valor da carga mínima isenta de dano (24 kN/m).

4.1.3.2. GRÁFICOS CARGA (kN) X DESLOCAMENTO DIAMETRAL (mm)

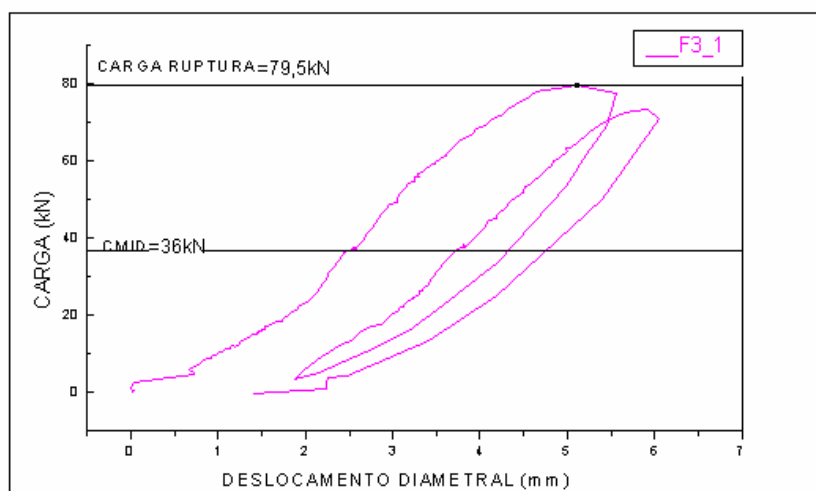


Figura 87: Resultado do ensaio de compressão diametral para tubos com fibras – CargaxDeslocamento - teor de fibra – **F3=20kg/m³**

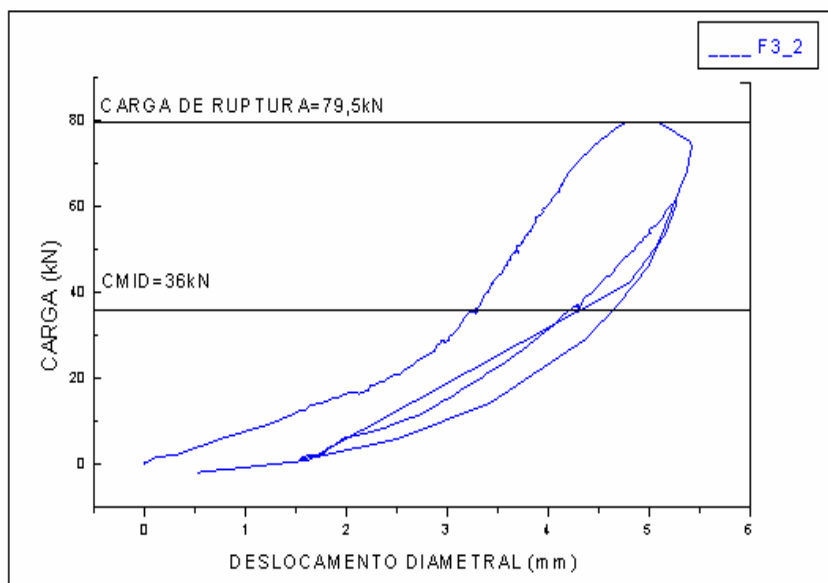


Figura 88: Resultado do ensaio de compressão diametral para tubos com fibras – CargaxDeslocamento - teor de fibra – $F3=20\text{kg/m}^3$

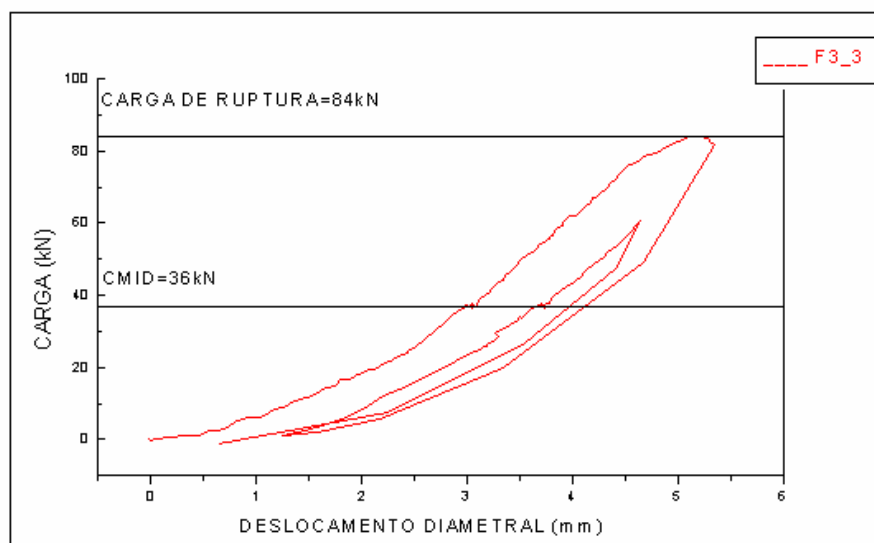


Figura 89: Resultado do ensaio de compressão diametral para tubos com fibras – CargaxDeslocamento - teor de fibra – $F3=20\text{kg/m}^3$

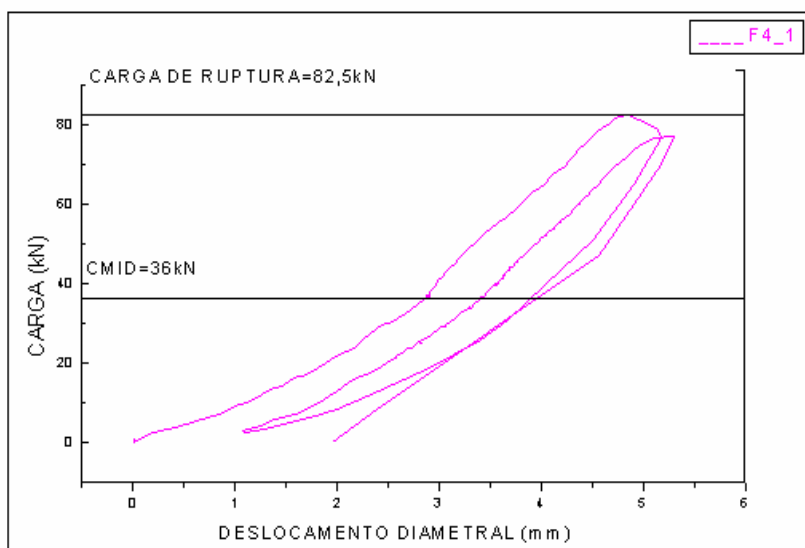


Figura 90: Resultado do ensaio de compressão diametral para tubos com fibras – CargaxDeslocamento - teor de fibra – **F4=25kg/m³**

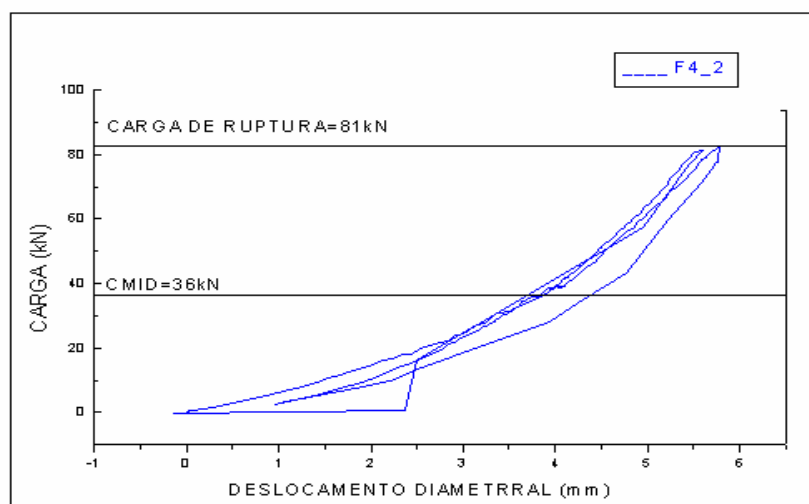


Figura 91: Resultado do ensaio de compressão diametral para tubos com fibras – CargaxDeslocamento - teor de fibra – **F4=25kg/m³**

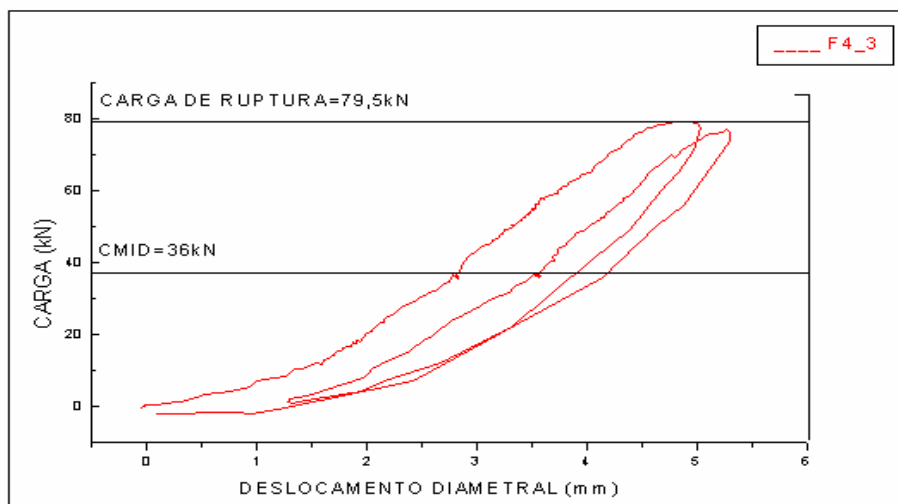


Figura 92: Resultado do ensaio de compressão diametral para tubos com fibras – CargaxDeslocamento - teor de fibra – **F4=25kg/m³**

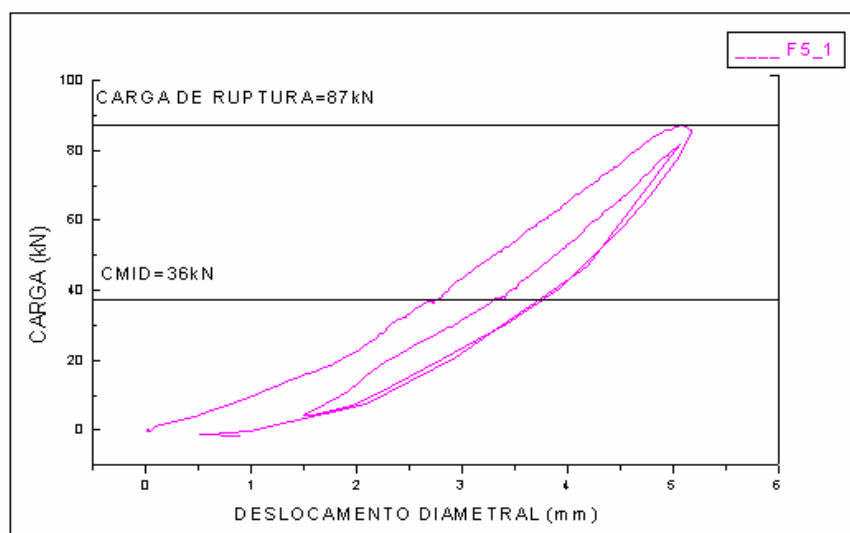


Figura 93: Resultado do ensaio de compressão diametral para tubos com fibras – CargaxDeslocamento - teor de fibra – **F5=30kg/m³**

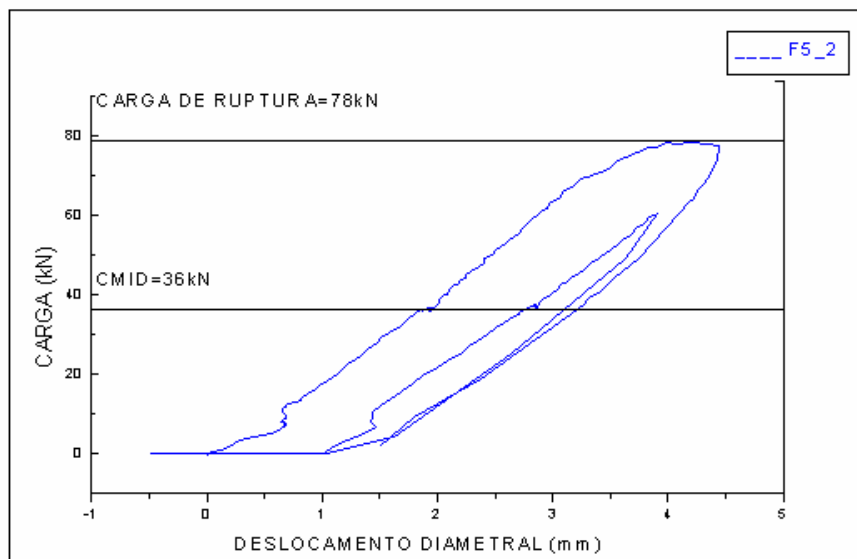


Figura 94: Resultado do ensaio de compressão diametral para tubos com fibras – CargaxDeslocamento - teor de fibra – **F5=30kg/m³**

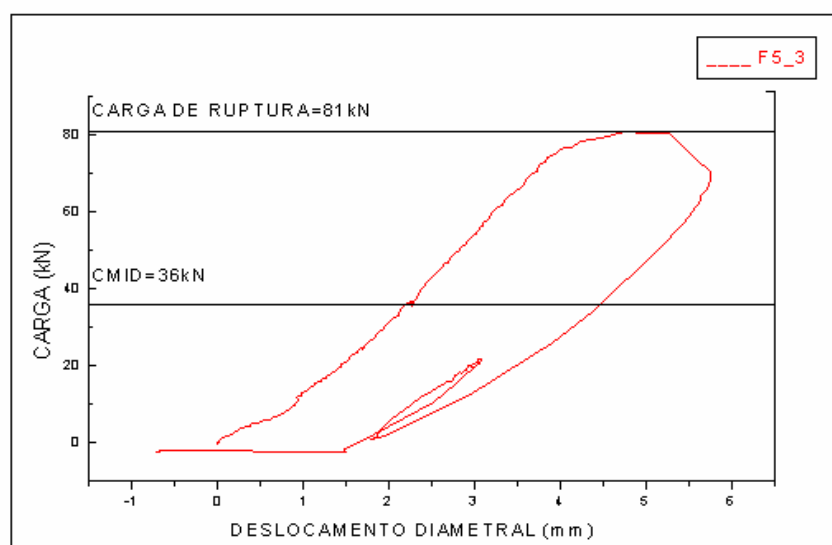


Figura 95: Resultado do ensaio de compressão diametral para tubos com fibras – CargaxDeslocamento - teor de fibra – **F5=30kg/m³**

4.1.4. TENACIDADE

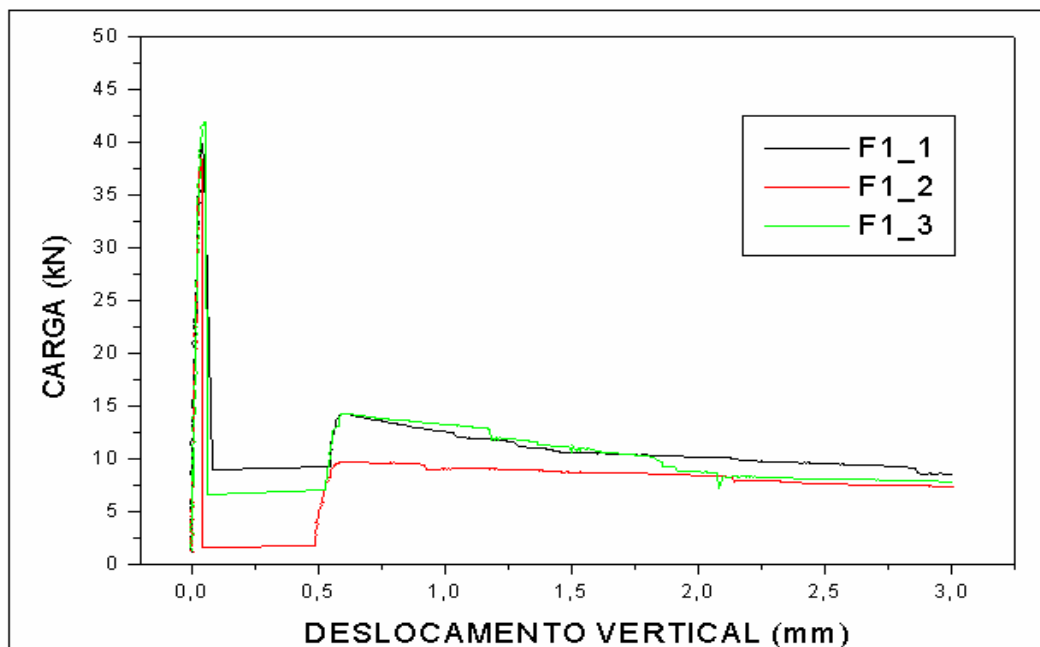


Figura 96: Resultado do ensaio de tenacidade – Teor de fibra – $F1=10\text{kg/m}^3$

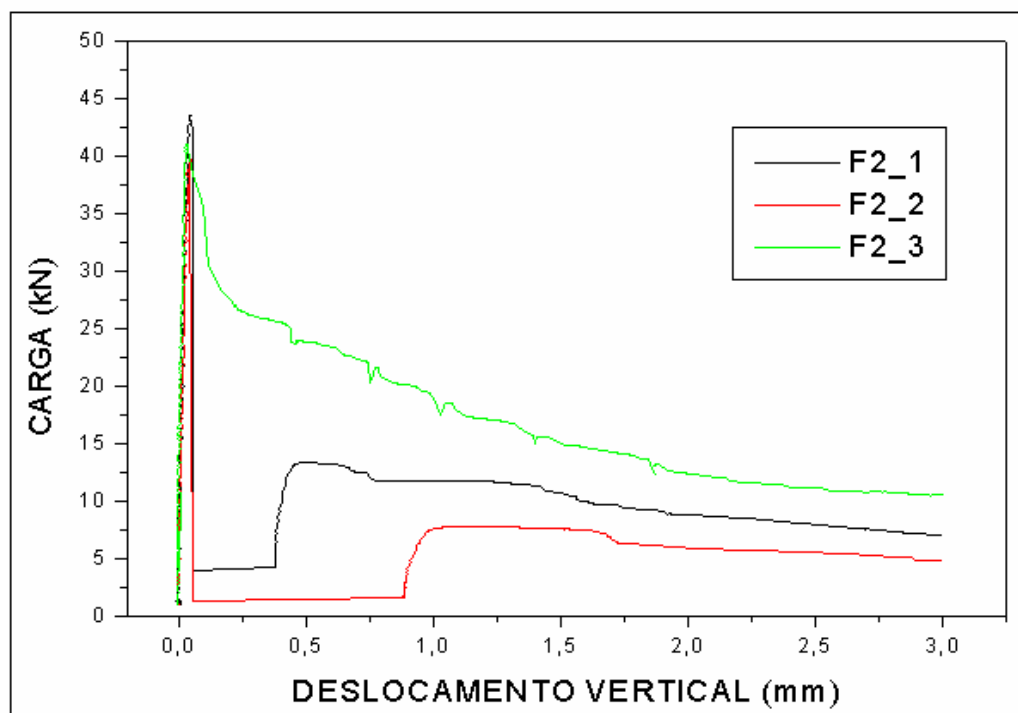
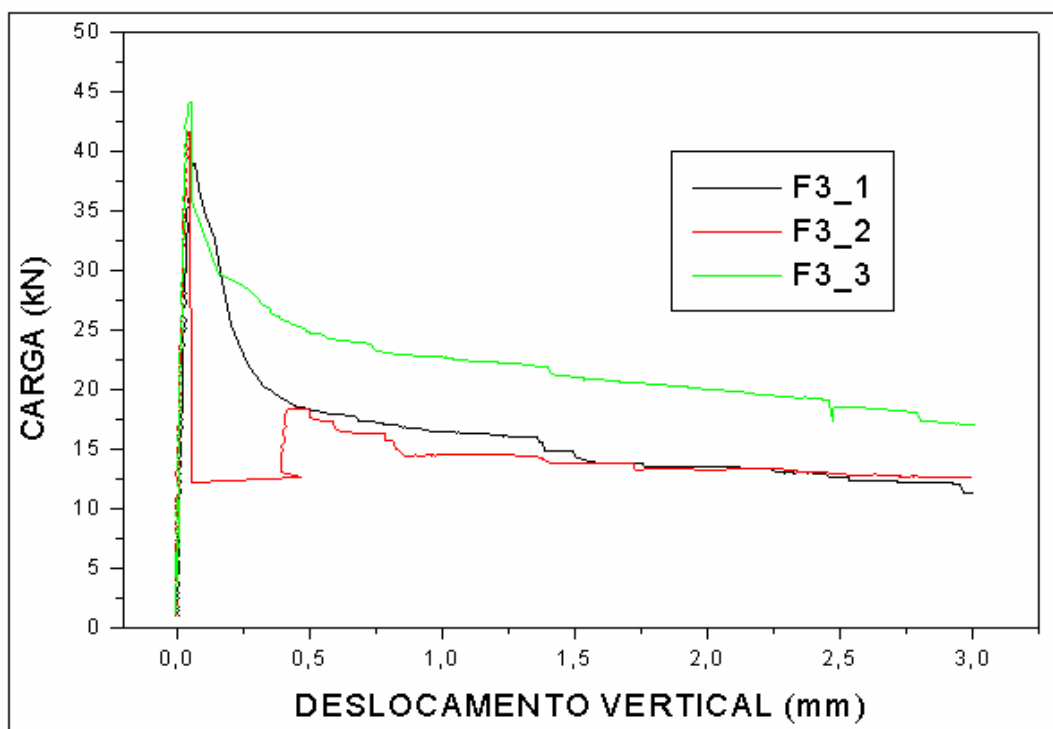
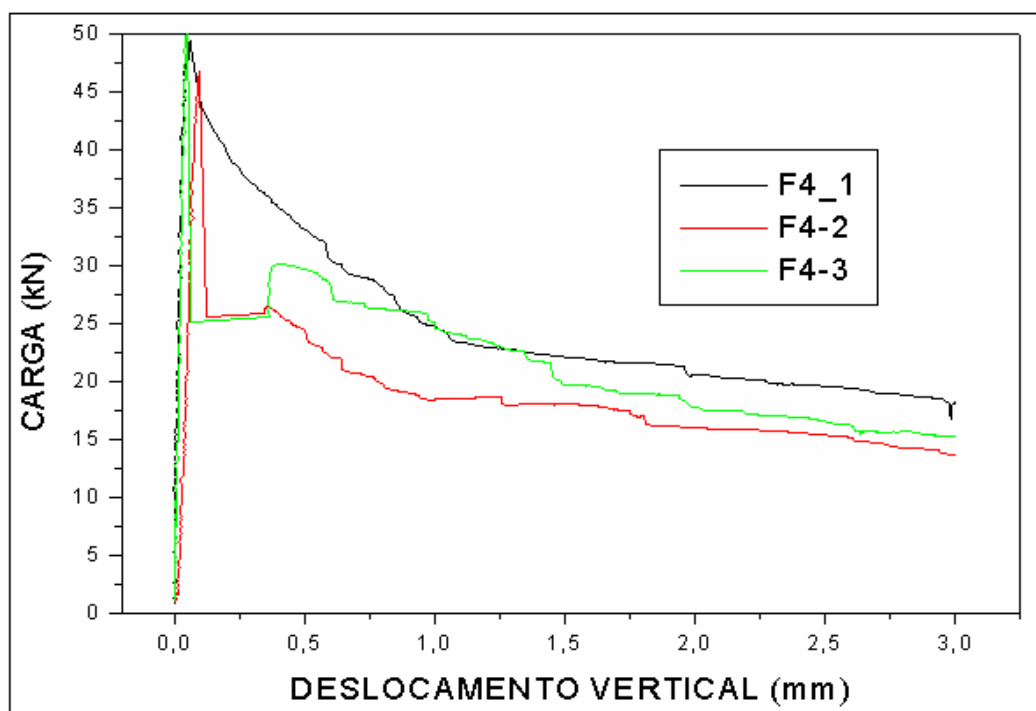


Figura 97: Resultado do ensaio de tenacidade – Teor de fibra – $F2=15\text{kg/m}^3$

Figura 98: Resultado do ensaio de tenacidade – Teor de fibra – F3=20kg/m³Figura 99: Resultado do ensaio de tenacidade – Teor de fibra – F4=25kg/m³

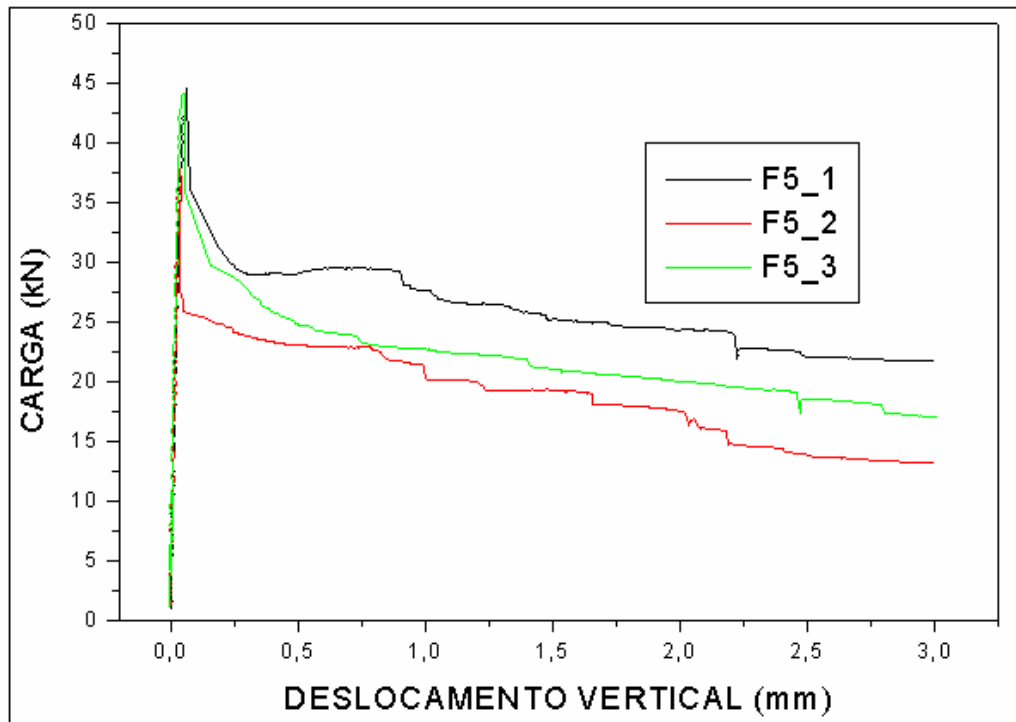


Figura 100: Resultado do ensaio de tenacidade – Teor de fibra – $F5=30\text{kg/m}^3$

Tabela 16: Resultados da tenacidade e do fator de tenacidade para corpos-de-prova prismáticos com diferentes teores de fibras de aço

Série	Prisma	Tenacidade (Tb) (kN.mm)	Fator de Tenacidade (FT) (MPa)	FT médio (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente de Variação (%)
F1	1	32,71	1,45	1,27	0,23	18,11
	2	22,87	1,02			
	3	30,40	1,35			
F2	1	29,11	1,29	1,43	0,65	45,45
	2	15,81	0,71			
	3	51,42	2,29			
F3	1	48,33	2,15	2,33	0,48	20,60
	2	42,43	1,89			
	3	66,21	2,94			
F4	1	75,05	3,34	2,90	0,35	12,06
	2	55,85	2,48			
	3	64,51	2,87			
F5	1	77,92	3,46	2,97	0,39	13,13
	2	56,43	2,51			
	3	66,21	2,94			

4.1.5. ABSORÇÃO

Tabela 17: Resultados do ensaio de absorção para os tubos simples e armados

Série	Tubo	Amostra	Massa S.S.S (g)	Massa Seca (g)	Absorção (%)	Absorção Média (%)	Absorção Média (%)
PS1	1	1	649,80	627,40	3,87	3,51	3,39
		2	996,80	961,90	3,36		
		3	599,10	579,90	3,31		
	2	1	777,00	747,30	3,97	3,78	
		2	1140,50	1098,00	3,87		
		3	605,40	585,00	3,49		
	3	1	789,00	766,70	2,91	2,87	
		2	1396,80	1357,90	2,86		
		3	720,30	700,50	2,83		
PA1	1	1	715,10	694,60	2,95	2,89	3,05
		2	706,20	686,50	2,87		
		3	1375,00	1298,00	2,85		
	2	1	844,30	814,30	3,68	3,65	
		2	924,00	892,00	3,59		
		3	618,00	596,10	3,67		
	3	1	617,30	600,30	2,76	2,62	
		2	1331,50	1297,00	2,66		
		3	1126,90	1100,00	2,45		

Tabela 18: Resultados do ensaio de absorção para os tubos com fibras de aço

Série	Tubo	Amostra	Massa S.S.S (kg)	Massa Seca (kg)	Absorção (%)	Absorção Média (%)	Absorção Média (%)
F1	1	1	0,599	0,578	3,74	3,81	3,81
		2	0,647	0,621	4,06		
		3	0,618	0,596	3,62		
	2	1	1,075	1,036	3,77	3,81	
		2	1,044	1,006	3,83		
		3	1,058	1,019	3,83		
	3	1	0,601	0,580	3,62	3,82	
		2	0,645	0,626	3,04		
		3	0,630	0,601	4,79		
F2	1	1	0,911	0,888	2,69	2,88	3,43
		2	0,792	0,770	2,92		
		3	1,295	1,256	3,03		
	2	1	1,116	1,076	3,76	3,70	
		2	0,731	0,705	3,72		
		3	0,893	0,861	3,62		
	3	1	0,739	0,713	3,55	3,72	
		2	0,994	0,959	3,61		
		3	0,442	0,425	4,00		
F3	1	1	0,744	0,719	3,39	3,45	3,50
		2	0,780	0,754	3,54		
		3	0,822	0,794	3,42		
	2	1	1,104	1,063	3,79	3,60	
		2	1,204	1,163	3,48		
		3	1,728	1,670	3,52		
	3	1	1,076	1,042	3,20	3,46	
		2	0,690	0,665	3,81		
		3	0,542	0,524	3,38		
F4	1	1	1,012	0,976	3,61	3,56	3,26
		2	0,805	0,779	3,35		
		3	0,624	0,602	3,72		
	2	1	0,640	0,617	3,78	3,63	
		2	0,688	0,664	3,63		
		3	0,847	0,819	3,49		
	3	1	1,642	1,607	2,18	2,58	
		2	1,232	1,201	2,56		
		3	0,916	0,889	2,99		
F5	1	1	1,312	1,271	3,23	3,57	3,65
		2	0,698	0,673	3,73		
		3	0,668	0,644	3,76		
	2	1	0,314	0,302	4,01	3,82	
		2	0,673	0,649	3,67		
		3	0,376	0,362	3,78		
	3	1	0,920	0,889	3,46	3,55	
		2	0,71	0,69	3,60		
		3	0,58	0,56	3,59		

4.2. ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.2.1. COMPRESSÃO AXIAL

Analisando o ensaio de compressão axial, percebe-se que todos os corpos-de-prova com fibras ensaiados obtiveram resultados maiores que dos corpos-de-prova sem fibras, embora a fibra não tenha como função principal o aumento da resistência à compressão axial.

O corpo-de-prova cujo teor de fibra obteve maior resistência à compressão axial foi 15 kg/m^3 correspondendo a um acréscimo de 41% em relação aos corpos-de-prova ensaiados sem fibras, enquanto os corpos-de-prova cujo teor de fibra obteve menor resistência à compressão foi 30 kg/m^3 correspondendo a um acréscimo de 17% em relação aos corpos-de-prova sem fibras.

A um determinado teor de fibras observa-se que o aumento da quantidade de fibras acaba prejudicando o aumento da resistência à compressão axial, quando comparado aos tubos verifica-se comportamento distinto. Isso pode ser explicado pelo fato que o corpo-de-prova cilíndrico $10\text{cm} \times 20\text{cm}$ utilizado para o ensaio tem uma área geométrica muito pequena e quando se adiciona o concreto com as fibras, fica difícil a acomodação e vibração do concreto em um recipiente pequeno, ocorrendo assim um corpo-de-prova com algumas "bicheiras" e possíveis resultados distorcidos. Os problemas quanto a bicheiras não ocorreram para o concreto dos tubos.

Com os dados obtidos do ensaio e observando o tratamento estatístico, percebe-se que o coeficiente de variação dos resultados foi pequeno, sendo que o maior valor foi de 11,7%, pode-se afirmar que os três corpos-de-prova ensaiados para cada teor obtiveram pouca variância em seus resultados sendo assim o esperado, já que os

corpos-de-prova foram moldados, curados e ensaiados da mesma maneira e no mesmo dia, com a mesma precisão.

4.2.2. TRAÇÃO NA COMPRESSÃO DIAMETRAL

Na análise da tração na compressão diametral, todos os resultados dos corpos-de-prova com fibras foram maiores que os corpos-de-prova sem fibras, embora a prioridade principal das fibras não seja o aumento da resistência à tração.

O corpo-de-prova que obteve maior resistência foi o correspondente ao teor de fibras de 25 kg/m^3 , obtendo 50% de acréscimo na resistência à tração quando comparado ao corpo-de-prova sem fibras. O corpo-de-prova que obteve menor resistência à tração foi relativo ao teor 30 kg/m^3 , obtendo 15% de acréscimo em relação ao corpo-de-prova sem fibras.

Analisando os resultados deste ensaio, leva a crer que a resistência à tração irá crescer de acordo com o aumento das fibras de aço no concreto, mas, quando atinge o teor de 30 kg/m^3 , observa-se uma queda de 30% de carga quando comparado ao teor de 25 kg/m^3 , que foi o teor que atingiu o maior valor de resistência à tração. Deve-se, porém, observar também que embora o teor de 30 kg/m^3 obteve queda de carga ao invés de aumento de carga, o valor de resistência ainda foi maior que o valor da resistência do corpo-de-prova controle (sem fibras).

Para este ensaio vale a premissa do ensaio de compressão axial, devido o corpo-de-prova cilíndrico (10x20) cm possuir um pequeno espaço, o confinamento do concreto com as fibras aumenta a possibilidade de obter corpos-de-prova com defeitos e dificulta a vibração do concreto, visto que o concreto para tubos possui slump zero e as fibras de aço ocupam uma maior área de molhagem, contribuindo para uma diminuição da quantidade de água no concreto.

Devido a dificuldade de vibrar os corpos-de-prova em laboratório com mesas vibratórias, já que estes equipamentos não possuem a energia necessária para vibração de concreto de consistência seca, deve-se utilizar o núcleo vibratório (a

fôrma interna) como suporte para vibrar os corpos-de-prova para tentar se aproximar da vibração dos tubos de concreto.

4.2.3. COMPRESSÃO DIAMETRAL

4.2.3.1. GRÁFICOS CARGA (kN) x TEMPO (minutos) – TUBOS COM FIBRAS DE AÇO SEGUNDO NBR 8890:2007

Analisando as figuras 72 até 86, observam-se os gráficos relativos aos tubos de concreto conforme a Norma Brasileira NBR 8890 exige, isto é, são gráficos de carga (kN) x tempo (minutos) que foram obtidos através do ensaio de compressão diametral que obedeceu o plano de carregamento da figura 58.

A partir dos gráficos, conclui-se que para os teores de fibras de aço igual a 20 e 25 kg/m³ o plano de carregamento foi completado com sucesso para todos os protótipos de tubos ensaiados tendo obtido valores altos para as cargas no recarregamento conforme apresentado na tabela 15.

Alguns autores que estudam fibras de aço produzem seus concretos com teores acima de 30 kg/m³, porém nesta pesquisa resolveu dar um passo na direção decrescente, isto é, tentar descobrir teores de fibras mais econômicos e que atingisse os resultados desejados.

Por isso foram testados teores 10 e 15 kg/m³ que são considerados teores baixos para se utilizar como reforço estrutural, porém os resultados foram interessantes. Para o teor de 10 kg/m³ dos três protótipos de tubos ensaiados apenas um protótipo não completou o plano de carregamento, ou seja, analisando o conjunto, observa-se um resultado satisfatório de 67% dos tubos ensaiados (atingiram o esperado). O mesmo não aconteceu para o teor de 15 kg/m³: nenhum dos tubos ensaiados completou o plano de carregamento, logo todos os tubos foram rejeitados.

Os tubos com fibras igual a 30 kg/m³ de concreto teoricamente deveriam completar o plano de carregamento exigido pela norma, mas na prática aconteceu um problema

idêntico ao teor de 10 kg/m^3 : apenas 67% dos tubos ensaiados completaram o plano de carregamento. Deve-se observar que o mesmo aconteceu com teores que são os extremos dos valores adotados na pesquisa, isto pode ser um indicador de uma possível falha de produção e/ou de ensaio de laboratório, visto que é uma nova tecnologia de produção e também uma nova alteração na norma, sendo que há ainda um aprendizado na fabricação e na realização dos ensaios.

4.2.3.2. GRÁFICOS CARGA (kN) x DESLOCAMENTO DIAMETRAL (mm)

No ensaio de compressão diametral foram colocados relógios comparadores nas duas geratrizes opostas do tubo para medir a deformação diametral dos tubos, este procedimento a norma brasileira não exige, porém como esta é uma pesquisa o objetivo é estudar além do que a norma exige.

Optou-se por analisar apenas os teores 20, 25 e 30 kg/m^3 com os relógios comparadores, devido ao receio da ruptura do concreto ser sem aviso (abrupta) e conseqüentemente destruir os relógios.

Analisando os gráficos obtidos observa-se comportamento semelhante entre eles, não ultrapassando 5,5 mm de deslocamento e, para carga mínima isenta de dano o deslocamento está em torno de 2,5mm, entretanto, em todos os gráficos, verificou-se um deslocamento crescente e acentuado até a carga mínima isenta de dano, depois desta, durante restante do plano de carregamento, o deslocamento foi menos acentuado, sendo possível verificar as fibras de aço sendo solicitadas, pois até a carga mínima isenta de dano, não se pode encontrar fissuras visíveis e, além disso, em nenhum tubo ensaiado foram encontradas fissuras visíveis antes de atingir a carga mínima isenta de dano. Portanto, as fibras, no momento em que foram solicitadas, elas realmente serviram como ponte de transferência de tensões, limitando a abertura de fissuras, papel fundamental das fibras de aço.

Como pode ser observado, nas figuras 87 a 95 os gráficos apresentam uma curvatura acentuados crescente com grandes deslocamentos até atingir a carga de ruptura, um problema que pode ter ocasionado esta situação, foi a posição dos

relógios comparadores nos tubos de concreto, o modo como foram posicionados fez com que medisse além dos tubos, todo o peso acima do tubo, como por exemplo, a viga apoiada para transmitir os esforços do macaco hidráulico.

4.2.4. TENACIDADE

O principal papel das fibras de aço acontece após a fissuração da matriz, ou seja, a capacidade de suportar maior tensão após o começo da fissuração. Porém é muito difícil a determinação da tensão após a fissuração da matriz. Algumas normas internacionais interpretam como a área sob a curva carga por deflexão, que representa o trabalho dissipado no material até certo nível de deflexão, assim como a Norma Japonesa adotada neste ensaio interpreta.

De acordo com Figueiredo e Helene (1997), uma desvantagem daquele ensaio é depender das dimensões do corpo-de-prova bem como do sistema de aplicação dos esforços. Embora a Norma Japonesa adote um aparato para servir de apoio ao LVDT, o *yoke*, objetivando diminuir a influência sobre os resultados, e deve-se tomar cuidado com as deformações externas ao corpo-de-prova, como a acomodação dos cutelos e a deformação dos corpos-de-prova nos apoios.

Os gráficos obtidos nesta pesquisa foram influenciados pela instabilidade pós-pico, que está associada a uma queda abrupta do nível de tensões depois da ruptura da matriz, devido a uma grande diferença de tensões suportadas pela matriz e pelas fibras, quer devido à alta resistência mecânica da matriz ou pelo baixo volume de fibras adotado, lembrando que usualmente adota-se volume de fibras abaixo do volume crítico. O problema com a instabilidade pós-pico também pode estar relacionado com a rigidez da máquina.

Segundo Fugii, Akasaki e Salles (2007) em sua pesquisa sobre tubos de concreto com fibras de aço foi utilizado a mesma quantidade, o mesmo tipo e o mesmo teor de fibra de aço utilizada nesta pesquisa, porém o concreto desta pesquisa é mais rico. Nos ensaios de tenacidade os autores obtiveram os seguintes gráficos de tenacidade:

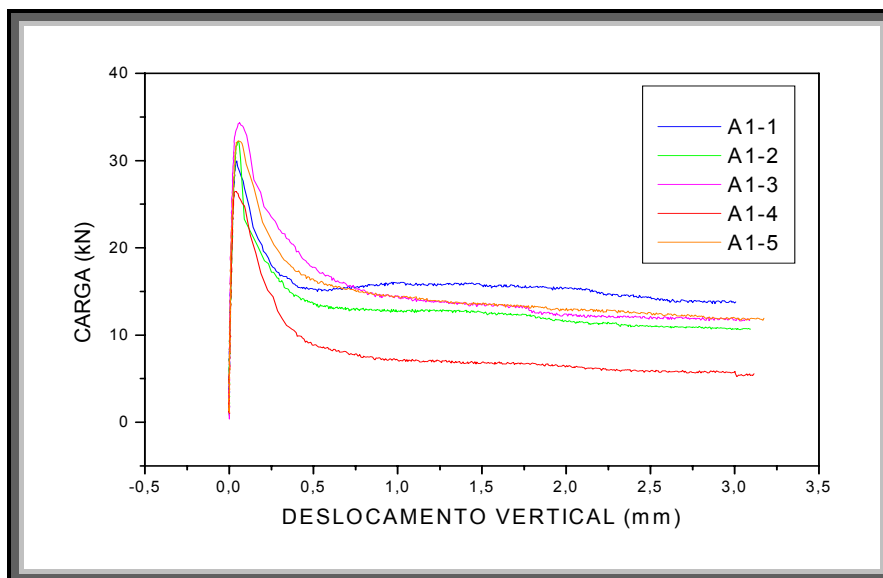


Figura 101: Ensaio de Tenacidade para teor 20 kg/m³

Fonte: FUGII, AKASAKI e SALLES (2007, p.10)

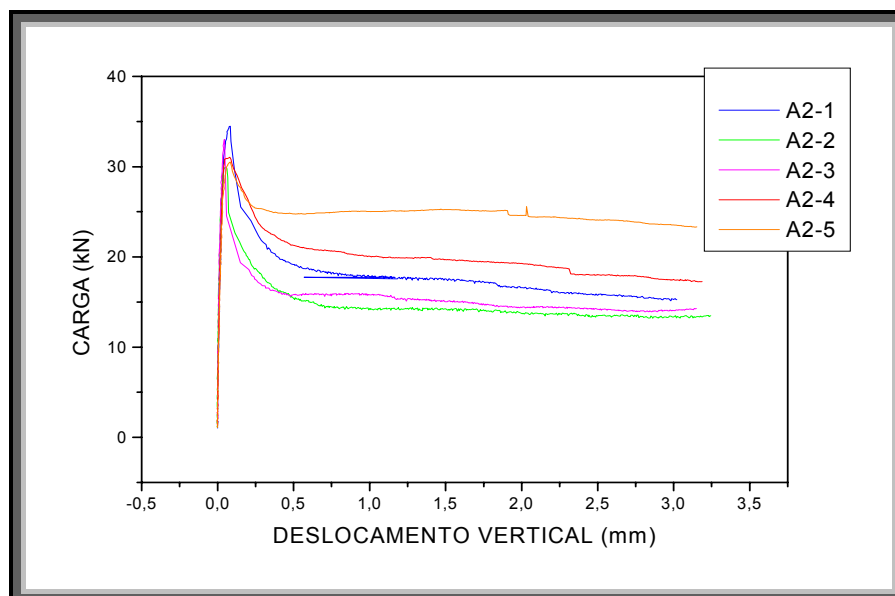


Figura 102: Ensaio de Tenacidade para teor 25 kg/m³

Fonte: FUGII, AKASAKI e SALLES (2007, p.10)

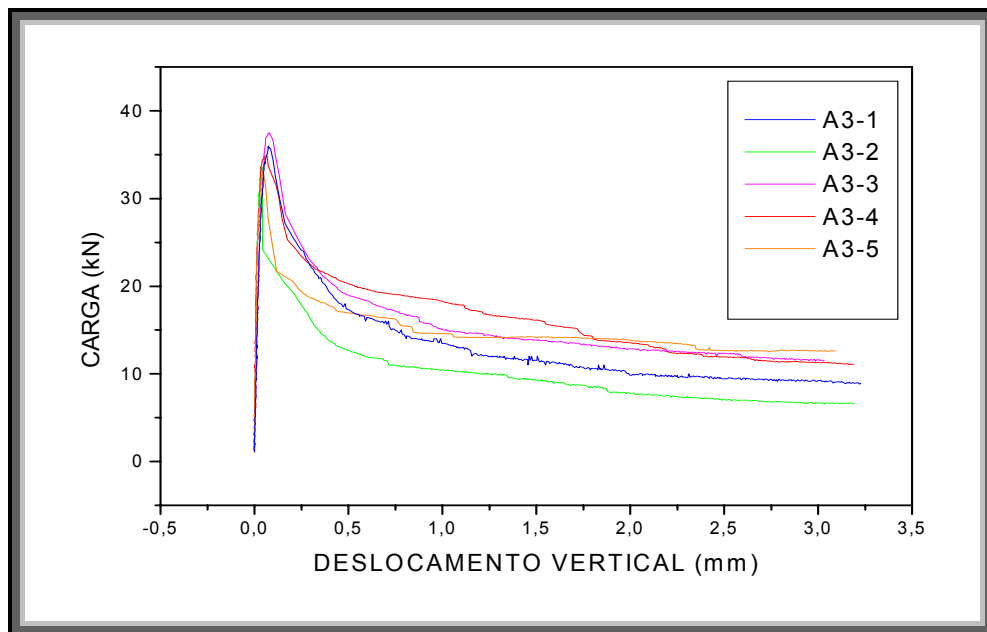


Figura 103: Ensaio de Tenacidade para teor 30 kg/m^3

Fonte: FUGII, AKASAKI e SALLES (2007, p.11)

Conforme mostrou os gráficos de tenacidade das figuras 101, 102 e 103 as curvas carga x deflexão teve comportamento de ruptura estável diferentemente dos gráficos mostrados nas figuras 96, 97, 98, 99 e 100, os quais mostraram para o mesmo teor de fibras, curvas com instabilidade pós-pico.

A diferença entre a pesquisa de Fugii, Akasaki e Salles (2007) para esta pesquisa é o traço do concreto, sendo que este foi enriquecido, o que pode ter ocasionado a instabilidade pós-pico. Pode ter ocorrido uma diferença de tensões suportada pela matriz e as fibras devido à alta resistência mecânica da matriz.

As figuras 101, 102 e 103 mostram gráficos de tenacidade para concretos com fibras utilizados em tubos. Como já se sabe, os tubos possuem concreto de consistência seca e difícil de moldagem pelo fato de não conseguir reproduzir a vibração em laboratórios, mas, quando os corpos-de-prova são moldados nos núcleos vibratórios dos tubos, a moldagem fica melhor e assim elimina as chamadas “bicheiras” do concreto. Como visto o ensaio de tenacidade para tubos de concreto não é impossível e os resultados podem ser satisfatórios, porém no caso desta pesquisa a falha nos resultados do ensaio de tenacidade pode ter acontecido devido ao aumento da resistência mecânica da matriz e/ou problemas na máquina que

executou o ensaio (FUGII, AKASAKI e SALLES, 2007, p.13).

4.2.5. ABSORÇÃO

Conforme mostrado nos resultados o ensaio de absorção foi realizado segundo a NBR 8890 (ABNT, 2007) que verificou o índice de absorção média de todos os tubos na faixa de 3% a 3,8% sendo que a norma estabelece que a absorção máxima para tubos destinados a drenagem de água pluvial é de 8%.

A adição das fibras de aço no concreto dos tubos em nada alterou o comportamento destes em relação a absorção de água, como foi mostrado nas tabelas 17 e 18.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÃO

5.1. CONCLUSÕES FINAIS

Ao se trabalhar com concreto de consistência seca como é o caso dos tubos de concreto percebe-se a dificuldade de trabalhabilidade do concreto, principalmente para corpo-de-prova cilíndrico. A pesquisa mostrou que, quando as fibras de aço são adicionadas, aumenta-se a área de molhagem do concreto, contribuindo para diminuição da trabalhabilidade do mesmo.

A característica seca dos tubos de concreto é devido a intensa vibração dos equipamentos e a falta de fôrma para sustentá-lo por um determinado período, pois, assim que é moldado, a fôrma é retirada do tubo para continuar a fabricação dos demais.

Portanto, registram-se os cuidados necessários para a confecção dos tubos de concreto, em razão da consistência da mistura e do novo processo de execução de tubos com fibras. A presença das fibras em determinada concentração na massa de concreto poderá dificultar o envolvimento dos agregados pela argamassa e assim resultar em porosidade localizada no tubo e a conseqüente permeabilidade e vazamento de água.

O objetivo da pesquisa versa sobre uma análise comparativa do comportamento mecânico entre tubos simples, armados e com fibras de aço, após a análise dos resultados observa-se que os tubos simples, armados e com fibras (dependendo do teor de fibra utilizado) satisfaz as exigências do ensaio de compressão diametral

segundo a NBR 8890, sendo possível afirmar que os tubos simples e armados ensaiados para esta pesquisa estão aptos a serem comercializados, pois atendem às exigências da norma brasileira de tubos. Porém os tubos com fibras de aço apenas os teores de 20 e 25 kg/m³ poderiam ser comercializados, pois apenas estes teores completaram o plano de carregamento em 100% dos tubos ensaiados.

Trata-se de uma pesquisa, logo os teores de fibras 10, 15 e 30 kg/m³ não devem ser descartados por não obterem 100% de tubos completando o plano de carregamento, devem-se estudar novamente estes teores, uma vez que muitos fatores intrínsecos e extrínsecos ocorrem em uma pesquisa experimental.

Não se podem comparar os tubos simples, armados e com fibras apenas analisando as cargas de ruptura, verificando a tabela 14, observa-se que os resultados de carga de ruptura de todos os tubos ensaiados são bem próximos, mas, quando analisa os gráficos que demonstram o plano de carregamento nas figuras 72 à 86 constata-se que alguns tubos com fibras atingem cargas de rupturas altas, porém no recarregamento, não conseguem completar o plano de carregamento, portanto, não passam no ensaio de compressão diametral.

O emprego de fibras de aço na mistura dos concretos para confecção de tubos mostrou, pelos testes realizados, tratar-se de aplicação promissora com bons resultados de desempenho, devendo-se tomar cuidados na dosagem do concreto de consistência seca e nos teores de fibras de aço escolhidos para utilização, pois teores de fibras muito altos dificultam a trabalhabilidade do concreto e inviabiliza a moldagem e a desforma dos tubos.

5.2. TRABALHOS FUTUROS

Como proposta para futuras pesquisas seriam indispensáveis estudos com tubos de concreto reforçados com fibras para diâmetros maiores que 1000 mm, já que, na prática, diâmetros grandes são comumente utilizados em galerias de águas pluviais e redes de esgoto sanitários. A própria norma brasileira NBR 8890 limita o uso de

tubos de concreto com fibras para diâmetros de até 1000 mm, pois não foram estudadas adições de fibras de aço para tubos com grandes diâmetros.

Como foi mostrado nesta pesquisa, os teores de 10 e 15 kg/m³ devem ser estudados novamente, pois se eles obtiverem sucesso, o custo do tubo de concreto com estes teores será menor do que com os teores de 20, 25 e 30 kg/m³. Ao estudar o teor de fibras para tubos deve-se levar em conta o custo-benefício e tentar utilizar um teor que satisfaça as exigências da norma brasileira sem, contudo aumentar demasiadamente o custo do tubo de concreto.

Deve-se tomar cuidado com o traço do tubo de concreto de modo que ao incrementar ao traço as fibras de aço, a relação fibra-matriz não fique comprometida e a relação água-cimento seja mantida de acordo com a norma. Dependendo do traço poderá ser necessária utilização de aditivos para melhorar a trabalhabilidade do traço do tubo, devido à adição das fibras e ajudar na desforma do tubo.

Contudo, os cuidados com a fabricação do tubo começam desde a composição do traço até a cura, sendo importante, cuidados em todos os procedimentos na fabricação deste produto. Como a fibra de aço é adicionada como se fosse mais um elemento do concreto, o pesquisador que resolver estudar tubos de concreto com adição de fibras, ou qualquer que seja o material adicionado ao concreto do tubo, deve-se atentar para aprender como se faz o tubo de concreto comum, para depois partir para estudos com os tubos “diferentes”. Como foi relatada no início desta dissertação, a bibliografia sobre tubos de concreto é escassa, e existem apenas dois livros sobre o assunto, porém aprender os macetes da fabricação de tubos de concreto, isto só se aprende na prática.

REFERÊNCIA

AMERICAN CONCRETE PIPE ASSOCIATION – ACPA. Disponível em: <www.concrete-pipe.org>. Acesso em 10 jan.2008.

ANDRADE, J.J.O. Propriedades Físicas e Mecânicas dos Materiais. In: ISAIA, G.C. (Ed.). **Materiais de Construção Civil**: e princípios de ciência e engenharia de materiais. São Paulo: Ibracon, 2007. v.1, p. 203-236.

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE FABRICANTES DE TUBOS DE HORMIGÓN ARMADO – ATHA. Disponível em: <www.atha.es>. Acesso em 10 jan.2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DOS FABRICANTES DE TUBOS DE CONCRETO - ABTC. Disponível em: <www.abtc.com.br>. Acesso em: 10 jan.2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 5733**: cimento Portland de alta resistência inicial. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 5737**: cimentos Portland resistentes a sulfatos. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 5738**: concreto – procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 5739**: concreto – ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 6207**: arame de aço – ensaio de tração. Rio de Janeiro, 1982.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 7222**: argamassa e concreto – determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 8890**: tubo de concreto de secção circular para águas pluviais e esgotos sanitários – requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 15530**: fibras de aço para concreto. Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NM 30**: agregado miúdo – determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NM 45**: determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NM 46**: agregado miúdo – determinação do material fino que passa na peneira de 75 micrometros por lavagem. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NM 49**: agregado miúdo – determinação de impurezas orgânicas. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR NM 52**: agregado miúdo – determinação de massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR NM 248**: agregados – determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

AZEVEDO NETTO, J.M.; PERA, A.F.; MARTINS, J.A. et al. **Sistemas de esgoto sanitários**. São Paulo: Cetesb, 1977. 467p.

BENTUR, A.; MINDESS, S. **Fibre reinforced cementitious composites**. London: Elsevier, 1990. 449p.

BOTELHO, M.H.C. **Águas de chuva**: engenharia das águas pluviais nas cidades. São Paulo: Edgard Blucher, 1998. 237p.

CAMACHO, J.S. Notas de aula. Introdução ao estudo do concreto armado. Ilha Solteira: Unesp/Departamento de Engenharia Civil, 2006. Disponível em: <<http://www.nepae.feis.unesp.br/downloads.htm>>. Acesso em: 20 dez. 2006. (Notas de aula).

CHAMA NETO, P.J. **Avaliação de desempenho de tubos de concreto reforçados com fibras de aço**. 2002. 87 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

CHAMA NETO, P.J. **Tubos de concreto**: projeto, dimensionamento, produção e execução de obras. Jaraguá do Sul: gráfica Régis, 2004. 115p.

FIGUEIREDO, A.D. **Concreto com fibras de aço**. São Paulo: EPUSP, 2000. 68p. (Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia da Construção Civil, BT/PCC/260).

FIGUEIREDO, A.D.;HELENE, P.R.L. Controle da tenacidade no concreto reforçado com fibras de aço. In: REUNIÃO BRASILEIRA DO CONCRETO, 39, 1997, São Paulo. **Anais...** São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 1997. (CD-ROM).

FIGUEIREDO, A.D.;CHAMA NETO, P.J. A nova especificação brasileira para tubos de concreto para águas pluviais e esgoto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 49, 2007, Rio de Janeiro. **Anais...** Bento Gonçalves: Instituto Brasileiro do Concreto, 2007. (CD-ROM).

FERMIX. Disponível em: <www.fermixtubos.com.br>. Acesso em: 10 jan.2008.

FUGII, A.P.; AKASAKI, J.L.; SALLES, F.M. Tubos de concreto reforçado com fibras de aço. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 49, 2007, Rio de Janeiro. **Anais...** Bento Gonçalves: Instituto Brasileiro do Concreto, 2007. (CD-ROM).

GEBARA, D. **Esgoto sanitário**. Ilha Solteira: Unesp/FEIS/Departamento de Engenharia Civil, 2004.(Notas de aula).

GUIMARÃES, A.T.C;RECENA, F.A.P;PEREIRA, F.M. Produtos de Cimento Portland. In: ISAIA, G.C. (Ed.). **Materiais de Construção Civil: e princípios de ciência e engenharia de materiais**. São Paulo: Ibracon, 2007. v.2, p. 945-982.

HANAI, J.B. Comportamento resistente, ductilidade e confinamento. In: ISAIA, G.C. (Ed.). **Concreto: ensino, pesquisa e realizações**. São Paulo: Ibracon, 2005. v.1, p. 165-200.

HANNANT, D.J. **Fibre cements and fibre concretes**. Chichester: John Wiley, 1986. 219p.

HELENE, P;TIBÉRIO, A. O concreto: da era clássica à contemporânea. In: ISAIA, G.C. (Ed.). **Materiais de Construção Civil: e princípios de ciência e engenharia de materiais**. São Paulo: Ibracon, 2007. v.2, p. 905-944.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. Pesquisa nacional de saneamento básico. Disponível em: <www.ibge.gov.br/home/presidencia/noticias/27032002pnsb.shtm>. Acesso em: 17 fev.2007.

ISAIA, G.C. O concreto: da era clássica à contemporânea. In: ISAIA, G.C. (Ed.). **Concreto: ensino, pesquisa e realizações**. São Paulo: Ibracon, 2005. v.1, p. 1-43.

JAPAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. **Method of tests for flexural strength and flexural toughness of steel fiber reinforced concrete.** JSCE-SF4. Concrete Library of JSCE Part III-2. Method of tests for steel fiber reinforced concrete nº.3. June 1984a. p.58-61.

JAPAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. **Method of tests for compressive strength and compressive toughness of steel fiber reinforced concrete.** JSCE-SF5. Concrete Library of JSCE Part III-2. Method of tests for steel fiber reinforced concrete nº.3. June 1984b. p.63-66.

LOPES, M.M. **Substituição parcial de armadura de flexão por fibras de aço em vigas de concreto.** 2005. 155 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

MENEGOTTI MÁQUINAS E EQUIPAMENTOS. Disponível em: <www.menegottiequipamentos.com.br>. Acesso em: 10 jan.2008.

METHA, P.K.;MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais.** São Paulo: Pini, 1994. 573p.

NEVILLE, A.M. **Propriedades do concreto.** São Paulo: Pini, 1982. 738p.

NUNES, N.L. **Contribuição para aplicação do concreto reforçado com fibras de aço em elementos de superfície restringidos.** 2006. 276 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

OLIVEIRA, H.M. Cimento Portland. In: BAUER, L.A.F. (Ed). **Materiais de construção.** Rio de Janeiro: LTC, 2000a. v.1, p. 35-62.

OLIVEIRA, H.M. Propriedades do concreto endurecido. In: BAUER, L.A.F. (Ed). **Materiais de construção.** Rio de Janeiro: LTC, 2000b. v.1, p. 284-313.

RAMOS, M.F. **Análise experimental de tubos de concreto reforçados com fibras de aço**. 2002. 130 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002.

RAMOS, M.F.; PINTO JUNIOR, N.O.; FRANCO, B.L.M. Avaliação de tubos de concreto reforçado com fibras de aço submetidos ao ensaio de compressão diametral. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 49, 2007, Rio de Janeiro. **Anais...** Bento Gonçalves: Instituto Brasileiro do Concreto, 2007. (CD-ROM).

SCANDIUZZI, L; ANDRIOLO, F.R. **Concreto e seus materiais: propriedades e ensaios**. São Paulo: Pini, 1986. 553p.

SCOARIS, M.R. **Concretos reforçados com fibras: avaliação das propriedades mecânicas através do método da maturidade**. 2005. 283f. Mestrado (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2005.

ZAILLER, W. **Projetos estruturais de tubos enterrados**. São Paulo: Pini, 1983. 106p.

BIBLIOGRAFIA

AMERICAN CONCRETE PIPE ASSOCIATION – ACPA. Disponível em: <www.concrete-pipe.org>. Acesso em 10 jan.2008.

ANDRADE, J.J.O. Propriedades Físicas e Mecânicas dos Materiais. In: ISAIA, G.C. (Ed.). **Materiais de Construção Civil**: e princípios de ciência e engenharia de materiais. São Paulo: Ibracon, 2007. v.1, p. 203-236.

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE FABRICANTES DE TUBOS DE HORMIGÓN ARMADO – ATHA. Disponível em: <www.atha.es>. Acesso em 10 jan.2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DOS FABRICANTES DE TUBOS DE CONCRETO - ABTC. Disponível em: <www.abtc.com.br>. Acesso em: 10 jan.2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 5733**: cimento Portland de alta resistência inicial. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 5737**: cimentos Portland resistentes a sulfatos. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 5738**: concreto – procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 5739**: concreto – ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 6023**: informação e documentação – referências - elaboração. Rio de Janeiro, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 6207**: arame de aço – ensaio de tração. Rio de Janeiro, 1982.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 7211**: agregados para concreto – especificação. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 7222**: argamassa e concreto – determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 7480**: barras e fios de aço destinados a armaduras para concreto armado. Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 8890**: tubo de concreto de secção circular para águas pluviais e esgotos sanitários – requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 15530**: fibras de aço para concreto. Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NM 30**: agregado miúdo – determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NM 45**: determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NM 46**: agregado miúdo – determinação do material fino que passa na peneira de 75 micrometros por lavagem. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NM 49**: agregado miúdo – determinação de impurezas orgânicas. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR NM 52:** agregado miúdo – determinação de massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR NM 248:** agregados – determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

ANDRIOLO, F.R. **Construções de concreto:** manual de práticas para controle e execução. São Paulo: Pini, 1984. 738p.

AZEVEDO NETTO, J.M.; PERA, A.F.; MARTINS, J.A. et al. **Sistemas de esgoto sanitários.** São Paulo: Cetesb, 1977. 467p.

BENTUR, A.; MINDESS, S. **Fibre reinforced cementitious composites.** London: Elsevier, 1990. 449p.

BOTELHO, M.H.C. **Águas de chuva:** engenharia das águas pluviais nas cidades. São Paulo: Edgard Blucher, 1998. 237p.

CAMACHO, J.S. Notas de aula. Introdução ao estudo do concreto armado. Ilha Solteira: Unesp/Departamento de Engenharia Civil, 2006. Disponível em: <http://www.nepae.feis.unesp.br/downloads.htm>. Acesso em: 20 dez. 2006. (Notas de aula).

CARVALHO, S. **Estatística básica.** Rio de Janeiro: Elsevier, 2005. 464p.

CHAMA NETO, P.J. **Avaliação de desempenho de tubos de concreto reforçados com fibras de aço.** 2002. 87 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

CHAMA NETO, P.J. **Tubos de concreto:** projeto, dimensionamento, produção e execução de obras. Jaraguá do Sul: gráfica Régis, 2004. 115p.

CHAMA NETO, P.J.;FIGUEIREDO, A.D. **Critérios de projeto de dimensionamento de tubos de concreto para esgotos sanitários**. São Paulo: EPUSP, 2002, 11p. (Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia de Construção Civil, BT/PCC/328).

COSTA, R.M.; COSTA, C.P.F. Estudo da durabilidade do concreto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 48, 2006, Rio de Janeiro. **Anais...**Rio de Janeiro: IBRACON, 2006. (CD-ROM).

DÍAZ, V.O.R. **Método de dosagem de concreto de elevado desempenho**. São Paulo: Pini, 1998. 122p.

EL DEBS, M.K. Projeto estrutural de tubos de circulares de concreto armado. Disponível em: <<http://www.abtc.com.br/publicações/4.pdf>>. Acesso em: 20 nov.2006.

FERMIX. Disponível em: <www.fermixtubos.com.br>. Acesso em: 10 jan.2008.

FIGUEIREDO, A.D. **Concreto com fibras de aço**. São Paulo: EPUSP, 2000. 69p. (Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia da Construção Civil, BT/PCC/260).

FIGUEIREDO, A.D. Concreto com fibras. In: ISAIA, G.C. (Ed.). **Concreto: ensino, pesquisa e realizações**. São Paulo: Ibracon, v.2, p. 1195-1225, 2005.

FIGUEIREDO, A.D.;CECCATO, M.R.;TORNERI, P. Influência do comprimento da fibra no desempenho do concreto reforçado com fibras de aço. In: REUNIÃO BRASILEIRA DO CONCRETO, 39, 1997, São Paulo. **Anais...** São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 1997. (CD-ROM).

FIGUEIREDO, A.D.;HELENE, P.R.L. Controle da tenacidade no concreto reforçado com fibras de aço. In: REUNIÃO BRASILEIRA DO CONCRETO, 39, 1997, São Paulo. **Anais...** São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 1997. (CD-ROM).

FIGUEIREDO, A.D.;CHAMA NETO, P.J.;QUINTA, M.T.;GIMENEZ, A.B. Avaliação de metodologia de ensaio de tubos de concreto reforçado com fibras para esgoto. **Concreto e Construções**, Ano XXXIV, Nº46, 2007. p.44-51.

FIGUEIREDO, A.D.;CHAMA NETO, P.J. A nova especificação brasileira para tubos de concreto para águas pluviais e esgoto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 49, 2007, Rio de Janeiro. **Anais...** Bento Gonçalves: Instituto Brasileiro do Concreto, 2007. (CD-ROM).

FORMAGINI, S. **Dosagem científica e caracterização mecânica de concretos de altíssimo desempenho**. 2005. 285 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

FUGII, A.P.; AKASAKI, J.L.; SALLES, F.M. Tubos de concreto reforçado com fibras de aço. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 49, 2007, Rio de Janeiro. **Anais...** Bento Gonçalves: Instituto Brasileiro do Concreto, 2007. (CD-ROM).

GARCEZ, E.O.; CAETANO, L.C.; SILVA FILHO, L.C.P.; RIOS, R.D. Análise experimental de concretos reforçados com fibras de aço submetidos a cargas de impacto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 48, 2006, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro do Concreto, 2006. (CD-ROM).

GEBARA, D. **Esgoto sanitário**. Ilha Solteira: Unesp/FEIS/Departamento de Engenharia Civil, 2004.(Notas de aula).

GUIMARÃES, A.T.C;RECENA, F.A.P;PEREIRA, F.M. Produtos de Cimento Portland. In: ISAIA, G.C. (Ed.). **Materiais de Construção Civil**: e princípios de ciência e engenharia de materiais. São Paulo: Ibracon, 2007. v.2, p. 945-982.

HANAI, J.B. Comportamento resistente, ductilidade e confinamento. In: ISAIA, G.C. (Ed.). **Concreto**: ensino, pesquisa e realizações. São Paulo: Ibracon, v.1, p. 165-200, 2005.

HANNANT, D.J. **Fibre cements and fibre concretes**. Chichester: John Wiley, 1986. 219p.

HELENE, P.; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto**. São Paulo: Pini, 2004. 349p.

HELENE, P.; TIBÉRIO, A. O concreto: da era clássica à contemporânea. In: ISAIA, G.C. (Ed.). **Materiais de Construção Civil: e princípios de ciência e engenharia de materiais**. São Paulo: Ibracon, 2007. v.2, p. 905-944.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. Pesquisa nacional de saneamento básico. Disponível em: www.ibge.gov.br/home/presidencia/noticias/27032002pnsb.shtm. Acesso em: 17 fev.2007.

ISAIA, G.C. O concreto: da era clássica à contemporânea. In: ISAIA, G.C. (Ed.). **Concreto: ensino, pesquisa e realizações**. São Paulo: Ibracon, v.1, p. 1-43, 2005.

JAPAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. **Method of tests for flexural strength and flexural toughness of steel fiber reinforced concrete**. JSCE-SF4. Concrete Library of JSCE Part III-2. Method of tests for steel fiber reinforced concrete nº.3. June 1984a. p.58-61.

JAPAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. **Method of tests for compressive strength and compressive toughness of steel fiber reinforced concrete**. JSCE-SF5. Concrete Library of JSCE Part III-2. Method of tests for steel fiber reinforced concrete nº.3. June 1984b. p.63-66.

JORDÃO, E.P.; PESSOA, C.A. **Tratamento de esgotos domésticos**. Rio de Janeiro: ABES, 1995. 720p.

LOPES, M.M. **Substituição parcial de armadura de flexão por fibras de aço em vigas de concreto**. 2005. 155 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

MENEGOTTI MÁQUINAS E EQUIPAMENTOS. Disponível em: <www.menegottiequipamentos.com.br>. Acesso em: 10 jan.2008.

METHA, P.K.;MONTEIRO, P.J.M. **Concreto**: estrutura, propriedades e materiais. São Paulo: Pini, 1994. 573p.

NEVILLE, A.M. **Propriedades do concreto**. São Paulo: Pini, 1982. 738p.

NUNES, N.L. **Contribuição para aplicação do concreto reforçado com fibras de aço em elementos de superfície restringidos**. 2006. 276p. Tese (Doutorado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

NUNES, N.L.; AGOPYAN, V. **Influência do fator de forma da fibra na tenacidade à flexão do concreto reforçado com fibras de aço**. São Paulo: EPUSP, 1999, 26p. (Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia de Construção Civil, BT/PCC/225).

NUNES, F.G.T; ARAÚJO, D.L; GUERRA, E.A; FONSECA, A.C. Influência da adição de fibras de aço nas propriedades mecânicas do concreto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 48, 2006, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro do Concreto, 2006. (CD-ROM).

OLIVEIRA, H.M. Cimento Portland. In: BAUER, L.A.F. (Ed). **Materiais de construção**. Rio de Janeiro: LTC, 2000a. v.1, p. 35-62.

OLIVEIRA, H.M. Propriedades do concreto endurecido. In: BAUER, L.A.F. (Ed). **Materiais de construção**. Rio de Janeiro: LTC, 2000b. v.1, p. 284-313.

RAMOS, M.F. **Análise experimental de tubos de concreto reforçados com fibras de aço**. 2002. 130 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002.

RAMOS, M.F.; PINTO JUNIOR, N.O. Análise experimental de tubos de concreto reforçado com fibras de aço. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 46, 2004, Rio de Janeiro. **Anais...** Florianópolis: Instituto Brasileiro do Concreto, 2004. (CD-ROM).

RAMOS, M.F.; PINTO JUNIOR, N.O.; FRANCO, B.L.M. Avaliação de tubos de concreto reforçado com fibras de aço submetidos ao ensaio de compressão diametral. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 49, 2007, Rio de Janeiro. **Anais...** Bento Gonçalves: Instituto Brasileiro do Concreto, 2007. (CD-ROM).

REIS, A.P.A. **Reforço de vigas de concreto armado submetidas à pré-carregamento e ações de longa duração com aplicação de concretos de alta resistência e concretos com fibras de aço.** 2003. 355 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

SARZALEJO, A.G.; ROSSI, B.; PERRI, G.; WINTERBERG.R.; ARISTEGUIETA, R.E.P. **Fibras como elemento estrutural para reforço de concreto.** 2007, 247p.(Manual Técnico da Maccaferri).

FIGUEIREDO, A.D. **Concreto com fibras de aço.** São Paulo: EPUSP, 2000. 69p. (Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia da Construção Civil, BT/PCC/260).

SAVASTANO JUNIOR, H. **Zona de transição entre fibras e pasta de cimento Portland: caracterização e inter-relação com as propriedades mecânicas dos compósitos.** 1992. 209 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil e Urbana) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1992.

SCANDIUZZI, L.; ANDRIOLO, F.R. **Concreto e seus materiais: propriedades e ensaios.** São Paulo: Pini, 1986. 553p.

SCOARIS, M.R. **Concretos reforçados com fibras: avaliação das propriedades mecânicas através do método da maturidade.** 2005. 283 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2005.

TARTUCE, R. **Dosagem experimental do concreto.** São Paulo: Pini, 1989. 115p.

TARTUCE, R; GIOVANNETTI, E. **Princípios básicos sobre concreto de cimento Portland.** São Paulo: Pini, 1990. 107p.

THE INDIAN HUME PIPE Co. Ltd.-IHP. Disponível em: www.indianhumepipe.com. Acesso em: 10 out.2006.

ZAILLER, W. **Projetos estruturais de tubos enterrados.** São Paulo: Pini, 1983. 106p.

ZOLLO, R.F. Fiber-reinforced concrete: an overview after 30 years of development. **Cement and Concrete Composites**, Barking, v.19, 1997. p.107-122.

ANEXO

Tabela 19: Compressão diametral de tubos armados e/ou reforçados com fibras de aço para tubos de águas pluviais

Fonte: NBR 8890 (ABNT, 2007)

DN	Água Pluvial							
	Carga mínima de fissura (tubos armados) ou carga isenta de danos (tubos com fibras de aço) (kN/m)				Carga mínima de ruptura (kN/m)			
	Classe	PA1	PA2	PA3	PA4	PA1	PA2	PA3	PA4
300	12	18	27	36	18	27	41	54
400	16	24	36	48	24	36	54	72
500	20	30	45	60	30	45	68	90
600	24	36	54	72	36	54	81	108
700	28	42	63	84	42	63	95	126
800	32	48	72	96	48	72	108	144
900	36	54	81	108	54	81	122	162
1000	40	60	90	120	60	90	135	180
1100	44	66	99	132	66	99	149	198
1200	48	72	108	144	72	108	162	216
1500	60	90	135	180	90	135	203	270
1750	70	105	158	210	105	158	237	315
2000	80	120	180	240	120	180	270	360

Tabela 20: Compressão diametral de tubos armados e/ou reforçados com fibras de aço para tubos de esgotos sanitários

Fonte: NBR 8890 (ABNT, 2007)

DN	Esgoto Sanitário					
	Carga mínima de fissura (tubos armados) ou carga isenta de danos (tubos com fibras de aço) (kN/m)			Carga de ruptura (kN/m)		
Classe	EA2	EA3	EA4	EA2	EA3	EA4
300	18	27	36	27	41	54
400	24	36	48	36	54	72
500	30	45	60	45	68	90
600	36	54	72	54	81	108
700	42	63	84	63	95	126
800	48	72	96	72	108	144
900	54	81	108	81	122	162
1000	60	90	120	90	135	180
1100	66	99	132	99	149	198
1200	72	108	144	108	162	216
1500	90	135	180	135	203	270
1750	105	158	210	158	237	315
2000	120	180	240	180	270	360

Tabela 21: Compressão diametral de tubos simples para tubos de águas pluviais e de esgotos sanitários

Fonte: NBR 8890 (ABNT, 2007)

DN	Água Pluvial		Esgoto Sanitário
	Carga mínima de ruptura (kN/m)		Carga mínima de ruptura (kN/m)
Classe	PS1	PS2	ES
200	16	24	36
300	16	24	36
400	16	24	36
500	20	30	45
600	24	36	54