RENATA CAMPOS ESCARIZ

Análise comparativa de desempenho mecânico de tubos de concreto reforçados com macrofibras poliméricas e fibras de aço

São Paulo

2012

RENATA CAMPOS ESCARIZ

Análise comparativa de desempenho mecânico de tubos de concreto reforçados com macrofibras poliméricas e fibras de aço

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de Concentração:
Engenharia de Construção Civil e Urbana

Orientador:
Prof. Dr. Antonio D. de Figueiredo

São Paulo

2012

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 23 de fevereiro de 2012.

Assinatura do autor _____

Assinatura do orientador _____

FICHA CATALOGRÁFICA

Escariz, Renata Campos
Análise comparativa de desempenho mecânico de tubos de concreto reforçados com macrofibras poliméricas e fibras de aço / R.C. Escariz. -- ed.rev. -- São Paulo, 2012.
133 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil.

1. Concreto reforçado com fibras 2. Tubos 3. Compressão diametral I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Construção Civil II. t.

Aos meus pais Paulo e Fátima e às minhas irmãs Paula e Marcela que sempre apoiaram, incentivaram e colaboraram para a realização deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador prof. Dr. Antonio Figueiredo pelo incentivo, dedicação e direcionamento para a realização deste trabalho.

À minha família pelo apoio e incentivo durante o período do Mestrado em que estive longe de casa, o que foi muito importante para a realização deste trabalho.

À empresa Fermix, em especial ao Engenheiro Alírio Gimenez pelo apoio ao projeto de pesquisa e, inclusive, na viabilização da produção de todos os tubos de concreto e realização dos ensaios de compressão diametral. Agradeço também ao Josué pelo apoio na produção dos tubos e na execução dos ensaios com os mesmos.

Às empresas Construquímica, Elasto Plastic Concrete do Brasil, Maccaferri do Brasil Ltda, e Belgo Bekaert Arames S.A. pelo apoio ao projeto de pesquisa por meio do fornecimento das fibras utilizadas neste trabalho.

À equipe do Laboratório de Construção civil, em especial ao Reginaldo, Renata Monte e Adilson, e à equipe do Laboratório de Microestrutura em especial ao Mario Takeashi pela disponibilidade e apoio na realização de parte dos ensaios deste trabalho.

Ao Ivan Tessarolo do Laboratório de Estruturas pelo apoio na execução do ensaio de compressão axial.

Aos professores Vahan Agopyan, Rafael Pileggi, Vanderley John, Maria Alba Cincotto e Ubiraci Souza pelos ensinamentos importantes transmitidos ao longo do mestrado.

Às amigas Lygia Carvalho, Marilia Ota e Gabriela Barreto que conviveram comigo durante o período em que morei em São Paulo que foram muito importantes para superar os desafios de morar longe da minha família e também compartilharam muitas alegrias.

À amiga Luana Bragança que esteve ao meu lado durante o período em que morei em Mineiros-GO, me apoiando e incentivando, o que foi muito importante para que eu concluísse o Mestrado.

Às entidades de fomento CNPq e FAPESP pela concessão da bolsa de estudos.

A todos que contribuíram de forma direta ou indireta para a realização deste trabalho.

RESUMO

O Brasil necessita de uma ampla implantação de sistemas de saneamento básico, como os de águas pluviais e, principalmente, coleta e tratamento de esgoto. Para resolver este problema pode ser interessante o emprego de tubos de concreto. Apesar de recente, o estudo de tubos de concreto reforçados com fibras já possibilitou a revisão da norma brasileira NBR 8890:2007 que prevê a utilização das fibras como único reforço do componente. No entanto, apenas fibras de aço são permitidas. Apesar de terem um potencial de durabilidade maior do que os tubos convencionalmente armados, ainda há a possibilidade de ampliar sua vida útil se forem utilizadas macrofibras poliméricas, que são resistentes à corrosão eletrolítica e hoje se encontram disponibilizadas no mercado Nacional. A dúvida que permanece é se essas fibras conseguem apresentar o mesmo desempenho mecânico das fibras de aço. Assim, esta dissertação de mestrado tem por objetivo principal realizar uma avaliação comparativa de desempenho mecânico das macrofibras poliméricas e das fibras de aço destinadas ao reforço de tubos de concreto para obras de saneamento básico. De forma a possibilitar estas avaliações foi feita uma verificação de desempenho por meio do ensaio de compressão diametral, com controle de deslocamentos, em tubos de concreto reforçados com fibras. Complementarmente, foram feitos o ensaio de absorção de água, a determinação do teor de fibra incorporado ao concreto por meio de testemunhos extraídos dos tubos e o ensaio de compressão axial em corpos-de-prova moldados. Os resultados demonstraram que as macrofibras poliméricas não obtiveram desempenho mecânico satisfatório, principalmente no que se refere à resistência residual pós-fissuração do tubo. Tal desempenho só foi obtido com a utilização de fibras de aço, o qual apresentou o dobro da capacidade resistente residual das macrofibras poliméricas para o mesmo teor em volume. Dessa forma, os tubos de concreto de 1 m de diâmetro reforçado com fibras, analisados neste estudo, apresentaram dificuldade de obtenção do desempenho pós-fissuração, o que dificultou a aprovação nos critérios da NBR 8890:2007. Assim, para que estes tubos pudessem atingir as cargas especificadas nesta norma seria preciso aumentar o teor ou o comprimento das fibras, o que iria dificultar a moldagem dos tubos.

Palavras-chave*: tubos de concreto, fibras de aço, macrofibras poliméricas, compressão diametral.*

ABSTRACT

Brazil requires a wide deployment of systems for drainage and, especially, sewage collection and treatment. To resolve this issue may be interesting the use of concrete pipes. Although recent, the study of fiber reinforced concrete pipes has already enabled the revision of the Brazilian standard NBR 8890:2007. This standard allows the use of fibers as the sole reinforcement for the components. However, only steel fibers are allowed. Despite the possibility that fibers can provide a potential higher durability compared to the conventionally reinforced concrete pipes, there is also the possibility of extension of the pipe lifetime by the use of polymeric fibers. This kind of fiber is resistant to electrolytic corrosion and, nowadays, is available in the Brazilian market. The remaining doubt is if these fibers can provide the same mechanical performance of steel fibers. Thus, this work has the main objective of carried out a comparative evaluation of the mechanical performance of polymeric fibers and steel fibers reinforcement for drainage concrete pipes. In order to enable these assessments, a verification of mechanical performance was made through the crushing test, where the diametric displacement of the pipes was also measured. In addition, tests were made in order to measure the concrete water absorption, the fiber actual consumption determination in cores extracted from the pipes, and compressive strength determination. The results showed that the polymeric macrofibers did not reach satisfactory performance, especially regarding to the residual post-crack strength. Only the steel fiber reinforced concrete pipes were able to fit the requirements, which had twice the post-crack residual strength presented by the polymeric fibers with the same content by volume. Thus, the fibers reinforced concrete pipes with diameter of one meter, used in this experimental program, showed difficult to obtaining the post-cracking behavior, which turns difficult the approval in the Brazilian standard criteria. So, the pipes reinforced with polymeric fibers could only possibly reach the load levels specified for post-crack strength by the use of a higher content or an increased length of fibers, which would turns much more difficult the concrete pipes production.

Keywords*: concrete pipes, steel fibers, polymeric fibers, crushing test*

.

SUMÁRIO

RESUMO iii

ABSTRACT iv

LISTA DE FIGURAS viii

LISTA DE TABELAS xiii

1. INTRODUÇÃO 1

1.1 OBJETIVO 2

1.2 JUSTIFICATIVA 3

1.3 ESTRUTURAÇÃO DO TRABALHO 3

2. TUBOS DE CONCRETO 5

2.1 CONDIÇÕES GERAIS 5

2.2 PRINCIPAIS APLICAÇÕES 6

2.2.1 Redes de águas pluviais 6

2.2.2 Redes de esgoto sanitário 7

2.2.3 Outras aplicações 7

2.3 TIPOS DE SISTEMA CONSTRUTIVO 8

2.3.1 Sistema enterrado 8

2.3.2 Sistema cravado 9

2.4 CRITÉRIOS DE PROJETO E DIMENSIONAMENTO 10

2.4.1 Critérios de projeto 10

2.4.2 Dimensionamento 11

2.4.2.1 Cargas 11

2.4.2.2 Determinação da resistência do tubo 16

2.4.2.3 Coeficiente de segurança 19

2.5 ESPECIFICAÇÃO E CONTROLE DE QUALIDADE 20

2.5.1 Especificação 20

2.5.1.1 Materiais 20
2.5.1.2 Ensaio de compressão diametral 23
2.5.1.3 Ensaio de absorção de água 26
2.5.1.4 Ensaio de permeabilidade e estanqueidade 27
2.5.2 Controle de qualidade 28
3. CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS 33
3.1 CONDIÇÕES GERAIS 33
3.2 O COMPÓSITO E A INTERAÇÃO FIBRA-MATRIZ 34
3.2.1 Tipos de fibras 37
3.2.1.1 Fibras de aço 38
3.2.1.2 Microfibras poliméricas e macrofibras poliméricas 39
3.2.2 Resistência e módulo de elasticidade das fibras 41
3.2.3 Geometria da fibra 44
3.2.3.1 Mecanismo de ancoragem 44
3.2.3.2 Fator de forma 45
3.2.3.3 Comprimento 45
3.2.4 Teor de fibra incorporado 46
3.2.5 Orientação da fibra 48
3.2.6 Resistência e módulo de elasticidade da matriz 49
3.2.7 Trabalhabilidade 51
3.3 DURABILIDADE 53
4. METODOLOGIA DE PESQUISA 56
4.1 MATERIAIS 56
4.1.1 Fibras 56
4.1.2 Cimento 58
4.1.3 Agregados 58
4.2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL 60

4.2.1 Processo de fabricação dos tubos 60
4.2.2 Traços utilizados nos tubos 66
4.2.3 Exemplares produzidos 67
4.2.4 Método de ensaio para avaliação dos tubos 69
4.2.4.1 Ensaio de compressão diametral 69
4.2.4.2 Ensaio de absorção de água e índice de vazios 73
4.2.4.3 Ensaio de determinação do teor real de fibra 75
4.2.4.4 Ensaio de compressão axial 78
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES 80
5.1 ENSAIO DE COMPRESSÃO DIAMETRAL 80
5.1.1 Tubo simples 80
5.1.2 Tubo de concreto reforçado com fibra de aço solta 82
5.1.3 Tubo de concreto reforçado com fibra de aço curta colada em pente 85
5.1.4 Tubo de concreto reforçado com fibra de aço longa colada em pente 88
5.1.5 Tubo de concreto reforçado com macrofibra polimérica Barchip 92
5.1.6 Tubo de concreto reforçado com macrofibra polimérica Forta Ferro 95
5.2 ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA E ÍNDICE DE VAZIOS 98
5.3 ENSAIO DE DETERMINAÇÃO DO TEOR INCORPORADO DE FIBRA 100
5.3 ENSAIO DE COMPRESSÃO AXIAL 107
5.4 SÍNTESE DA ANÁLISE DOS RESULTADOS 109
6. CONCLUSÕES 115
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 117
APÊNDICES 123
APÊNDICE A – RESULTADOS INDIVIDUAIS OBTIDOS NOS TESTEMUNHOS EXTRAÍDOS DOS TUBOS 123
APÊNDICE B – RESULTADOS INDIVIDUAIS OBTIDOS NOS CORPOS-DE-PROVA MOLDADOS 130

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Carga de aterro atuante sobre o tubo. (RAMOS, 2002) 12

Figura 2.2 – Formas de instalação: (a) vala simples; (b) vala com paredes inclinadas; (c) vala com sub-vala; (d) aterro com projeção positiva; (e) aterro com projeção negativa. (EL DEBS, 2008) 13

Figura 2.3 – Fluxo das tensões no solo em tubos enterrados: (a) em vala; (b) e (c) em aterro. (EL DEBS, 2008) 14

Figura 2.4 – Formas de assentamento e de condições de aterro lateral junto a base do tubo. (EL DEBS, 2008) 14

Figura 2.5 – Ensaios de determinação da resistência de um tubo: (a) três cutelos; (b) dois cutelos; (c) colchão de areia e (d) Minnesota. (CHAMA NETO, 2002). 16

Figura 2.6 – Bases de concreto ou Classe A. (EL DEBS, 2008) 18

Figura 2.7 – Bases de primeira classe ou Classe B. (EL DEBS, 2008) 18

Figura 2.8 – Bases comuns ou Classe C. (EL DEBS, 2008) 18

Figura 2.9 – Bases condenáveis ou Classe D. (EL DEBS, 2008) 19

Figura 2.10 – Ensaio de permeabilidade e estanqueidade da junta 28

Figura 2.11 – corte longitudinal: (a) tubo de concreto macho e fêmea; (b) tubo de concreto ponta e bolsa. (NBR 8890:2007) 30

Figura 3.1 – Modelo simplificado de transmissão de tensões em um elemento de pasta de cimento: (a) elemento comprimido; (b) elemento tracionado. (NUNES, 2006) 34

Figura 3.2 – Propagação de fissuras e concentração de tensões. (RAMOS, 2002) 35

Figura 3.3 – Mecanismo de controle de propagação das fissuras. (RAMOS, 2002) 35

Figura 3.4 – Diagrama de tensão por deformação elástica de matriz e fibras de alto e baixo módulo de elasticidade trabalhando em conjunto. (FIGUEIREDO, 2000) 42

Figura 4.1 – (a) fibra de aço solta; (b) fibra de aço curta colada em pente e fibra de aço longa colada em pente 57

Figura 4.2 – (a) macrofibra polimérica Barchip; (b) macrofibra polimérica Forta Ferro 58

Figura 4.3 – Curva granulométrica da areia e limites estabelecidos por norma (NBRNM 248:2003) 59

Figura 4.4 – Curva granulométrica da brita e limites de classificação estabelecidos por norma (NBRNM 248:2003) 59

Figura 4.5 – Lançamento do cimento direto no misturador 60

Figura 4.6 – Lançamento da areia e brita na esteira 61

Figura 4.7 – Pesagem das fibras 61

Figura 4.8 – Adição de fibras de aço diretamente na esteira de alimentação: (a) soltas; (b) coladas em pente 62

Figura 4.9 – Adição de macrofibras poliméricas diretamente no misturador 62

Figura 4.10 – Transporte do concreto à VRF 63

Figura 4.11 – Lançamento do concreto na forma 63

Figura 4.12 – Procedimento de compactação por meio de anel giratório 63

Figura 4.13 – (a) retirada do tubo do equipamento; (b) transporte do tubo; (c) colocação do tubo no piso; (d) retirada da forma 64

Figura 4.14 – Acabamento superficial no tubo: (a) na parte externa; (b) na ponta 65

Figura 4.15 – Processo de cura: (a) colocando a lona plástica; (b) tubo coberto 65

Figura 4.16 – Caracterização geométrica do tubo utilizado no estudo 68

Figura 4.17 – (a) fissuras na bolsa no momento da desforma; (b) detalhe da fissura na bolsa 68

Figura 4.18 – Ensaio de compressão diametral de tubos de concreto para águas pluviais e esgoto. (NBR 8890:2007) 70

Figura 4.19 – Esquema de carregamento do tubo reforçado com fibras de aço. (NBR 8890:2007) 71

Figura 4.20 – (a) colchão de areia com a finalidade de distribuir melhor a carga aplicada no tubo; (b) detalhe do colchão de areia 71

Figura 4.21 – (a) configuração inicial do sistema de posicionamento dos LVDTs; (b) detalhe do suporte e da folha de acetato usados para leitura da deformação do tubo durante o ensaio de compressão diametral 73

Figura 4.22 – Extração dos testemunhos 74

Figura 4.23 – Recipiente com corpos-de-prova em que foi feito a fervura 74

Figura 4.24 – Determinação da massa do corpo-de-prova saturado após ensaio 75

Figura 4.25 – Esmagamento do testemunho na prensa dentro de uma bandeja para evitar perda de material 76

Figura 4.26 – Testemunho de concreto com fibras de aço ao final da etapa de esmagamento 76

Figura 4.27 – Testemunho de concreto com macrofibras poliméricas ao final da etapa de esmagamento 77

Figura 4.28 – Coleta das fibras: (a) fibra de aço; (b) macrofibra polimérica 77

Figura 4.29 – Pesagem das fibras: (a) fibra de aço; (b) macrofibra polimérica 78

Figura 4.30 – Confecção dos corpos-de-prova em mesa vibratória com auxílio de um soquete: (a) primeiras camadas; (b) última camada 78

Figura 4.31 – (a) ensaio de compressão axial com utilização de equipamento de aquisição automática de dados; (b) detalhe da configuração dos extensômetros elétricos 79

Figura 5.1 – Curvas de carga por tempo obtidas no ensaio de compressão diametral dos tubos simples 81

Figura 5.2 – Curvas de carga por deslocamento obtidas no ensaio de compressão diametral dos tubos com 20 kg/m³ da fibra de aço solta 82

Figura 5.3 – Curvas de carga por deslocamento obtidas no ensaio de compressão diametral dos tubos com 25 kg/m³ da fibra de aço solta 82

Figura 5.4 – Curvas de carga por deslocamento obtidas no ensaio de compressão diametral dos tubos com 35 kg/m³ da fibra de aço solta 83

Figura 5.5 – Curvas de carga por deslocamento obtidas no ensaio de compressão diametral dos tubos com 20 kg/m³ da fibra de aço curta colada em pente 85

Figura 5.6 – Curvas de carga por deslocamento obtidas no ensaio de compressão diametral dos tubos com 25 kg/m³ da fibra de aço curta colada em pente 85

Figura 5.7 – Curvas de carga por deslocamento obtidas no ensaio de compressão diametral dos tubos com 35 kg/m³ da fibra de aço curta colada em pente 86

Figura 5.8 – Curvas de carga por deslocamento obtidas no ensaio de compressão diametral dos tubos com 45 kg/m³ da fibra de aço curta colada em pente 86

Figura 5.9 – Curvas de carga por deslocamento obtidas no ensaio de compressão diametral dos tubos com 20 kg/m³ da fibra de aço longa colada em pente 89

Figura 5.10 – Curvas de carga por deslocamento obtidas no ensaio de compressão diametral dos tubos com 25 kg/m³ da fibra de aço longa colada em pente 89

Figura 5.11 – Curvas de carga por deslocamento obtidas no ensaio de compressão diametral dos tubos com 35 kg/m³ da fibra de aço longa colada em pente 90

Figura 5.12 – Curvas de carga por deslocamento obtidas no ensaio de compressão diametral dos tubos com 45 kg/m³ da fibra de aço longa colada em pente 90

Figura 5.13 – Curvas de carga por deslocamento obtidas no ensaio de compressão diametral dos tubos com 3 kg/m³ da macrofibra polimérica Barchip..... 92

Figura 5.14 – Curvas de carga por deslocamento obtidas no ensaio de compressão diametral dos tubos com 4 kg/m³ da macrofibra polimérica Barchip..... 93

Figura 5.15 – Curvas de carga por deslocamento obtidas no ensaio de compressão diametral dos tubos com 5,5 kg/m³ da macrofibra polimérica Barchip..... 93

Figura 5.16 – Curvas de carga por deslocamento obtidas no ensaio de compressão diametral dos tubos com 3 kg/m³ da macrofibra polimérica Forta Ferro 95

Figura 5.17 – Curvas de carga por deslocamento obtidas no ensaio de compressão diametral dos tubos com 4 kg/m³ da macrofibra polimérica Forta Ferro 96

Figura 5.18 – Curvas de carga por deslocamento obtidas no ensaio de compressão diametral dos tubos com 5,5 kg/m³ da macrofibra polimérica Forta Ferro 96

Figura 5.19 – Correlação entre a resistência à compressão média e a absorção de água média obtida no ensaio de compressão axial nos corpos-de-prova..... 108

Figura 5.20 – Correlação logarítmica da absorção de água dos testemunhos extraídos dos tubos de concreto e seus respectivos consumos teóricos de fibras..... 109

Figura 5.21 - Correlação da carga de ruptura dos tubos de concretos e seus respectivos consumos teóricos de fibras..... 110

Figura 5.22 – Correlação entre a carga de ruptura e a relação água/cimento dos tubos reforçados com fibras 112

Figura 5.23 – Correlação logarítmica entre os teores das fibras - curva de dosagem 113

Figura B.1 – Curvas de resistência à compressão pela deformação obtidas no ensaio de compressão axial dos corpos-de-prova com 20 kg/m³ da fibra de aço curta colada em pente 131

Figura B.2 – Curvas de resistência à compressão pela deformação obtidas no ensaio de compressão axial dos corpos-de-prova com 25 kg/m³ da fibra de aço curta colada em pente 131

Figura B.3 – Curvas de resistência à compressão pela deformação obtidas no ensaio de compressão axial dos corpos-de-prova com 35 kg/m³ da fibra de aço curta colada em pente 132

Figura B.4 – Curvas de resistência à compressão pela deformação obtidas no ensaio de compressão axial dos corpos-de-prova com 4 kg/m³ da macrofibra polimérica Forta Ferro. 132

Figura B.5 – Curvas de resistência à compressão pela deformação obtidas no ensaio de compressão axial dos corpos-de-prova com 5,5 kg/m³ da macrofibra polimérica Forta Ferro 133

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 - Níveis de atendimento com água e esgotos dos prestadores de serviço participantes do SNIS em 2008, segundo região geográfica. (SNIS, 2008) 1

Tabela 2.1 - Compressão diametral de tubos simples. (NBR 8890:2007) 23

Tabela 2.2 - Compressão diametral de tubos armados e/ou reforçados com fibras de aço. (NBR 8890:2007) 25

Tabela 2.3 - Ângulo de deflexão. (NBR 8890:2007) 28

Tabela 2.4 - Dimensões dos tubos destinados a águas pluviais com encaixe ponta e bolsa e macho e fêmea. (NBR 8890:2007) 30

Tabela 2.5 - Dimensões dos tubos destinados a esgotos sanitários e águas pluviais com junta elástica. (NBR 8890:2007) 31

Tabela 3.1 - Valores de resistência mecânica e módulo de elasticidade para diversos tipos de fibra e matrizes. (BENTUR; MINDESS, 1990) 43

Tabela 4.1 – Características físicas e mecânicas das fibras 57

Tabela 4.2 – Características dos agregados 59

Tabela 4.3 – Teor em massa e em volume de fibras utilizado na produção dos tubos 66

Tabela 4.4 – Consumo de material por m³ de concreto utilizado na produção dos tubos 67

Tabela 5.1 – Resultados do ensaio de compressão diametral para os tubos simples - quanto à carga de ruptura 81

Tabela 5.2 – Resultados do ensaio de compressão diametral para os tubos com fibra de aço solta - quanto à carga de ruptura 84

Tabela 5.3 – Resultados do ensaio de compressão diametral para os tubos com fibra de aço solta - quanto à carga máxima pós-fissuração 84

Tabela 5.4 – Resultados do ensaio de compressão diametral para os tubos com fibra de aço curta colada em pente - quanto à carga de ruptura 87

Tabela 5.5 – Resultados do ensaio de compressão diametral para os tubos com fibra de aço curta colada em pente - quanto à carga máxima pós-fissuração 88

Tabela 5.6 – Resultados do ensaio de compressão diametral para os tubos com fibra de aço longa colada em pente - quanto à carga de ruptura 91

Tabela 5.7 – Resultados do ensaio de compressão diametral para os tubos com fibra de aço longa colada em pente - quanto à carga máxima pós-fissuração 91

Tabela 5.8 – Resultados do ensaio de compressão diametral para os tubos com macrofibra polimérica Barchip - quanto à carga de ruptura 94

Tabela 5.9 – Resultados do ensaio de compressão diametral para os tubos com macrofibra polimérica Barchip - quanto à carga máxima pós-fissuração 94

Tabela 5.10 – Resultado do ensaio de compressão diametral para os tubos com macrofibra polimérica Forta Ferro - quanto à carga de ruptura 97

Tabela 5.11 – Resultado do ensaio de compressão diametral para os tubos com macrofibra polimérica Forta Ferro - quanto à carga máxima pós-fissuração 97

Tabela 5.12 – Resultados obtidos no ensaio de absorção de água e índice de vazios para os tubos reforçados com fibras de aço e macrofibras poliméricas 99

Tabela 5.13 – Resultados obtidos para os tubos concretos com a fibra de aço solta no estado endurecido quando submetidos ao ensaio previsto pela norma NBR9778 (2005) 101

Tabela 5.14 – Resultados obtidos para os tubos concretos com a fibra de aço curta colada em pente no estado endurecido quando submetidos ao ensaio previsto pela norma NBR9778 (2005) 101

Tabela 5.15 – Resultados obtidos para os tubos concretos com a fibra de aço longa colada em pente no estado endurecido quando submetidos ao ensaio previsto pela norma NBR9778 (2005) 102

Tabela 5.16 – Resultados obtidos para os tubos concretos com macrofibras poliméricas D no estado endurecido quando submetidos ao ensaio previsto pela norma NBR9778 (2005) 102

Tabela 5.17 – Valores de consumo teórico e consumo verificado para os tubos de concreto com as fibras de aço e a macrofibra polimérica Barchip 103

Tabela 5.18 – Resultados obtidos para as massas de fibras extraídas após o esmagamento dos testemunhos dos tubos de concreto com a fibra de aço solta e respectivos teores incorporados 104

Tabela 5.19 – Resultados obtidos para as massas de fibras extraídas após o esmagamento dos testemunhos dos tubos de concreto com a fibra de aço curta colada em pente e respectivos consumos 104

Tabela 5.20 – Resultados obtidos para as massas de fibras extraídas após o esmagamento dos testemunhos dos tubos de concreto com a fibra de aço longa colada em pente e respectivos consumos 105

Tabela 5.21 – Resultados obtidos para as massas de fibras extraídas após o esmagamento dos testemunhos dos tubos de concreto com a macrofibra polimérica Barchip e respectivos consumos 105

Tabela 5.22 – Resultados do ensaio de absorção de água e do teor real de fibras dos testemunhos extraídos dos tubos 106

Tabela 5.23 – Resultados do ensaio de compressão axial nos corpos-de-prova – resistências à compressão médias e absorção médias 107

Tabela A.1 – Resultados do ensaio de absorção de água dos testemunhos extraídos dos tubos 123

Tabela A.2 – Resultados do cálculo do teor incorporado de fibra 124

Tabela B.1 – Resultados do ensaio de absorção de água dos corpos-de-prova 130

1. INTRODUÇÃO

É sobejamente conhecido o fato do Brasil necessitar urgentemente de uma ampla implantação de sistemas de saneamento básico, notadamente de sistemas de coleta e tratamento de esgoto, como também de águas pluviais. Isto porque apesar do país apresentar bom índice de atendimento de águas pluviais, ainda existe algumas regiões que apresentam esse índice abaixo da média, tais quais Norte e Nordeste. Esta situação torna-se ainda pior quando se fala em índice de atendimento de coleta e tratamento de esgoto, tanto para a média do Brasil como, principalmente, para a região Norte, como pode ser observado na Tabela 1.1.

Tabela 1.1 - Níveis de atendimento com água e esgotos dos prestadores de serviço participantes do SNIS em 2008, segundo região geográfica. (SNIS, 2008)

Regiões	***Índice de atendimento (%)***				***Índice de tratamento dos esgotos gerados (%)***
	Água		***Coleta de esgotos***		
	Total	***Urbano***	***Total***	***Urbano***	***Total***
Norte	57,6	72,0	5,6	7,0	11,2
Nordeste	68,0	89,4	18,9	25,6	34,5
Sudeste	90,3	97,6	66,6	72,1	36,1
Sul	86,7	98,2	32,4	38,3	31,1
Centro-oeste	89,5	95,6	44,8	49,5	41,6
Brasil	81,2	94,7	43,2	50,6	34,6

No sentido de se possibilitar uma variante tecnológica para a produção de tubos de concreto para os referidos sistemas, foram desenvolvidos estudos sobre a utilização de fibras de aço como reforço, na Escola Politécnica da USP e na Universidade Estadual de Campinas, cujos primeiros resultados obtidos foram as dissertações de Pedro Jorge Chama Neto (CHAMA NETO, 2002) e de Marcelo Francisco Ramos (RAMOS, 2002).

A partir destes trabalhos foi estabelecida uma série de parâmetros para a análise do desempenho mecânico dos tubos de concretos reforçados com fibras de aço (CHAMA NETO; FIGUEIREDO, 2003). O principal fundamento para esta avaliação é a utilização de um sistema de controle de deformação diametral no ensaio de compressão diametral. O ensaio básico, sem controle de deformações, já era utilizado anteriormente para o controle de qualidade dos tubos convencionalmente armados com telas ou vergalhões de aço (FIGUEIREDO et al., 2007).

Apesar de recente, o estudo de tubos de concreto reforçados com fibras já possibilitou a revisão da norma NBR 8890:2007 - *Tubo de concreto, de seção circular, para águas pluviais e esgotos sanitários*, que incorporou a utilização das fibras de aço como único reforço do componente (FIGUEIREDO; CHAMA NETO, 2007). A concepção da norma brasileira, publicada em 2007, é similar ao recomendado pela norma européia NBN EN 1916:2002 - *Concrete pipes and fittings, unreinforced, steel fibre and reinforced*, apesar de introduzir algumas inovações no que se refere à avaliação do componente. Esta norma é a primeira do Brasil a parametrizar o uso do concreto reforçado com fibras de aço, tendo sido desenvolvida em paralelo com a norma de especificação da própria fibra NBR 15530:2007 (FIGUEIREDO; CHAMA NETO; FARIA, 2008).

Assim, hoje é possível contar com o fornecimento de tubos de concreto reforçado com fibras de aço no mercado brasileiro, o que passa a ser uma interessante alternativa para a redução do déficit público de obras de saneamento. No entanto, apenas fibras de aço são permitidas. Isto ocorre porque, até aqui, todos os estudos desenvolvidos nesta área só abordaram o uso das fibras de aço.

Apesar dos tubos com fibras de aço terem um potencial de durabilidade maior do que os tubos convencionalmente armados, ainda há a possibilidade de ampliar sua vida útil se forem utilizadas macrofibras poliméricas, que são resistentes à corrosão eletrolítica e hoje se encontram disponibilizadas no mercado nacional. A dúvida que permanece é se essas fibras conseguem apresentar o mesmo desempenho mecânico das fibras de aço.

O primeiro estudo abordando estas macrofibras que foi desenvolvido na Escola Politécnica da USP resultou na dissertação de mestrado de Maira Paulina Tiguman (TIGUMAN, 2004) que avaliou o material por meio de ensaios de tração na flexão de prismas com deformação controlada. Neste estudo, foram obtidos resultados interessantes apesar de, na época, não se contar com o fornecimento de macrofibras de maior desempenho como as disponíveis nos dias atuais. De qualquer forma, faz-se necessário avaliar o potencial de uso dessas fibras para o reforço de tubos de concreto para águas pluviais e esgoto.

1.1 OBJETIVO

Este trabalho tem por objetivo principal realizar uma análise comparativa de desempenho mecânico das macrofibras poliméricas e das fibras de aço destinadas ao reforço de tubos de concreto para obras de saneamento básico. Ou seja, pretende-se estimar a relação

de desempenho entre diferentes tipos de fibras aplicadas a tubos da classe PA1 com 1000 mm de diâmetro nominal e parede de 80 mm de espessura, e analisar a viabilidade da substituição das fibras de aço por macrofibras poliméricas.

Como objetivos secundários, podem ser listados os seguintes:

- Avaliar o impacto da utilização de macrofibras poliméricas nas condições de produção dos tubos;
- Verificar a possibilidade de utilização de ensaios de determinação do teor incorporado de fibras no controle dos tubos de concreto reforçados com este material.

1.2 JUSTIFICATIVA

Como comentado anteriormente, a normalização brasileira vigente só permite o uso de fibras de aço para o reforço dos tubos de concreto destinados a obras de coleta de esgoto e águas pluviais. Isto ocorreu porque a totalidade dos estudos desenvolvidos na área apenas envolveu o uso de tubos reforçados com este tipo de fibra, mesmo internacionalmente. Assim, julgou-se pertinente o desejo de se pesquisar a possibilidade de utilização de outro tipo de fibra, neste caso, a macrofibra polimérica, e verificar se há como obter um desempenho mecânico equivalente entre estes dois tipos de fibras. Se isto ocorrer, será possível ganhar também em desempenho com relação à durabilidade, pois as macrofibras poliméricas deverão resistir melhor ao meio ambiente agressivo onde os tubos irão trabalhar.

O diâmetro nominal de 1000 mm foi escolhido por ser mais simples para fabricação dos tubos, dado que não precisa mudar as peças na máquina de produção, pois é um dos diâmetros mais utilizados no mercado Nacional. Além disso, este diâmetro é o máximo permitido pela norma brasileira para a produção de tubos de concreto com reforço de fibras, dessa forma, será possível verificar o desempenho do compósito na condição limite prevista pela norma brasileira NBR 8890:2007.

1.3 ESTRUTURAÇÃO DO TRABALHO

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

Neste capítulo já foram abordados de maneira sucinta o quadro atual da aplicação das fibras de aço nos tubos de concreto, a importância, o objetivo e a justificativa do tema.

No capítulo 2, é apresentada a primeira parte da revisão bibliográfica que abrange os aspectos mais relevantes dos tubos de concreto, tais como: condições gerais, principais aplicações, tipos de sistemas construtivos, critérios de projeto e dimensionamento, especificações e controle de qualidade.

No capítulo 3, é apresentada a segunda parte da revisão bibliográfica que abrange os aspectos mais relevantes do concreto com fibras, tais como: interação fibra-matriz e os parâmetros que a interfere (tipos de fibras, resistência e módulo de elasticidade da matriz e das fibras, geometria e orientação das fibras, teor de fibra incorporado) e durabilidade do concreto reforçado com fibras. As informações deste capítulo serão úteis para caracterizar o papel e o comportamento das fibras no controle da fissuração do tubo.

No capítulo 4 são apresentados os estudos experimentais realizados na fábrica Fermix e no Laboratório de Construção Civil da Escola Politécnica da USP. Os estudos experimentais realizados na fábrica foram a produção dos tubos, o ensaio de resistência a compressão diametral, a extração dos testemunhos e a confecção dos corpos-de-prova para o ensaio de compressão axial. Já os realizados em laboratório foram o ensaio de absorção de água e o ensaio de compressão axial.

No capítulo 5 são apresentados, analisados e discutidos os resultados do estudo experimental, com o foco na comparação entre o desempenho dos tubos de concreto reforçados com fibras de aço e macrofibras poliméricas.

No capítulo 6 são apresentadas as principais conclusões do estudo apresentado.

2. TUBOS DE CONCRETO

2.1 CONDIÇÕES GERAIS

É indiscutível que o setor da construção civil é um grande consumidor de recursos naturais e energéticos, além de gerador de resíduos. Por isso, para reduzir o déficit do sistema de saneamento do Brasil, é importante analisar a viabilidade dos materiais, processos produtivos e outros aspectos relativos à implantação do sistema visando sua sustentabilidade.

A análise da sustentabilidade dos tubos de saneamento deve levar em conta os aspectos econômico, funcional, social e ambiental, pois em alguns casos, uma alternativa pode ser melhor em um aspecto como, por exemplo, econômico, no entanto pior em outro aspecto como, por exemplo, funcional e ambiental. Por isso, é importante que todos os aspectos sejam avaliados em conjunto (VIÑOLAS; DE LA FUENTE; AGUADO, 2010).

Para os tubos de saneamento, a resistência do conjunto solo-tubo varia em função do material e da compactação da vala. Se os materiais que se dispõem são selecionados e se realiza uma boa compactação, a resistência do conjunto aumenta. Caso contrário, aumenta o consumo de matérias-primas, pois grande quantidade do material escavado não será reaproveitado e o custo da execução também aumenta, porque deve-se dispor de novos materiais ou realizar uma compactação mais cuidadosa. Assim, o custo da execução e o consumo de matérias-primas estão relacionados com a capacidade estrutural do sistema solo-tubo. Esta influência é ainda maior quando são utilizados tubos plásticos já que sua deformação é maior e, portanto o terreno contribui mais com a capacidade estrutural do conjunto solo-tubo (VIÑOLAS; DE LA FUENTE; AGUADO, 2010).

Viñolas, De La Fuente e Aguado (2010) observaram que o tubo de concreto é um componente cuja resistência quase não sofre influência da compactação lateral e do tipo de aterro, sendo responsável por apenas 15% da resistência do conjunto solo-tubo. Enquanto que os tubos plásticos dependem de uma boa compactação e um bom material de aterro, pois o terreno é responsável por 85% da resistência total ao sistema. Esta influência aumenta à medida que aumenta o diâmetro do tubo, ou seja, para tubos de grandes diâmetros (superior a 800 mm) o tubo de concreto se mostra mais competitivo do que os tubos de plástico, o que o torna a opção mais interessante para este trabalho que estuda tubos de 1000 mm de diâmetro.

Uma das dificuldades na fabricação de tubos armados é a necessidade de investimentos tanto em mão-de-obra qualificada para corte, dobramento e montagem das armações quando

se utiliza tela metálica ou na substituição destes por equipamentos automatizados, como em infra-estrutura das fábricas devido à necessidade de espaço para poder estocar a produção da armadura e das telas metálicas que devem estar disponíveis durante a produção dos componentes. Já quando se utilizam fibras como único reforço do concreto para fabricação dos tubos, é eliminada a etapa de fabricação da armadura, pois estas são adicionadas como se fossem um elemento adicional do concreto (NUNES, 1998; PINTO JR.; MORAES, 1996).

As principais características do tubo de concreto com fibras são sua capacidade de resistência ao impacto (redução de danos acidentais durante a fabricação, manuseio, transporte e instalação dos tubos) e sua capacidade portante pós-fissuração, ou seja, depois de apresentar fissuras significativas o tubo suporta maior carregamento. Além do mais propicia uma abertura menor das fissuras, que é uma vantagem para os tubos de concreto destinados à redes de esgotos sanitários. Ou seja, a adição de fibras ao tubo de concreto significa uma melhora na durabilidade e vida útil do mesmo (FIGUEIREDO; CHAMA NETO, 2006).

2.2 PRINCIPAIS APLICAÇÕES

Os tubos de concreto são normalmente utilizados para irrigação, redes de águas pluviais, abastecimento de água, redes de esgotos sanitários, galerias e bueiros. Apesar das diversas aplicações possíveis, os tubos de concreto no Brasil são, em sua maioria, utilizados para redes de águas pluviais e esgotos sanitários.

2.2.1 Redes de águas pluviais

Com a crescente urbanização, as áreas permeáveis são reduzidas dificultando a infiltração das águas da chuva no solo e com isto, as águas pluviais excessivas tendem a escoar e se acumular em pontos baixos das cidades, provocando as enchentes que, em geral, causam muitos prejuízos sociais, econômicos e sanitários nas cidades. Para evitar que isto aconteça, é necessário que as águas das chuvas sejam captadas e conduzidas para locais adequados, e por isso foram criadas as redes de águas pluviais, conhecidas como drenagem urbana.

Segundo Chama Neto (2008), um adequado sistema de drenagem de águas superficiais ou subterrâneas, proporcionará uma série de benefícios, tais como: desenvolvimento do

sistema viário; redução dos gastos com manutenção das vias públicas; valorização das propriedades na área beneficiada; escoamento rápido das águas superficiais facilitando o tráfego por ocasião das precipitações; eliminação de águas estagnadas e lamaçais que podem causar doenças; e segurança e conforto para a população e veículos.

No Brasil as redes de águas pluviais são construídas, em sua maioria, utilizando tubos de concreto simples, em diâmetros que variam de 200 a 600 mm e, tubos de concreto armado em diâmetros que variam de 300 a 2000 mm, de maneira que os mesmos atendam às exigências prescritas na norma brasileira NBR 8890:2007, vide item 2.4.

2.2.2 Redes de esgoto sanitário

Os tubos de concreto para esgotos sanitários foram desenvolvidos para atender a demanda destes sistemas, os quais tornaram possível o crescimento das grandes cidades. O tubo fabricado com concreto é, até o momento, o componente mais utilizado em obras de esgotos sanitários devido ao seu custo em relação ao tubo fabricado com outros materiais e também pelos excelentes resultados de resistência e durabilidade que vem apresentando. Funcionam como conduto livre e são produzidos em diâmetros que variam de 400 a 2000 mm, sendo os mais utilizados até 1200 mm, de maneira que os mesmos atendam às exigências prescritas na norma brasileira NBR 8890:2007 (vide item 2.4).

Até recentemente, estes tubos eram a única alternativa disponível para aplicação em redes de esgoto não pressurizadas. Atualmente outros materiais estão sendo produzidos no Brasil, porém os projetistas, construtores e empresas de saneamento, continuam optando de forma bastante intensa pelo uso de tubos de concreto em redes de esgoto, em função de vantagens técnicas e econômicas (CHAMA NETO, 2002).

2.2.3 Outras aplicações

Além da utilização de tubos de concreto em sistemas de esgoto sanitário e redes de águas pluviais, este material tem sido utilizado em sistemas de abastecimento de água pressurizada ou por gravidade.

Em sistemas de abastecimento de água sob pressão, são usados tubos de concreto armado, com ou sem cilindro de aço, protendido ou sem protenção, sendo que para cada

situação as exigências mudam em função das cargas externas e internas atuantes no tubo. Na Europa, principalmente na Alemanha, esta alternativa ainda continua sendo utilizada, já no Brasil, o mais utilizado é o sistema por gravidade (CHAMA NETO, 2008).

Outra aplicação é em drenagem de rodovias, ferrovias e aeroportos; bueiros e travessias; poços de inspeção; passagens subterrâneas para animais e pedestres; fossas sépticas e poços de lençol freático. Nos Estados Unidos e Canadá estima-se que 90% dos aeroportos têm seu sistema de drenagem executado com tubos de concreto (CHAMA NETO, 2008).

2.3 TIPOS DE SISTEMA CONSTRUTIVO

Os principais tipos de sistema construtivo utilizados em redes de tubos de concreto são o sistema enterrado e o sistema cravado que serão descritos a seguir.

2.3.1 Sistema enterrado

O sistema enterrado ou escavação a céu aberto é aquele em que a vala é aberta desde a superfície do terreno até o ponto de instalação dos tubos. É a forma mais utilizada, apesar dos transtornos que traz para o trânsito de veículos e de pedestres (NUVOLARI et al., 2003). A escavação, proteção e reaterro das valas constituem, na maioria das vezes, a parte mais trabalhosa, demorada e dispendiosa da execução do sistema. Por este motivo são necessários cuidados especiais e técnicas apropriadas na sua construção (HESS, 1977).

Inicialmente elabora-se o projeto que especifica o diâmetro nominal, declividade da tubulação, largura da vala, posicionamento da tubulação na via pública, profundidades, cobrimentos mínimos, pontos de passagem obrigatória, interferências e tipo de pavimento segundo as normas ou especificações. Com o projeto pronto devem ser feitas as sondagens para avaliar a natureza do solo a ser escavado e a posição do lençol freático, avaliando a necessidade de utilização de escoras e de esgotamento da água drenada do lençol freático durante a escavação (HESS, 1977).

Após estas determinações inicia-se a locação das valas, que podem ser posicionadas sob o passeio ou sob o terço da rua. A menor largura da vala é de 60 cm em terrenos firmes e com pequenas profundidades, podendo chegar a vários metros no caso de grandes tubulações. A

profundidade e declividade do fundo da vala são controladas por cavaletes fixos, colocados em cada uma das extremidades do trecho a ser aberto e por uma régua móvel (HESS, 1977).

Com a locação da vala pronta inicia-se a escavação, que pode ser manual ou mecânica. Onde há mão-de-obra barata predomina a escavação manual sobre a mecânica, principalmente nas obras de menor vulto. As escavações manuais são feitas com ferramentas do tipo: alavanca, enxada, pá e picareta. Em valas profundas pode-se utilizar escavação mecânica até o limite de alcance do equipamento. Daí em diante, só se emprega a escavação manual, já que o escoramento das paredes da vala impede a ação da maioria dos equipamentos de escavação mecânica. Os equipamentos mais utilizados na escavação mecânica são: retro-escavadeiras (para profundidades de valas de até 2,50 m), escavadeiras hidráulicas (para profundidades de até 5 m ou 6 m), drag-lines (para raspagens em terrenos pouco consistentes e de difícil acesso) e pás-carregadeiras (para carga de material solto nos caminhões) (NUVOLARI et al., 2003).

Quando as valas são abertas em solo suscetível a desbarrancamento, torna-se necessário escorar suas paredes laterais. Para evitar acidentes por soterramento, é obrigatório o escoramento para valas de profundidade superiores a 1,25 m, qualquer que seja a natureza do solo. Para menores profundidades a necessidade de escoramento dependerá do tipo do solo, por exemplo, solos arenosos encharcados e argila muito mole necessitam de escoramento mesmo em valas rasas. Para o esgotamento da água utilizam-se bombas em poços de sucção ou faz-se o rebaixamento do lençol freático (HESS, 1977).

Uma vez assentada e verificada a tubulação quanto ao alinhamento, declividade e estanqueidade, deve-se reaterrar a vala o mais rapidamente possível. Se a vala tiver sido escavada em solo de boa qualidade, o reaterro poderá ser feito com o próprio material retirado. Caso contrário, deve-se trazer terra apropriada de outro local (HESS, 1977).

2.3.2 Sistema cravado

Tradicionalmente as redes de esgoto e galerias de águas pluviais são instaladas com o emprego da técnica de abertura de valas a céu aberto. Nos grandes centros urbanos, com áreas densamente ocupadas, este sistema tem se mostrado cada vez mais inviável. Dessa forma, os túneis passaram a ter importância decisiva na execução destas obras, pois se apresentaram como a solução para a transposição de múltiplos obstáculos.

Dentre os métodos existentes para a execução de túneis em áreas urbanas, um dos resultantes do desenvolvimento tecnológico recente é o sistema *Jacking Pipe* destinado às

canalizações em geral (CHAMA NETO, 2008). Este sistema é composto de tubos de concreto armado de alta resistência (50 a 80 MPa), cravados no solo por meio de macaco hidráulico um após o outro, à medida que executa-se a escavação da frente do túnel. Os tubos são acoplados um ao outro por encaixe de ponta especial de anel metálico chumbado em uma das extremidades do tubo (NUVOLARI et al., 2003).

O sistema *Jacking Pipe* permite a execução de obras em áreas urbanas sem a interrupção do trânsito, facilita a transposição de interferências, e evita desapropriações de terrenos e edificações. Apresenta ainda algumas vantagens, tais como, tipos e versatilidade dos equipamentos de cravação que permitem a execução dos túneis em maciços arenosos e argilosos com ou sem capacidade portante e na presença ou não de água (CHAMA NETO, 2008).

No Brasil a primeira obra executada utilizando-se este sistema foi o Coletor Tronco Itaim, situado em São Paulo no bairro do Itaim Paulista, iniciado em 1992 com extensão de 2078 m e diâmetro de 600 mm. Desde então este sistema tem sido utilizado nos maiores programas de despoluição ambiental desenvolvidos no país, como por exemplo, o do Rio Tietê, em São Paulo, e o da Baía de Guanabara, no Rio de Janeiro (CHAMA NETO, 2008).

2.4 CRITÉRIOS DE PROJETO E DIMENSIONAMENTO

2.4.1 Critérios de projeto

As principais linhas de projeto utilizadas para o dimensionamento e a construção de redes de águas pluviais e de esgotos sanitários são o projeto hidráulico e o projeto estrutural. No projeto hidráulico são observados os aspectos necessários para garantir o bom desempenho funcional da rede, como a locação em planta e corte, o funcionamento das redes como conduto livre em regime permanente e uniforme, a determinação das vazões mínima e máxima, diâmetro mínimo, declividades mínima e máxima, velocidade crítica, lâmina d’água, etc., ou seja, todas as ações hidráulicas capazes de agir sobre a estrutura.

No projeto estrutural é necessário que os tubos atendam aos estados limites últimos e de serviço, que são verificados a partir dos esforços solicitantes (momento fletor, força cortante e força normal). Para isso, é necessário determinar as cargas atuantes no tubo, que podem ser permanentes ou transitórias. As cargas permanentes são: o peso próprio; a carga do solo; a

pressão do fluído dentro do tubo; as cargas produzidas por sobrecargas na superfície, em função da natureza do tráfego (rodoviário, ferroviário, aeroviário ou especial); ações por sobrecargas de construção e empuxos laterais produzidos pelo solo. Já as cargas transitórias são: as ações produzidas por equipamento de compactação durante a execução do aterro; ações produzidas por cravação; e, ações produzidas durante o manuseio, transporte e montagem do tubo (EL DEBS, 2008).

As cargas verticais devidas à massa de água transportada pelo tubo podem ser desconsideradas para tubos de diâmetro inferior a 1800 mm, mas devem ser consideradas para tubos de maiores diâmetros (AS-NZS3725, 2007). Como neste trabalho os tubos estudados são de 1000 mm de diâmetro, estas cargas não serão explicitadas.

2.4.2 Dimensionamento

A determinação das pressões sobre os tubos de concreto depende de vários fatores e a consideração de todos estes de forma razoavelmente precisa é uma atividade extremamente complexa, ainda mais quando se considerar a possível interação da estrutura com o solo. Dessa forma, foi necessário o desenvolvimento de um procedimento de projeto, para o dimensionamento dos tubos de concreto, em que estes fatores fossem levados em conta de forma mais simplificada. O procedimento em questão é denominado de procedimento de Marston-Spangler. Este procedimento engloba a determinação da resultante das cargas sobre os tubos, um ensaio de laboratório padronizado para medir a resistência do componente e o emprego de um fator de equivalência (CHAMA NETO, 2002; DE LA FUENTE; ARMENGOU, 2007; EL DEBS, 2008; FIORANELLI JR., 2005; SILVA; EL DEBS; BECK, 2008).

2.4.2.1 Cargas

Há dois tipos principais de cargas a serem consideradas no cálculo dos tubos: as cargas do solo atuantes na tubulação e as cargas móveis devido ao tráfego na superfície do terreno.

Cargas do solo

Para determinar as cargas do solo atuante sobre um tubo, o método mais usual não só no Brasil, mas também em vários outros países, para projetos de tubos de concreto enterrados é a

teoria de Marston-Spangler. Esta teoria admite como carga do solo atuante sobre um tubo (AS-NZS3725, 2007; RAMOS, 2002):

- O peso do prisma principal, ou seja, o prisma formado pelo maciço de solo diretamente em cima do tubo ($Q = b \, x \, h \, x \, \gamma$);
- O peso Q majorado pela consideração dos planos de fratura a 45° (e não mais verticais);
- O peso Q aliviado pela consideração do efeito de arco do aterro.

Essa teoria toma como ponto de partida o pressuposto de que a carga de aterro atuante sobre o tubo é a do prisma principal, majorada ou reduzida pelos efeitos das forças de atrito dos prismas adjacentes. A figura 2.1 ilustra a hipótese:

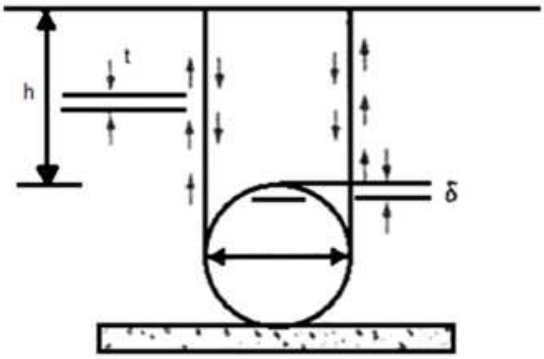


Figura 2.1 – Carga de aterro atuante sobre o tubo. (RAMOS, 2002)

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

- $\delta > t$: o que significa que o prisma principal tende a deslocar-se para baixo, em relação aos prismas adjacentes, transmitindo a este parte do seu peso, em virtude do atrito, resultando numa pressão E sobre o tubo menor que Q, $E < Q$
- $\delta = t$: o que implica ausência de atrito e, consequentemente, $E = Q$
- $\delta < t$: portanto, inversamente ao primeiro caso, $E > Q$.

Além disso, a teoria de Marston-Spangler mostra que a carga de solo atuante sobre uma canalização enterrada não depende apenas da altura do terrapleno, mas também, fundamentalmente, da forma da instalação e do assentamento do tubo. Tais fatores de instalação é que irão determinar a grandeza e direção dos recalques dos prismas já citados, ou seja, a geração de forças de atrito ou cortantes que se somarão, algebricamente, ao peso do prisma anterior (EL DEBS, 2008; FIORANELLI JR., 2005; RAMOS, 2002).

Em razão da conhecida influência das condições construtivas, as canalizações enterradas são classificadas em dois tipos principais: valas (ou trincheiras) e aterros (ou

saliência). As condições de vala ocorrem geralmente, quando o tubo é instalado numa vala relativamente estreita, aberta em terreno natural e, posteriormente reaterrada até o nível original (Figura 2.2 a, b, c). Já as condições de aterro ocorrem basicamente em dois casos. Um é quando a tubulação é diretamente assentada sobre o nível do terreno, e numa segunda etapa, aterrada; e o outro é quando as valas apresentam largura tal, que a carga sobre o tubo não é mais afetada pelo atrito aterro-parede. Podem ainda ser classificadas em aterro de projeção positiva, em que o tubo é instalado sobre a base e aterrado de forma que a sua geratriz superior esteja acima do nível natural do solo (Figura 2.2d), ou de projeção negativa, em que o tubo é instalado em vala estreita e pouco profunda, com o topo do conduto abaixo da superfície natural do terreno (Figura 2.2e) (EL DEBS, 2008; FIORANELLI JR., 2005; RAMOS, 2002).

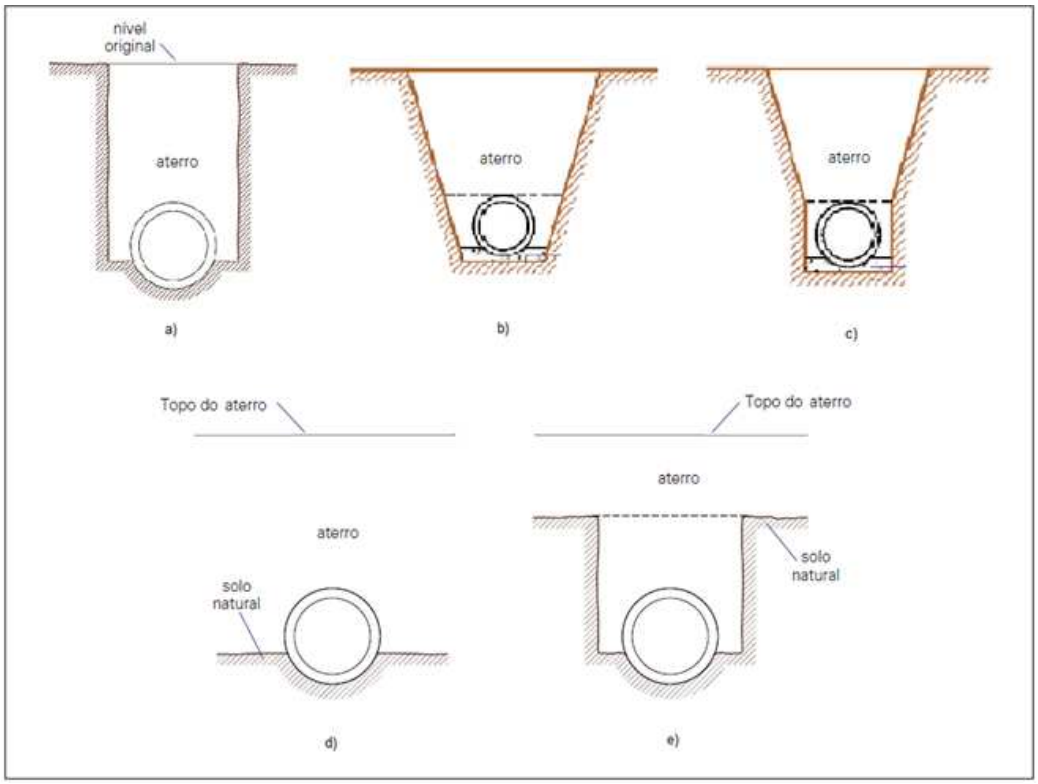


Figura 2.2 – Formas de instalação: (a) vala simples; (b) vala com paredes inclinadas; (c) vala com sub-vala; (d) aterro com projeção positiva; (e) aterro com projeção negativa. (EL DEBS, 2008)

Nos tubos instalados em vala, a tendência de deslocamento do solo da vala mobiliza forças de atrito que reduzem a carga que atua sobre o topo do tubo, ou seja, haverá uma tendência de que a carga sobre o tubo se desvie para as laterais (Figura 2.3a). Já nos tubos em aterro, pode ocorrer um aumento ou uma redução das forças atuantes sobre eles, em função da tendência de deslocamentos verticais relativos entre a linha vertical, que passa pelo seu centro e a linha vertical, que passa pelas suas laterais. Assim, se ocorrer uma tendência de

deslocamento maior nas laterais do que no centro do tubo, a carga resultante pode aumentar (Figura 2.3b). Caso contrário, pode diminuir (Figura 2.3c) (EL DEBS, 2008; FIORANELLI JR., 2005).

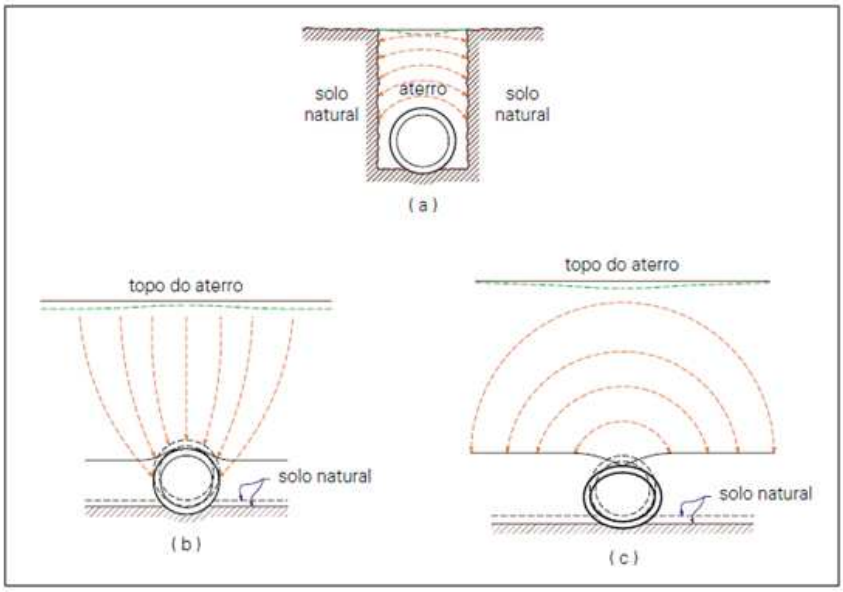


Figura 2.3 – Fluxo das tensões no solo em tubos enterrados: (a) em vala; (b) e (c) em aterro. (EL DEBS, 2008)

O assentamento inclui a forma da base e as condições de execução do aterro lateral junto à base do tubo. Quando o tubo for assentado de forma a se promover um contato efetivo em uma grande região, ou o assentamento apresentar melhores condições de realizar a compactação do solo (Figura 2.4a), as pressões na base serão distribuídas em uma região maior e, naturalmente, de menor intensidade. Além disso, as pressões agindo na lateral do tubo serão maiores devido às melhores condições de compactação do solo. Caso contrário (Figura 2.4b), as pressões na base são distribuídas numa região menor e, portanto, de maior intensidade. Analogamente ao caso anterior, as pressões laterais serão menores devido à dificuldade de compactação do aterro lateral junto à base, portanto, os momentos fletores no tubo serão mais desfavoráveis (EL DEBS, 2008).

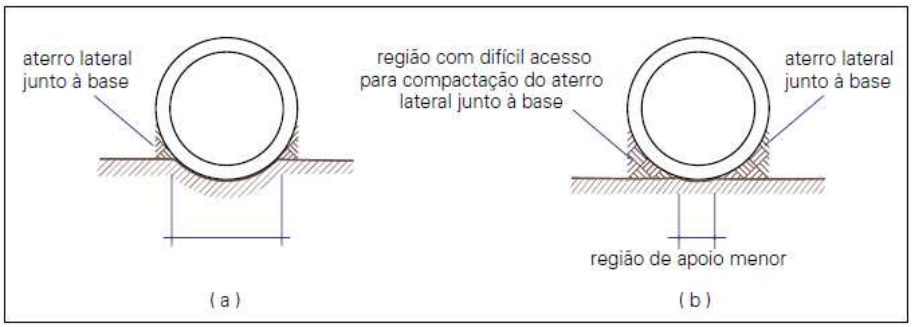


Figura 2.4 – Formas de assentamento e de condições de aterro lateral junto a base do tubo. (EL DEBS, 2008)

Admitindo os fatores acima citados e mais uma série de hipóteses complementares que possibilitaram a determinação da direção e intensidade das forças de atrito, Marston-Spangler estabeleceram a expressão:

$$Q_1 = C \times \gamma \times B^2$$

Conhecida como a Equação Geral de Marston-Spangler (EL DEBS, 2008; RAMOS, 2002).

Onde:

Q_1 = peso do aterro por unidade de comprimento;

γ = peso específico do solo do aterro;

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

C = coeficiente adimensional[1].

Cargas móveis

O cálculo das cargas móveis é feito em função da pressão no solo resultante do tráfego na superfície utilizando-se a integração de Newmark para a fórmula de Boussinesq (CHAMA NETO, 2002):

- Cargas concentradas: $Q_2 = C \times (P \times f)/L$
- Cargas distribuídas: $Q_2 = C \times q \times f \times D$

Onde:

C= coeficiente de carga;

f = fator de impacto (1,5 para rodovias; 1,75 para ferrovias; 1,00 a 1,50 para aeroportos);

q = carga concentrada aplicada na superfície do solo;

D = diâmetro externo do tubo;

L = comprimento do tubo.

Carga total

A carga total é resultante da soma da carga do solo, da carga móvel e de outras que porventura existam:

---

[1] O coeficiente adimensional é função de parâmetros como a relação entre a altura do aterro e a largura da vala (ou condutor); as forças cortantes entre os prismas principal e adjacentes e a direção e valor do recalque diferencial entre os referidos prismas, atendidas as condições particulares de aterro.

$$Q_3 = (Q_1 + Q_2 + Q_n)$$

Onde:

Q_3 = resultante das cargas atuante no tubo;

Q_1 = carga de terra;

Q_2 = carga móvel;

Q_n = outras cargas.

2.4.2.2 Determinação da resistência do tubo

Para determinar a resistência de um tubo normalmente se emprega o ensaio de compressão diametral. Dentre os vários métodos existentes deste ensaio os quatro mais conhecidos são o de três cutelos, o de dois cutelos, o do colchão de areia e o de Minnesota (Figura 2.5). Sendo que dentre estes, o mais largamente utilizado é o de três cutelos, sendo inclusive adotado pela norma brasileira NBR 8890:2007. Isto devido à simplicidade e facilidade de execução dos ensaios e principalmente pela exatidão e uniformidade dos resultados (CHAMA NETO, 2002; DE LA FUENTE; ARMENGOU, 2007; SILVA; EL DEBS; BECK, 2008).

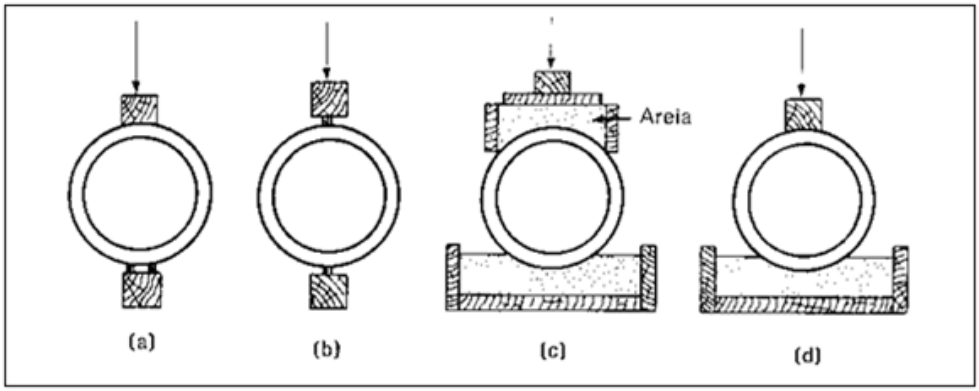


Figura 2.5 – Ensaios de determinação da resistência de um tubo: (a) três cutelos; (b) dois cutelos; (c) colchão de areia e (d) Minnesota. (CHAMA NETO, 2002).

Contudo, vale ressaltar duas considerações importantes deste método. A primeira é que o mesmo não reproduz o efeito da pressão lateral da terra e, consequentemente, o aumento da capacidade resistente do tubo que isso representa. Como o tubo de concreto é um elemento com comportamento rígido, este efeito não é tão acentuado como em tubos flexíveis, que devem parte de sua resistência à sua interação com o solo em seu processo de deformação.

Portanto, este efeito tende a ser normalmente desprezado. E a segunda é que o método considera um apoio direto sobre o tubo com apoio distribuído, o que não acontece na prática, simulando desta forma um caso de carga mais desfavorável que o real. Ambas as considerações estão a favor da segurança o que melhora o sistema de controle de qualidade dos tubos (DE LA FUENTE; ARMENGOU, 2007; SILVA; EL DEBS; BECK, 2008).

Deste modo, para levar em conta as condições reais de distribuição de cargas e os procedimentos de execução da base e da compactação lateral adjacente ao tubo, é utilizado um fator de equivalência (Fe) que é um coeficiente corretor que se aplica para aumentar a carga obtida no ensaio, reproduzindo de forma mais próxima do real a resposta do tubo "in situ". Portanto em função das condições de assentamento têm-se os seguintes fatores de equivalência para tubos em valas (CHAMA NETO, 2002; DE LA FUENTE; ARMENGOU, 2007; EL DEBS, 2008; FIORANELLI JR., 2005; SILVA; EL DEBS; BECK, 2008):

- ***Bases de concreto ou Classe A***: em que a face inferior dos tubos é assentada numa base de concreto, com $f_{ck} \geq 15{,}0$ MPa e cuja espessura, sob o tubo, deve ser de, no mínimo, 1/4 do diâmetro interno, e estendendo-se verticalmente, até 1/4 do diâmetro externo (Figura 2.6). ***Fe = 2,25 a 3,40***, dependendo do tipo de execução e da qualidade da compactação de enchimento;
- ***Bases de primeira classe ou Classe B***: em que os tubos são completamente enterrados em vala e cuidadosamente assentados sobre materiais de granulação fina, propiciando uma fundação convenientemente conformada à parte inferior do tubo, em uma largura de pelo menos 60% do diâmetro externo. A superfície restante dos tubos é envolvida, inteiramente, até a altura mínima de 30 cm acima da sua geratriz superior, com materiais granulares colocados a mão, de modo a preencher todo o espaço periférico. O material de enchimento deve ser bem apiloado, em camadas de espessura não superior a 15 cm (Figura 2.7). ***Fe = 1,90***;
- ***Bases comuns ou Classe C***: em que os tubos são colocados no fundo das valas, com bastante cuidado, sobre fundação de solo compactado para adaptar-se, perfeitamente, à parte inferior dos tubos, em uma largura mínima de 50% do diâmetro externo; sendo a parte restante envolvida, até uma altura de pelo menos 15 cm acima da geratriz superior daqueles, por material granular, colocado e socado a pá de modo a preencher os vazios (Figura 2.8). ***Fe = 1,50***;
- ***Bases condenáveis ou Classe D***: em que os tubos são assentados com pouco ou nenhum cuidado, não tendo sido preparado o solo para que a parte inferior do tubo seja apoiada

convenientemente, e deixando de encher os vazios do seu redor, ao menos parcialmente, com material granular (Figura 2.9). ***Fe = 1,10***.

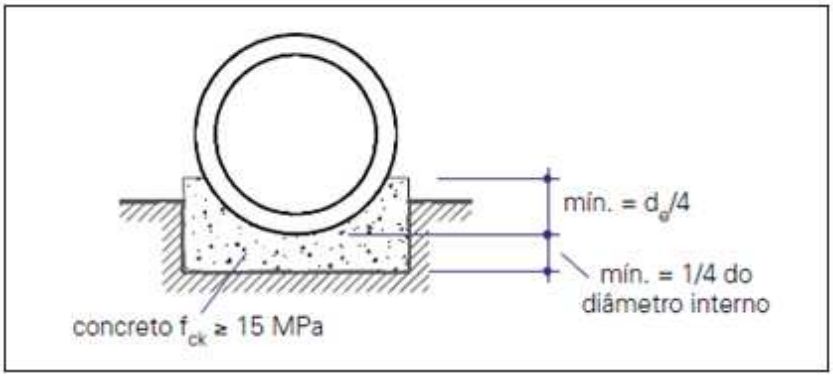


Figura 2.6 – Bases de concreto ou Classe A. (EL DEBS, 2008)

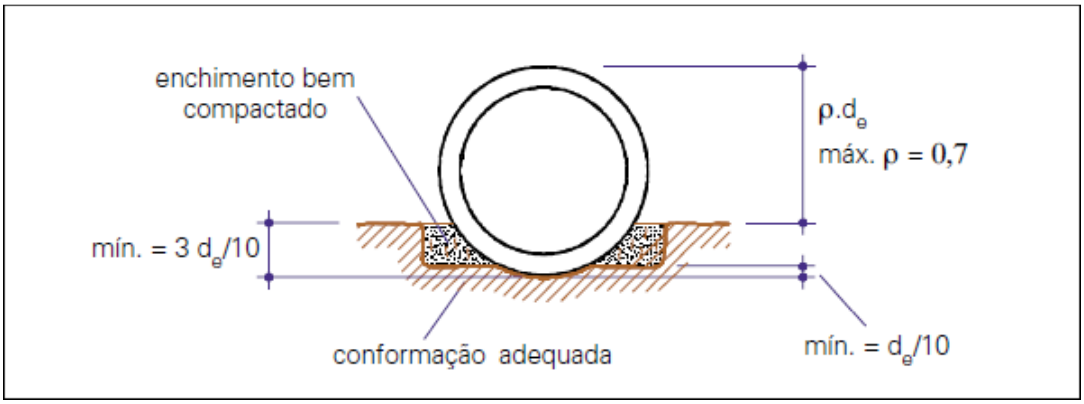


Figura 2.7 – Bases de primeira classe ou Classe B. (EL DEBS, 2008)

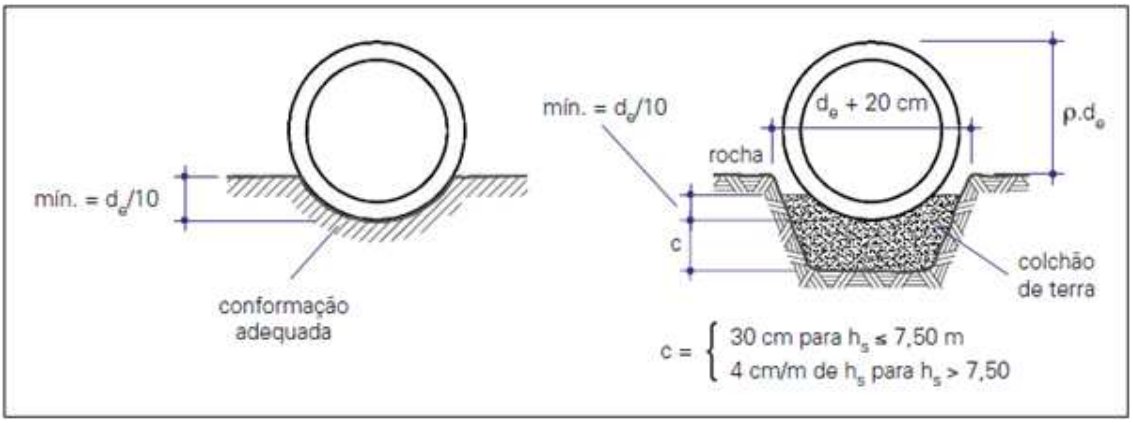


Figura 2.8 – Bases comuns ou Classe C. (EL DEBS, 2008)

Figura 2.9 – Bases condenáveis ou Classe D. (EL DEBS, 2008)

Dessa forma, em função de todos os conceitos e variáveis envolvidas no projeto e dimensionamento, e considerando-se a condição de assentamento, a força correspondente ao ensaio de compressão diametral é (CHAMA NETO, 2002; DE LA FUENTE; ARMENGOU, 2007; EL DEBS, 2008; SILVA; EL DEBS; BECK, 2008):

$$F_{ensaio} = \frac{(Q_3)}{Fe}$$

Onde:

F_{ensaio} = força correspondente ao ensaio de compressão diametral;

Q_3 = resultante das cargas atuante no tubo (carga de solo, carga móvel e outras cargas);

Fe = fator de equivalência.

2.4.2.3 Coeficiente de segurança

Após o cálculo do valor da força correspondente ao ensaio de compressão diametral devem ser empregados os coeficientes de segurança que são:

- γ_t = 1,0 para a carga de fissura (trinca);
- γ_r = 1,5 para a carga de ruptura.

A carga de fissura (trinca) corresponde à força no ensaio de compressão diametral que causa uma ou mais fissuras com abertura de 0,25 mm e de 300 mm de comprimento, ou mais. Esta condição corresponde ao estado limite de fissuração inaceitável. Já a carga de ruptura corresponde à máxima força que se consegue atingir no ensaio de compressão diametral. Esta condição corresponde ao estado limite último de ruína do tubo (CHAMA NETO, 2002; DE LA FUENTE; ARMENGOU, 2007; EL DEBS, 2008; SILVA; EL DEBS; BECK, 2008).

Dessa forma, a expressão para determinar a força no ensaio de compressão diametral pode ser colocada na forma (CHAMA NETO, 2002; DE LA FUENTE; ARMENGOU, 2007; EL DEBS, 2008; SILVA; EL DEBS; BECK, 2008):

$$F_{ensaio} = \frac{Q_3}{Fe} \times \gamma$$

Onde: γ é o coeficiente de segurança, apresentado anteriormente.

A partir do valor da carga de fissura e da carga de ruptura no ensaio de compressão diametral, pode-se especificar a classe de resistência do tubo que atende ao valor calculado, conforme a NBR 8890 (ABNT, 2007). Naturalmente, na especificação do tubo deverá ser adotada a classe correspondente à força igual ou superior àquela que resulta do cálculo, devendo atender tanto a carga mínima de fissura como a carga mínima de ruptura, conforme se encontra melhor detalhado no próximo item.

2.5 ESPECIFICAÇÃO E CONTROLE DE QUALIDADE

Os tubos de concreto devem atender às especificações da norma brasileira NBR 8890:2007 - *Tubo de concreto, de seção circular, para águas pluviais e esgotos sanitários,* que fixa os requisitos e métodos de ensaio para a aceitação de tubos de concreto simples, armado e reforçado com fibras de aço, de seção circular, destinados a condução de águas pluviais e esgotos sanitários. Esta norma apresenta, em sua maior parte, especificações similares às recomendadas pelas normas internacionais, como a européia NBN EN 1916:2002 - *Concrete pipes and fittings, unreinforced, steel fibre and reinforced*, e a australiana AS 4139:2003 – *Fibre-reinforced concrete pipes and fittings*. Dessa forma, serão descritos a seguir os itens abordados pela norma nacional e suas similaridades com as normas internacionais.

2.5.1 Especificação

2.5.1.1 Materiais

Dentre os requisitos mínimos estabelecidos para tubos de concreto, tanto a norma nacional (NBR 8890:2007) como as internacionais (NBN EN 1916:2002 e AS 4139:2003)

determinam que os materiais devem ser utilizados de acordo com a agressividade do meio, interno e externo, onde serão instalados os tubos.

Cimento

A norma brasileira (NBR 8890:2007) permite que seja utilizado qualquer tipo de cimento Portland nos tubos para águas pluviais, exceto no caso de comprovada agressividade do meio externo ao concreto, onde deve ser feita uma avaliação do grau e tipo de agressividade para definição dos parâmetros de produção do concreto. E nos tubos para esgoto sanitário, deve ser utilizado cimento resistente a sulfato. Já para as normas internacionais (NBN EN 1916:2002 e AS 4139:2003), deve-se fazer sempre um estudo da agressividade do meio independentemente da função do tubo.

Agregados

A norma nacional (NBR 8890:2007) determina que os agregados utilizados nos tubos reforçados com fibras devem atender às exigências da NBR 7211:2005, sendo sua dimensão máxima limitada a um terço da espessura da parede do tubo. Para a norma australiana (AS 4139:2003) não devem ser utilizados agregados leves e escórias não ferrosas. E para a norma européia (NBN EN 1916:2002) os agregados não devem conter componentes nocivos em quantidades que podem ser prejudiciais a moldagem, endurecimento, resistência, impermeabilidade e durabilidade do concreto, nem causar corrosão da fibra de aço.

Água

A norma brasileira (NBR 8890:2007) determina que a relação água/cimento deve ser de no máximo 0,50 L/kg para tubos destinados a águas pluviais e de no máximo 0,45 L/kg para tubos destinados a esgotos sanitários. A norma européia (NBN EN 1916:2002) determina que a relação água/cimento não deve ser superior a 0,45 para qualquer tipo de tubo. Já a norma australiana não cita uma relação água/cimento específica para tubos de concreto, ou seja, esse fator é utilizado a partir da norma genérica de fornecimento de concreto.

Aditivos

A norma nacional (NBR 8890:2007) determina que os tubos de concreto devem atender ao disposto na NBR 11768:1992 e o teor de íons de cloro no concreto não deve ser maior que 0,15%. Para norma australiana (AS 4139:2003) os aditivos não devem conter nitratos, cloretos ou outros sais fortemente ionizados, a menos que se demonstre que este não prejudique a durabilidade. Para a norma européia (NBN EN 1916:2002) o concreto não deve

conter quantidade superior a 1% de íon cloreto por massa de cimento para tubos de concreto simples e superior a 0,4% para tubos de concreto com fibras de aço ou telas de aço.

Fibras

A norma brasileira (NBR 8890:2007) só aceita atualmente a utilização de fibras de aço como reforço de tubos de concreto com consumo mínimo de 20 kg/m³ de fibra. Segundo a norma NBR 15530:2007 as fibras de aço são classificadas quanto à sua conformação geométrica em (ABNT, 2007):

- Tipo A: fibra de aço com ancoragens nas extremidades;
- Tipo C: fibra de aço corrugada;
- Tipo R: fibra de aço reta.

E quanto à sua classe, as quais foram definidas segundo o aço que deu origem às mesmas (ABNT, 2007):

- Classe I: fibra oriunda de arame trefilado a frio;
- Classe II: fibra oriunda de chapa laminada cortada a frio;
- Classe III: fibra oriunda de arame trefilado e escarificado.

Para serem usadas como reforço em tubos de concreto a norma brasileira (NBR 8890:2007) exige que as fibras de aço devam ser de aço trefilado, com resistência mínima à tração de 1000 MPa, com ancoragem em gancho e fator de forma (razão entre o comprimento e o diâmetro da fibra) mínimo de 40, ou seja, uma fibra do tipo AI. Isso porque já está comprovado em estudos anteriores (CHAMA NETO; FIGUEIREDO, 2003) que as fibras do tipo AI apresentam condição de reforço para tubos expressivamente superior em relação às fibras do tipo AII que possuem resistência à tração mais baixa.

A norma européia (NBN EN 1916:2002) só aceita a utilização das fibras de aço com consumo mínimo de 25 kg/m³de fibra. Estas devem ser fabricadas a partir de fio de aço trefilado, com resistência à tração não inferior a 1000 MPa. Além disso, devem apresentar forma e/ou textura da superfície que assegure a sua fixação mecânica no concreto.

Já a norma australiana (AS 4139:2003) permite a utilização de outros tipos de fibras além da fibra de aço, tais como a fibra de celulose, fibras plásticas e fibras de vidro. Além disso, nenhuma restrição adicional é colocada na escolha do tipo de fibra, suas combinações, suas proporções no produto acabado, ou no método de fabricação do tubo, exceto que os tubos fabricados com estes materiais devem cumprir os requisitos da referida norma.

Apesar da norma australiana já permitir o uso de outros tipos de fibra como reforço no tubo de concreto, pode-se observar que não existe um bom controle de qualidade, já que os fabricantes podem usá-las nas proporções e para as funções que quiserem, sem ao menos verificar a adequação da fibra quanto à durabilidade ao meio em que estará exposta.

2.5.1.2 Ensaio de compressão diametral

O método de ensaio utilizado, tanto no Brasil como internacionalmente, para a verificação da adequação do desempenho mecânico dos tubos de concreto para águas pluviais e esgoto é o de compressão diametral pelo método de três cutelos (descrito no capítulo 4).

O procedimento do ensaio de compressão diametral especificado na norma australiana (AS 4139:2003) para todos os tipos de tubos sejam eles simples, armados ou reforçados com fibras, é o mesmo apresentado na norma brasileira (NBR 8890:2007) e na européia (NBN EN 1916:2002) para tubos de concreto simples, sendo que para a norma australiana o ensaio deve ser feito em um pedaço do tubo com comprimento de 300 ± 5 mm, enquanto que nas outras duas normas o ensaio é feito no tubo inteiro.

O ensaio em tubos de concreto simples especificado pela norma brasileira e européia consiste na aplicação de uma carga com taxa de variação constante até a ruptura do tubo, determinando-se a carga máxima suportada, que deve ser superior à carga mínima especificada na norma para tubos simples, conforme a Tabela 2.1. Porém, quando o tubo é armado ou reforçado com fibras, a norma brasileira e a européia adotam um procedimento mais completo, o que as tornam mais rigorosas e precisas que a australiana.

Tabela 2.1 - Compressão diametral de tubos simples. (NBR 8890:2007)

Diâmetro nominal	***Água pluvial***		***Esgoto sanitário***
DN (mm)	***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
Carga diametral de ruptura (kN/m)			
Qd	40	60	90
Qd = carga de fissura ou carga de ruptura/DN * 1000			

O procedimento de ensaio dos tubos de concreto armado é o mesmo para a norma brasileira (NBR 8890:2007) e européia (NBN EN 1916:2002), diferindo apenas no procedimento experimental a ser utilizado no método de ensaio para determinação da carga de fissura. De acordo com estas normas, o tubo armado com vergalhões ou telas de aço é submetido a um carregamento contínuo até a sua ruptura, e se exige apenas a determinação da carga de fissura e da carga de ruptura, que é a máxima atingida durante a realização do ensaio.

Pela norma brasileira, a carga de fissura é atingida quando a lâmina padrão (0,2 mm de espessura, 12,7 mm de largura e afinada na ponta para 1,6 mm) consegue penetrar 1,6 mm em pequenos intervalos de 300 mm ao longo da fissura gerada pelo carregamento. Já pela norma européia, a carga de fissura é igual a dois terços da carga especificada na norma não podendo apresentar fissuras maiores do que 0,3 mm ao longo de um comprimento contínuo de 300 mm ou mais. Ambos os métodos de ensaio apresentam uma concepção simplista, o que não permitem avaliar o comportamento mecânico da peça, ficando restrito apenas à verificação da conformidade do componente ao requisito especificado. Isto porque apenas a carga de ruptura é um parâmetro confiável, já que a carga de fissura é sempre um parâmetro duvidoso, pois depende muito da sensibilidade e acuidade do técnico responsável pela realização do ensaio. Dessa forma, para que a avaliação do comportamento mecânico tenha maior precisão é necessário utilizar um controle simultâneo de carga e deslocamento diametral.

Para os tubos com fibras, a norma brasileira (NBR 8890:2007) define que os mesmos sejam considerados como tubo armado, ou seja, reforçados com fibras, podendo ser utilizados nas mesmas condições que tubos de concreto com vergalhões ou telas de aço, e por isso ambos apresentam a mesma classificação (Tabela 2.2). No entanto, os tubos com fibras não devem ser utilizados no lugar de tubos convencionalmente armados sem prévia qualificação específica. Isto porque, o procedimento de ensaio especificado tanto pela norma brasileira (NBR 8890:2007) como pela norma européia (NBN EN 1916:2002) para a verificação de conformidade do desempenho do tubo de concreto reforçado com fibras é mais completo e preciso. Neste ensaio são determinadas a carga mínima isenta de dano e a carga de ruptura, que correspondem à carga de fissura e de ruptura dos tubos armados, respectivamente.

Inicialmente o tubo deve suportar uma carga equivalente a dois terços da carga de ruptura especificada para sua classe durante um minuto, sem apresentar fissuras (carga mínima isenta de dano). A carga deve ser aumentada até a sua ruptura (carga de ruptura) que deve ser maior que a especificada na norma para sua classe. Após a carga aplicada cair para 95% da carga máxima, o tubo é totalmente aliviado reduzindo sua carga a zero, e em seguida,

reaplica-se a carga equivalente à carga mínima isenta de dano mantendo-a por mais um minuto. Neste momento o ensaio é considerado encerrado para a norma européia, enquanto para a norma brasileira o tubo é novamente carregado até a carga máxima (carga máxima pós-fissuração) devendo ser, no mínimo, 5% superior à carga mínima isenta de dano. Neste procedimento a observação do laboratorista encarregado do exame do tubo é feita com a devida tranqüilidade e a constatação da ocorrência de fissura é um procedimento muito mais simples do que a medida de sua abertura. Assim, o procedimento fica muito menos sujeito à subjetividade do julgamento do laboratorista ou mesmo de sua falta de habilidade.

Tabela 2.2 - Compressão diametral de tubos armados e/ou reforçados com fibras de aço. (NBR 8890:2007)

Diâmetro nominal DN (mm)	***Água pluvial***								***Esgoto sanitário***					
	Carga mínima de fissura ou carga isenta de dano (kN/m)				***Carga mínima de ruptura (kN/m)***				***Carga mínima de fissura ou carga isenta de danos (kN/m)***			***Carga mínima de ruptura (kN/m)***		
Classe	PA1	PA2	PA3	PA4	PA1	PA2	PA3	PA4	EA2	EA3	EA4	EA2	EA3	EA4
300	12	18	27	36	18	27	41	54	18	27	36	27	41	54
400	16	24	36	48	24	36	54	72	24	36	48	36	54	72
500	20	30	45	60	30	45	68	90	30	45	60	45	68	90
600	24	36	54	72	36	54	81	108	36	54	72	54	81	108
700	28	42	63	84	42	63	95	126	42	63	84	63	95	126
800	32	48	72	96	48	72	108	144	48	72	96	72	108	144
900	36	54	81	108	54	81	122	162	54	81	108	81	122	162
1 000	40	60	90	120	60	90	135	180	60	90	120	90	135	180
1 100	44	66	99	132	66	99	149	198	66	99	132	99	149	198
1 200	48	72	108	144	72	108	162	216	72	108	144	108	162	216
1 500	60	90	135	180	90	135	203	270	90	135	180	135	203	270
1 750	70	105	158	210	105	158	237	315	105	158	210	158	237	315
2 000	80	120	180	240	120	180	270	360	120	180	240	180	270	360
Carga diametral de fissura/ruptura (kN/m)														
Qd	40	60	90	120	60	90	135	180	60	90	120	90	135	180

Qd = carga de fissura ou carga de ruptura/DN * 1000

Carga mínima de fissura é para tubos armados e carga isenta de dano é para tubos reforçados com fibras

Dessa forma as normas (NBR 8890:2007 e NBN EN 1916:2002) acabaram sendo mais rigorosas com os tubos reforçados com fibras, os quais devem suportar a carga de fissura do tubo convencionalmente armado sem apresentar qualquer tipo de dano, o que não deixa de ser interessante pelo fato de se estar introduzindo uma nova tecnologia no mercado, o que demanda certa cautela. Apesar de se prever uma maior durabilidade para os tubos de concretos com fibras do que para os convencionalmente armados devido ao fato das fibras

serem mais resistentes à corrosão eletrolítica, esta postura conservadora da norma irá cooperar para uma maior durabilidade dos sistemas executados com esta nova tecnologia (FIGUEIREDO; CHAMA NETO, 2008).

Além disso, para a norma nacional o uso de concreto com fibras é restrito a tubos com diâmetro nominal igual ou inferior a um metro. Isto foi adotado no sentido de se minimizar riscos de aplicação, os quais são maiores para as redes coletoras de maiores dimensões. As etapas do ensaio de compressão diametral em tubos reforçados com fibras serão detalhadas no capítulo 4.

2.5.1.3 Ensaio de absorção de água

O procedimento do ensaio de absorção de água é similar para as três referidas normas (NBR 8890:2007, NBN EN 1916:2002 e AS 4139:2003). De acordo com a norma nacional, para a realização do ensaio de absorção de água são extraídas duas amostras sendo uma na região da ponta e outro na região da bolsa, dos mesmos tubos ensaiados à compressão diametral. Os corpos-de-prova devem ser secos em estufa com temperatura mantida no intervalo de (105 ± 5) ºC, 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 (M_0). Os corpos-de-prova já secos devem ser colocados em recipientes apropriados, imersos em água potável e devem ser levados à ebulição (100ºC) e mantidos a água em fervura por cinco horas. Completada esta etapa, deixar os corpos-de-prova esfriar junto com a água em seus respectivos recipientes até a temperatura ambiente. Determinar e registrar a massa com auxílio de balança hidrostática (M_2). Em seguida, retirá-los da água, secá-los superficialmente por meio de toalha, pano úmido ou papel absorvente e pesá-los imediatamente (M_1). O índice de absorção de água é dado por:

$$A = \frac{M_1 - M_0}{M_0} \times 100$$

Onde:

A: é o índice de absorção de água em porcentagem;

M_0: é a massa do corpo-de-prova seco, em gramas;

M_1: é a massa do corpo-de-prova após ensaio saturado, em gramas.

A norma nacional especifica que os tubos para utilização em redes de águas pluviais devem apresentar uma absorção de água máxima de 8%, e aqueles utilizados em esgotos sanitários de 6%. A norma européia determina que a absorção não deve ser superior a 6% para todos os tipos de tubos e a australiana diz que a absorção não deve diferir em mais do que 10% do especificado pelo fabricante. Ou seja, mais uma vez a norma australiana apresenta menor rigor no processo de avaliação da qualidade do tubo produzido, pois a mesma não impõe limites na absorção máxima de água permitida no tubo que está produzindo, deixando a critério do fabricante.

2.5.1.4 Ensaio de permeabilidade e estanqueidade

O ensaio objetiva a determinação da permeabilidade dos tubos e da estanqueidade elástica entre os tubos quanto à passagem de água nas condições do ensaio. O procedimento deste ensaio é similar para as três normas (NBR 8890:2007, NBN EN 1916:2002 e AS 4139:2003).

De acordo com a norma nacional, no ensaio de tubos de concreto com junta elástica tanto para águas pluviais como para esgoto sanitário são utilizadas duas amostras, que não foram utilizadas no ensaio de compressão diametral. Os tubos são acoplados um ao outro (Figura 2.10), utilizando anel de vedação e em seguida são submetidos ao ângulo de deflexão especificado na Tabela 2.3. Os tubos são cheios de água e concomitamente eleva-se de modo gradual e constante a pressão da água até 0,05 e 0,10 MPa mantendo-se nesta pressão por 15 e 30 minutos, para tubos destinados a águas pluviais e esgoto sanitário, respectivamente. Durante o ensaio os tubos não podem apresentar vazamentos, presença de gotas aderentes e manchas de umidade nas paredes.

Nos tubos com junta rígida para águas pluviais não é necessário que se faça este ensaio, mas caso o comprador exija, é feito em apenas um tubo e não deve apresentar qualquer vazamento durante 15 minutos do ensaio.

Figura 2.10 – Ensaio de permeabilidade e estanqueidade da junta

Tabela 2.3 - Ângulo de deflexão. (NBR 8890:2007)

Diâmetro nominal DN (mm)	***Ângulo de deflexão***	***Valor da flecha correspondente ao ângulo de deflexão (mm)***		
		Comprimento útil do tubo 1,00 m	***Comprimento útil do tubo 2,00 m***	***Comprimento útil do tubo 2,50 m***
300	1º 40'	29	58	72,5
400	1º 40'	29	58	72,5
500	1º 00'	17	34	42,5
600	1º 00'	17	34	42,5
700	0º 50'	14	29	35
800	0º 50'	14	29	35
900	0º 45'	13	26	32,5
1 000	0º 45'	13	26	32,5
1 100	0º 30'	09	18	22,5
1 200	0º 30'	09	18	22,5
1 300	0º 30'	09	18	22,5
1 500	0º 30'	09	18	22,5
1 750	0º 30'	09	18	22,5
2 000	0º 30'	09	18	22,5

2.5.2 Controle de qualidade

De acordo com a NBR 8890:2007, os tubos devem ser agrupados de modo a formar lotes com até 100 peças, considerando-se o mesmo diâmetro, classe e acessórios ou limitada à produção de no máximo 15 dias, com numeração sequencial. As amostras no lote apresentado devem ser escolhidas de forma aleatória, sendo necessária a coleta de dois tubos no caso de águas pluviais com junta rígida e quatro tubos no caso de águas pluviais com junta elástica ou esgoto sanitário.

Na inspeção visual o comprador deve verificar em 100% do lote (NBR 8890:2007):

- Se os tubos apresentam as superfícies internas e externas regulares e homogêneas, não devendo apresentar defeitos visíveis a olho nu ou detectáveis através de percussão;
- Se existem fibras aparentes na superfície interna e na ponta do tubo (não permitidas), podendo apenas apresentar fibras aparentes na superfície externa do tubo;
- Se existem retoques com nata de cimento ou com outros materiais (não permitidos);
- Se as bolhas ou furos superficiais existentes apresentam diâmetros ≤ 10 mm e profundidade ≤ 5 mm e fissuras com abertura ≤ 0,15 mm.

A norma NBN EN 1916:2002 também só permite fissuras com aberturas de até 0,15 mm, já a norma AS 4139:2003 permite fissuras com abertura entre 0,10 e 0,30 mm e ainda permite dentes e protuberâncias em qualquer superfície do tubo de até 3 mm e que se estenda até 50 mm. Isto mostra que a norma nacional se mantém bem similar à européia e que a australiana é, em geral, menos rigorosa.

A avaliação dimensional especificada pela NBR 8890:2007 deve ser feita na amostra retirada para a realização do ensaio de compressão diametral, cujas dimensões medidas estão contidas na Figura 2.11, devendo atender às especificações para cada tipo de tubo apresentadas nas Tabelas 2.4 e 2.5. Além disso, o comprimento útil não deve diferir em mais de 20 mm (para menos) nem mais de 50 mm (para mais) em relação ao comprimento declarado. Para a AS 4139:2003 a diferença entre o comprimento indicado pelo fabricante e o real deve ser de no máximo ± 15 mm e para a NBN EN 1916:2002 o comprimento útil do tubo não pode exceder seis vezes o seu diâmetro externo. O que mostra que tanto a norma australiana como a norma européia são mais rigorosas neste item do que a norma nacional.

A NBR 8890:2007 determina que a espessura da parede do tubo não pode diferir em mais de 5% ou 5 mm (adotar o menor valor) em relação à espessura declarada e, o diâmetro interno médio não deve diferir mais de 1% do diâmetro nominal. Já a AS 4139:2003 especifica que a espessura da parede do tubo não deve variar em mais do que ± 10% em relação à espessura declarada e, o diâmetro interno médio não deve diferir em ± 3 mm para diâmetro nominal ≤ a 300 mm, ± 5 mm para diâmetro nominal > 300 mm e ≤ 600 mm e ± 7 mm para diâmetro nominal > 600 mm e ≤ 1200 mm. Nestes aspectos evidencia-se maior rigor da norma nacional em relação à australiana.

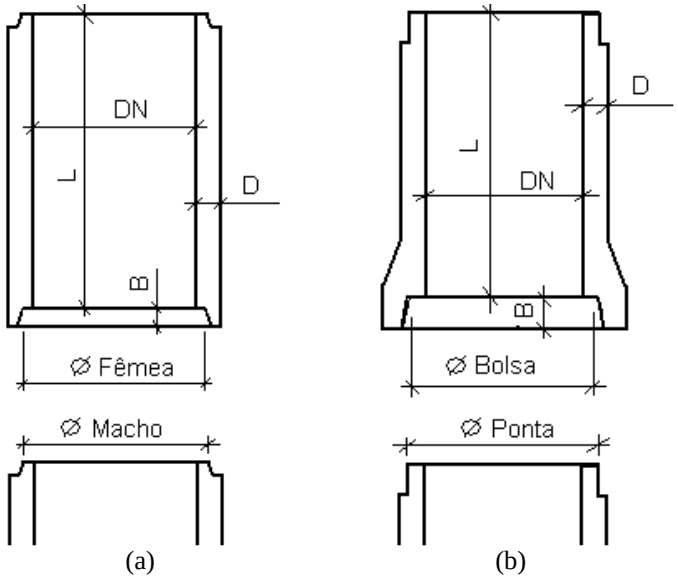


Figura 2.11 – corte longitudinal: (a) tubo de concreto macho e fêmea; (b) tubo de concreto ponta e bolsa. (NBR 8890:2007)

Tabela 2.4 - Dimensões dos tubos destinados a águas pluviais com encaixe ponta e bolsa e macho e fêmea. (NBR 8890:2007)

Diâmetro nominal DN (mm)	***Comprimento útil mínimo do tubo L (mm)***		***Comprimento mínimo da bolsa ou da Fêmea B (mm)***		***Folga máxima do encaixe C (mm)***	***Espessura mínima de parede D (mm)***	
	Ponta e Bolsa	***Macho e Fêmea***	***Ponta e Bolsa***	***Macho e Fêmea***		***Simples***	***Armado***
200	1 000	950	50	20	30	30	-
300	1 000	950	60	20	30	30	45
400	1 000	950	65	20	30	40	45
500	1 000	950	70	20	40	50	50
600	1 000	950	75	20	40	55	60
700	1 000	950	80	35	40	-	66
800	1 000	950	80	35	40	-	72
900	1 000	950	80	35	40	-	75
1 000	1 000	950	80	35	40	-	80
1 100	1 000	950	80	35	50	-	90
1 200	1 000	950	90	35	50	-	96
1 300	1 000	950	90	35	50	-	105
1 500	1 000	950	90	35	60	-	120
1 750	1 000	950	100	35	60	-	140
2 000	1 000	950	100	35	60	-	180

Tabela 2.5 - Dimensões dos tubos destinados a esgotos sanitários e águas pluviais com junta elástica. (NBR 8890:2007)

Diâmetro nominal DN (mm)	***Comprimento útil mínimo do tubo L (mm)***	***Comprimento mínimo da bolsa B (mm)***	***Espessura mínima de parede D (mm)***
200	2 000	50	45
300	2 000	60	50
400	2 000	65	50
500	2 000	70	55
600	2 000	75	65
700	2 000	80	70
800	2 000	80	80
900	2 000	80	85
1 000	2 000	80	90
1 100	2 000	80	100
1 200	2 000	90	100
1 300	2 000	90	115
1 500	2 000	90	120
1 750	2 000	100	150
2 000	2 000	100	180

E finalmente são efetuados os ensaios, que a NBR 8890:2007 especifica que sejam realizados em função do tipo de junta utilizada entre os tubos. Se os tubos forem dotados de junta elástica, seja para esgotos sanitários ou águas pluviais, a amostra de tubos deve ser submetida a:

- Ensaio de compressão diametral, que verifica se a classe de resistência do tubo de concreto atende às especificações de projeto conforme as Tabelas 2.1 e 2.2;
- Ensaio de permeabilidade e estanqueidade, que verifica a qualidade do sistema (tubo + junta) quando submetidos à pressão, simulando a situação de serviço. Não podendo apresentar nem vazamento nas juntas e nem manchas de umidade nas paredes do tubo;
- Ensaio de absorção, que verifica a qualidade do tubo quanto à durabilidade.

Já quando os tubos são dotados de junta rígida, a amostra de tubos será submetida apenas ao ensaio de compressão diametral e de absorção. O ensaio de permeabilidade poderá ser executado, caso o comprador venha a exigir.

A NBN EN 1916:2002 determina que o ensaio de absorção deve ser feito pelo menos uma vez no mês; o de compressão diametral, 1 tubo para cada 500 produzidos, mas não inferior a 4 por ano para tubo simples e reforçado com fibras e 1 para cada 250 tubos produzidos, mas não inferior a 2 por ano para tubo armado; e o de estanqueidade um par de

tubos para cada 1000 produzidos, mas não menos que um par por ano. Já a AS 4139:2003 determina que para qualquer um destes ensaios deve ser feito pelo menos 1 a cada dois anos.

A partir destas comparações, fica evidente que o controle de qualidade da norma brasileira (NBR 8890:2007) é similar ao da norma européia (NBN EN 1916:2002), e que a norma australiana (AS 4139:2003) apresenta o maior nível de particularidades em relação às demais. Além disso, quanto ao tubo de concreto destinado a esgoto, pode-se observar que, na maioria dos requisitos, a norma brasileira é mais rigorosa que as outras duas e com isso possibilita a produção de tubos de melhor qualidade. No entanto, quanto ao tubo de concreto destinado a águas pluviais, a norma brasileira permite uma absorção de até 8%, que pode permitir que tubos de menor qualidade sejam aceitos, enquanto que a norma européia fixa este valor em 6%, sendo mais rigorosa que a nacional o que garante melhor qualidade dos tubos. Apesar disso, ainda existem dúvidas quanto à representatividade da amostra ensaiada por ser tão reduzida (2 tubos para cada 100 produzidos) em relação ao lote que está sendo julgado.

Dentre todos os aspectos necessários ao controle de qualidade dos tubos, o ensaio de compressão diametral é o principal elemento para realizar a avaliação de desempenho mecânico dos tubos com diferentes tipos de fibras, o que o torna o foco principal deste trabalho. No estudo experimental deste trabalho, o ensaio de compressão diametral será realizado utilizando controle de deslocamentos diametrais por meio de extensômetros elétricos de resistência. Isto possibilitou a obtenção das cargas isenta de dano e de ruptura determinadas graficamente e vinculadas a um determinado deslocamento, o que aumenta a confiabilidade dos resultados e do poder de análise.

3. CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS

Tendo em vista que o foco da presente dissertação está voltado para a análise comparativa do desempenho de fibras de aço e macrofibras poliméricas como reforço de tubos de concreto, considera-se necessário revisar, de forma genérica, como funciona a interação fibra-matriz e analisar como as características de cada um destes elementos afetam as propriedades do compósito resultante.

3.1 CONDIÇÕES GERAIS

O concreto é um material de construção versátil e pode ser aplicado com grande eficiência em tubos de concreto para águas pluviais e esgotos devido a uma série de características que lhe propiciam esta condição. No entanto, este material apresenta algumas limitações como o comportamento marcadamente frágil, ou seja, apresenta pequena capacidade de deformação antes da ruptura quando submetido à tração (FIGUEIREDO, 2008b).

Como característica geral dos materiais frágeis, o concreto possui resistência à tração muito menor que à compressão (FIGUEIREDO, 2008b). Isso se deve ao fato do concreto ser um material que, antes de qualquer solicitação, já possui microfissuras, vazios e descontinuidades (METHA; MONTEIRO, 1994). Algumas destas descontinuidades são formadas na zona de transição agregado-pasta, outras decorrentes da própria mistura do material, com a inclusão de bolhas de ar, ou ainda decorrentes de tensões internas induzidas pela retração restringida da pasta de cimento pelos agregados. O fato é que estas descontinuidades são iniciadoras e concentradoras de fissuras, quando do carregamento do material (NUNES, 2006).

Quando comprimido, um elemento de pasta de cimento com uma descontinuidade ainda tem capacidade de transmitir tensões através desta (Figura 3.1a). Já tracionado, este elemento não oferece resistência à separação ao longo da superfície livre de descontinuidade, não transmitindo tensões nesta superfície e concentrando-as nas porções livres (Figura 3.1b). Como resultado, a descontinuidade propaga-se na direção transversal à direção das tensões, aumentando sua superfície livre e concentrando mais tensões, o que provoca nova propagação de descontinuidade, num processo que culmina na união de várias descontinuidades, formando fissuras, que se propagam da mesma maneira, unindo-se em fissuras maiores até

atingir um estado de fissuração instável, onde as fissuras propagam-se rapidamente sem nenhum acréscimo de energia, conduzindo à ruptura (NUNES, 2006).

Logo, a ruptura à tração é causada por algumas fissuras que se unem e não por numerosas fissuras, como ocorre quando o concreto é comprimido (METHA; MONTEIRO, 1994).

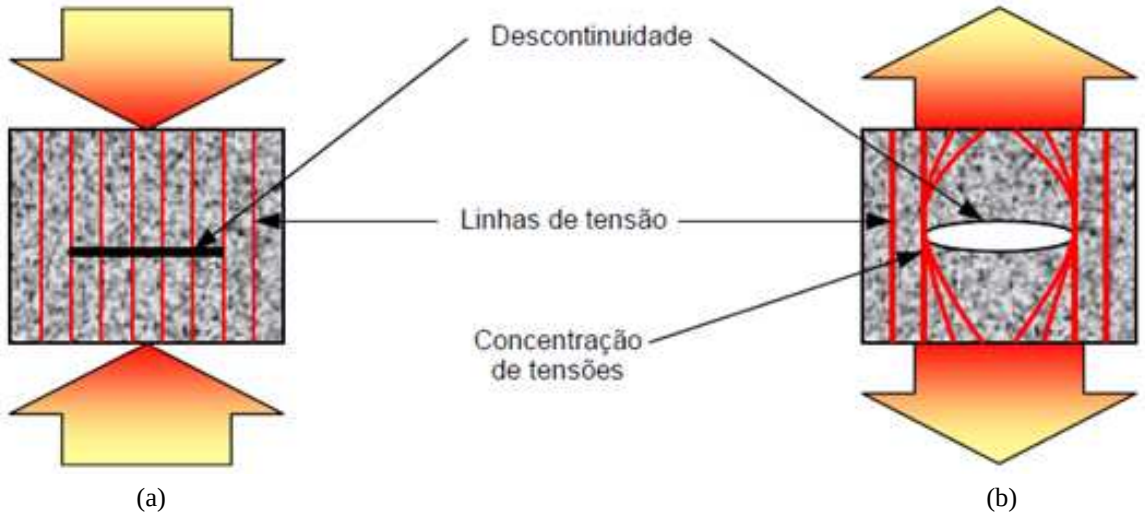


Figura 3.1 – Modelo simplificado de transmissão de tensões em um elemento de pasta de cimento: (a) elemento comprimido; (b) elemento tracionado. (NUNES, 2006)

3.2 O COMPÓSITO E A INTERAÇÃO FIBRA-MATRIZ

Concreto reforçado com fibras pode ser definido como compósito, ou seja, material constituído de, pelo menos, duas fases distintas principais. O próprio concreto endurecido sem fibras já é um compósito cujas fases principais são a pasta, os poros e os agregados. No entanto, consideram-se como fases principais do concreto com fibras o próprio concreto, denominado matriz, e as fibras, que podem ser produzidas a partir de diferentes materiais, como aço, vidro, polipropileno, náilon, etc (FIGUEIREDO, 2000).

No caso do concreto simples (Figura 3.2), uma fissura irá representar uma barreira à propagação de tensões, representadas simplificadamente pelas linhas de tensão. Esse desvio das linhas de tensão irá implicar numa concentração de tensões nas extremidades da fissura e, no caso dessa tensão superar a resistência da matriz, ocorrerá a ruptura abrupta do material, ou seja, não se poderá mais contar com uma capacidade resistente do concreto fissurado (FIGUEIREDO, 2005).

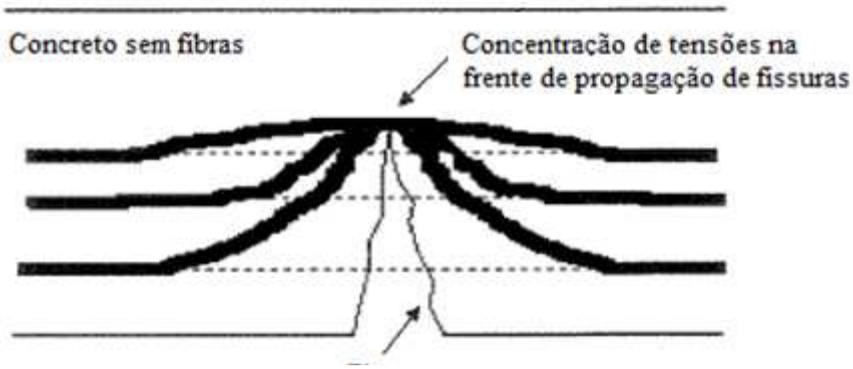


Figura 3.2 – Propagação de fissuras e concentração de tensões. (RAMOS, 2002)

Quando se adicionam fibras de resistência e módulo adequado ao concreto num teor apropriado, este material deixa de ter o caráter marcadamente frágil, ou seja, passada a carga de fissura o compósito continua recebendo carregamento mesmo que seja relativamente inferior a esta carga. Isto ocorre porque as fibras atuam como ponte de transferência de tensões pelas fissuras, minimizando a concentração de tensões nas extremidades das mesmas (Figura 3.3). Com isto, tem-se uma redução da velocidade de propagação e da abertura das fissuras. Então, o material passa a ter um comportamento pseudo-dúctil ou não frágil, ou seja, apresenta certa capacidade resistente pós-fissuração, o que faz com que o compósito suporte deformações maiores do que as sustentadas pelo concreto simples. Assim, com a utilização de fibras, será assegurada menor fissuração e maior absorção de energia, ou seja, maior tenacidade (RAMOS, 2002).

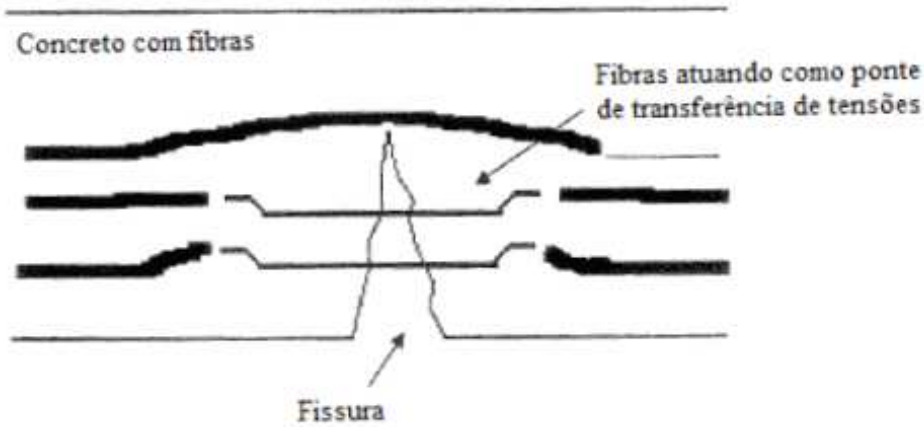


Figura 3.3 – Mecanismo de controle de propagação das fissuras. (RAMOS, 2002)

Este fato pode vir a recomendar sua utilização mesmo para tubos convencionalmente armados, como uma armadura complementar para reduzir a fissuração do material. Além disso, com a contribuição estrutural obtida pela adição das fibras, é possível reduzir significativamente a armadura convencional. Dessa forma, é muito frequente a utilização de

fibras no concreto que, além de reduzir as limitações do material, trazem uma série de vantagens práticas para sua aplicação (BLANCO et al., 2010).

Uma das vantagens do reforço proporcionado pelas fibras é o fato de estas se distribuírem aleatoriamente no material, reforçando toda a peça, e não uma determinada posição, como ocorre com as armaduras convencionais. Este aspecto é até mais relevante para o caso dos tubos de concreto por possuírem pequena espessura de parede em relação às estruturas convencionais. Como as armaduras com telas ou vergalhões exigem um recobrimento mínimo para sua proteção, acaba-se por concentrar o reforço junto ao centro da parede, próximo à linha neutra. Isto reduz a capacidade de reforço da armadura, principalmente para baixos níveis de fissuração e deformação do tubo, que é a condição prática mais importante para a garantia da vida útil do componente (FIGUEIREDO, 2008b).

Quando da utilização das fibras, acaba-se por distribuí-las em todo o conjunto, não sendo necessário se preocupar com um recobrimento mínimo, pois as mesmas são mais resistentes à corrosão. Com isto, as fibras acabam por apresentar um maior nível de desempenho quanto ao reforço dos tubos submetidos a baixos níveis de deformação e/ou fissuração (FIGUEIREDO, 2008b).

Outra vantagem, é que ao substituir as telas de aço por fibras, obtêm-se uma redução considerável no tempo total de produção dos tubos, pela maior facilidade de preenchimento da forma e também há uma redução na mão-de-obra, graças à eliminação do processo de produção das telas (DE LA FUENTE; ARMENGOU, 2007).

Além disso, mesmo quando utilizadas em baixos teores, as fibras representam um acréscimo na resistência à fissuração do concreto, pelo fato das mesmas atuarem como reforço em todo o volume de concreto do tubo, inclusive nas bordas do mesmo. Assim, as mesmas acabam por aumentar a energia absorvida pelo material podendo ser verificado uma redução de perdas do concreto, ou seja, a utilização das fibras em baixos teores reduz consideravelmente o número de perdas na fabricação, manuseio, armazenamento, transporte e aplicação (FIGUEIREDO; CHAMA NETO, 2006).

Dessa forma, pode-se encarar o reforço com fibras como uma variante tecnológica muito interessante para a produção de tubos de concreto. Porém, o comportamento do concreto com fibras deve ser bem compreendido, pois como qualquer outra tecnologia, apresenta limitações e precisa de certos cuidados específicos.

A mistura deficiente das fibras ao concreto e a utilização de matriz de baixa qualidade, especialmente para doses elevadas de fibras, pode causar uma dispersão não-uniforme das

mesmas na matriz e provocar a segregação e embolamento das fibras, o que reduz a resistência e durabilidade do concreto. Para altas taxas de carregamento e deformações, o reforço somente das fibras em determinadas situações não é suficiente e por isso é necessário adicionar armadura convencional, o que torna o componente mais caro (GARCIA, 2006).

Além disso, nem todas as fibras proporcionam uma resistência residual ao concreto, o que torna a escolha da fibra uma tarefa de grande responsabilidade. Ademais, a dosagem da fibra sem critérios analíticos pode conduzir a resultados piores que os esperados em termos de controle de fissuras e durabilidade, ou ainda conduzir a um consumo de fibras superior ao necessário, desperdiçando recursos e maximizando os problemas relativos à aplicação, decorrentes de uma dosagem exagerada (NUNES, 2006).

Assim, a compreensão da interação entre as fibras e a matriz é necessária para estimar a contribuição das fibras no desempenho do compósito e prever o seu comportamento. Esta interação é influenciada pelos seguintes parâmetros:

- Material que compõe as fibras, incluindo suas resistências e módulos de elasticidade;
- Geometria da fibra: mecanismo de ancoragem, fator de forma (relação l/d), comprimento.
- Teor de fibra incorporado;
- Orientação da fibra;
- Resistência e módulo de elasticidade da matriz.

3.2.1 Tipos de fibras

Existem diferentes tipos de fibras que podem ser utilizadas como reforço do concreto cuja escolha é função das características que se deseja do compósito. As fibras podem ser classificadas em: sintéticas como as poliméricas, as de nylon e aramida; silicatos cristalinos como o amianto, as de aço e de vidro; e as vegetais, como as de celulose, sisal, juta, coco, etc.

As fibras de vidro e as de vegetais necessitam de tratamento especial para não sofrerem deterioração em função do ataque de álcalis do cimento, o que reduz a durabilidade do compósito, sendo as sintéticas e as de aço as mais empregadas para o reforço do concreto (PINTO JR., 2005).

Dessa forma, neste estudo as fibras estudadas serão as poliméricas e as de aço.

3.2.1.1 Fibras de aço

As fibras de aço já possuem norma Nacional de especificação que é a NBR 15530:2007 - *fibras de aço para concreto - especificação*, e já estão previstas como único reforço na norma brasileira de tubos de concreto NBR8890:2007.

São bastante empregadas como reforço do concreto por apresentarem uma grande vantagem sobre os outros tipos de fibras, devido a sua alta resistência à tração e grande capacidade de aderência à matriz que a envolve. Tais fibras podem ser facilmente deformadas melhorando sua capacidade de aderência, o que contribui para o aumento da tenacidade do compósito (BENTUR; MINDESS, 1990).

As fibras de aço são filamentos descontínuos que podem ser obtidas por diferentes métodos, numa variada gama de formas, dimensões e tipos de aço. Possuem comprimentos variando de 25 a 60 mm e diâmetros de 0,5 a 1 mm, ou seja, apresentam fator de forma entre 30 e 80. Podem ser fornecidas soltas ou coladas em pentes, o que facilita o processo de mistura e homogeneização do material (FIGUEIREDO; CHAMA NETO; FARIA, 2008). Ramos (2002) utilizou fibras coladas em pente e soltas e, conclui que os tubos reforçados com fibras coladas apresentam maior tenacidade que os reforçados com fibras soltas para os mesmos teores incorporados, sendo resultado da distribuição mais uniforme das fibras na matriz, do maior fator de forma e comprimento das fibras coladas.

Há três tipos de fibras de aço normalizadas pela NBR 15530:2007 (FIGUEIREDO; CHAMA NETO; FARIA, 2008):

- Fibra de aço corrugada: produzida a partir do fio chato que sobra da produção da lã de aço, de comprimento entre 25 e 50 mm e conformada longitudinalmente para se obter o formato corrugado, cujo objetivo é melhorar a aderência da fibra com a matriz. Sua vantagem é o baixo custo e a pouca interferência na consistência do concreto;
- Fibra de aço retangular com ancoragem: produzida a partir de chapas de aço que são cortadas na largura da fibra e, conformadas de modo a obter o formato desejado da ancoragem em gancho. Seu objetivo é especificamente reforçar o concreto.
- Fibra de aço circular com ancoragem na extremidade: produzida a partir de fios trefilados progressivamente até se chegar ao diâmetro desejado. Com isto, acabam por apresentar uma maior resistência mecânica (dado o seu encruamento), a qual pode ser ainda maior quando da utilização de aço com maior teor de carbono.

Um fator fundamental para o bom desempenho da fibra no tubo de concreto é a resistência do aço que lhe deu origem. No estudo de Chama Neto (2002) ficou comprovada a superioridade de desempenho das fibras de aço produzidas a partir do corte de fios de aço trefilado que, naturalmente, apresentam resistências à tração superiores a 1000 MPa. No referido estudo também foram utilizadas fibras de aços provenientes do corte de chapas de aço que não conseguiram elevados níveis de fissuração. Por isto é exigência da norma NBR 8890:2007 a resistência mínima de 1000 MPa para as fibras de aço que venham a ser utilizadas no reforço de tubos de concreto.

3.2.1.2 Microfibras poliméricas e macrofibras poliméricas

As fibras poliméricas são classificadas em dois tipos básicos, em função do processo de fabricação: monofilamentos e fibriladas. As fibras chamadas de monofilamentos são macrofibras produzidas individualmente em cilindros contínuos, que podem ser cortados em comprimentos específicos (MANOLIS et al., 1997). Já as fibriladas constituem-se em microfibras agrupadas formando uma malha de finos filamentos de secção transversal retangular, que se abrem durante a mistura com o concreto, diminuindo o impacto da adição da fibra neste momento. Dessa forma, há um aumento na adesão entre a fibra e a matriz, dado o intertravamento por elas proporcionado, com isto tem-se um aumento da capacidade de reforço para um mesmo volume de fibras adicionado ao concreto (PINTO JR., 2005).

As microfibras poliméricas, como as de polipropileno, já são utilizadas no concreto há um bom tempo, sendo produzidas a partir de polipropileno de baixo módulo de elasticidade. Sua aplicação tradicional não tinha função estrutural, apenas objetivava promover um maior controle da fissuração nas primeiras idades ou proporcionar a proteção passiva do concreto durante incêndio (FIGUEIREDO; TANESI; NINCE, 2002).

As microfibras poliméricas quando adicionadas ao concreto reduzem a migração da água para a superfície do concreto fresco e sua consequente evaporação. Além disso, aumentam a capacidade de deformação elástica do concreto fresco, visto que nesta condição a matriz encontra-se com níveis baixos de resistência mecânica apresentando módulo de elasticidade similar ao das fibras. Com isto, resulta numa redução da fissuração nas primeiras idades do concreto, ou seja, da retração plástica e também da retração por secagem, pois reduzem a evaporação da água (BAYASI; DHAHERI, 2002).

Segundo Naaman, Wongtanakitcharoen e Hauser (2005), em concretos reforçados com microfibras poliméricas, expostos às condições de ambiente de calor e vento, as fissuras por retração estabilizam-se cerca de 7 a 9 horas após o lançamento do concreto, o que comparando com o concreto sem fibras é muito favorável, já que seria necessário um período de até 24 horas.

No caso de incêndios, com a elevação brusca da temperatura ocorre a evaporação da água que satura os poros do concreto nas suas camadas mais superficiais. Com isso o vapor não encontra caminho de escape gerando tensões internas elevadas. Além disso, a face exposta ao calor se dilata ao mesmo tempo em que é restringida pelas camadas internas, o que incrementa as tensões. Esse aumento de tensões leva ao lascamento do revestimento do concreto que acaba por expor as camadas mais internas, gerando destacamentos progressivos do concreto (FIGUEIREDO; TANESI; NINCE, 2002).

Ao adicionar microfibras poliméricas, que apresentam baixa temperatura de fusão, as mesmas derretem criando canais que facilitam a saída do vapor de água, aliviando a pressão interna e ajudando a retardar a destruição do concreto (BRANDT, 2008).

Já as macrofibras poliméricas surgiram no mercado internacional nos anos 1990 quando começaram a ser fornecidas em cilindros que consistiam em feixes de um grande número de fibras unidos por uma fita externa, sendo suas primeiras aplicações com o concreto projetado, especialmente na Austrália e no Canadá (MORGAN; RICH, 1996). Aos poucos esta tecnologia se disseminou e chegou ao Brasil em anos mais recentes.

Atualmente, existem vários fabricantes que disponibilizam diferentes tipos de macrofibras no mercado brasileiro. No entanto, ao contrário do que se espera das fibras poliméricas convencionais, estas macrofibras são produzidas para se obter um reforço estrutural, nos mesmos moldes que uma fibra de aço. Apesar do uso crescente das macrofibras poliméricas e de alguns trabalhos já terem sido desenvolvidos no Brasil, trata-se de um material de disponibilidade recente e que tem a análise de sua capacidade de reforço pós-fissuração dificultada pela instabilidade pós-pico. A soma destes fatores ao reduzido volume de pesquisas específicas faz com que ainda não exista uma normalização técnica na área (FIGUEIREDO, 2010). Assim, estudos experimentais como o desenvolvido nesta dissertação têm a possibilidade de aprofundar na análise de desempenho destas fibras sem os inconvenientes apresentados. Isto ocorre pelo fato de utilizar um ensaio conduzido em um componente estrutural, ou seja, mais próximo das condições de aplicação. Com isto, pode-se fornecer subsídios para a futura parametrização do uso deste tipo de fibra.

O uso das macrofibras poliméricas pode ser interessante pelo fato das mesmas não estarem sujeitas à corrosão eletrolítica, o que possibilita uma maior durabilidade em ambientes mais agressivos em relação às fibras de aço (FIGUEIREDO, 2010).

Outro fator interessante está no menor impacto que estas fibras causam na trabalhabilidade do concreto pelo fato delas serem mais flexíveis que as fibras de aço. Com isto, as macrofibras dificultam menos a mobilidade relativa dos agregados. Todavia, a maior flexibilidade, devido ao menor módulo de elasticidade, em conjunto com a menor resistência irá demandar teores em volume diferentes daqueles utilizados para o reforço do concreto com fibras de aço, o que pode prejudicar a fluidez do material. Além disso, quando o concreto é reforçado com macrofibras poliméricas, a determinação da tenacidade torna-se mais complexa, o que dificulta o seu controle e dosagem (FIGUEIREDO, 2010).

Assim, para realizar a substituição da fibra de aço pela macrofibra polimérica é necessário realizar estudos de dosagem específicos.

3.2.2 Resistência e módulo de elasticidade das fibras

O módulo de elasticidade e a resistência mecânica são as duas propriedades mais importantes na definição da capacidade de reforço que a fibra proporciona ao concreto. As fibras que possuem módulo de elasticidade inferior ao do concreto endurecido são chamadas de fibras de baixo módulo. Já as fibras que possuem módulo de elasticidade superior ao do concreto são conhecidas como fibras de alto módulo (FIGUEIREDO, 2000).

Para ilustrar esse aspecto, foi produzido o esquema da Figura 3.4. Nele se apresenta uma matriz hipotética reforçada com três tipos de fibras, uma de baixo módulo de elasticidade e duas de alto módulo, sendo uma de baixa e outra de alta resistência mecânica. Todas as fases foram consideradas como de comportamento elástico perfeito. A curva de tensão por deformação da matriz está representada pela linha O-A, enquanto as linhas O-B e O-C representam o trabalho elástico das fibras de alto módulo com alta e baixa resistência, respectivamente. O comportamento da fibra de baixo módulo se encontra representado pela linha O-D (FIGUEIREDO, 2000; PINTO JR., 2005).

No momento em que a matriz se rompe (ponto A) e transfere a tensão para a fibra de baixo módulo (ponto D) esta apresenta uma tensão muito baixa nesse nível de deformação, devendo ser intensamente deformada para garantir o mesmo nível de tensão. Logo, essa fibra apresentará uma baixa capacidade de reforço pós-fissuração ou permitirá uma grande

deformação do compósito com um consequente elevado nível de fissuração (ponto E). Isto ocorreria supondo-se que a fibra de baixo módulo tenha resistência mecânica suficiente para atingir o nível de tensão associado ao ponto E, porém não é o que acontece (FIGUEIREDO, 2000; PINTO JR., 2005).

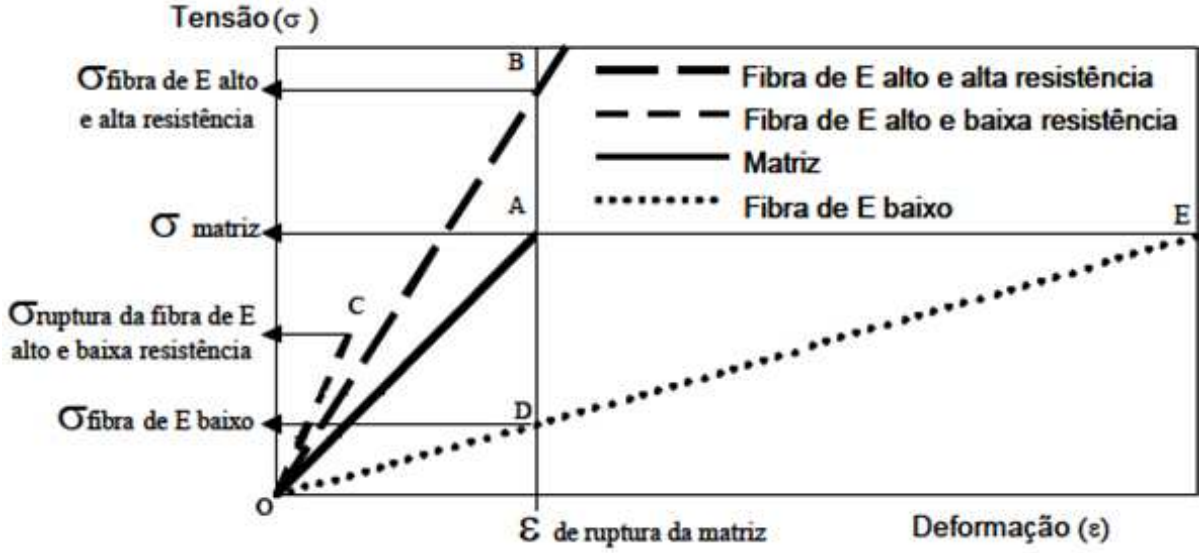


Figura 3.4 – Diagrama de tensão por deformação elástica de matriz e fibras de alto e baixo módulo de elasticidade trabalhando em conjunto. (FIGUEIREDO, 2000)

Normalmente as fibras de baixo módulo apresentam também menor resistência mecânica (Tabela 3.1). Devido a isso, os teores dessas fibras, medidos em volume, devem ser muito elevados para possibilitar o reforço da matriz, o que pode inviabilizar a aplicação do material (FIGUEIREDO, 2005).

Por outro lado, a fibra de alto módulo de elasticidade apresentará um elevado nível de tensão no momento da ruptura da matriz, o que lhe permitirá atuar como um reforço, já a partir do ponto B, caso sua resistência não seja superada, o que é muito freqüente quando se utiliza um baixo consumo de fibras. Por outro lado, mesmo que uma fibra tenha elevado módulo de elasticidade, mas tenha uma baixa resistência à tração ou ao cisalhamento, sua capacidade de reforço pós-fissuração também será reduzida ou até inexistente (FIGUEIREDO, 2005; PINTO JR., 2005).

Observando-se a linha 0-C da Figura 3.4, pode-se constatar que, no momento em que ocorre a ruptura da matriz (ponto A), serão superadas as tensões resistentes das fibras ou ultrapassado seu limite último de deformação. Qualquer que seja a situação haverá a ruptura das fibras, ou seja, quando a matriz se romper, as fibras já terão sido rompidas e não conferirão nenhum tipo de reforço. Essa preocupação é importante, pois a base do

desempenho dos concretos reforçados com fibras está no papel exercido pelas fibras de ponte de transferência de tensão pelas fissuras (FIGUEIREDO, 2005).

Tabela 3.1 - Valores de resistência mecânica e módulo de elasticidade para diversos tipos de fibra e matrizes. (BENTUR; MINDESS, 1990)

Material	***Módulo de elasticidade (GPa)***	***Resistência à tração (GPa)***
Aço	190 – 210	0,5 - 2,0
Vidro	70 – 80	2,0 – 4,0
Amianto	160 – 200	3,0 - 3,5
Polipropileno	1,0 - 7,7	0,5 - 0,75
Kevlar	65 – 133	3,6
Carbono	230	2,6
Nylon	4,0	0,9
Celulose	10	0,3 - 0,5
Acrílico	14 - 19,5	0,4 - 1,0
Polietileno	0,3	$0,7 \times 10^{-3}$
Fibra de madeira	71	0,9
Sisal	-	0,8
Matriz de cimento (para comparação)	10 – 45	$3,7 \times 10^{-3}$

Pode-se concluir que as fibras que possuem alta resistência e alto módulo de elasticidade, como as fibras de aço, atuam como um reforço do concreto endurecido, e por isso são as mais indicadas para o reforço de tubos de concreto para águas pluviais e esgotos que, pela elevada exigência de durabilidade, devem apresentar elevada compacidade e, consequentemente, elevada resistência mecânica podendo até substituir a armadura convencional com equivalência de desempenho. Já as fibras de baixa resistência e baixo módulo de elasticidade, como as fibras poliméricas, só são eficientes quando a resistência e o módulo de elasticidade do concreto também são baixos, isto é, no estado fresco e no início de seu processo de endurecimento, e por isso só poderiam ser utilizadas para o reforço de tubos caso fossem modificadas no sentido de se elevar tanto o seu módulo de elasticidade como sua resistência mecânica (CHAMA NETO; FIGUEIREDO, 2003).

Vale ressaltar, que as macrofibras poliméricas, por terem sido recentemente incorporadas ao mercado, não estão classificadas nem mesmo indicadas em trabalhos importantes como o de Bentur e Mindess (1990) e Manolis et al. (1997), que consideram as fibras de polipropileno como exclusivamente de baixo módulo, ou seja com módulo de elasticidade em torno de 2 GPa. Porém, atualmente já se encontram no mercado fibras poliméricas com módulo de elasticidade em torno de 10 GPa, e por isso são consideradas

fibras de alto módulo, denominadas de macrofibras. É com a adição destas macrofibras no concreto que este trabalho pretende atingir desempenho semelhante ao do concreto com fibras de aço.

3.2.3 Geometria da fibra

3.2.3.1 Mecanismo de ancoragem

O desempenho pós-fissuração do concreto depende muito da geometria da fibra que está sendo utilizada. A transferência de tensão da matriz para a fibra ocorre por combinação de dois mecanismos básicos: transferência elástica e transferência por atrito.

A transferência elástica é dominante na etapa de pré-fissuração do compósito, que é utilizado para prever o limite de proporcionalidade e a tensão de primeira fissura do compósito. Nesta etapa, as tensões de cisalhamento na interface fibra-matriz não superam o limite de resistência ao cisalhamento, ou seja, a matriz e a fibra estão aderidas entre si e, consequentemente, não há deslocamentos relativos entre fibra e matriz. Até este ponto a fibra não atua como ponte de transferência de tensões através da fissura (BENTUR; MINDESS, 1990).

Após a fissuração da matriz, o mecanismo de transferência de tensões passa gradualmente de elástico para o mecanismo por atrito. A tensão de cisalhamento por aderência elástica supera a resistência ao cisalhamento na interface fibra/matriz, provocando o início do descolamento da fibra. Com o deslocamento relativo entre a fibra e a matriz, o mecanismo de transferência de tensões passa a ser somente por atrito (BALAGURU; SHAH, 1992).

As tensões de cisalhamento desenvolvidas por atrito são uniformemente distribuídas ao longo da interface fibra-matriz. Nesta etapa ocorre efetivamente a transferência de tensões por atrito das fibras enquanto sofrem um processo de arrancamento ou ruptura que demanda uma quantidade extra de energia para deformação e ruptura do compósito, proporcionando uma maior tenacidade (BENTUR; MINDESS, 1990).

No caso das fibras deformadas ou com ancoragem em gancho, além dos mecanismos já mencionados, existe também o mecanismo de transferência de tensões pela ancoragem

mecânica da fibra na matriz, que é devida às deformações ou ganchos existentes nas fibras (CHAMA NETO, 2002).

Como as macrofibras poliméricas, em geral, não apresentam deformações ou ganchos, o mecanismo de atuação das mesmas é predominantemente de transferência de tensões por atrito, já as fibras de aço, na sua grande maioria, possuem ganchos e por isso apresentam os três mecanismos (FIGUEIREDO, 2010).

3.2.3.2 Fator de forma

O fator de forma ou relação de aspecto é um parâmetro que consiste na relação entre o comprimento da fibra e o diâmetro da circunferência cuja área seja equivalente à da seção transversal da fibra. Assim, ao se aumentar o comprimento ou reduzir a seção transversal da fibra, o valor do fator de forma será maior.

Um maior fator de forma pode significar tanto uma melhora na resistência ao arrancamento da fibra, pelo aumento do comprimento de ancoragem, como uma redução no espaçamento entre fibras, consequentemente, maior será o número de fibras atuando como ponte de transferência de tensões, o que resulta numa maior capacidade resistente após a fissuração do concreto. No entanto, se o comprimento da fibra for aumentado demais, ou se a resistência da matriz aumentar muito, a fibra deixará de escorregar em relação à matriz com o progressivo aumento da abertura da fissura. Neste caso, a força de atrito entre a fibra e a matriz aumentará muito, o que conduzirá à ruptura da fibra e, consequentemente, haverá uma baixa ou nula capacidade resistente após a fissuração do material (FIGUEIREDO, 2008b).

Além disso, quanto maior for o fator de forma, maior será também a influência da fibra na perda de fluidez do material (item 3.2.7).

3.2.3.3 Comprimento

O comprimento da fibra é considerado um fator de eficiência do reforço devido à sua correlação com a resistência de atrito, parâmetro indispensável para a condição pós-fissuração do compósito, uma vez que a transmissão de tensões por atrito fibra-matriz é o mecanismo que governa a transferência de esforços após a fissuração da matriz. Dessa forma, quanto maior for a extensão de fibra inserida na matriz, maior será a resistência de atrito durante o

seu arrancamento a qual está diretamente relacionada com a energia de fratura (SILVA, 2006).

Em geral, o comprimento da fibra deve ser igual ou superior ao dobro da dimensão máxima característica do agregado utilizado no concreto para que haja uma compatibilidade dimensional entre agregados e fibras, de modo que possibilite a atuação da fibra como reforço do concreto, ou seja, de modo que as fibras interceptem com maior freqüência a fissura que ocorre no compósito. Isto é importante pelo fato da fratura se propagar preferencialmente na região de interface entre o agregado graúdo e a pasta para concretos de baixa e moderada resistência mecânica (FIGUEIREDO, 2005).

Quando não há a compatibilidade, poucas fibras trabalham como ponte de transferência de tensões na fissura. Em casos onde não é possível aumentar o comprimento da fibra em função de restrições de ordem prática, é necessário reduzir o diâmetro máximo do agregado para manter a compatibilidade dimensional (FIGUEIREDO, 2005; PINTO JR., 2005).

Um exemplo que pode ilustrar esse conceito é o trabalho de Haktanir, et al. (2007) que conclui que as fibras de aço longas são mais eficientes nos tubos de concreto do que as fibras curtas e, portanto, a segunda não deve ser utilizada na produção de tubos de concreto com diâmetro superior a 500 mm.

3.2.4 Teor de fibra incorporado

É consenso que o teor de fibras incorporado na matriz possui grande influência na tenacidade dos concretos reforçados com fibras, pois o aumento do consumo de fibras adicionadas à matriz melhora a capacidade resistente pós-fissuração para o caso do concreto convencional (BENTUR; MINDESS, 1990; FIGUEIREDO, 1997; FIGUEIREDO, 2010; NUNES, 2006; TIGUMAN, 2004). Naturalmente, este comportamento não deve ser muito diferente no caso dos tubos de concreto.

Um conceito importante para entender o comportamento do compósito é o associado ao volume crítico de fibras, o qual pode ser definido como aquele para o qual a capacidade portante residual do compósito fissurado é a mesma da matriz. Este parâmetro é diretamente proporcional à resistência da matriz, a qual determina a tensão de aparecimento da primeira fissura, pois dependendo do nível de tensões suportado pela mesma após a sua ruptura, haverá um maior ou menor nível de carregamento das fibras, em função da transferência de tensões da matriz para as fibras. Se a resistência da matriz aumenta, maior é o volume crítico de

fibras, ou seja, maior teor de fibras será necessário para manutenção da capacidade portante do compósito (FIGUEIREDO, 1997).

O volume crítico também é função da tensão de ruptura da fibra e seu módulo de elasticidade, sendo inversamente proporcional, ou seja, quanto menor o módulo de elasticidade da fibra maior será o volume crítico para que se obtenha um desempenho equivalente (FIGUEIREDO, 1997).

À medida que se eleva o teor de fibras, aproximando-se do volume crítico, a resistência residual pós-fissuração do compósito cresce, perdendo as características de fragilidade típicas de matrizes cimentíceas. Isto porque o aumento da quantidade de fibras faz com que ocorra um aumento da quantidade de pontes de transferência de tensões nas fissuras, reduzindo a abertura das mesmas, como também o aumento da quantidade de fibras a serem arrancadas, ou seja, o gasto de energia para a deformação plástica da fibra e o arrancamento da mesma da matriz será maior. Vale ressaltar, que o ganho de desempenho pós-fissuração não é diretamente proporcional ao aumento do teor de fibra, ou seja, se o teor de fibra dobrar não significa que o ganho de desempenho também dobrará (FIGUEIREDO, 2000).

Entretanto, se for utilizado um volume acima do volume crítico, o ganho de desempenho do concreto não é mais significante podendo até prejudicar o comportamento pós-fissuração em função dos problemas de compactação e heterogeneidade da mistura, decorrentes da grande quantidade de fibras presentes no compósito (NUNES, 2006).

Haktanir, et al. (2007) utilizou um tipo de fibra de aço (comprimento de 60 mm, fator de forma 80 e resistência à tração 1000 MPa) em tubos de concreto de 500 mm de diâmetro e concluiu que o teor ideal de fibras de aço deve ser em torno 25 kg/m^3. Observou também que o aumento do teor de fibras de aço de 25 kg/m^3 para 40 kg/m^3, apresentou melhorias insignificantes na resistência e na fissuração dos tubos de concreto. Verificou que a resistência à compressão diametral dos tubos de concreto no ensaio de três cutelos, com teor de fibras de aço de 25 kg/m^3 é maior cerca de 10% em relação aos tubos de concreto armado com tela metálica e, para o mesmo teor, os tubos apresentaram menor abertura das fissuras com a adição de fibras em relação ao tubo armado.

Fugii (2008) realizou ensaios utilizando 10, 15, 20, 25 e 30 kg/m³ de fibras de aço em tubos de concreto, e concluiu que apenas os teores de 20 e 25 kg/m³ poderiam ser comercializados, pois foram os únicos que completaram o plano de carregamento em 100% dos tubos ensaiados, segundo as exigências da norma, sendo necessários estudar melhor os demais teores.

Ramos (2002) utilizou um tipo de fibra longa e um de fibra curta em tubos de concreto e observou um crescimento da ductilidade dos tubos com o aumento do teor de fibras de aço, sendo os tubos com fibras curtas com teor incorporado de 30 kg/m³ os que apresentaram melhor desempenho, mostrando comportamento muito semelhante aos tubos armados.

De La Fuente et al. (2010a) concluíram que a adição de fibras de aço em dosagens de até 40 kg/m³ permite eliminar totalmente a armadura convencional em tubos com diâmetro máximo de 600 mm para todas as classes resistentes. Para os tubos de diâmetro acima de 600 mm até 1500 mm concluíram que a melhor alternativa é utilizar armadura mista (tela e fibras), já que a adição de fibras permitiu eliminar a armadura externa e diminuir em até 50% a armadura interna para a mesma quantia de fibras. Já para tubos de diâmetro superior a 1500 mm, não foi possível a substituição de nenhuma das malhas da armadura convencional (interior ou exterior) pelas fibras metálicas. De igual modo observaram que dosagens de fibras superiores a 40 kg/m^3 são pouco atrativas do ponto de vista econômico e podem não ser tecnicamente viáveis com os sistemas de produção atualmente disponíveis.

Chama Neto (2002) fez ensaios utilizando dois tipos de fibra de aço (tipo A - comprimento de 60 mm, fator de forma 80 e resistência à tração 1000 MPa; tipo B - comprimento de 49 mm, fator de forma 47 e resistência à tração 770 MPa) nos teores de 10, 20 e 40 kg/m³. Verificou que na dosagem de 10 kg/m^3 os tubos reforçados com fibras não atenderam ao valor mínimo de ruptura prescrito por norma para tubos classe A2 chegando até a apresentar ruptura frágil no caso da fibra tipo B. Já com os teores de 20 e 40 kg/m^3 os tubos atenderam ao valor mínimo prescrito por norma, porém muito próximo do limite, exceto no caso dos tubos reforçados com a fibra tipo A na dosagem de 40 kg/m^3 que ficou aproximadamente 15% e 31% acima do valor mínimo de carga de trinca e de carga de ruptura prescrito por norma para tubos armados, respectivamente. Ou seja, o melhor desempenho encontrado nesse estudo foi para a fibra de aço tipo A na dosagem de 40 kg/m³.

3.2.5 Orientação da fibra

A orientação das fibras é um fator de grande importância no desempenho dos concretos com fibras, que influencia não só na distribuição destas na matriz como também na resistência do compósito.

A distribuição das fibras está diretamente ligada ao fator de forma da fibra e ao volume de fibras na matriz, pois em um mesmo volume de fibras no compósito, quanto maior o fator

de forma, menor será o espaçamento entre elas, consequentemente, maior será a quantidade de fibras por unidade de volume do compósito, o que significa maior probabilidade de uma fissura ser interceptada por uma fibra nesta unidade de volume (NUNES, 2006).

No caso da resistência do compósito, quanto mais orientadas as fibras estiverem em relação ao sentido da tensão principal de tração, isto é, perpendicular à superfície de fissuração principal, maior será a quantidade de fibras atuando como ponte de transferência de tensões nas fissuras, consequentemente, maior será o seu desempenho quanto à resistência pós-fissuração (BENTUR; MINDESS, 1990). Este fator pode ser função do comprimento da fibra e, no caso dos tubos, da espessura da parede. Isto porque, fibras mais longas em conjunto com uma menor espessura da parede, possibilitam um maior alinhamento das mesmas em relação às paredes do tubo de concreto durante sua moldagem.

Além disso, as fibras frágeis poderão aumentar a perda de eficiência relativa à sua inclinação em relação ao plano de ruptura, pois apesar de absorverem uma quantidade muito maior de energia para um dado deslocamento em relação às fibras alinhadas, o nível de tensão de cisalhamento a que estão submetidas também é muito maior, o que favorece a uma maior probabilidade de ruptura das fibras. Ou seja, se a fibra não for capaz de se deformar plasticamente, de modo a se alinhar ao esforço principal, acabará rompendo-se por cisalhamento (FIGUEIREDO, 2008b).

Dessa forma, as fibras dúcteis, que apresentam deformação plástica, causam um gasto energético adicional à medida que se flexionam através das fissuras. Por outro lado, um aumento de carga de arrancamento proporcionada pela flexão das fibras pode provocar tensões superiores à resistência da fibra quebrando-a (NUNES, 2006).

3.2.6 Resistência e módulo de elasticidade da matriz

A matriz é constituída de um esqueleto sólido e poros, sendo que o principal componente do esqueleto sólido é o silicato de cálcio hidratado (C-S-H) que, no concreto, age como uma ponte entre os agregados graúdos e miúdos componentes do esqueleto (METHA; MONTEIRO, 1994).

A natureza da matriz é caracterizada pela sua microestrutura e, consequentemente, pelas suas propriedades mecânicas. Esses dois fatores são parâmetros fundamentais para a eficiência do compósito, visto que a microestrutura da matriz, associada com as características da fibra irá influenciar na característica da interface fibra-matriz, conferindo um grau de

aderência da fibra com a matriz, enquanto a propriedade mecânica da matriz influencia na condição de funcionalidade do reforço (SILVA, 2006).

Para concretos com baixa relação água/cimento, como os tubos de concreto, o volume e o tamanho dos vazios na zona de transição serão maiores do que na matriz nas primeiras idades, portanto a zona de transição é menos resistente. Com o aumento da idade a resistência da zona de transição pode se tornar igual ou mesmo maior do que a resistência da matriz (METHA; MONTEIRO, 1994).

A microestrutura da região de interface entre a fibra e a matriz é diferente daquela do restante da pasta, tal qual a zona de transição pasta-agregado. Isto porque, as partículas de cimento se hidratam e reagem formando partículas coloidais de C-S-H e grandes cristais de hidróxido de cálcio (CH) (BENTUR; MINDESS, 1990).

Com isto, ocorre a formação de espaços preenchidos com água ao redor das fibras devido à exsudação interna e ao empacotamento ineficiente dos grãos de cimento em torno da superfície da fibra. Como consequência, a relação água/cimento nas mediações da fibra é maior e, portanto mais porosa será a matriz nas vizinhanças da fibra do que no restante (BENTUR; MINDESS, 1990).

Além disso, há uma maior quantidade de cristais grandes de CH, que são orientados perpendicularmente à superfície da fibra, criando uma zona preferencial de clivagem. Tudo isto contribui para que a resistência da matriz na interface fibra-matriz seja menor, influenciando o processo de perda de aderência, importante no mecanismo de transferência de tensões. Já que nos concretos reforçados com fibras a maior parte do trabalho total desenvolvido para que ocorra a ruptura do compósito é função da energia dissipada para a ruptura da aderência entre fibras e matriz e o posterior arrancamento dessas fibras (BENTUR; MINDESS, 1990).

Quando temos um menor teor de fibra e, simultaneamente, uma maior resistência da matriz, o desempenho da fibra é nitidamente reduzido. Isto se justifica pelo fato do número de fibras presente na seção de ruptura ser reduzido, assim, quando a resistência da matriz é maior, transfere um elevado nível de tensão para as fibras no momento de sua ruptura, provocando escorregamento e ruptura das fibras. Por outro lado, com o aumento do teor de fibras e consequentemente do número de fibras presente na seção de ruptura, a tensão absorvida por cada uma delas no momento em que a matriz se rompe é menor. Com isto, diminui-se o número de rupturas e escorregamento das fibras, consequentemente aumenta-se o desempenho do compósito quanto à tenacidade (FIGUEIREDO, 1997).

Dessa forma, para matrizes de maior resistência mecânica, deve-se lançar mão de duas alternativas para se garantir o mesmo nível de desempenho quanto à tenacidade: ou se utiliza um maior teor de fibras, ou se empregam fibras com elevada aderência ao compósito para minimizar o efeito de ruptura das mesmas no momento em que a matriz lhes transfere a tensão (FIGUEIREDO, 2000).

Para garantir a aderência fibra-matriz e consequentemente aumentar a resistência da matriz nesta interface, é preciso ter uma cura adequada, dosagem adequada da matriz e, quando necessário, utilizar aditivos minerais e de materiais poliméricos (BENTUR; MINDESS, 1990).

Segundo Miller (2008) o módulo de elasticidade é geralmente obtido a partir da inclinação da curva tensão-deformação resultante de um ensaio de compressão axial. Seu valor depende tanto de condições de ensaio como das características da mistura. As condições de ensaio englobam as condições de exposição durante o armazenamento, grau de saturação do corpo-de-prova e a taxa de carregamento. Já a velocidade de aplicação da carga afeta a magnitude das deformações, a taxa de fissuração e o grau de não-linearidade.

Quanto maior a taxa de carregamento, maior será o valor do módulo e da resistência à compressão. Com relação às características da mistura existem diversos fatores que direta ou indiretamente afetam o módulo de elasticidade, como: as propriedades dos materiais constituintes (porosidade, dimensão máxima, forma, textura superficial, granulometria, composição mineralógica, módulo de elasticidade, etc), a dosagem da mistura e a relação água/cimento, a porosidade da matriz, os espaços vazios e as microfissuras da zona de transição (MILLER, 2008).

Sob uma mesma tensão, as deformações em um concreto de maior resistência serão menores e, consequentemente, maior será a inclinação da reta. Dessa forma, para concretos de diferentes resistências, quanto maior for a resistência do concreto, maior será o módulo de elasticidade (MILLER, 2008).

3.2.7 Trabalhabilidade

Apesar do ganho de desempenho conferido pelas fibras no que se refere à contenção da propagação das fissuras no concreto endurecido, a adição de fibras altera as condições de consistência do compósito no estado fresco e, consequentemente, a sua trabalhabilidade. Essa

alteração é função principalmente da geometria da fibra e do teor incorporado (FIGUEIREDO, 2005; PINTO JR., 2005).

Esta alteração de consistência ocorre porque as fibras atuam como um bloqueio ao movimento dos agregados. Este bloqueio será tão mais intenso quanto maior for o número de fibras por unidade de volume de concreto. Além disso, ao se adicionarem fibras ao concreto, está se adicionando também uma grande área superficial que demanda água de molhagem. Assim, fibras mais finas e em maiores teores, apresentam maior área superficial que demanda maior quantidade de água de molhagem, aumentando a coesão do concreto e reduzindo a fluidez e a mobilidade da mistura no estado fresco (FIGUEIREDO, 2005; PINTO JR., 2005).

Fibras mais longas também contribuem para a redução da perda de mobilidade da mistura por aumentar o atrito interno do concreto, que faz com que a movimentação das partículas de maiores dimensões seja mais difícil, como é o caso dos agregados. Dessa forma, ter-se-á uma menor quantidade de água disponível para fluidificar a mistura. Por isso, fica claro que, quanto maior o fator de forma da fibra, maior será a influência de sua incorporação na perda de fluidez da mistura (FIGUEIREDO, 2005).

O ganho de coesão que se obtém para a mistura quando se adicionam fibras ao concreto pode ser origem de alguns problemas práticos durante a execução dos tubos. Um problema associado à aplicação dos concretos com fibras é o aparecimento de bolas formadas por fibras aglomeradas (FIGUEIREDO, 2008b).

No caso da presença de embolamentos de fibras no concreto, ocorrerá não só uma redução do teor de fibra homogeneamente distribuído, como também um grande risco de bloqueio do sistema de transporte e alimentação da mistura. Além disso, caso este embolamento de fibras passe despercebido e venha a ser incorporado no tubo, haverá inevitavelmente, o surgimento de um defeito grave no componente que representará uma perda de estanqueidade e resistência mecânica, comprometendo, sobretudo a durabilidade do material (FIGUEIREDO, 2008b).

As causas da formação dos embolamentos de fibras estão invariavelmente associadas à mistura inadequada do material. Fibras de maior fator de forma produzem um maior risco de embolamentos. Ademais, se a fibra é adicionada à betoneira de maneira descuidada ou rapidamente, virando-se o saco ou a caixa de fibras de uma só vez, por exemplo, o risco será ainda maior. Assim, recomenda-se que a fibra seja lançada em taxas controladas junto com os agregados, homogeneizando a mistura antes do lançamento do cimento (FIGUEIREDO, 2008b).

Uma alternativa para minimizar este efeito é a utilização de fibras coladas em pente como já é disponibilizada por alguns fornecedores. Isto porque, quando são misturados ao concreto, os pentes têm as suas colas dissolvidas, permitindo uma homogeneização facilitada do compósito mesmo nos casos de concretos com consistência mais seca, como é o caso dos tubos de concreto. Ou seja, o fato do concreto apresentar consistência mais seca, não impede que as fibras coladas sejam utilizadas na sua produção (FIGUEIREDO, 2008b).

Vale ressaltar que, em algumas aplicações específicas, como o pré-moldado, o aumento da coesão e perda de mobilidade do concreto pode significar uma melhora na trabalhabilidade, uma vez que garante a estabilidade dimensional do concreto recém-desformado. Por isso, é comum o emprego de fibras poliméricas como as de polipropileno, para se aumentar a coesão do material quando isso é desejado. Além disso, a adição das fibras poliméricas reduz a taxa de exsudação do concreto diminuindo a retração global do material por dificultar a movimentação de água no seu interior (FIGUEIREDO; TANESI; NINCE, 2002).

Quanto ao acabamento do tubo existem dois problemas típicos que podem ocorrer com a aplicação do concreto com fibras: o acúmulo de fibras expostas na ponta e o aparecimento de fibras na superfície do tubo. Ambos são particularmente frequentes em máquinas radiais onde há maior dificuldade de submeter o tubo a uma vibração mais intensa, de modo a embutir as fibras dentro do concreto. Nestes casos, o melhor caminho é se garantir um ajuste de traço que permita o melhor embutimento da fibra na mistura e utilizar um equipamento vibro prensado, que garante uma aplicação de energia mínima de compactação ao material, sendo possível conseguir excelente nível de acabamento (FIGUEIREDO, 2008b).

3.3 DURABILIDADE

Quando determinada estrutura necessita ser projetada para resistir a cargas de impacto (em situações onde haja perigo de quedas de materiais de grande altura, explosões ou colisões) ou quando se deseja uma maior resistência à penetração de projéteis, torna-se necessário o emprego de um material adequado, capaz de resistir a esforços dinâmicos de curta duração (GARCEZ et al., 2004).

Os efeitos produzidos pelo impacto em uma estrutura dependerão de propriedades típicas dos compósitos que a compõem, tais como, resistência à tração e energia específica de

fratura que, por sua vez, dependem da natureza da matriz cimentícia empregada (GARCEZ et al., 2004).

Nos compósitos reforçados com fibras a resistência ao impacto é grandemente influenciada pelo processo de fabricação e pelo método de ensaio. A geometria da fibra em relação ao tamanho do molde do corpo-de-prova poderá causar uma orientação preferencial das fibras localizadas próximo à superfície sendo, portanto, diferente daquela do interior da massa do compósito. Além disso, a concentração e a orientação das fibras dependem do método de lançamento, da fluidez da mistura e do tipo e grau de compactação (PINTO JR., 2005).

A adição de fibras proporciona ductilidade ao concreto, o que proporciona uma maior quantidade de energia dissipada pelas deformações plásticas que é capaz de apresentar, ou seja, o compósito absorve a energia de impacto. O acréscimo na dissipação de energia é proveniente da necessidade de se arrancar a fibra da matriz para a ruptura do material (PUJADAS, 2009).

Pujadas (2009) observou que a resistência ao impacto do concreto com fibras em quantidades superiores a 0,5% em volume, depois da fissuração, chega a ser 50% maior que a do concreto convencional.

E Pinto Jr. (2005) observou que ao adicionar fibras de polipropileno à matriz de concreto houve um aumento do índice de resistência residual ao impacto em mais de quatro vezes em relação à matriz sem fibras. Enquanto que ao adicionar fibras de aço, este índice atingiu sete vezes. Ou seja, quando se trata de resistência ao impacto as fibras metálicas se comportam melhor que as macrofibras poliméricas.

Quanto à degradação, a adição de fibras ao concreto restringe a propagação e a abertura das fissuras e, consequentemente a permeabilidade do compósito, tornando a zona de transição na interface da matriz mais protegida de ataque quando sujeito a meios agressivos. No entanto, não impede completamente que agentes degradantes penetrem na porção interna do concreto (BENTUR; MINDESS; VONDRAN, 1989; NAAMAN, WONGTANAKITCHAROEN; HAUSER, 2005).

Quando comparadas, as fibras poliméricas são as mais atrativas para reforçar matrizes de cimento devido à sua não degradação: seja por microorganismos, o que acontece com a fibra vegetal; seja por corrosão, o que acontece com a fibra de aço; ou por degradação em meio alcalino, o que acontece com as fibras de vidro e vegetal (BENTUR; MINDESS, 1990).

Quando íons agressivos tais como cloretos, migram para dentro do concreto há uma redução da proteção da superfície das fibras, o que torna as condições favoráveis para a corrosão dentro do componente. No caso das fibras poliméricas, a possibilidade de corrosão é mínima, pois as mesmas são quimicamente inertes. No caso das fibras de aço, as mesmas estão susceptíveis à degradação, porém, o comportamento à corrosão do concreto reforçado com fibras de aço é muito diferente do concreto armado convencionalmente (SALUDES, 2006).

Isto porque, a corrosão galvânica no concreto armado depende do desenvolvimento das células de corrosão eletroquímicas. É muito mais fácil para uma grande célula de corrosão se desenvolver incorporando uma seção da barra, que é contínua em uma grande distância, do que, muitas pequenas células de corrosão se desenvolverem incorporando fibras de aço discretas e separadas por uma camada de pasta de cimento (VONDRAN, 1991).

Além disso, como a fibra possui um diâmetro reduzido, o volume de óxidos gerados não é suficiente para produzir o lascamento da superfície, conseqüentemente, garante-se a integridade do recobrimento sem fissuras e, dessa maneira, a proteção de seu interior (FIGUEIREDO, 2005). Ademais, as fibras de aço geralmente oxidam na superfície do tubo devido à carbonatação superficial do concreto, o que não quer dizer que exista oxidação no interior do concreto, pois esta oxidação é mínima, já que o volume de concreto é bem maior que o volume de fibras e, as mesmas estão distribuídas pela massa de concreto e separadas por uma camada de pasta de cimento. Ou seja, esta oxidação não tem efeito estrutural, mas somente visual, pois aparecem pontos de oxidação ocasionais na superfície do concreto (CHAMA NETO, 2002).

4. METODOLOGIA DE PESQUISA

Neste capítulo é apresentado o procedimento experimental utilizado para avaliar comparativamente o desempenho mecânico das macrofibras poliméricas e das fibras de aço como reforço para tubos de concreto. Além das propriedades controladas para o concreto normal, o concreto reforçado com fibras deve ser avaliado quanto ao seu comportamento pós-fissuração, de modo a evidenciar a interação fibra-matriz. De forma a possibilitar estas avaliações, foi feita uma verificação de desempenho por meio do ensaio de compressão diametral, com controle de deslocamentos, em tubos de concreto reforçados com macrofibras poliméricas e fibras de aço. Para melhorar a compreensão dos resultados obtidos no ensaio de compressão diametral, foram feitos ensaios complementares de absorção de água e determinação do teor real de fibra incorporado aos tubos por meio de testemunhos extraídos dos tubos, além de ensaios de compressão de axial em corpos-de-prova moldados.

4.1 MATERIAIS

Na produção de todos os tubos de concreto reforçados com macrofibras poliméricas e fibras de aço foram adotados os mesmos materiais e a mesma dosagem empregada pela empresa fabricante dos tubos. Apenas a quantidade de água foi alterada em alguns casos para manutenção da trabalhabilidade e, consequentemente, a relação água/cimento sofreu modificações. Foram mantidas também as recomendações da norma brasileira NBR 8890:2007 relativas às dimensões e tolerâncias, de maneira a não interferir no processo produtivo.

4.1.1 Fibras

As fibras empregadas como reforço dos tubos com suas respectivas características físicas e mecânicas de acordo com os dados fornecidos pelos fabricantes se encontram relacionadas na Tabela 4.1. Estas fibras foram indicadas pelos respectivos fabricantes para esta aplicação e escolhidas principalmente em função do seu fator de forma e comprimento. A intenção era induzir a uma determinada orientação das fibras em relação ao plano tangencial à parede do tubo e perpendicular ao plano preferencial das fissuras, de maneira a se obter uma maior eficiência na interceptação das fissuras.

Apesar de alguns estudos de concreto convencional com fibras (GARCEZ, 2005) e também de tubos de concreto com fibras (HAKTANIR, et al., 2007) terem comprovado o melhor desempenho das fibras longas em relação às fibras curtas, neste estudo foi utilizada uma fibra de aço curta com a finalidade de avaliar seu desempenho visando a possibilidade do uso da mesma em tubos mistos (tubo armado com tela de aço mais fibras curtas) (FIGUEIREDO; ESCARIZ, 2011). Dessa forma, foram utilizados três tipos de fibras de aço, todas do tipo A e classe 1 da norma NBR 15530:2007, sendo uma solta e duas coladas em pente (Figura 4.1). As macrofibras poliméricas utilizadas foram Barchip54 e Forta Ferro54, ambas produzidas a partir do polipropileno como matéria prima básica, de geometria linear e de seção transversal retangular (Figura 4.2).

Tabela 4.1 – Características físicas e mecânicas das fibras

Fibras	***Geometria***	***Diâmetro eq. (mm)***	***Fator de forma (l/d)***	***Resistência à tração (MPa)****
Fibra de aço solta	50 mm	0,75	67	1200
Fibra de aço curta colada em pente	35 mm	0,55	64	1150
Fibra de aço longa colada em pente	60 mm	0,75	80	1100
Macrofibra polimérica Barchip	54 mm	0,90	60	640
Macrofibra polimérica Forta Ferro	54 mm	0,34	158	570 – 660

* Dados fornecidos pelos fabricantes

(a) (b)

Figura 4.1 – (a) fibra de aço solta; (b) fibra de aço curta colada em pente e fibra de aço longa colada em pente

(a) (b)

Figura 4.2 – (a) macrofibra polimérica Barchip; (b) macrofibra polimérica Forta Ferro

4.1.2 Cimento

O cimento utilizado foi o Portland composto com adição de escória, de resistência de 40 MPa aos 28 dias (CP II-E 40) e justifica-se o uso deste cimento por ser o mais empregado em tubos de águas pluviais na própria fábrica. Foi determinada sua massa específica por ensaio em picnômetro de gás hélio com a utilização de um equipamento automatizado do fabricante Quantachrome Instruments modelo MVP 5DC. O valor obtido foi de 2,96 g/cm³.

4.1.3 Agregados

Os agregados, miúdo e graúdo foram fornecidos pelas empresas Embu e Pau Pedra, respectivamente. Estes agregados já eram corriqueiramente utilizados na indústria para a produção dos tubos. Para esses agregados foram determinadas a composição granulométrica, de acordo com a NBR NM 248:2003 - *Agregado - Determinação da Composição Granulométrica*, conforme Tabela 4.2 e Figuras 4.3 e 4.4. Foram determinadas também suas massas específicas por ensaio em picnômetro de gás hélio com a utilização de um equipamento automatizado do fabricante Quantachrome Instruments modelo MVP 5DC. Os valores obtidos foram de 2,63 e 2,66 g/cm³, respectivamente.

Tabela 4.2 – Características dos agregados

Material	***Areia***	***Pedra***
Dimensão máxima do agregado (mm)	2,4	12,5
Módulo de finura	2,60	6,89
Caracterização	Média	Brita intermediária (entre a brita 0 e a brita 1)

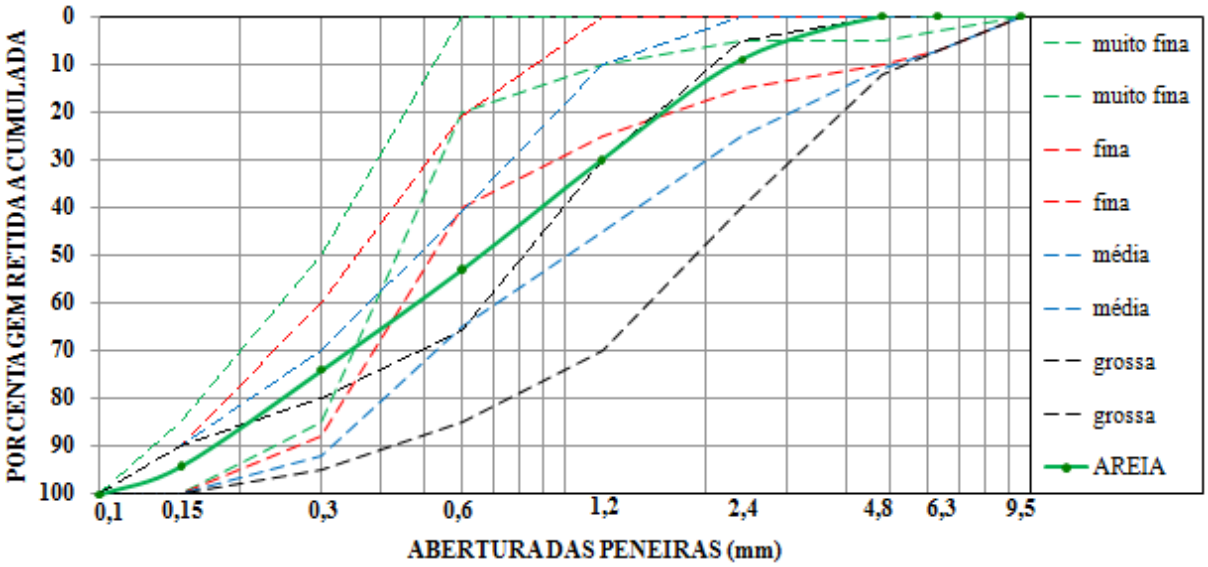


Figura 4.3 – Curva granulométrica da areia e limites estabelecidos por norma (NBRNM 248:2003)

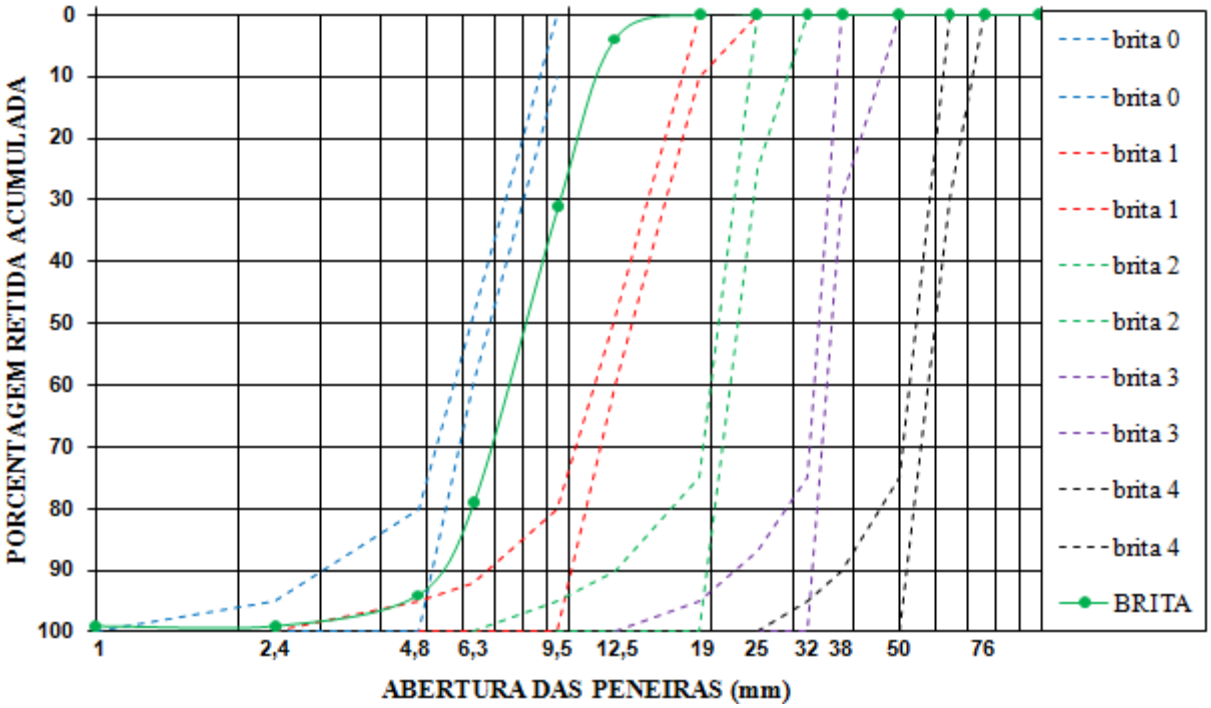


Figura 4.4 – Curva granulométrica da brita e limites de classificação estabelecidos por norma (NBRNM 248:2003)

4.2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A metodologia utilizada neste estudo tem o objetivo de avaliar comparativamente o desempenho mecânico do reforço de fibras de aço e macrofibras poliméricas nos tubos de concreto. Para isso, todos os tubos foram moldados procurando-se restringir ao máximo o número de variáveis intervenientes e, com o menor nível de alteração possível das condições reais de produção na fábrica. Ou seja, os tubos foram moldados com os mesmos materiais, mesmos equipamentos e nas mesmas condições gerais (inclusive com menor variação possível dos dias de moldagem).

Dessa forma, a produção dos tubos em escala real e os ensaios de compressão diametral foram executados na fábrica de tubos de concreto Fermix, localizada na cidade de Guarulhos - SP. Para o ensaio de compressão diametral foi utilizado o equipamento da própria empresa que se encontra calibrado e em operação corrente para realização deste ensaio. A metodologia utilizada neste ensaio foi a mesma utilizada por Figueiredo (2008a).

4.2.1 Processo de fabricação dos tubos

Os tubos de concreto foram fabricados por processo de vibro-compressão em máquina de marca Menegotti e modelo VRF. Os materiais foram dosados em massa por processo totalmente automatizado, sendo o cimento lançado diretamente no misturador (Figura 4.5) e a areia e a brita foram lançadas juntas, de maneira automatizada na esteira que faz o transporte até o misturador (Figura 4.6).

Figura 4.5 – Lançamento do cimento direto no misturador

Figura 4.6 – Lançamento da areia e brita na esteira

As fibras foram pesadas separadamente utilizando uma balança eletrônica (Figura 4.7) e depois adicionadas manualmente na esteira de transporte da areia e brita, no caso das fibras de aço (Figura 4.8), ou diretamente no misturador, no caso das macrofibras poliméricas (Figura 4.9). Esta diferença de procedimento ocorreu em função das dificuldades geradas pelas macrofibras durante a adição na esteira. Nesta condição, as macrofibras por serem menos densas, acabavam por cair para fora da esteira, o que poderia reduzir o teor efetivamente incorporado no tubo de concreto.

Figura 4.7 – Pesagem das fibras

(a) (b)

Figura 4.8 – Adição de fibras de aço diretamente na esteira de alimentação: (a) soltas; (b) coladas em pente

Figura 4.9 – Adição de macrofibras poliméricas diretamente no misturador

O concreto foi misturado durante 2,5 minutos e depois transportado por esteira automatizada (Figura 4.10) até o equipamento de produção dos tubos que utiliza o sistema de produção vibro-prensado, onde é lançado diretamente nas fôrmas (Figura 4.11). O concreto lançado no molde sofre o processo de vibração contínua simultaneamente ao processo de lançamento. Após o preenchimento total da forma, além do processo de vibração, o tubo passa por um processo de compressão e compactação na parte superior, que corresponde à ponta, por meio de anel giratório acionado por prensa hidráulica. Esta compressão da ponta visa garantir uma boa compactação e acabamento do tubo nesta região (Figura 4.12).

Figura 4.10 – Transporte do concreto à VRF

Figura 4.11 – Lançamento do concreto na forma

Figura 4.12 – Procedimento de compactação por meio de anel giratório

A movimentação das fôrmas e transporte dos tubos foi feita com o mesmo sistema utilizado habitualmente pela indústria, através de sistema de pontes rolantes. Tomou-se sempre o cuidado de evitar impactos nas etapas de retirada do tubo do equipamento de fabricação, de transporte e de colocação no piso para retirada das fôrmas (Figura 4.13).

(a) (b)

(c) (d)

Figura 4.13 – (a) retirada do tubo do equipamento; (b) transporte do tubo; (c) colocação do tubo no piso; (d) retirada da forma

Após a retirada das formas foi feita uma regularização na superfície externa da bolsa e na ponta do tubo, sem obviamente, arrancar as fibras (Figura 4.14). O processo de cura foi feito seguindo o mesmo procedimento de cura ao ar utilizado habitualmente pela empresa, tomando-se o cuidado de envolver os tubos com lona plástica para reduzir a perda de água (Figura 4.15).

(a) (b)

Figura 4.14 – Acabamento superficial no tubo: (a) na parte externa; (b) na ponta

(a) (b)

Figura 4.15 – Processo de cura: (a) colocando a lona plástica; (b) tubo coberto

4.2.2 Traços utilizados nos tubos

O critério adotado para a definição dos teores de fibra incorporados ao concreto foi a manutenção da relação volume de fibras por volume do compósito o mais constante possível. Ou seja, a idéia era manter a mesma porcentagem em volume para cada tipo de fibra, visando avaliar o comportamento das fibras e o respectivo impacto no desempenho dos tubos. O que faz com que exista uma diferença entre as fibras de aço e as macrofibras poliméricas no traço em massa. Também se utilizou resultados anteriores de tubos ensaiados com fibras de aço e as recomendações dos fabricantes de macrofibras poliméricas.

Foram fixados os teores de 20 kg/m³, 25 kg/m³ e 35 kg/m³ para todas as fibras de aço e o teor de 45 kg/m³ foi utilizado apenas para as fibras coladas em pente. Já para as macrofibras poliméricas foram fixados os teores de 3 kg/m³, 4 kg/m³ e 5,5 kg/m³. Estes teores em massa foram divididos pela massa específica de cada fibra especificada pelo fabricante, que no caso das fibras de aço é de 7,85 g/cm³ e das macrofibras poliméricas de 0,91 g/cm³, para obter o volume adicionado para cada fibra conforme Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Teor em massa e em volume de fibras utilizado na produção dos tubos

Tipo de fibra	***Teor em massa (kg/m³)***	***Teor em volume (%)***
Fibra de aço solta	20	0,25
	25	0,32
	35	0,45
Fibra de aço curta colada em pente	20	0,25
	25	0,32
	35	0,45
	45	0,57
Fibra de aço longa colada em pente	20	0,25
	25	0,32
	35	0,45
	45	0,57
Macrofibra polimérica Barchip	3	0,33
	4	0,44
	5,5	0,60
Macrofibra polimérica Forta Ferro	3	0,33
	4	0,44
	5,5	0,60

O traço em massa da matriz de concreto utilizado na fabricação de todos os tubos foi de 1 : 2,44 : 3,75 (cimento : areia : pedra), sendo que a quantidade de água não apresentou um valor fixo, pois foi alterada sempre que necessário visando manter a mesma consistência do concreto para garantir a moldabilidade de todos os tubos. Isto porque, a matriz tem reologia de concreto seco, e por isso não há metodologia de dosagem pré-estabelecido para o ajuste desta matriz, já que não da para usar o mesmo procedimento que é feito para o concreto plástico em que mede-se a consistência utilizando o ensaio de abatimento do concreto.

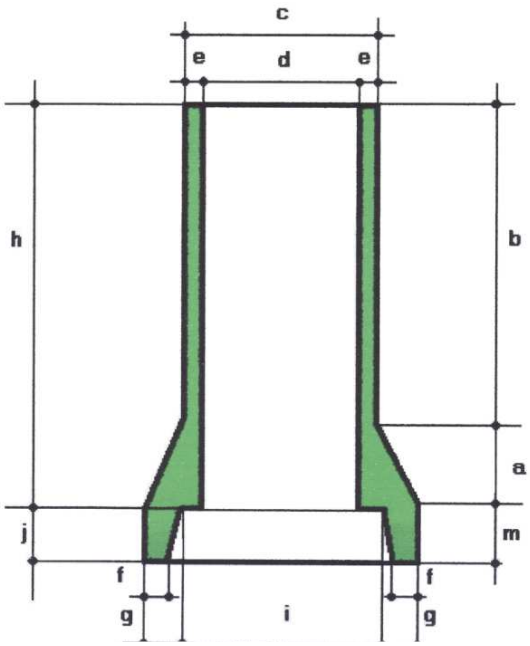
Dessa forma, faz-se o ajuste da trabalhabilidade de forma empírica antes de lançar o concreto na forma. Com isto, o comportamento do tubo é impactado pelas alterações realizadas na mistura, o que pode afetar os resultados. Isto foi levado em conta na análise do desempenho dos componentes. O consumo de materiais por metro cúbico está apresentado na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Consumo de material por m³ de concreto utilizado na produção dos tubos

Material	***Consumo de material por m³***
Cimento CPII E - 40	320 kg
Areia artificial	780 kg
Brita	1200 kg

4.2.3 Exemplares produzidos

Foram produzidos, no mínimo, três tubos para cada determinação, ou seja, três tubos de concreto simples e três tubos para cada teor de fibra. Todos os tubos foram produzidos no mesmo equipamento e com as mesmas dimensões de 1000 mm de diâmetro nominal, 1500 mm de comprimento e parede de 80 mm de espessura (Figura 4.16), destinados a atender os requisitos para a produção de canalizações de redes de águas pluviais.



medidas em mm

a	300
b	1190
c	1160
d	1000
e	80
f	110
g	114
h	1500
i	1200
j	120
m	130

Figura 4.16 – Caracterização geométrica do tubo utilizado no estudo

No entanto, durante a fabricação aconteceram alguns problemas que poderiam comprometer a resistência do tubo, como o aparecimento de fissuras na bolsa do tubo no momento da desforma (Figura 4.17). Para aqueles que não apresentaram fissuras, mas que para determinados teores apresentaram trabalhabilidade dificultada e geraram dúvidas em relação à qualidade da produção, foram produzidos tubos extras de modo a garantir o número mínimo de três tubos por determinação. Em apenas uma família houve a perda de um componente, o que resultou na utilização de apenas dois tubos para a determinação da resistência à compressão diametral dos mesmos.

(a) (b)

Figura 4.17 – (a) fissuras na bolsa no momento da desforma; (b) detalhe da fissura na bolsa

Dessa forma os tubos produzidos foram os seguintes:

- Três tubos de concreto simples;
- Onze tubos de concreto reforçados com fibras de aço soltas, sendo três tubos com teor de 20 kg/m³, cinco tubos com teor de 25 kg/m³ e três tubos com teor de 35 kg/m³. Neste caso em especial (35 kg/m³) houve a detecção posterior de uma fissura existente em um dos tubos, o qual foi ensaiado mesmo assim com a intenção de se avaliar o impacto dessa fissura no comportamento do tubo;
- Onze tubos de concreto reforçados com fibras de aço curtas e coladas em pente, sendo três tubos com teor de 20 kg/m³, três tubos com teor de 25 kg/m³, três tubos com teor de 35 kg/m³ e dois tubos com teor de 45 kg/m³;
- Doze tubos de concreto reforçados com fibras de aço longas e coladas em pente, sendo três tubos com teor de 20 kg/m³, três tubos com teor de 25 kg/m³, três tubos com teor de 35 kg/m³ e três tubos com teor de 45 kg/m³;
- Dez tubos de concreto reforçados com macrofibras poliméricas Barchip, sendo três tubos com teor de 3 kg/m³, quatro tubos com teor de 4 kg/m³ e três tubos com teor de 5,5 kg/m³.
- Dez tubos de concreto reforçados com macrofibras poliméricas Forta Ferro, sendo três tubos com teor de 3 kg/m³, três tubos com teor de 4 kg/m³ e quatro tubos com teor de 5,5 kg/m³;

4.2.4 Método de ensaio para avaliação dos tubos

4.2.4.1 Ensaio de compressão diametral

O principal método de ensaio para a verificação da adequação do desempenho mecânico dos tubos de concreto para águas pluviais e esgoto é o de compressão diametral pelo método de três cutelos em que o tubo é apoiado sobre dois deles separados segundo uma distância especificada, neste caso 20 cm. O terceiro cutelo fica apoiado na parte superior do tubo paralelamente ao seu eixo longitudinal com a finalidade de assegurar uma distribuição uniforme da carga aplicada no tubo durante o ensaio. Neste posicionamento, deve-se evitar o contato com os ressaltos da bolsa (Figura 4.18). Esta concepção básica é uma prática tradicional para este tipo de avaliação adotada tanto na Europa (NBN EN 1916 Concrete pipes and fittings, unreinforced, steel fibre and reinforced) como no Brasil (NBR 8890:2007).

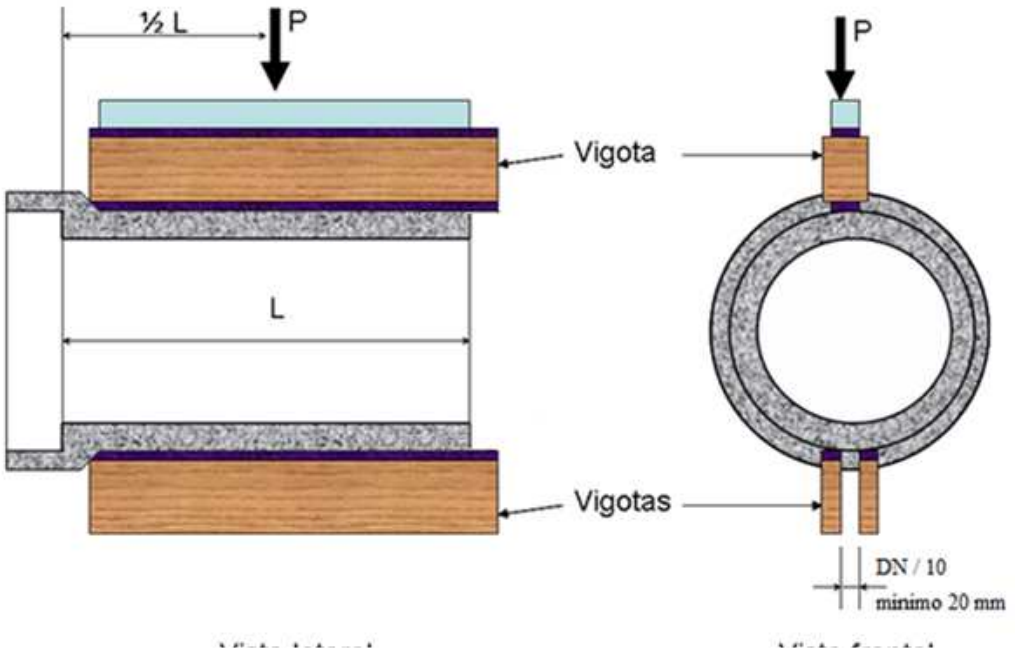


Figura 4.18 – Ensaio de compressão diametral de tubos de concreto para águas pluviais e esgoto. (NBR 8890:2007)

O ensaio utilizado neste trabalho foi o padrão brasileiro recomendado para os tubos de concreto reforçado com fibras (NBR 8890:2007). Ele é iniciado com um carregamento progressivo no tubo, a uma velocidade constante até atingir uma carga equivalente a dois terços da carga de ruptura especificada para sua classe, sendo que esta carga deve ser mantida por, no mínimo, um minuto. Nesta situação, o tubo não poderá apresentar fissura ou qualquer tipo de alteração. Por esta razão, esta carga foi denominada carga mínima isenta de dano. Caso seja constatado qualquer dano, o tubo é reprovado e, caso isto não ocorra, o tubo deve ser carregado até atingir a sua carga máxima (carga de ruptura). Atingida esta carga, ocorre uma progressiva redução da carga. Quando o valor da carga medida atinge 95% da carga máxima registrada, o tubo é totalmente aliviado reduzindo sua carga a zero. Na seqüência, reaplica-se uma carga equivalente à carga mínima isenta de dano (dois terços da carga de ruptura) mantendo-a por mais um minuto. Neste momento é verificado se o tubo apresenta capacidade de suporte da carga mantida nesta situação. Caso isto ocorra, o tubo é carregado novamente e a carga máxima atingida neste re-carregamento corresponde à carga máxima pós-fissuração. Esta carga máxima pós-fissuração deverá ser, no mínimo, 5% superior à carga mínima isenta de dano. O esquema da seqüência de carregamento utilizada neste ensaio encontra-se apresentado na Figura 4.19.

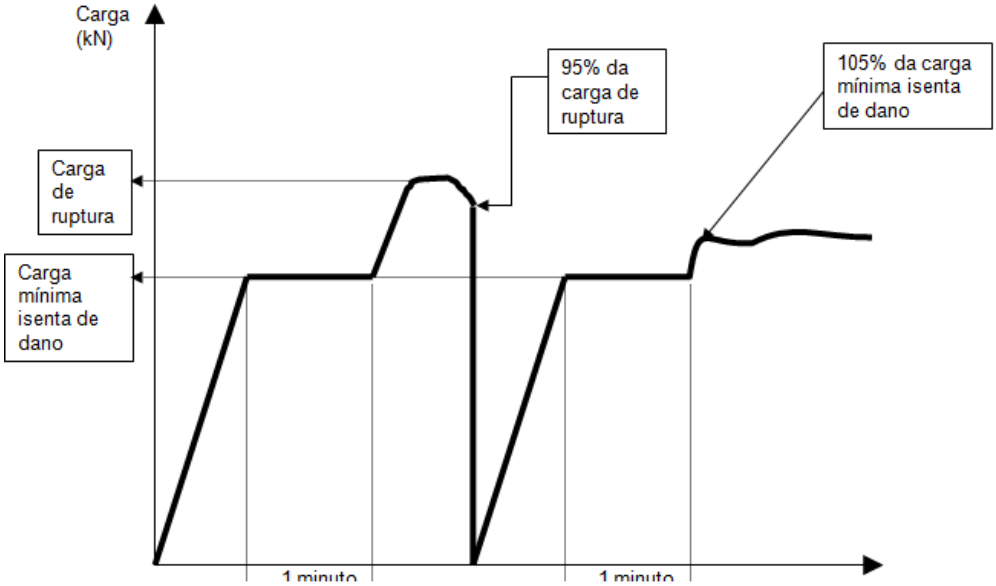


Figura 4.19 – Esquema de carregamento do tubo reforçado com fibras de aço. (NBR 8890:2007)

Como o tubo com fibras apresenta uma maior dificuldade de moldagem do que os tubos armados, houve necessidade de uma maior relação água/cimento, o que fez com que boa parte dos tubos apresentasse menor consistência no momento da desforma. Essa menor consistência proporcionou empenamentos no tubo endurecido, ou seja, a geometria do tubo não ficou completamente regular, o que fez com que o cutelo superior não ficasse perfeitamente apoiado no tubo, provocando concentrações de cargas em determinados pontos do componente, prejudicando a determinação da sua resistência. Para contornar este problema foi utilizado em todos os ensaios um colchão de areia entre o cutelo e o tubo, tomando-se o cuidado para que o colchão de areia ocupasse exatamente o mesmo local que o cutelo iria ocupar se estivesse em contato direto com o tubo de concreto (Figura 4.20).

(a) (b)

Figura 4.20 – (a) colchão de areia com a finalidade de distribuir melhor a carga aplicada no tubo; (b) detalhe do colchão de areia

Para melhor compreensão do comportamento do componente durante o ensaio e poder avaliar com maior precisão as diferenças proporcionadas pelas fibras no reforço do material foi empregado um sistema de medida contínua de deslocamento diametral do tubo concomitantemente ao seu carregamento. Isto permitiu também uma maior precisão na avaliação do comportamento do componente, verificando assim com maior confiabilidade a sua adequação aos requisitos exigidos pela normalização. Para estes ensaios, o equipamento utilizado é dotado de um sistema de aquisição de dados compatível com as necessidades de levantamento das curvas de carga por deformação diametral do componente.

A medida, propriamente dita, das deformações dos tubos foi feita por meio de LVDTs, posicionados nas extremidades dos tubos e apoiados na borda oposta conforme o apresentado na Figura 4.21a. Com esta configuração de posicionamento dos transdutores evita-se que deformações extrínsecas à peça ensaiada interfiram no resultado medido. Na Figura 4.21b pode ser observado em detalhe o posicionamento do LVDT na parte superior interna do tubo durante o ensaio de compressão diametral. Este posicionamento ocorre sobre uma pequena folha de acetato de modo a se evitar que o LVDT entre na fissura que se forma no tubo durante o ensaio.

Com este arranjo de ensaio torna-se possível levantar a curva de carga por deslocamento médio medido em ambos os LVDTs. Vale ressaltar que, para a norma, não é necessário este tipo de sofisticação para a realização do ensaio, bastando apenas a utilização de um sistema que possibilite a leitura precisa do nível de carregamento independentemente do nível de deformação diametral a ele associado.

No caso dos tubos de concreto simples, analisados neste programa experimental, não é possível a utilização dos LVDTs, dado que a ruptura frágil e abrupta do tubo traria grande possibilidade de danificar estes instrumentos. Assim, optou-se por, neste caso específico, levantar-se a curva de carga por tempo, a qual era possível a partir do software utilizado no equipamento de aquisição de dados.

(a) (b)

Figura 4.21 – (a) configuração inicial do sistema de posicionamento dos LVDTs; (b) detalhe do suporte e da folha de acetato usados para leitura da deformação do tubo durante o ensaio de compressão diametral

4.2.4.2 Ensaio de absorção de água e índice de vazios

O ensaio de absorção de água pode ser feito com base em duas normas: NBR 8890:2007 ou a NBR 9778:2005. O ensaio conforme a NBR 8890:2007 como já foi explicado no capítulo 2, determina apenas a absorção de água, já o ensaio conforme a NBR 9778:2005 determina a absorção e o índice de vazios simultaneamente. Dessa forma, foi escolhida a segunda norma para determinar o procedimento de ensaio a ser utilizado neste estudo. Este ensaio é particularmente importante para verificar se as fibras prejudicaram as condições de compactação do concreto, além de, naturalmente, serem estabelecidos limites no sentido de possibilitar atender os requisitos de desempenho com vistas à durabilidade.

Dois corpos-de-prova foram extraídos de cada tubo (Figura 4.22), sendo um da ponta e outro da bolsa e foram secos em estufa com temperatura mantida no intervalo de (105 ± 5) °C, pelo período mínimo de 72 horas, até que em duas pesagens consecutivas, em intervalos de 24 horas, indiquem variação de perda de massa inferior a 0,5% de sua massa original (m_0). Depois de secas as amostras foram colocadas em recipiente cheio de água, que foi levado progressivamente à ebulição, e mantidas a água em fervura por cinco horas (figura 4.23).

Completada esta etapa, deixa a água esfriar junto com os corpos-de-prova em seus respectivos recipientes até a temperatura ambiente. Determinar e registrar a massa com auxílio de balança hidrostática (m_2). Em seguida, retirá-los da água, secá-los superficialmente

por meio de toalha, pano úmido ou papel absorvente e pesá-los imediatamente (m_1) conforme Figura 4.24. O índice de absorção de água é dado por:

$$A = \frac{m_1 - m_0}{m_0} \times 100$$

E o índice de vazios é dado por:

$$I_v = \frac{m_1 - m_0}{m_1 - m_2} \times 100$$

Onde:

A: é o índice de absorção de água em porcentagem;

I_v: é o índice de vazios em porcentagem;

m_0: é a massa do corpo-de-prova seco, em gramas;

m_1: é a massa do corpo-de-prova após ensaio saturado, em gramas;

m_2: é a massa do corpo-de-prova saturada imersa em água após fervura.

Figura 4.22 – Extração dos testemunhos

Figura 4.23 – Recipiente com corpos-de-prova em que foi feito a fervura

Figura 4.24 – Determinação da massa do corpo-de-prova saturado após ensaio

4.2.4.3 Ensaio de determinação do teor real de fibra

Os testemunhos utilizados na determinação da absorção de água foram aproveitados para a realização da determinação do teor de fibra incorporado ao material, pois com os parâmetros determinados no primeiro ensaio, massa saturada superfície seca e massa saturada imersa, pode-se calcular o volume do corpo-de-prova (diferença entre estas duas massas) que será utilizada no segundo ensaio. Tendo sido determinado o volume do testemunho, o passo seguinte é o seu esmagamento para permitir a extração das fibras. Esta determinação é particularmente interessante pelo fato da dosagem da fibra acontecer a partir de uma estimativa do volume de concreto a ser utilizado no preenchimento do molde para a produção do tubo.

Além disso, o sistema de produção dos tubos não foi contínuo, dado que houve a necessidade de variação do teor de fibra para cada série de tubos. Com isto, havia a possibilidade de alterações na proporção dos materiais. Na previsão do volume de concreto consumido para a produção do tubo também podem ocorrer variações do consumo efetivo devido à variação da densidade do material em função de uma maior ou menor dificuldade de compactação gerada pela fibra. Por essa razão, a utilização desse ensaio permite realizar uma verificação da proximidade entre o consumo teórico de fibras e o teor efetivamente incorporado ao compósito.

De acordo com o procedimento proposto por Kalil; Escariz; Figueiredo (2010), o testemunho foi esmagado com utilização da prensa de compressão axial já dentro de uma bandeja de modo a evitar que parte do material fosse perdida no processo (Figura 4.25). O procedimento de esmagamento foi repetido até que não houvesse pedaços do testemunho com dimensões maiores que o dobro do diâmetro máximo do agregado graúdo utilizado na mistura. A avaliação desta condição foi feita visualmente e serve tanto para o concreto com fibras de aço (Figura 4.26) como para o concreto com macrofibras poliméricas (Figura 4.27).

Figura 4.25 – Esmagamento do testemunho na prensa dentro de uma bandeja para evitar perda de material

Figura 4.26 – Testemunho de concreto com fibras de aço ao final da etapa de esmagamento

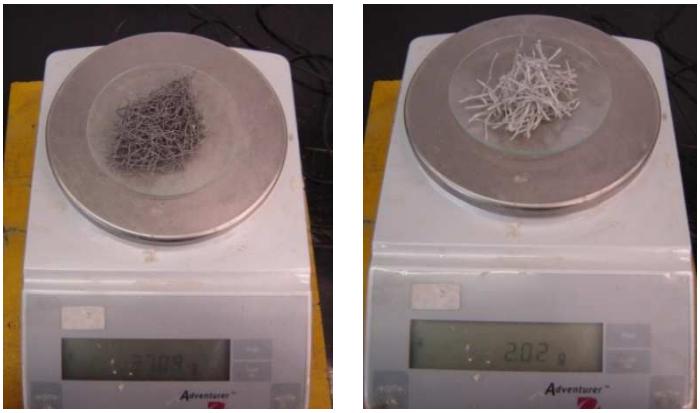
Figura 4.27 – Testemunho de concreto com macrofibras poliméricas ao final da etapa de esmagamento

Após o esmagamento do testemunho foi feita a coleta das fibras manualmente, no caso das fibras poliméricas e com auxílio de um imã, no caso das fibras de aço (Figura 4.28). Nesta etapa é imprescindível que toda a fibra presente no corpo-de-prova seja coletada e separada. Após a separação, todas as fibras soltas foram acondicionadas em um saco plástico, devidamente identificado, de modo a evitar que se perca parte da amostra.

(a) (b)

Figura 4.28 – Coleta das fibras: (a) fibra de aço; (b) macrofibra polimérica

É importante ressaltar que o cálculo de consumo é feito por testemunho, o que implica na necessidade de identificar as amostras de fibras separadas em função do testemunho de onde foram extraídas. Uma vez separadas, as fibras de aço e as macrofibras poliméricas foram então pesadas (Figura 4.29). Esta massa, dividida pelo volume do testemunho irá determinar o consumo de fibra no tubo de concreto.



(a) (b)

Figura 4.29 – Pesagem das fibras: (a) fibra de aço; (b) macrofibra polimérica

4.2.4.4 Ensaio de compressão axial

Para a realização do ensaio de compressão axial foram moldados corpos-de-prova cilíndricos de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura sobre mesa vibratória e com o auxílio de um soquete (Figura 4.30). A opção pelo uso do soquete ocorreu pelo fato de ser um concreto de consistência muito seca, o que impossibilita o uso dos procedimentos convencionais adequados a concretos plásticos. Sem o uso do soquete é praticamente impossível realizar a moldagem dos corpos-de-prova. Além de avaliar a possibilidade de controle do material através deste ensaio, estes resultados poderão futuramente ser utilizados na validação de modelos numéricos de previsão de comportamento dos tubos (DE LA FUENTE et al., 2010b).

Os corpos-de-prova foram moldados com a fibra de aço B e a microfibra polimérica E, pois estas apresentaram melhor trabalhabilidade, o que possibilita uma boa compactação.

(a) (b)

Figura 4.30 – Confecção dos corpos-de-prova em mesa vibratória com auxílio de um soquete: (a) primeiras camadas; (b) última camada

Após a confecção dos corpos-de-prova, foi feita a cura em câmara úmida por 28 dias, quando foi feito o ensaio de compressão axial. Este ensaio foi realizado segundo os procedimentos normais recomendados pela norma NBR 5739:2007 – *Concreto - Ensaios de compressão de corpos-de-prova cilíndricos*, em uma prensa universal de marca Shimadzu, modelo UH 200 (Figura 4.31a). Antes do ensaio, foi feita a regularização dos topos dos corpos-de-prova por meio de desgaste superficial por ação de retífica, e foram fixados extensômetros elétricos (Figura 4.31b), para obtenção da curva resistência à compressão pela deformação desses componentes, usando aparelho de aquisição automática de dados marca Lynx, modelo Aqdados 7.02.

(a) (b)

Figura 4.31 – (a) ensaio de compressão axial com utilização de equipamento de aquisição automática de dados; (b) detalhe da configuração dos extensômetros elétricos

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 ENSAIO DE COMPRESSÃO DIAMETRAL

Para uma melhor visualização, os resultados individuais de cada teor de fibra estão apresentados em conjunto. Os resultados obtidos com os tubos simples estão expressos em termos de curvas de carga por tempo e, no caso dos tubos reforçados com fibras, em termos de curvas de carga por deslocamento diametral. Isto porque o tubo simples rompe fragilmente e, por isso, não é possível medir o deslocamento diametral, apenas a carga de ruptura. No caso dos tubos com fibras é possível medir o deslocamento diametral, sendo este um dos principais parâmetros de avaliação de desempenho dos tubos.

Além disso, há também em todos os gráficos a indicação da carga mínima de ruptura e da carga mínima pós-fissuração exigida pela norma NBR 8890:2007 para o tubo PA1 de 1 m de diâmetro nominal. Vale ressaltar que, como o tubo simples rompe fragilmente, não há a indicação da carga mínima pós-fissuração no gráfico que apresenta o tubo simples.

A carga mínima de ruptura por norma é de 60 kN/m e, como o tubo utilizado neste estudo possui um comprimento de 1,5 m então, a carga mínima de ruptura é de 90 kN. Já a carga mínima pós-fissuração é obtida em função da carga mínima isenta de dano que por norma é de 40 kN/m e, como o tubo utilizado neste estudo possui um comprimento de 1,5 m então, a carga mínima isenta de dano é de 60 kN. Dessa forma, a carga mínima pós-fissuração é de 63 kN, já que a mesma tem que ser pelo menos 5% maior que a carga mínima isenta de dano.

5.1.1 Tubo simples

Os resultados obtidos para os tubos simples são mostrados na Figura 5.1 e as cargas de ruptura estão destacadas na Tabela 5.1.

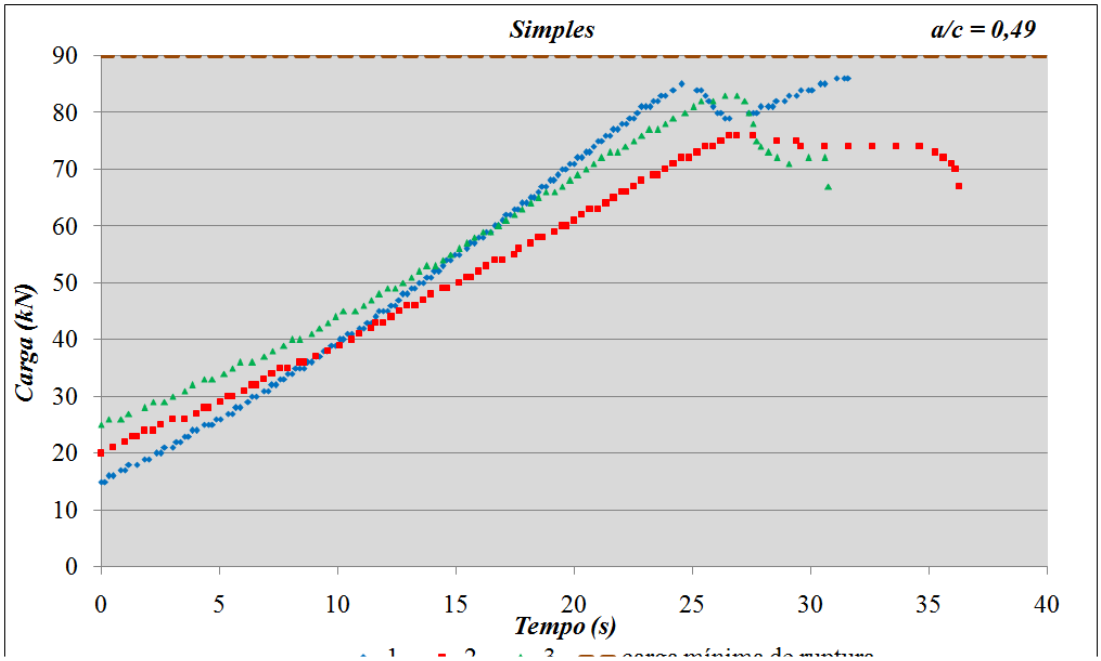


Figura 5.1 – Curvas de carga por tempo obtidas no ensaio de compressão diametral dos tubos simples

A partir das curvas acima, pode-se observar que a matriz sem reforço não atingiu a carga mínima de ruptura que é de 90 kN. Isto pode ter ocorrido, devido à relação água/cimento utilizada que foi de 0,49. Além disso, este tubo não é produzido normalmente sem a armadura, o que, seguramente, reduziu a carga máxima atingida no ensaio. Percebe-se também que a ruptura não foi totalmente frágil, havendo uma pequena resistência residual após o tubo atingir a carga de pico. Isto ocorre pelo tempo de propagação da fissura que, no caso dos tubos, principia pela ponta e vai até a bolsa.

A quantidade de água utilizada foi definida de modo a manter a mesma média de consumo dos demais tubos com fibras, visando evitar que este fator alterasse de forma significativa o comportamento do tubo simples, impossibilitando a comparação de desempenhos. No entanto, essa relação água/cimento para um tubo simples se reflete em excesso de água, ou seja, poros, o que faz com que o tubo tenha uma redução da sua resistência última.

Tabela 5.1 – Resultados do ensaio de compressão diametral para os tubos simples - quanto à carga de ruptura

Tubo	*Carga de Ruptura (kN)*	*Valor Médio (kN)*	*Desvio Padrão*	*Coeficiente de Variação (%)*
Simples	76	81,67	5,13	6,28
	83			
	86			

5.1.2 Tubo de concreto reforçado com fibra de aço solta

A fibra de aço solta possui 50 mm de comprimento. Com esta fibra foram feitos ensaios com 20, 25 e 35 kg/m³ cujos resultados obtidos são mostrados nas Figuras 5.2 a 5.4, respectivamente. As cargas de ruptura e pós-fissuração estão destacadas nas Tabelas 5.2 e 5.3.

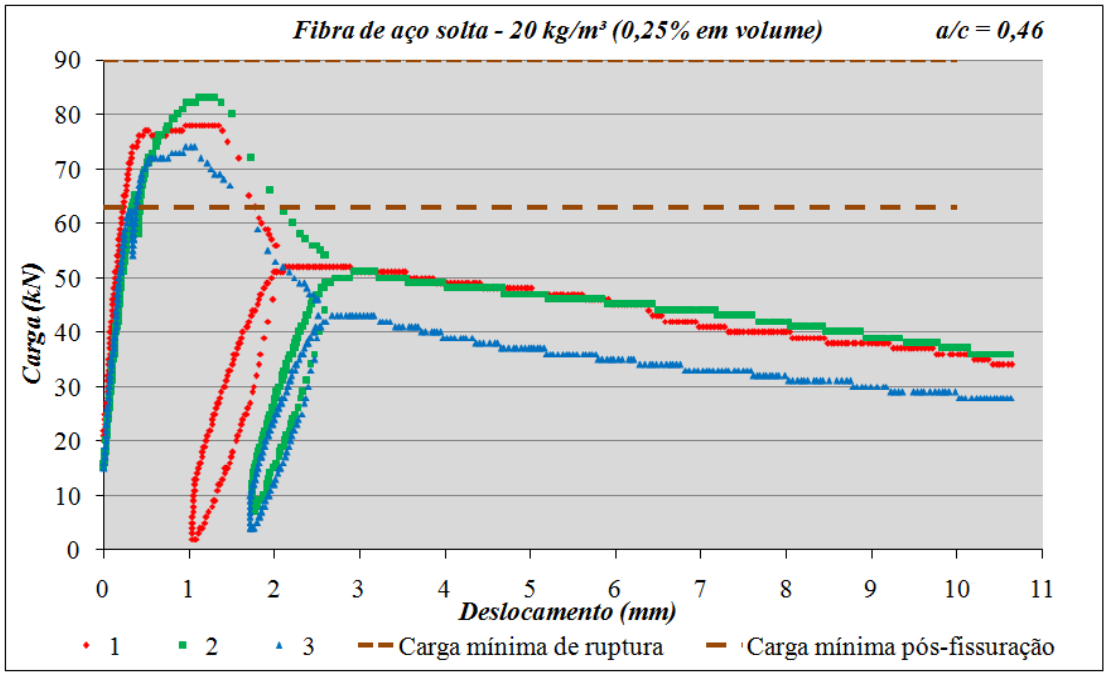


Figura 5.2 – Curvas de carga por deslocamento obtidas no ensaio de compressão diametral dos tubos com 20 kg/m³ da fibra de aço solta

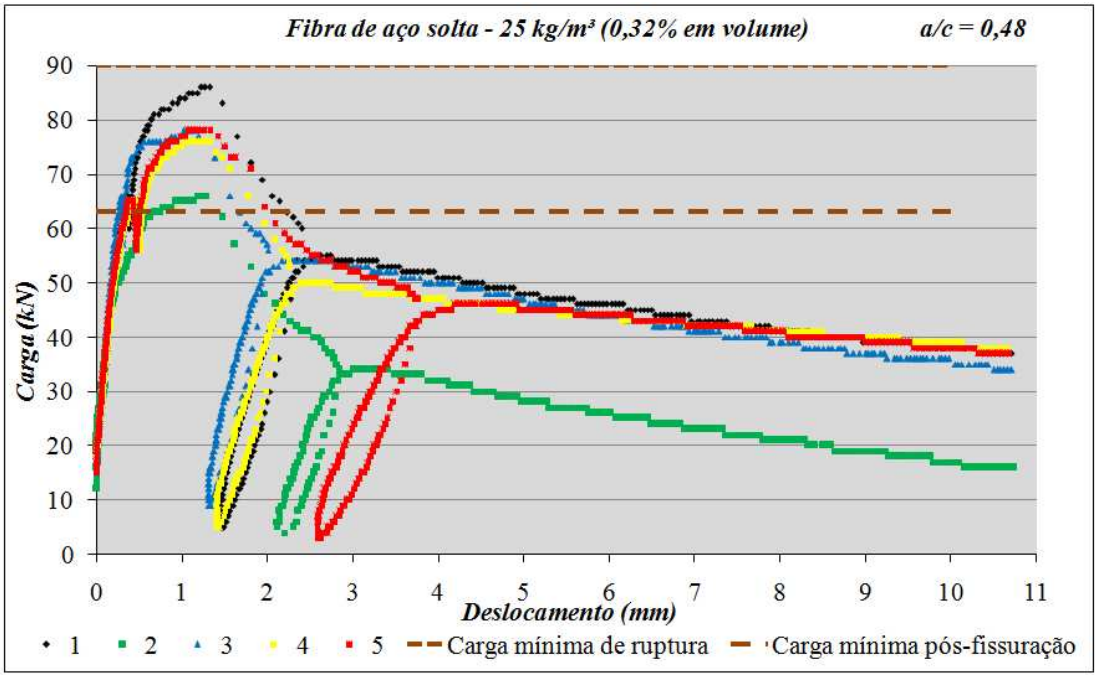


Figura 5.3 – Curvas de carga por deslocamento obtidas no ensaio de compressão diametral dos tubos com 25 kg/m³ da fibra de aço solta

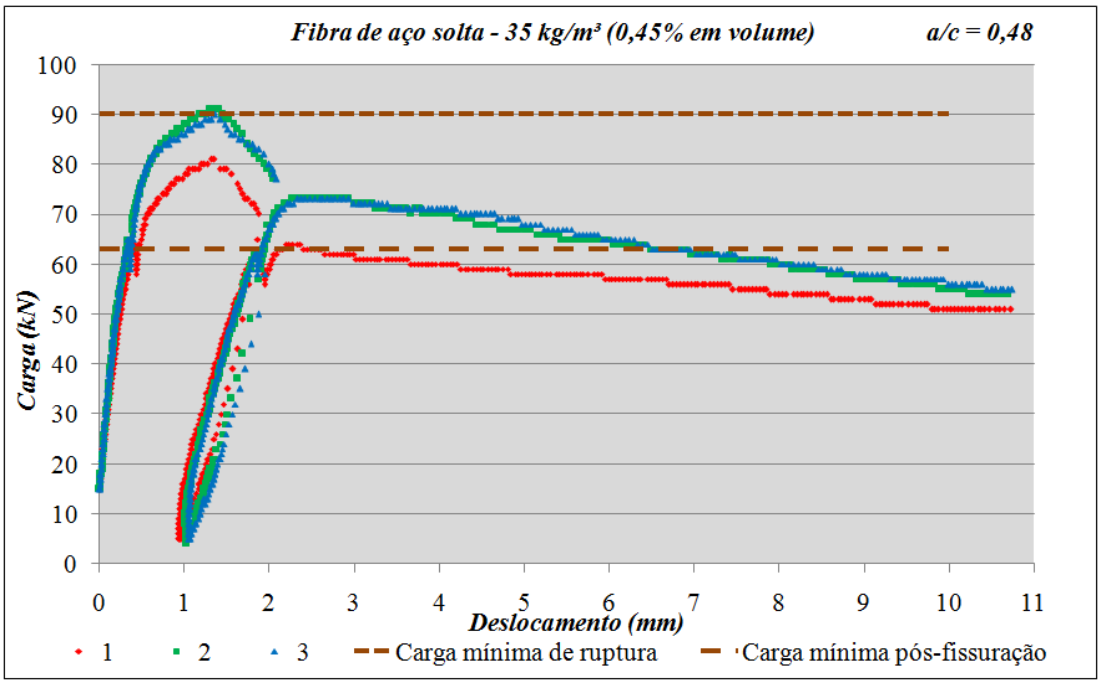


Figura 5.4 – Curvas de carga por deslocamento obtidas no ensaio de compressão diametral dos tubos com 35 kg/m³ da fibra de aço solta

A partir das curvas acima pode-se observar que os tubos reforçados com 20 e 25 kg/m³ da fibra de aço solta, não conseguiram atingir nem a carga de ruptura (90 kN) nem a carga pós-fissuração (63 kN). Já quando foram adicionados 35 kg/m³ dessa fibra, dois dos três tubos atingiram a carga de ruptura e todos eles atingiram a carga mínima pós-fissuração.

Além disso, observa-se que o tubo representado pela curva 2 da Figura 5.3 apresentou tanto a carga de ruptura como a carga máxima pós-fissuração aquém das apresentadas pelos demais tubos com mesmo teor de fibras, isto porque, durante a desforma ocorreu a fissuração da bolsa do tubo. Este tubo foi ensaiado visando a análise da interferência que uma fissura na bolsa pode provocar na resistência do tubo o que, neste caso, foi uma redução de aproximadamente 17% da carga de ruptura e de 34% da carga pós-fissuração em relação aos demais tubos ensaiados com o mesmo teor de fibras. Dessa forma, este tubo não foi considerado na análise global destes componentes e também fica evidente a importância da qualidade da produção do tubo.

Vale ressaltar que é possível um tubo não atingir a carga de ruptura, mas atingir a carga mínima pós-fissuração, como mostra a curva 1 da Figura 5.4. Isso se deve ao fato de que a carga de ruptura é fortemente afetada pela matriz, enquanto que a carga máxima pós-fissuração depende muito da fibra e de seu teor. Assim, uma matriz de resistência insuficiente mas que apresente boa aderência com a fibra poderá apresentar resistência residual adequada mesmo quando a carga de ruptura for inferior ao especificado.

Tabela 5.2 – Resultados do ensaio de compressão diametral para os tubos com fibra de aço solta - quanto à carga de ruptura

Teor de fibra de aço solta	*Carga de ruptura (kN)*	*Valor médio (kN)*	*Desvio padrão*	*Coeficiente de variação (%)*
20 kg/m³	78	78,33	4,51	5,76
	83			
	74			
25 kg/m³	86	79,50	4,43	5,58
	78			
	76			
	78			
35 kg/m³	81	87,33	5,51	6,31
	91			
	90			

Tabela 5.3 – Resultados do ensaio de compressão diametral para os tubos com fibra de aço solta - quanto à carga máxima pós-fissuração

Teor de fibra de aço solta	*Carga máxima pós-fissuração (kN)*	*Carga média (kN)*	*Desvio Padrão*	*Coeficiente de variação (%)*
20 kg/m³	52	48,67	4,93	10,14
	51			
	43			
25 kg/m³	55	51,25	4,11	8,03
	54			
	50			
	46			
35 kg/m³	64	70,00	5,20	7,42
	73			
	73			

Analisando as Tabelas 5.2 e 5.3, observa-se que não há diferença significativa nem da carga de ruptura nem da carga pós-fissuração quando são utilizados os teores de 20 e 25 kg/m³ da fibra de aço solta, apesar de haver um ligeiro acréscimo em ambas com o aumento do teor de fibras. No entanto, quando é adicionado o teor de fibras de 35 kg/m³, o componente apresenta um acréscimo de aproximadamente 10% na carga de ruptura e de 40% na carga pós-fissuração. O que mostra que além de contribuir com o aumento da carga pós-fissuração, a adição desse tipo de fibras contribui também para o aumento da carga de ruptura, porém de forma menos expressiva. Ou seja, o teor de 35 kg/m³ é o que proporciona melhor desempenho em relação aos outros teores dessa mesma fibra neste estudo.

5.1.3 Tubo de concreto reforçado com fibra de aço curta colada em pente

A fibra de aço curta colada em pente possui um comprimento de 35 mm. Com esta fibra foram feitos ensaios com 20, 25, 35 e 45 kg/m³ cujos resultados obtidos são mostrados nas Figuras 5.5 a 5.8, respectivamente. As cargas de ruptura e pós-fissuração estão destacadas nas Tabelas 5.4 e 5.5.

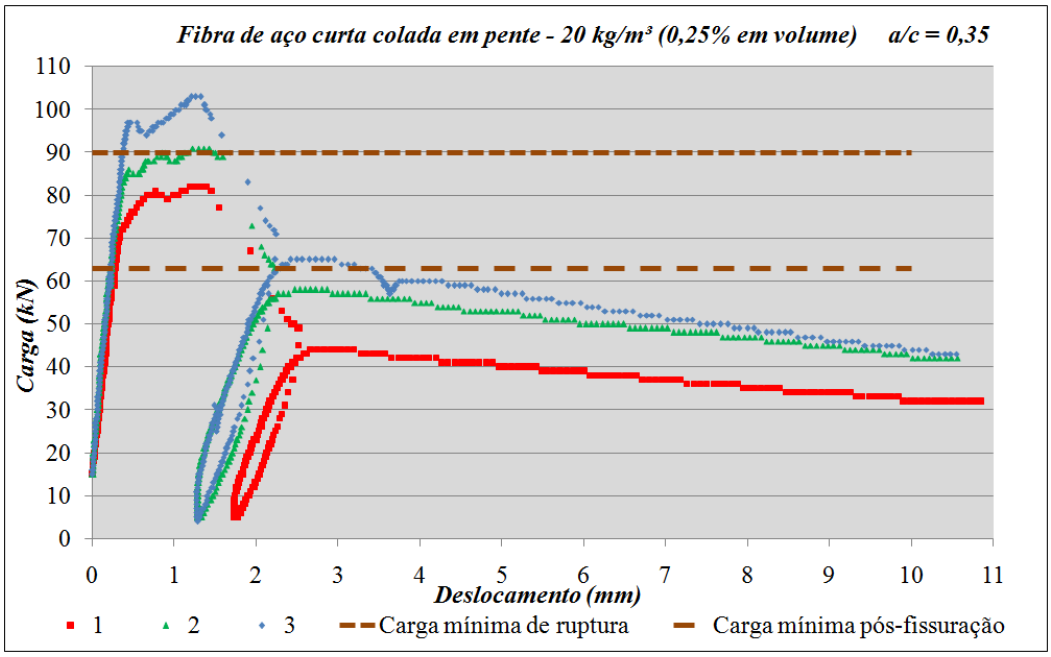


Figura 5.5 – Curvas de carga por deslocamento obtidas no ensaio de compressão diametral dos tubos com 20 kg/m³ da fibra de aço curta colada em pente

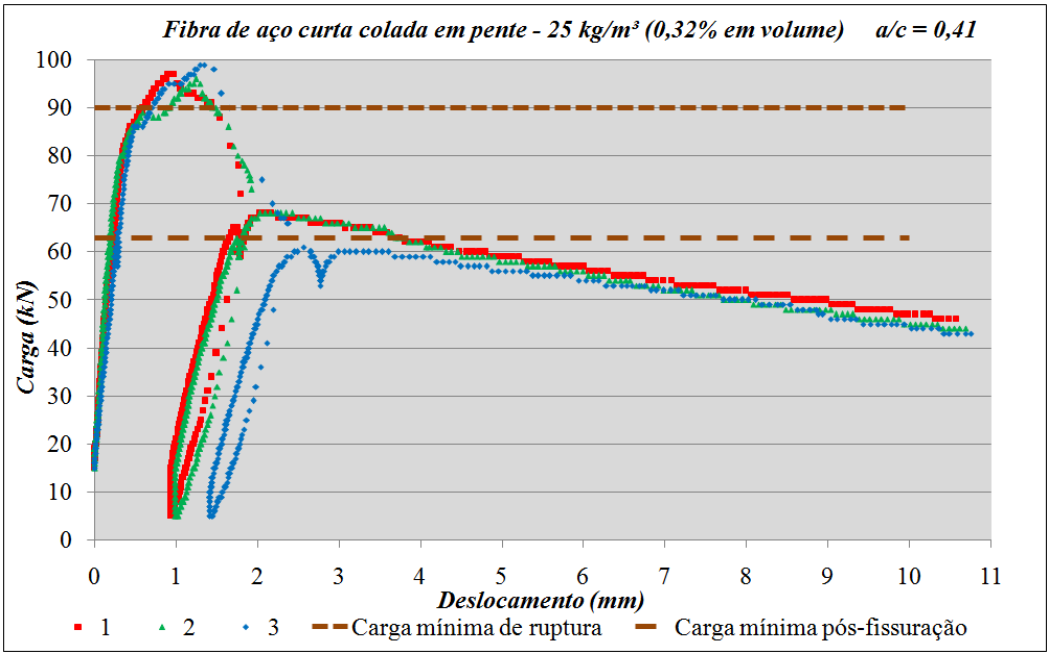


Figura 5.6 – Curvas de carga por deslocamento obtidas no ensaio de compressão diametral dos tubos com 25 kg/m³ da fibra de aço curta colada em pente

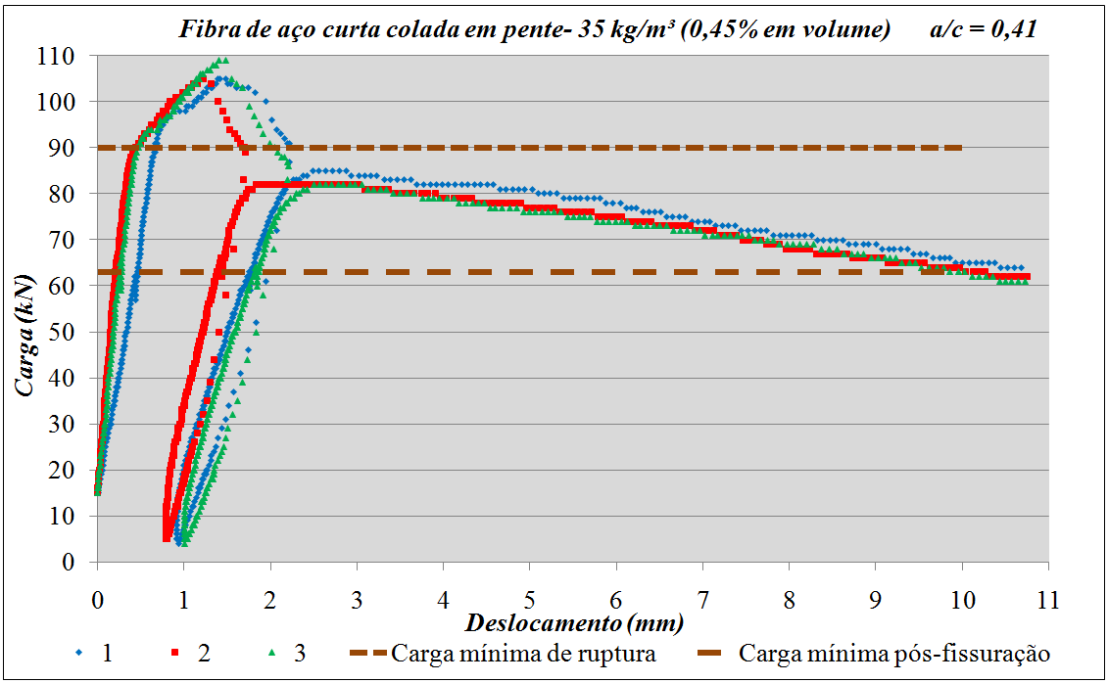


Figura 5.7 – Curvas de carga por deslocamento obtidas no ensaio de compressão diametral dos tubos com 35 kg/m³ da fibra de aço curta colada em pente

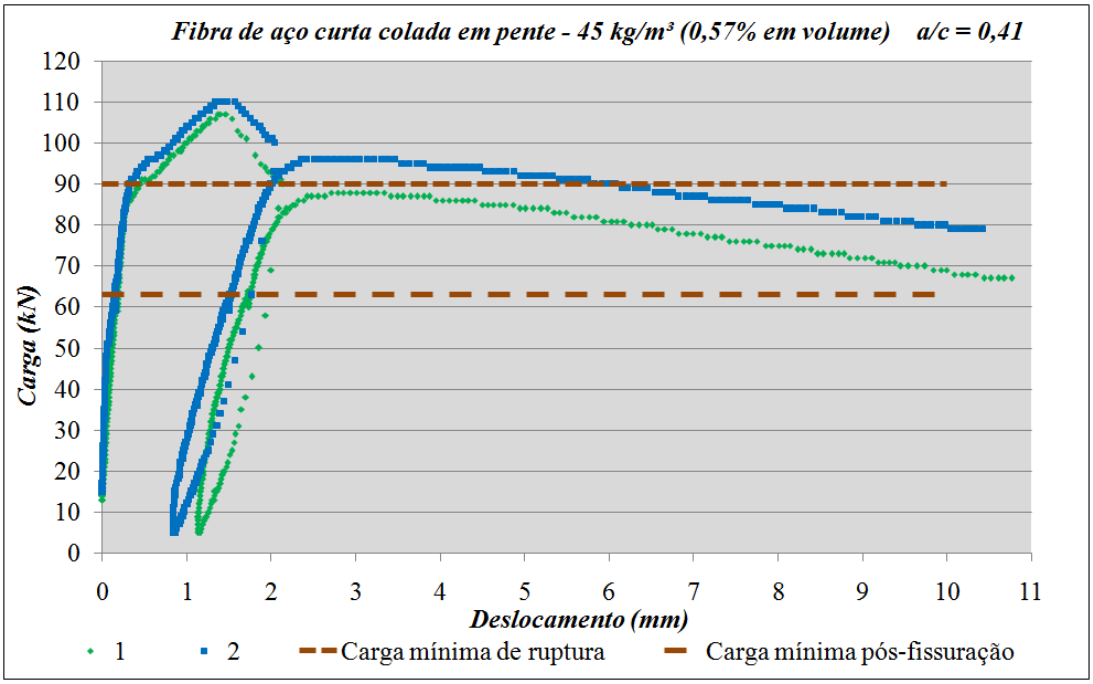


Figura 5.8 – Curvas de carga por deslocamento obtidas no ensaio de compressão diametral dos tubos com 45 kg/m³ da fibra de aço curta colada em pente

A partir das curvas acima pode-se observar que com o teor de 20 kg/m³ de fibras de aço curta colada em pente os tubos apresentaram heterogeneidade no comportamento evidenciando pequenas discrepâncias nos resultados das cargas tanto de ruptura como pós-fissuração. Nesta condição, o primeiro tubo não atingiu nem a carga de ruptura nem a carga pós-fissuração, o segundo só atingiu a carga de ruptura e o terceiro atingiu ambas as cargas.

No entanto, nos demais teores (25, 35 e 45 kg/m³) os tubos com os mesmos teores de fibras apresentaram comportamentos bem similares.

Com o teor de 25 kg/m³ de fibras, todos os tubos atingiram a carga de ruptura e apenas um não atingiu a carga pós-fissuração exigida pela norma NBR 8890:2007 que é de 63 kN. Os tubos que atingiram tanto a carga de ruptura como a carga pós-fissuração chegaram a superar estas cargas em 10% e 8%, respectivamente.

Com 35 e 45 kg/m³ de fibras, todos os tubos atingiram a carga de ruptura e a carga pós-fissuração chegando a superar em aproximadamente 23% a carga mínima de ruptura e em aproximadamente 35% e 53% a carga mínima pós-fissuração, respectivamente. Observa-se também que com 45 kg/m³ a carga pós-fissuração ultrapassa a carga mínima de ruptura ficando muito próxima à carga de ruptura dos tubos, o que evidencia um excelente desempenho da fibra na fase pós-fissuração com este teor de fibras.

Tabela 5.4 – Resultados do ensaio de compressão diametral para os tubos com fibra de aço curta colada em pente - quanto à carga de ruptura

Teor de fibra de aço curta colada em pente	***Carga de ruptura (kN)***	***Valor Médio (kN)***	***Desvio Padrão***	***Coeficiente de variação (%)***
20 kg/m³	82	92,33	11,06	11,98
	91			
	104			
25 kg/m³	97	97,33	1,53	1,57
	96			
	99			
35 kg/m³	105	106,33	2,31	2,17
	109			
	105			
45 kg/m³	110	108,50	2,12	1,96
	107			

Tabela 5.5 – Resultados do ensaio de compressão diametral para os tubos com fibra de aço curta colada em pente - quanto à carga máxima pós-fissuração

Teor de fibra de aço curta colada em pente	*Carga máxima pós-fissuração (kN)*	*Carga média (kN)*	*Desvio Padrão*	*Coeficiente de variação (%)*
20 kg/m³	44	55,67	10,69	19,21
	58			
	65			
25 kg/m³	68	65,33	4,62	7,07
	68			
	60			
35 kg/m³	82	83,00	1,73	2,09
	82			
	85			
45 kg/m³	96	92,00	5,66	6,15
	88			

Analisando as Tabelas 5.4 e 5.5, observa-se que à medida que se aumenta o teor de fibras há um acréscimo na carga de ruptura, chegando a superar em 23% a carga mínima exigida pela norma com o teor de 45 kg/m³ desta fibra.

O mesmo comportamento pode ser observado na fase pós-fissuração, em que o tubo atingiu a carga pós-fissuração 35% e 53% superior à carga mínima exigida pela norma (63 kN) com o teor de 35 e 45 kg/m³, respectivamente. Dessa forma, fica evidente que o teor de 45 kg/m³ da fibra de aço curta colada em pente é o que apresenta melhor desempenho quando comparado com os outros teores para esta fibra.

5.1.4 Tubo de concreto reforçado com fibra de aço longa colada em pente

A fibra de aço longa colada em pente possui um comprimento de 60 mm. Com esta fibra foram feitos ensaios com 20, 25, 35 e 45 kg/m³ cujos resultados obtidos são mostrados nas Figuras 5.9 a 5.12, respectivamente. As cargas de ruptura e pós-fissuração estão destacadas nas Tabelas 5.6 e 5.7.

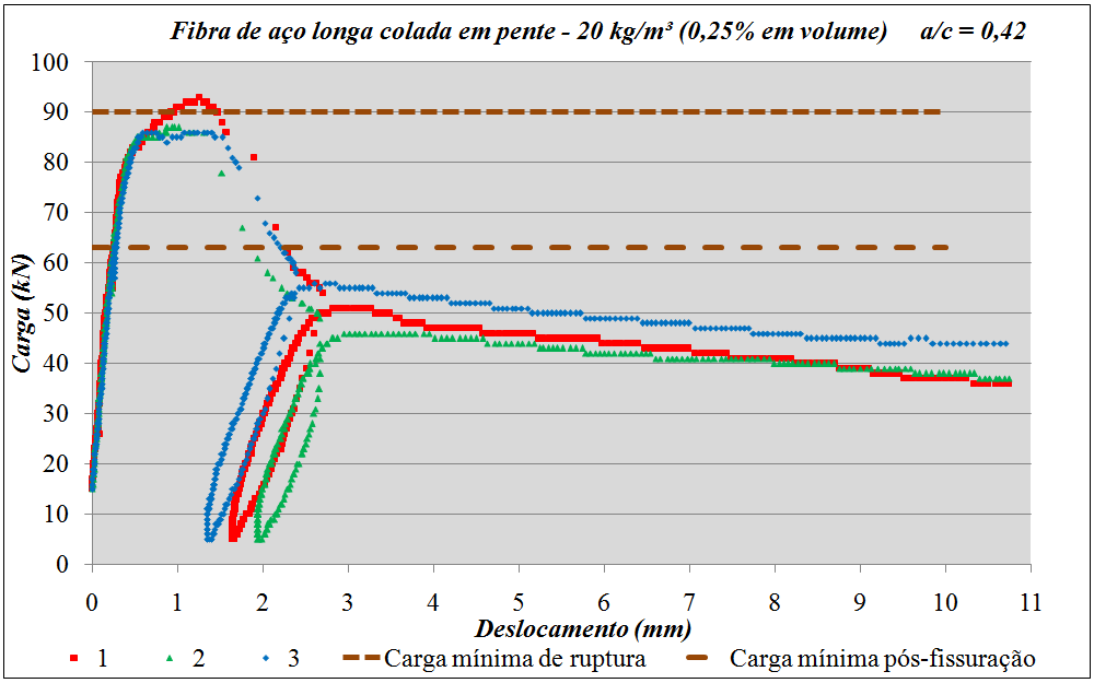


Figura 5.9 – Curvas de carga por deslocamento obtidas no ensaio de compressão diametral dos tubos com 20 kg/m³ da fibra de aço longa colada em pente

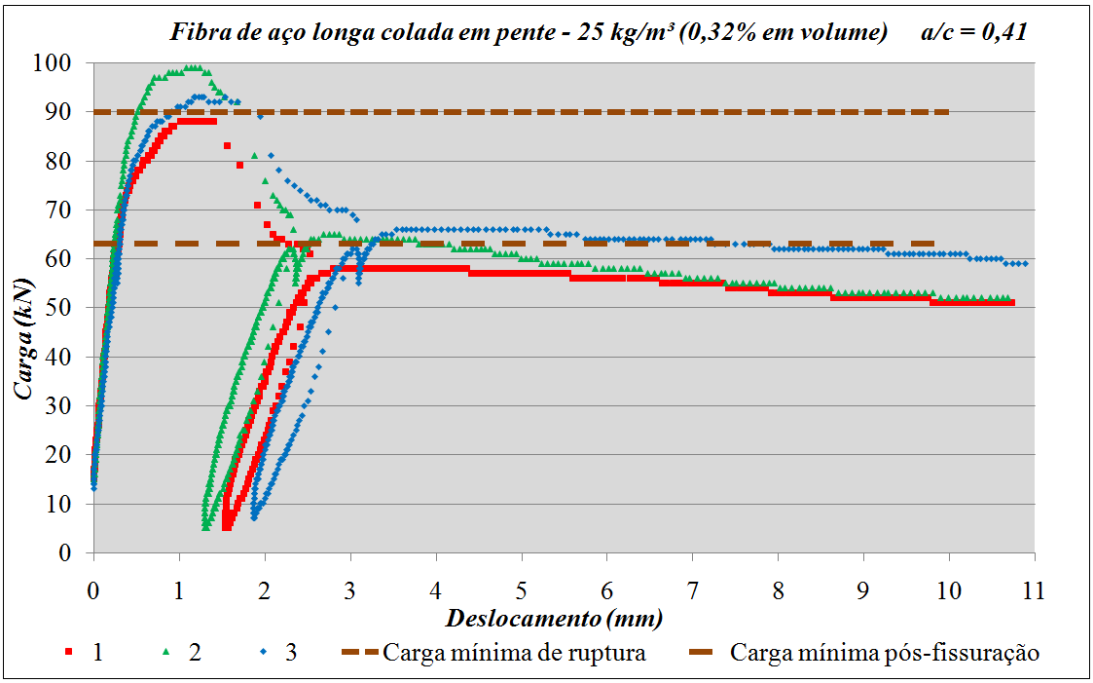


Figura 5.10 – Curvas de carga por deslocamento obtidas no ensaio de compressão diametral dos tubos com 25 kg/m³ da fibra de aço longa colada em pente

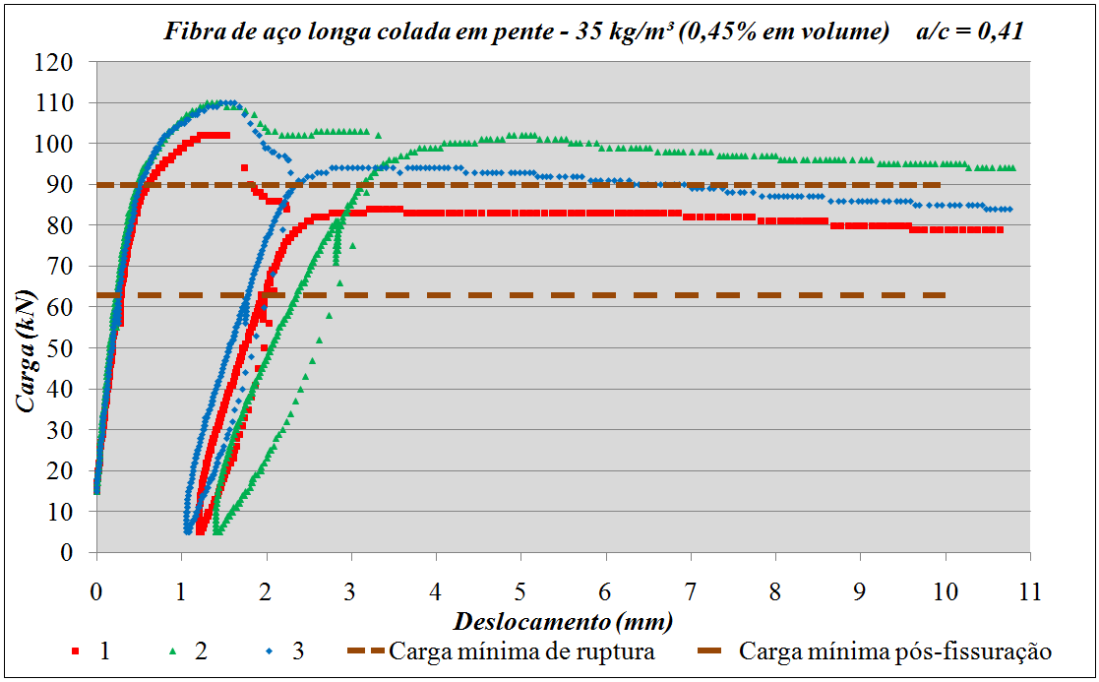


Figura 5.11 – Curvas de carga por deslocamento obtidas no ensaio de compressão diametral dos tubos com 35 kg/m³ da fibra de aço longa colada em pente

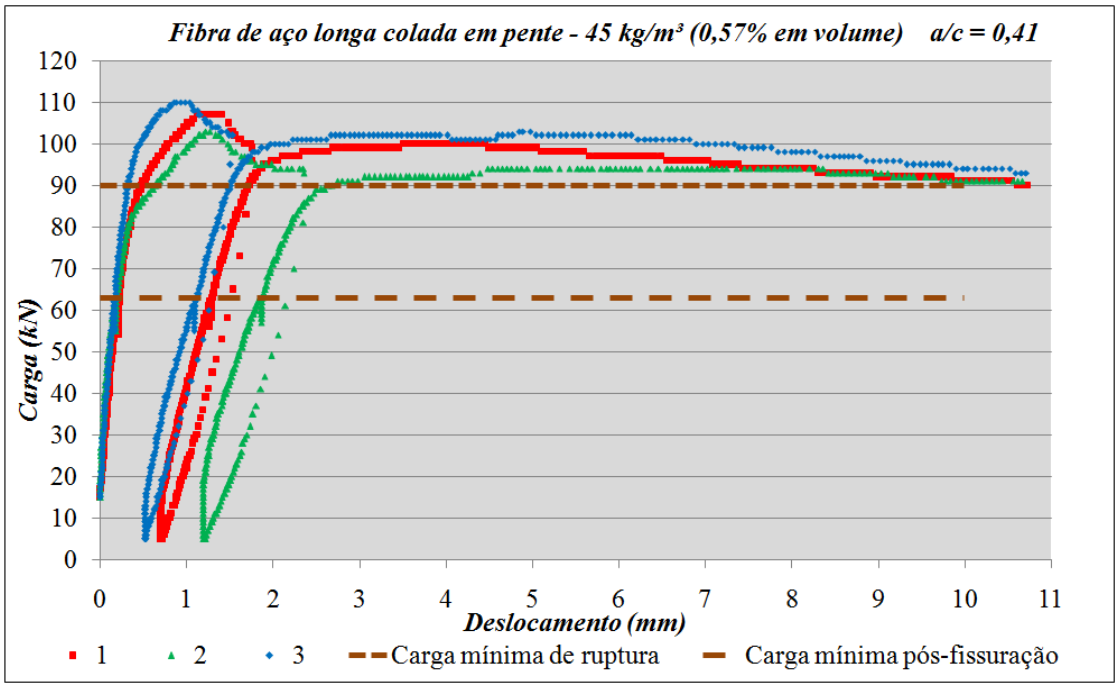


Figura 5.12 – Curvas de carga por deslocamento obtidas no ensaio de compressão diametral dos tubos com 45 kg/m³ da fibra de aço longa colada em pente

A partir das curvas acima pode-se observar que com 20 kg/m³ da fibra de aço longa colada em pente, apenas um tubo atingiu a carga de ruptura e nenhum dos três tubos atingiu a carga mínima na fase pós-fissuração. Já com 25 kg/m³, apenas um tubo não atingiu tanto a carga mínima de ruptura como a carga mínima pós-fissuração.

Com 35 e 45 kg/m³ da fibra de aço longa colada em pente, todos os tubos conseguiram atingir a carga mínima de ruptura e a carga mínima pós-fissuração, chegando a superá-las em aproximadamente 20% e 64%, respectivamente. Observa-se também que com estes teores de fibras a carga pós-fissuração ultrapassa a carga mínima de ruptura ficando muito próxima à carga de ruptura destes tubos, o que evidencia um excelente desempenho da fibra na fase pós-fissuração.

Tabela 5.6 – Resultados do ensaio de compressão diametral para os tubos com fibra de aço longa colada em pente - quanto à carga de ruptura

Teor de fibra de aço longa colada em pente	***Carga de ruptura (kN)***	***Valor Médio (kN)***	***Desvio Padrão***	***Coeficiente de variação (%)***
20 kg/m³	93	88,67	3,79	4,27
	87			
	86			
25 kg/m³	88	93,33	5,51	5,90
	99			
	93			
35 kg/m³	102	107,33	4,62	4,30
	110			
	110			
45 kg/m³	107	106,67	3,51	3,29
	103			
	110			

Tabela 5.7 – Resultados do ensaio de compressão diametral para os tubos com fibra de aço longa colada em pente - quanto à carga máxima pós-fissuração

Teor de fibra de aço longa colada em pente	***Carga máxima pós-fissuração (kN)***	***Carga média (kN)***	***Desvio Padrão***	***Coeficiente de variação (%)***
20 kg/m³	51	51,00	5,00	9,80
	46			
	56			
25 kg/m³	58	63,00	4,36	6,92
	65			
	66			
35 kg/m³	84	93,33	9,02	9,66
	102			
	94			
45 kg/m³	100	99,00	4,58	4,63
	94			
	103			

Analisando as Tabelas 5.6 e 5.7, observa-se que à medida que se aumenta o teor de fibras há um acréscimo na carga de ruptura, chegando a superar em 20% a carga mínima exigida pela norma com o teor de 35 e 45 kg/m³ da fibra de aço longa colada em pente.

O mesmo comportamento pode ser observado na fase pós-fissuração, em que o tubo atingiu carga pós-fissuração 55% e 64% superior à carga mínima exigida pela norma (63 kN) com o teor de 35 e 45 kg/m³, respectivamente. Dessa forma, fica evidente que o teor de 45 kg/m³ desse tipo de fibra é o que apresenta melhor desempenho quando comparado com os outros teores para esta fibra.

5.1.5 Tubo de concreto reforçado com macrofibra polimérica Barchip

A macrofibra polimérica Barchip é aquela que possui um fator de forma de 60, para um comprimento de 54 mm (fibra longa) e, consiste em um único tipo de fibra de polipropileno de alto módulo de elasticidade. Com esta fibra foram feitos ensaios com 3, 4 e 5,5 kg/m³ cujos resultados obtidos são mostrados nas Figuras 5.13 a 5.15, respectivamente. As cargas de ruptura e pós-fissuração estão destacadas nas Tabelas 5.8 e 5.9.

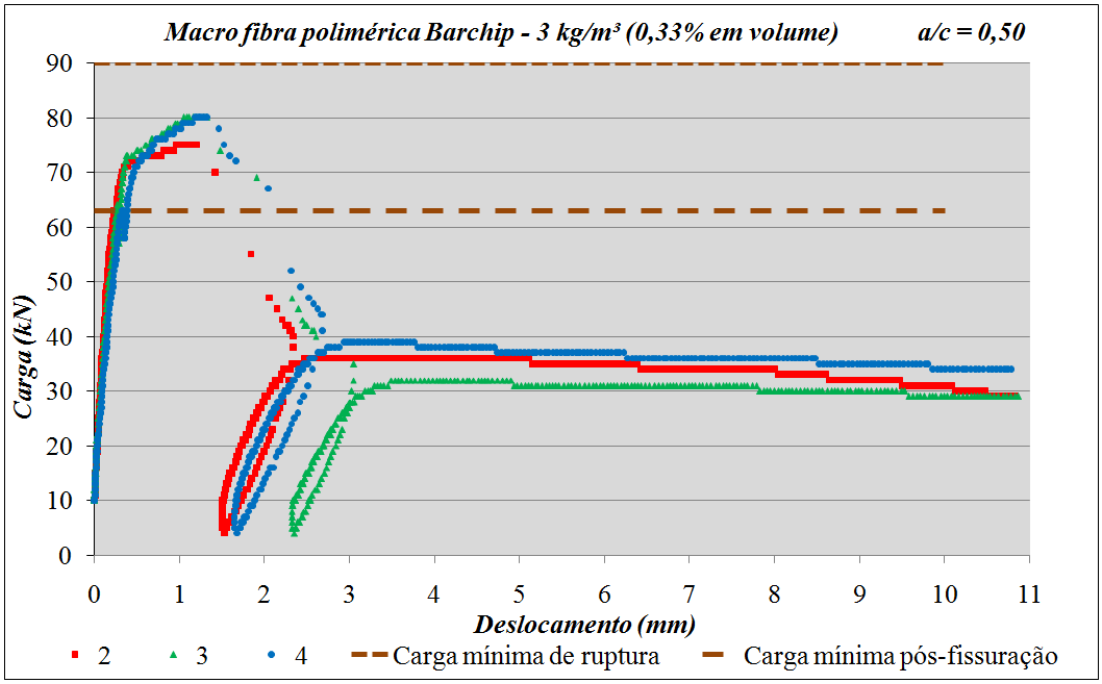


Figura 5.13 – Curvas de carga por deslocamento obtidas no ensaio de compressão diametral dos tubos com 3 kg/m³ da macrofibra polimérica Barchip

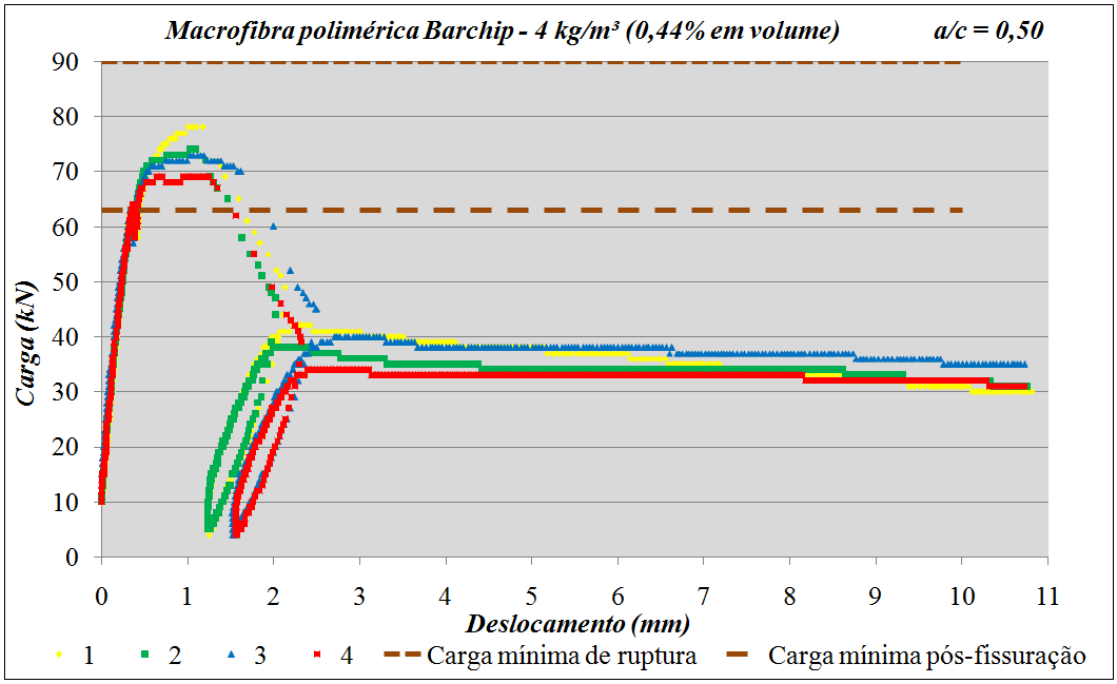


Figura 5.14 – Curvas de carga por deslocamento obtidas no ensaio de compressão diametral dos tubos com 4 kg/m³ da macrofibra polimérica Barchip

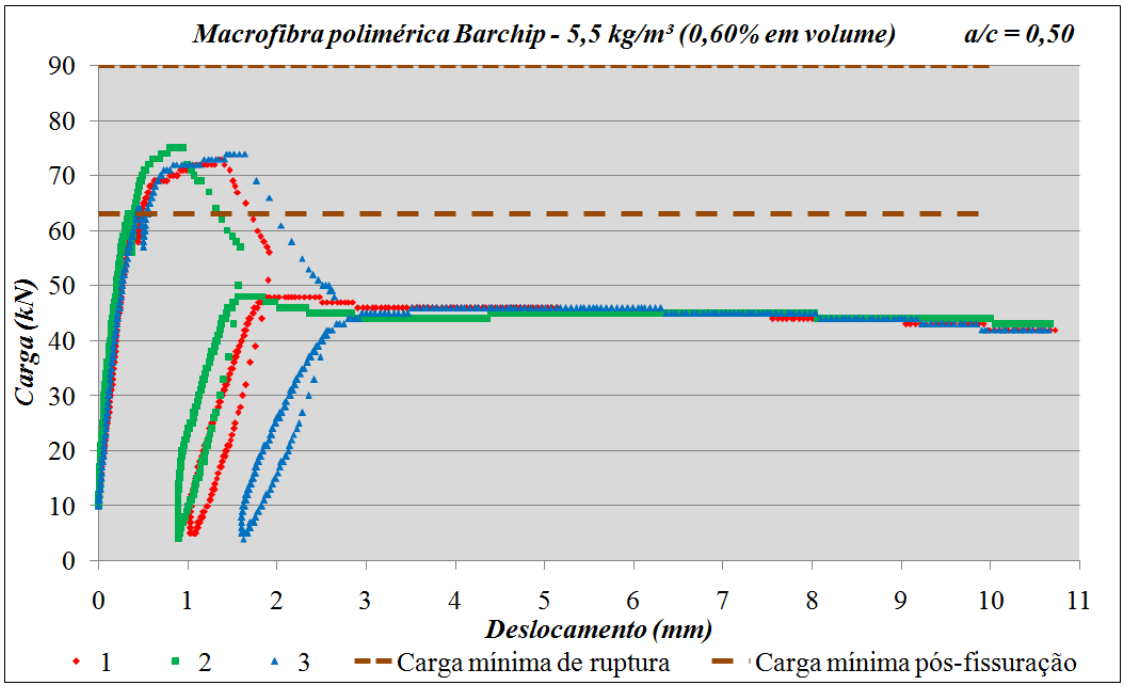


Figura 5.15 – Curvas de carga por deslocamento obtidas no ensaio de compressão diametral dos tubos com 5,5 kg/m³ da macrofibra polimérica Barchip

A partir das curvas acima pode-se observar que com todos os teores utilizados para a macrofibra polimérica Barchip (3, 4 e 5,5 kg/m³) nenhum dos tubos atingiram nem a carga de ruptura nem a carga pós-fissuração.

Na ruptura, os tubos com 3, 4 e 5,5 kg/m³ de macrofibra polimérica Barchip apresentaram a carga de ruptura inferior em 13%, 18% e 18%, respectivamente, ao exigido

pela norma NBR 8890:2007. Já na fase pós-fissuração, com esses mesmos teores, os tubos apresentaram carga máxima inferior à mínima exigida pela norma em 41%, 36% e 21%, respectivamente. Isso mostra que, apesar dos tubos com macrofibras poliméricas Barchip não terem atingido a carga mínima pós-fissuração, a resistência na fase pós-fissuração também é função do teor de fibras adicionado ao componente.

Tabela 5.8 – Resultados do ensaio de compressão diametral para os tubos com macrofibra polimérica Barchip - quanto à carga de ruptura

Teor de macrofibra polimérica Barchip	*Carga de ruptura (kN)*	*Valor Médio (kN)*	*Desvio Padrão*	*Coeficiente de variação (%)*
3 kg/m³	75	78,33	2,89	3,69
	80			
	80			
4 kg/m³	78	73,50	3,70	5,03
	74			
	73			
	69			
5,5 kg/m³	73	74,00	1,00	1,35
	75			
	74			

Tabela 5.9 – Resultados do ensaio de compressão diametral para os tubos com macrofibra polimérica Barchip - quanto à carga máxima pós-fissuração

Teor de macrofibra polimérica Barchip	*Carga máxima pós-fissuração (kN)*	*Carga média (kN)*	*Desvio Padrão*	*Coeficiente de variação (%)*
3 kg/m³	36	35,67	3,51	9,85
	32			
	39			
4 kg/m³	42	38,50	3,42	8,87
	38			
	40			
	34			
5,5 kg/m³	48	47,33	1,15	2,44
	48			
	46			

Analisando as Tabelas 5.8 e 5.9, observa-se que ao contrário do que ocorreu com todos os tipos de fibras de aço, o aumento do teor da macrofibra polimérica Barchip não interfere significativamente na carga de ruptura do tubo, embora apresente uma ligeira redução da mesma. Isto se deve ao fato desse tipo de fibra prejudicar a trabalhabilidade da mistura e

dificultar mais a sua compactação, tendo até formado aglomerados de fibras com grande facilidade. No entanto, no que se refere à carga pós-fissuração, há um aumento da resistência da carga máxima atingida no ensaio com o aumento do teor de fibra, apesar de não ter atingido a carga mínima exigida pela norma.

5.1.6 Tubo de concreto reforçado com macrofibra polimérica Forta Ferro

A macrofibra polimérica Forta Ferro possui um fator de forma de 158, para um comprimento de 54 mm (fibra longa), e consiste de um combinado de dois tipos de fibras de polipropileno, sendo uma de alto e outra de baixo módulo de elasticidade. Com esta fibra foram feitos ensaios com 3, 4 e 5,5 kg/m³ cujos resultados obtidos são mostrados nas Figuras 5.16 a 5.18, respectivamente. As cargas de ruptura e pós-fissuração estão destacadas nas Tabelas 5.10 e 5.11.

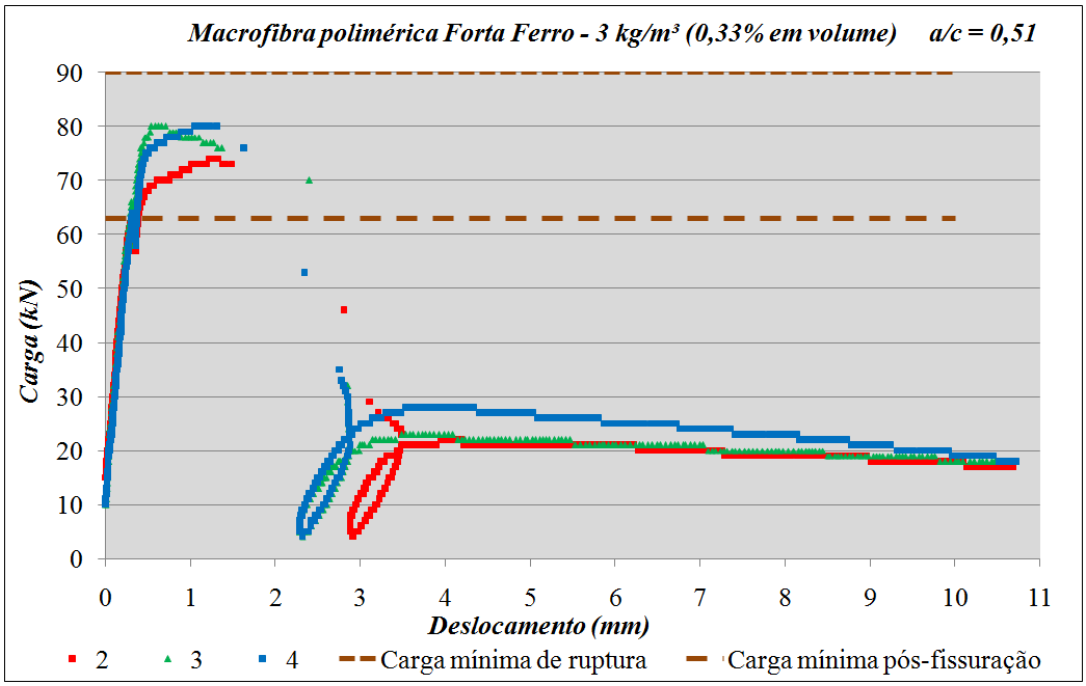


Figura 5.16 – Curvas de carga por deslocamento obtidas no ensaio de compressão diametral dos tubos com 3 kg/m³ da macrofibra polimérica Forta Ferro

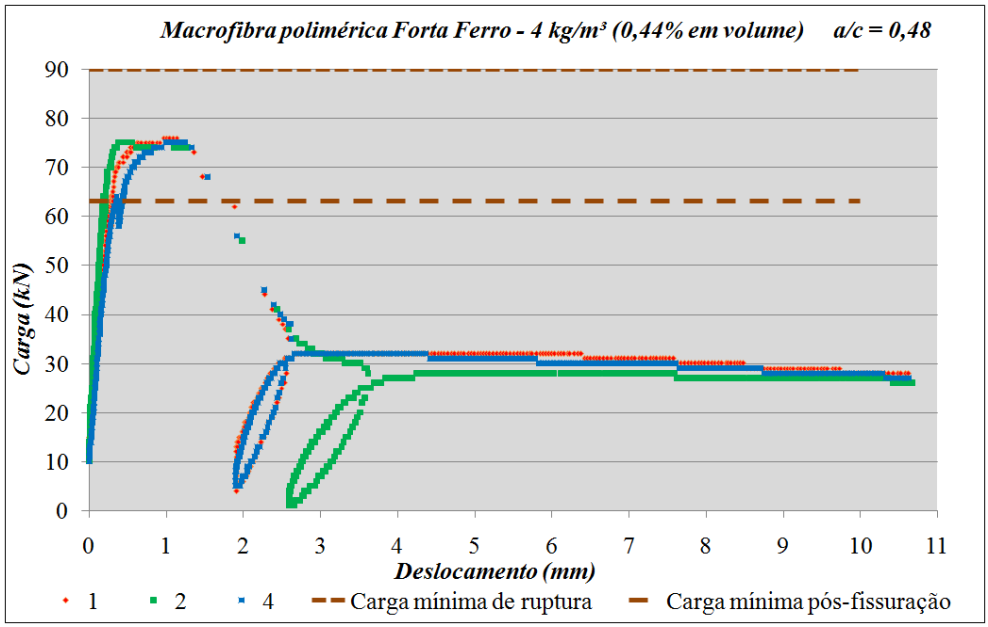


Figura 5.17 – Curvas de carga por deslocamento obtidas no ensaio de compressão diametral dos tubos com 4 kg/m³ da macrofibra polimérica Forta Ferro

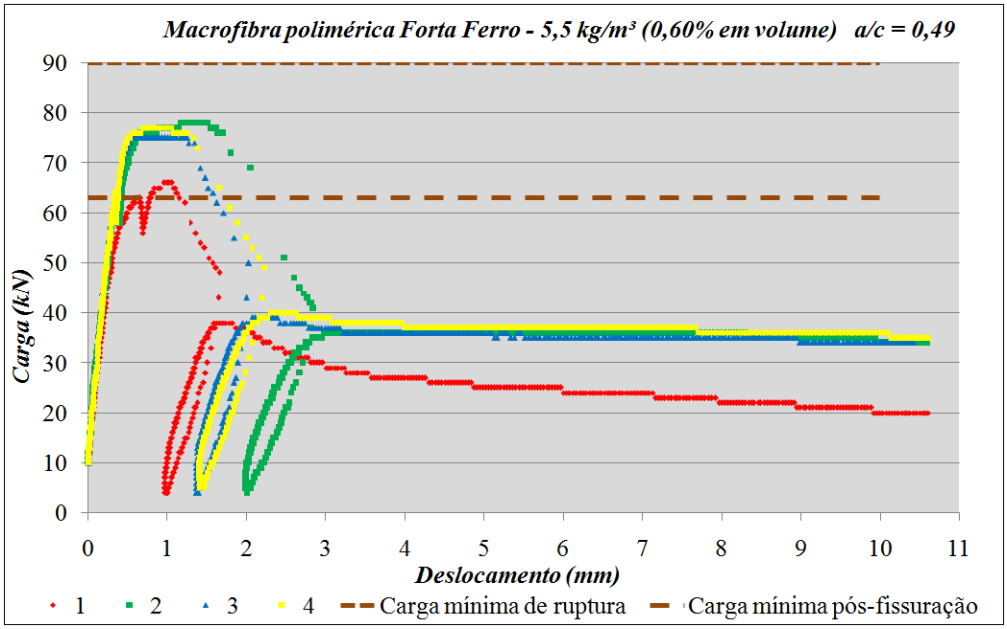


Figura 5.18 – Curvas de carga por deslocamento obtidas no ensaio de compressão diametral dos tubos com 5,5 kg/m³ da macrofibra polimérica Forta Ferro

A partir das curvas acima pode-se observar que com todos os teores utilizados para a macrofibra polimérica Forta Ferro (3, 4 e 5,5 kg/m³) nenhum dos tubos atingiram nem a carga de ruptura nem a carga pós-fissuração.

Na ruptura, os tubos com 3, 4 e 5,5 kg/m³ de macrofibra polimérica Forta Ferro apresentaram a carga de ruptura inferior em 13%, 16% e 15% ao exigido pela norma NBR 8890:2007, respectivamente. Já na fase pós-fissuração, com esses mesmos teores de fibras, os tubos apresentaram carga máxima inferior em 60%, 49% e 36%. Isso mostra que apesar de os

tubos com macrofibra polimérica E não terem atingido a carga mínima pós-fissuração, o aumento da resistência na fase pós-fissuração é função do aumento do teor de fibras.

É importante observar que o tubo representado pela curva 1 da Figura 5.18 apresentou tanto a carga de ruptura como a carga máxima pós-fissuração inferior às apresentadas pelos demais tubos com o mesmo teor de 5,5 kg/m³. Isto porque durante o processo de fabricação do tubo, o concreto ficou muito tempo no misturador devido a atrasos de execução e, provavelmente, houve início das reações de hidratação. Para poder utilizá-lo foi colocado um pouco mais de água, o que prejudicou sua resistência final. Mais uma vez fica evidenciado que a qualidade da produção dos tubos de concreto com fibras interfere significativamente na sua resistência à compressão diametral e, por isto, este tubo não foi considerado na análise global destes componentes.

Tabela 5.10 – Resultado do ensaio de compressão diametral para os tubos com macrofibra polimérica Forta Ferro - quanto à carga de ruptura

Teor de macrofibra polimérica Barchip	***Carga de ruptura (kN)***	***Valor Médio (kN)***	***Desvio Padrão***	***Coeficiente de variação (%)***
3 kg/m³	74	78,00	3,46	4,44
	80			
	80			
4 kg/m³	76	75,33	0,58	0,77
	75			
	75			
5,5 kg/m³	78	76,67	1,53	1,99
	75			
	77			

Tabela 5.11 – Resultado do ensaio de compressão diametral para os tubos com macrofibra polimérica Forta Ferro - quanto à carga máxima pós-fissuração

Teor de macrofibra polimérica Barchip	***Carga máxima pós-fissuração (kN)***	***Carga média (kN)***	***Desvio Padrão***	***Coeficiente de variação (%)***
3 kg/m³	22	24,33	3,21	13,21
	23			
	28			
4 kg/m³	32	30,67	2,31	7,53
	28			
	32			
5,5 kg/m³	36	38,33	2,08	5,43
	39			
	40			

Analisando as Tabelas 5.10 e 5.11, observa-se que assim como o outro tipo de macrofibra polimérica, o aumento do teor de fibra não interfere significativamente na carga de fissuração do tubo, embora apresente uma ligeira redução da mesma. Os baixos valores de carga de ruptura podem ser associados à maior relação água/cimento utilizada nestes tubos, o que ocorreu devido ao impacto negativo dessas fibras na trabalhabilidade da mistura, dificultando a condição de mobilidade dos tubos e, além disso, ao fato desta fibra possuir em sua composição fibras de baixo módulo de elasticidade, que não contribuem para a resistência à ruptura do componente, podendo até prejudicar.

No entanto, no que se refere à carga pós-fissuração, há um aumento da carga máxima atingida no ensaio com o aumento do teor de fibra, apesar de não ter atingido a carga mínima exigida pela norma.

5.2 ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA E ÍNDICE DE VAZIOS

Os resultados do ensaio de absorção de água foram em geral muito bons, pois apresentaram uma média de 4,86%. Além disso, nenhuma das amostras apresentou valor superior ao limite estabelecido pela norma que é de 8% para tubos de águas pluviais. Vale ressaltar que a grande maioria das amostras[2] ficou abaixo até do limite máximo exigido pela norma para tubos destinados a esgoto que é de 6% (apenas três tubos ultrapassaram esse limite), isto demonstra que houve uma boa compactação durante a produção desses tubos de concreto.

Os resultados médios obtidos no ensaio de absorção de água e índice de vazios se encontram apresentados juntamente com a relação água/cimento na Tabela 5.12.

[2] O resultado da absorção de água de cada tubo encontra-se listado na Tabela A.1 do Apêndice A.

Tabela 5.12 – Resultados obtidos no ensaio de absorção de água e índice de vazios para os tubos reforçados com fibras de aço e macrofibras poliméricas

Tubos	*Teor (kg/m³)*	*Absorção média (%)*	*Índice de vazios (%)*	*Relação a/c*
Simples	*--*	3,43	7,98	0,43
Fibra de aço solta	***20***	5,52	12,76	0,46
	25	5,77	13,28	0,48
	35	5,82	13,36	0,48
Fibra de aço curta colada em pente	***20***	5,04	11,73	0,35
	25	4,92	11,53	0,41
	35	5,13	11,99	0,41
	45	4,99	11,69	0,41
Fibra de aço longa colada em pente	***20***	3,42	7,90	0,42
	25	3,08	7,21	0,41
	35	3,58	8,41	0,41
	45	3,96	9,20	0,41
Macrofibra polimérica Barchip	***3***	5,53	12,68	0,50
	4	5,46	12,52	0,50
	5,5	5,57	12,75	0,50
Macrofibra polimérica Forta Ferro	***3***	5,57	12,77	0,51
	4	5,39	12,38	0,48
	5,5	5,51	12,63	0,48

Pode-se observar que em geral, a adição de qualquer um dos tipos de fibras ao tubo de concreto aumenta a absorção de água em relação ao concreto simples, consequentemente aumenta o índice de vazios, o que neste caso não significa que a carga de ruptura será reduzida inexoravelmente, pois as fibras de aço trabalham como reforço eficaz no primeiro ciclo de carregamento. A exceção é o caso da fibra de aço longa colada em pente que apresentou um nível de absorção muito próximo daquele obtido com o concreto simples. No entanto, neste caso específico, foi possível utilizar uma relação água/cimento ligeiramente menor que a do concreto simples sem prejuízos para a trabalhabilidade da mistura. Os tubos que foram produzidos com esta fibra foram os que atingiram maior carga de ruptura.

Outro detalhe importante é que as fibras poliméricas demandaram um aumento da quantidade de água superior ao das fibras de aço para que fossem mantidas as condições de moldagem, devido ao maior impacto que as mesmas provocam na trabalhabilidade da mistura. Com isto, houve também um aumento efetivo da relação água/cimento, o que também contribuiu para aumentar o nível de absorção e reduzir a carga de ruptura.

Para os tubos reforçados com fibras de aço, qualquer que seja o tipo da fibra, o teor de 25 kg/m³ apresentou menor absorção de água. No caso das macrofibras poliméricas, o mesmo

aconteceu com o teor de fibra de 4 kg/m³. Isso mostra que esses dois teores são os que proporcionaram uma maior compactação do tubo de concreto. Isto pode estar associado à dificuldade inicial de ajuste da consistência do material para o primeiro traço rodado para a moldagem dos tubos para cada tipo de fibra, onde o menor teor sempre foi o escolhido para tal, partindo-se então para os maiores teores. Com isto, pode ter havido alguma dificuldade de compactação nas séries de tubos que utilizaram os menores teores.

Para a relação água/cimento em torno de 0,41 os tubos com fibra de aço longa colada em pente apresentaram absorção de água inferior aos tubos com fibra de aço curta colada em pente. Além disso, todos os tubos com fibra de aço longa colada em pente apresentaram absorção de água inferior a 4%, chegando a ser inferior ao tubo simples no teor de 25 kg/m³ e igual no teor de 20 kg/m³. Já para a relação água/cimento em torno de 0,48 tanto as macrofibras poliméricas (Barchip e Forta Ferro) como a fibra de aço solta apresentaram mesma absorção de água.

Isto evidencia que a absorção de água tem como principal fator a influenciá-lo a relação água/cimento que é utilizada para a fabricação dos tubos.

5.3 ENSAIO DE DETERMINAÇÃO DO TEOR INCORPORADO DE FIBRA

Nas Tabelas 5.14 a 5.17 se encontram apresentados os resultados obtidos na determinação dos volumes de cada testemunho e da massa específica, por tipo de fibra, segundo a norma NBR 9778 (2005).

Vale ressaltar que as fibras cujos teores foram utilizados foram as três de aço e apenas uma macrofibra polimérica (Barchip). Isto ocorreu porque, não foi possível separa a macrofibra polimérica Forta Ferro do concreto do testemunho, pelo fato da mesma ser composta por duas fibras sendo uma delas muito fina e de baixa resistência. Com isto, esta parte se rompia, permanecendo embutida na argamassa e, assim, apresentava grande dificuldade para a extração.

Nas Tabelas 5.13 a 5.16 também foram lançados os valores obtidos para a absorção de água em massa, que é um resultado obtido a partir do mesmo ensaio, e dá uma boa idéia do nível de compactação do material.

Tabela 5.13 – Resultados obtidos para os tubos concretos com a fibra de aço solta no estado endurecido quando submetidos ao ensaio previsto pela norma NBR9778 (2005)

Fibra de aço solta												
	20 kg/m³			***Volume (l)***	***Massa esp. (g/l)***	***Absorção (%)***	***35 kg/m³***			***Volume (l)***	***Massa esp. (g/l)***	***Absorção (%)***
	m1(g)	***m2(g)***	***m3(g)***				***m1(g)***	***m2(g)***	***m3(g)***			
CP1	1942	1207	2047	0,840	2437,76	5,4	1358	842	1445	0,603	2397,51	6,4
CP2	1922	1196	2027	0,831	2439,40	5,5	1605	1002	1704	0,702	2427,96	6,1
CP3	*						1447	900	1529	0,629	2431,75	5,7
CP4	1549	965	1637	0,672	2436,87	5,6	1562	974	1649	0,675	2442,32	5,6
CP5	1440	898	1518	0,620	2448,39	5,5	1468	915	1551	0,636	2438,91	5,7
CP6	1697	1056	1790	0,734	2439,28	5,5	1624	1013	1712	0,699	2449,63	5,4
				Média	***2440,34***	***5,5***				***Média***	***2431,35***	***5,8***
	25 kg/m³			***Volume (l)***	***Massa esp. (g/l)***	***Absorção (%)***						
	m1(g)	***m2(g)***	***m3(g)***									
CP1	1663	1034	1755	0,721	2433,92	5,5						
CP2	1627	1014	1711	0,697	2455,02	5,1						
CP3	1443	894	1529	0,635	2407,21	6,0						
CP4	*											
CP5	1286	798	1369	0,571	2398,04	6,4						
CP6	1503	937	1591	0,654	2431,85	5,9						
CP7	1518	943	1607	0,664	2421,25	5,8						
CP8	1541	959	1629	0,670	2430,70	5,7						
				Média	***2425,43***	***5,8***						
m1 = massa seca				*m2 = massa saturada imersa*					*m3 = massa saturada*			

* Valores descartados por apresentarem resultados absurdos devido a algum erro de ensaio

Tabela 5.14 – Resultados obtidos para os tubos concretos com a fibra de aço curta colada em pente no estado endurecido quando submetidos ao ensaio previsto pela norma NBR9778 (2005)

Fibra de aço curta colada em pente												
	20 kg/m³			***Volume (l)***	***Massa esp. (g/l)***	***Absorção (%)***	***25 kg/m³***			***Volume (l)***	***Massa esp. (g/l)***	***Absorção (%)***
	m1(g)	***m2(g)***	***m3(g)***				***m1(g)***	***m2(g)***	***m3(g)***			
CP1	1586	986	1680	0,694	2420,95	5,9	1495	928	1571	0,643	2444,36	5,1
CP2	1470	915	1557	0,642	2425,46	5,9	1537	955	1613	0,658	2451,81	5,0
CP3	1535	953	1615	0,662	2439,79	5,2	1570	977	1638	0,661	2477,62	4,3
CP4	1567	974	1640	0,666	2462,02	4,7	1575	983	1651	0,668	2472,22	4,8
CP5	1458	906	1520	0,614	2475,81	4,3	1527	953	1609	0,656	2453,41	5,4
CP6	1438	895	1501	0,606	2478,12	4,3	1616	1007	1695	0,688	2463,02	4,9
				Média	***2450,36***	***5,0***				***Média***	***2460,41***	***4,9***
	35 kg/m³			***Volume (l)***	***Massa esp. (g/l)***	***Absorção (%)***	***45 kg/m³***			***Volume (l)***	***Massa esp. (g/l)***	***Absorção (%)***
	m1(g)	***m2(g)***	***m3(g)***				***m1(g)***	***m2(g)***	***m3(g)***			
CP1	*						1494	930	1573	0,643	2445,45	5,3
CP2	1657	1033	1742	0,709	2456,78	5,1	1934	1206	2029	0,823	2466,08	4,9
CP3	1567	977	1649	0,672	2454,52	5,2	1740	1082	1824	0,742	2457,63	4,8
CP4	1634	1021	1718	0,697	2465,48	5,1	1917	1197	2010	0,813	2471,60	4,9
CP5	1604	1000	1685	0,685	2459,64	5,0				***Média***	***2460,19***	***5,0***
CP6	1401	875	1473	0,598	2464,19	5,1						
				Média	***2460,12***	***5,1***						
m1 = massa seca				*m2 = massa saturada imersa*					*m3 = massa saturada*			

* Valores descartados por apresentarem resultados absurdos devido a algum erro de ensaio

Tabela 5.15 – Resultados obtidos para os tubos concretos com a fibra de aço longa colada em pente no estado endurecido quando submetidos ao ensaio previsto pela norma NBR9778 (2005)

Fibra de aço longa colada em pente												
	20 kg/m³			***Volume (l)***	***Massa esp. (g/l)***	***Absorção (%)***	***25 kg/m³***			***Volume (l)***	***Massa esp. (g/l)***	***Absorçã o (%)***
	m1(g)	***m2(g)***	***m3(g)***				***m1(g)***	***m2(g)***	***m3(g)***			
CP1	1473	888	1518	0,630	2409,30	3,1	1477	886	1514	0,628	2410,38	2,5
CP2	1494	901	1539	0,638	2412,00	3,0	1485	891	1525	0,634	2406,25	2,7
CP3	1579	957	1625	0,668	2432,42	2,9	1434	866	1481	0,615	2409,28	3,2
CP4	1507	902	1585	0,683	2320,26	5,2	1538	936	1586	0,650	2440,66	3,1
CP5	1491	905	1540	0,635	2425,20	3,3	1639	996	1697	0,701	2420,83	3,5
CP6	1565	947	1611	0,664	2425,78	2,9	1679	1020	1736	0,716	2424,38	3,4
				Média	***2404,16***	***3,4***				***Média***	***2418,63***	***3,1***
	35 kg/m³			***Volume (l)***	***Massa esp. (g/l)***	***Absorção (%)***	***45 kg/m³***			***Volume (l)***	***Massa esp. (g/l)***	***Absorçã o (%)***
	m1(g)	***m2(g)***	***m3(g)***				***m1(g)***	***m2(g)***	***m3(g)***			
CP1	1560	951	1615	0,664	2432,66	3,5	1632	992	1694	0,702	2414,11	3,8
CP2	1545	940	1602	0,662	2419,30	3,7	1676	1025	1740	0,715	2433,57	3,8
CP3	1460	891	1509	0,618	2442,68	3,4	1474	894	1531	0,637	2403,89	3,8
CP4	1543	947	1604	0,657	2442,50	3,9	*					
CP5	1618	981	1673	0,692	2416,81	3,4	1554	946	1616	0,670	2411,31	4,0
CP6	1482	903	1535	0,632	2428,57	3,6	1539	936	1602	0,666	2405,41	4,1
				Média	***2430,42***	***3,6***				***Média***	***2413,66***	***3,9***
m1 = massa seca				*m2 = massa saturada imersa*			*m3 = massa saturada*					

* Valores descartados por apresentarem resultados absurdos devido a algum erro de ensaio

Tabela 5.16 – Resultados obtidos para os tubos concretos com macrofibras poliméricas D no estado endurecido quando submetidos ao ensaio previsto pela norma NBR9778 (2005)

Macrofibra polimérica Barchip												
	3 kg/m³			***Volume (l)***	***Massa esp. (g/l)***	***Absorção (%)***	***5,5 kg/m³***			***Volume (l)***	***Massa esp. (g/l)***	***Absorçã o (%)***
	m1(g)	***m2(g)***	***m3(g)***				***m1(g)***	***m2(g)***	***m3(g)***			
CP1	1550	961	1634	0,673	2427,93	5,4	1742	1078	1837	0,759	2419,73	5,5
CP2	1533	950	1617	0,667	2425,36	5,5	1758	1090	1854	0,764	2425,95	5,5
CP3	1687	1045	1779	0,734	2422,93	5,5	1581	975	1673	0,698	2397,65	5,8
CP4	1781	1104	1882	0,778	2419,94	5,6	1822	1130	1923	0,793	2424,25	5,5
CP5	1350	835	1423	0,588	2419,34	5,5	1552	958	1642	0,684	2401,20	5,8
CP6	1473	912	1557	0,645	2413,52	5,7	1613	999	1698	0,699	2428,78	5,3
				Média	***2421,50***	***5,5***				***Média***	***2416,26***	***5,6***
	4 kg/m³			***Volume (l)***	***Massa esp. (g/l)***	***Absorção (%)***						
	m1(g)	***m2(g)***	***m3(g)***									
CP1	1520	936	1600	0,664	2408,79	5,3						
CP2	1388	860	1464	0,604	2422,90	5,5						
CP3	1616	1000	1702	0,702	2425,52	5,3						
CP4	1663	1032	1752	0,720	2432,74	5,4						
CP5	1292	798	1364	0,566	2408,90	5,6						
CP6	1687	1043	1781	0,738	2413,47	5,6						
CP7	1662	1028	1753	0,725	2418,32	5,5						
CP8	1655	1025	1746	0,721	2420,85	5,6						
				Média	***2418,94***	***5,5***						
m1 = massa seca				*m2 = massa saturada imersa*			*m3 = massa saturada*					

Para a aferição do teor de fibras efetivamente empregado nas misturas, utilizou-se o cálculo do consumo através da massa específica do concreto determinada no próprio ensaio previsto na norma NBR 9778 (2005). Isto ocorreu pelo fato de que a determinação da massa específica por esta norma se dá a partir dos resultados medidos em cada testemunho, inclusive o volume de cada elemento ensaiado, o que minimiza os erros na determinação. Além disso, foi possível utilizar a média dos testemunhos efetivamente utilizados no ensaio. Assim, o cálculo dos consumos efetivos de fibra partiu dos traços em massa efetivamente utilizados no item 4.2.2, e das médias das massas específicas determinadas para o conjunto de corpos-de-prova de cada determinação (Tabelas 5.13 a 5.16). Tais resultados se encontram apresentados na Tabela 5.17.

Tabela 5.17 – Valores de consumo teórico e consumo verificado para os tubos de concreto com as fibras de aço e a macrofibra polimérica Barchip

Fibra	***Fibra de aço solta***			***Fibra de aço curta colada em pente***			
Consumo teórico (kg/m³)	***20***	***25***	***35***	***20***	***25***	***35***	***45***
Massa específica média (kg/m³)	2440,34	2425,43	2431,35	2450,36	2460,41	2460,12	2460,19
Consumo efetivo de cimento (kg/m³)	316,52	313,13	312,64	322,42	320,55	319,21	317,93
Conteúdo efetivo de fibra (kg/m³)	19,78	24,46	34,19	20,15	25,05	34,91	44,71
Fibra	***Fibra de aço longa colada em pente***				***Macrofibra polimérica Barchip***		
Consumo teórico (kg/m³)	***20***	***25***	***35***	***45***	***3***	***4***	***5,5***
Massa específica média (kg/m³)	2404,16	2418,63	2430,42	2413,66	2421,50	2418,94	2416,26
Consumo efetivo de cimento (kg/m³)	313,45	315,11	315,36	311,92	314,61	314,15	313,61
Conteúdo efetivo de fibra (kg/m³)	19,59	24,62	34,49	43,86	2,95	3,93	5,39

A maior diferença observada foi o valor obtido para o consumo efetivo da fibra de aço solta ligado ao traço de concreto com reforço de 35 kg/m³ e para a fibra de aço longa colada em pente ligado ao traço de concreto com reforço de 45 kg/m³, isto pode ser explicado pelo fato de ter havido uma maior incorporação de água para este traço, que pode ser diagnosticado pelo maior valor de absorção de água. Assim, o maior consumo de água gerou um maior volume de concreto e, consequentemente, um menor conteúdo efetivo de fibras.

Nas Tabelas 5.18 a 5.21 encontram-se apresentados os resultados obtidos para a massa de fibra coletada em cada um dos testemunhos após os seus esmagamentos e os respectivos teores incorporados de fibras obtidos para cada um dos mesmos.

Tabela 5.18 – Resultados obtidos para as massas de fibras extraídas após o esmagamento dos testemunhos dos tubos de concreto com a fibra de aço solta e respectivos teores incorporados

Fibra de aço solta									
Teor de fibra	***20 kg/m³***			***25 kg/m³***			***35 kg/m³***		
	Massa de fibra (g)	***Volume (l)***	***Teor incorporado de fibra (kg/m³)***	***Massa de fibra (g)***	***Volume (l)***	***Teor incorporado de fibra (kg/m³)***	***Massa de fibra (g)***	***Volume (l)***	***Teor incorporado de fibra (kg/m³)***
CP1	20,77	0,84	24,74	16,68	0,72	23,13	20,67	0,60	34,31
CP2	11,72	0,83	14,11	15,49	0,70	22,23	21,37	0,70	30,45
CP3	*			11,64	0,64	18,32	19,94	0,63	31,72
CP4	12,87	0,67	19,16	*			24,37	0,68	36,09
CP5	12,14	0,62	19,58	10,67	0,57	18,69	25,77	0,64	40,53
CP6	12,59	0,73	17,16	18,64	0,65	28,48	22,14	0,70	31,68
CP7				15,21	0,66	22,92			
CP8				14,00	0,67	20,89			
Média			***18,95***			***22,10***			***34,13***
Desvio			***3,48***			***3,16***			***3,42***

* Valores descartados por apresentarem resultados absurdos devido a algum erro de ensaio

Tabela 5.19 – Resultados obtidos para as massas de fibras extraídas após o esmagamento dos testemunhos dos tubos de concreto com a fibra de aço curta colada em pente e respectivos consumos

Fibra de aço curta colada em pente						
Teor de fibra	***20 kg/m³***			***25 kg/m³***		
	Massa de fibra (g)	***Volume (l)***	***Teor incorporado de fibra (kg/m³)***	***Massa de fibra (g)***	***Volume (l)***	***Teor incorporado de fibra (kg/m³)***
CP1	15,31	0,69	22,06	17,52	0,64	27,27
CP2	12,36	0,64	19,26	14,00	0,66	21,28
CP3	17,30	0,66	26,14	14,29	0,66	21,61
CP4	12,49	0,67	18,75	14,19	0,67	21,25
CP5	14,08	0,61	22,94	16,58	0,66	25,29
CP6	11,61	0,61	19,17	14,95	0,69	21,72
Média			***21,39***			***23,07***
Desvio			***2,64***			***2,34***
Teor de fibra	***35 kg/m³***			***45 kg/m³***		
	Massa de fibra (g)	***Volume (l)***	***Teor incorporado de fibra (kg/m³)***	***Massa de fibra (g)***	***Volume (l)***	***Teor incorporado de fibra (kg/m³)***
CP1	*			26,84	0,64	41,72
CP2	21,99	0,71	31,01	27,09	0,82	32,93
CP3	21,69	0,67	32,29	30,63	0,74	41,26
CP4	24,77	0,70	35,55	34,64	0,81	42,59
CP5	24,28	0,69	35,44			
CP6	21,59	0,60	36,13			
Média			***34,08***			***39,62***
Desvio			***2,04***			***3,89***

* Valor descartado por apresentar resultado absurdo devido a algum erro de ensaio

Tabela 5.20 – Resultados obtidos para as massas de fibras extraídas após o esmagamento dos testemunhos dos tubos de concreto com a fibra de aço longa colada em pente e respectivos consumos

Fibra de aço longa colada em pente						
Teor de fibra	***20 kg/m³***			***25 kg/m³***		
	Massa de fibra (g)	***Volume (l)***	***Teor incorporado de fibra (kg/m³)***	***Massa de fibra (g)***	***Volume (l)***	***Teor incorporado de fibra (kg/m³)***
CP1	11,91	0,63	18,90	11,92	0,63	18,97
CP2	10,02	0,64	15,70	12,30	0,63	19,41
CP3	10,01	0,67	14,98	10,85	0,61	17,66
CP4	8,76	0,68	12,82	16,68	0,65	25,67
CP5	10,36	0,64	16,31	13,62	0,70	19,43
CP6	10,54	0,66	15,87	15,57	0,72	21,74
Média			***15,77***			***20,48***
Desvio			***1,80***			***2,62***
Teor de fibra	***35 kg/m³***			***45 kg/m³***		
	Massa de fibra (g)	***Volume (l)***	***Teor incorporado de fibra (kg/m³)***	***Massa de fibra (g)***	***Volume (l)***	***Teor incorporado de fibra (kg/m³)***
CP1	26,77	0,66	40,33	25,72	0,70	36,66
CP2	19,81	0,66	29,91	22,46	0,72	31,41
CP3	29,89	0,62	48,40	22,49	0,64	35,32
CP4	32,45	0,66	49,43	*		
CP5	23,02	0,69	33,25	23,38	0,67	34,88
CP6	18,43	0,63	29,16	29,12	0,67	43,72
Média			***38,41***			***36,40***
Desvio			***8,26***			***4,05***

* Valor descartado por apresentar resultado absurdo devido a algum erro de ensaio

Tabela 5.21 – Resultados obtidos para as massas de fibras extraídas após o esmagamento dos testemunhos dos tubos de concreto com a macrofibra polimérica Barchip e respectivos consumos

Macrofibra polimérica Barchip									
Teor de fibra	***3 kg/m³***			***4 kg/m³***			***5,5 kg/m³***		
	Massa de fibra (g)	***Volume (l)***	***Teor incorporado de fibra (kg/m³)***	***Massa de fibra (g)***	***Volume (l)***	***Teor incorporado de fibra (kg/m³)***	***Massa de fibra (g)***	***Volume (l)***	***Teor incorporado de fibra (kg/m³)***
CP1	1,85	0,67	2,75	2,78	0,66	4,18	4,53	0,76	5,97
CP2	2,60	0,67	3,90	1,83	0,60	3,03	3,97	0,76	5,19
CP3	1,92	0,73	2,61	3,51	0,70	5,00	4,40	0,70	6,31
CP4	2,08	0,78	2,68	2,02	0,72	2,80	5,26	0,79	6,63
CP5	1,45	0,59	2,46	2,45	0,57	4,33	4,22	0,68	6,17
CP6	2,03	0,65	3,15	2,82	0,74	3,82	3,98	0,70	5,69
CP7				3,22	0,72	4,44			
CP8				2,71	0,72	3,76			
Média			***2,93***			***3,92***			***5,99***
Desvio			***0,48***			***0,69***			***0,46***

Para uma melhor visualização e análise, os resultados do ensaio de absorção de água e do teor real de fibras foram organizados em uma única tabela (Tabela 5.22).

Tabela 5.22 – Resultados do ensaio de absorção de água e do teor real de fibras dos testemunhos extraídos dos tubos

Tubos	*Teor (kg/m³)*	*Absorção média (%)*	*Teor incorporado (kg/m³)*
Fibra de aço solta	***20***	5,50	18,95
	25	5,80	22,10
	35	5,80	34,13
Fibra de aço curta colada em pente	***20***	5,00	21,39
	25	4,90	23,07
	35	5,10	34,08
	45	5,00	39,62
Fibra de aço longa colada em pente	***20***	3,40	15,77
	25	3,10	20,48
	35	3,60	38,41
	45	3,90	36,40
Macrofibra polimérica Barchip	***3***	5,50	2,93
	4	5,50	3,92
	5,5	5,60	5,99

Nesta tabela pode-se observar que o teor incorporado de fibras[3] variou em torno de 10% para todos os teores, no caso das fibras soltas e curtas coladas em pente. No caso da macrofibra polimérica Barchip a variação foi de 2% para os consumos teóricos de 3 e 4 kg/m³ e de 9% para o consumo teórico de 5,5 kg/m³. Nestes casos a variação não é considerada significativa, o que mostra que houve uma melhor distribuição das mesmas no tubo, apesar das dificuldades de aplicação que demandaram maior quantidade de água.

Já no caso da fibra longa colada em pente, houve uma variação significativa o que pode estar associada a uma má homogeneização das fibras dentro do tubo. Para os consumos teóricos de 20, 25 e 45 kg/m³ desta fibra resultou num teor incorporado 25%, 18% e 19% inferior ao esperado, respectivamente. Já com o consumo teórico de 35 kg/m³ resultou num consumo efetivo 10% superior ao esperado. Estas variações podem ser uma das causas da baixa resistência apresentada por alguns tubos.

[3] O resultado do cálculo do teor incorporado de fibra de cada tubo encontra-se listado na Tabela A.2 do Apêndice A

5.3 ENSAIO DE COMPRESSÃO AXIAL

As resistências à compressão médias obtidas no ensaio de compressão axial para cada teor da fibra de aço curta colada em pente e da macrofibra polimérica Forta Ferro em conjunto com os valores de absorção de água[4] estão apresentados na Tabela 5.23.

Tabela 5.23 – Resultados do ensaio de compressão axial nos corpos-de-prova – resistências à compressão médias e absorção médias

Fibra de aço curta colada em pente	***20 kg/m³***	***25 kg/m³***	***35 kg/m³***
Resistência à compressão média (MPa)	35,67	47,36	43,86
Absorção média (%)	3,63	2,68	2,5
Relação água/cimento	0,48	0,48	0,48
Macrofibra polimérica Forta Ferro	***3 kg/m³***	***4 kg/m³***	***5,5 kg/m³***
Resistência à compressão média (MPa)	37,05	39,85	34,58
Absorção média (%)	3,19	2,69	3,19
Relação água/cimento	0,48	0,50	0,48

A partir da tabela acima pode-se observar que o desempenho à compressão axial de ambas as fibras foi bem similar. Com os menores (20 kg/m³ para fibra de aço e 3 kg/m³ para macrofibra polimérica) e os maiores (35 kg/m³ para fibra de aço e 5,5 kg/m³ para macrofibra polimérica) teores os corpos-de-prova apresentaram maior absorção de água em relação aos teores intermediários o que resultou numa menor resistência à compressão dos primeiros.

Vale ressaltar que neste caso a relação água/cimento utilizada foi a mesma para ambas as fibras e, mesmo assim, as fibras de aço apresentaram desempenho superior em relação às macrofibras poliméricas. O único valor que destoa é o da fibra de aço com 20 kg/m³ que apresentou resistência menor do que os demais teores de ambas as fibras, provavelmente devido a problemas de moldagem específicos.

Dessa forma, o teor de 3 kg/m³ deve ser comparado ao teor de 25 kg/m³ que corresponde a 0,33% em volume, e que neste caso a fibra de aço foi superior em relação à macrofibra polimérica em aproximadamente 28%. E comparando o teor de 35 kg/m³ da fibra de aço, que corresponde a 0,45% em volume, com o teor de 4 kg/m³ da macrofibra

[4] Os resultados do ensaio de absorção de água dos corpos-de-prova encontram-se na Tabela B.1 do Apêndice B

polimérica, que corresponde a 0,44% em volume, a fibra de aço foi superior em 10% em relação à macrofibra polimérica.

Para visualizar melhor a relação entre a resistência à compressão axial e a absorção de água foi elaborado um gráfico (Figura 5.19) a partir dos dados da Tabela 5.23.

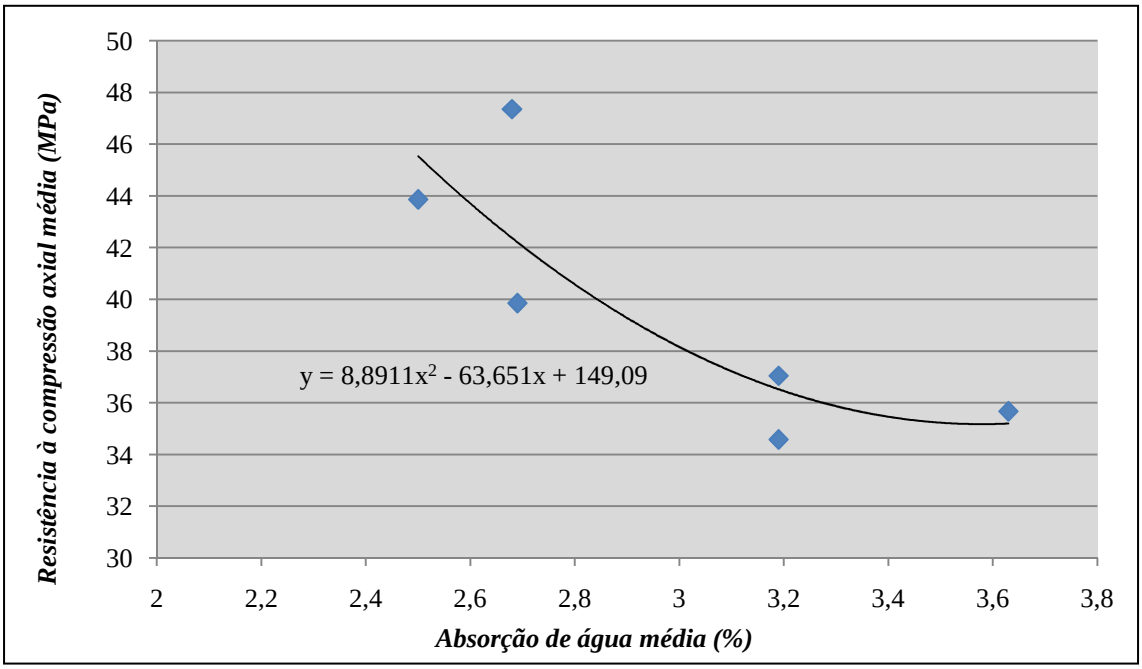


Figura 5.19 – Correlação entre a resistência à compressão média e a absorção de água média obtida no ensaio de compressão axial nos corpos-de-prova

A partir deste gráfico fica nítido que à medida que a absorção de água aumenta a resistência à compressão axial reduz independentemente do tipo de fibra que foi utilizado. Isto se deve ao fato de que ao apresentar maior nível de absorção, significa que os mesmos estão também com maior nível de porosidade. Este maior nível de porosidade pode alterar a resistência à compressão.

Além disso, observa-se que mais uma vez as fibras de aço apresentaram desempenho superior em relação às macrofibras poliméricas. Isto pode ser devido à dificuldade de compactação dos corpos-de-prova com as macrofibras poliméricas, o que consequentemente reduz a resistência à compressão axial.

As curvas individuais de resistência à compressão por deformação para alguns teores de fibra incorporados ao concreto encontram-se nas Figuras B.1 a B.5 do Apêndice B. Não foram apresentadas todas as curvas, pois alguns corpos-de-prova não tiveram suas deformações lidas após a fissuração e, por isso, não foram apresentadas, isto porque a idéia da medida da deformação era analisar o comportamento pós-fissuração e não até a fissuração.

5.4 SÍNTESE DA ANÁLISE DOS RESULTADOS

Para analisar e discutir os resultados de uma forma mais clara foram elaborados quatro gráficos comparativos entre todas as fibras estudadas, sendo um gráfico de absorção de água versus teor de fibras (Figura 5.20), um gráfico de carga de ruptura versus teor de fibras (Figura 5.21), um gráfico de carga de ruptura versus relação água/cimento (Figura5.22) e por último foi elaborada uma curva de dosagem para carga máxima pós-fissuração para cada tipo de fibra em função do teor de fibras incorporado ao concreto (Figura 5.23).

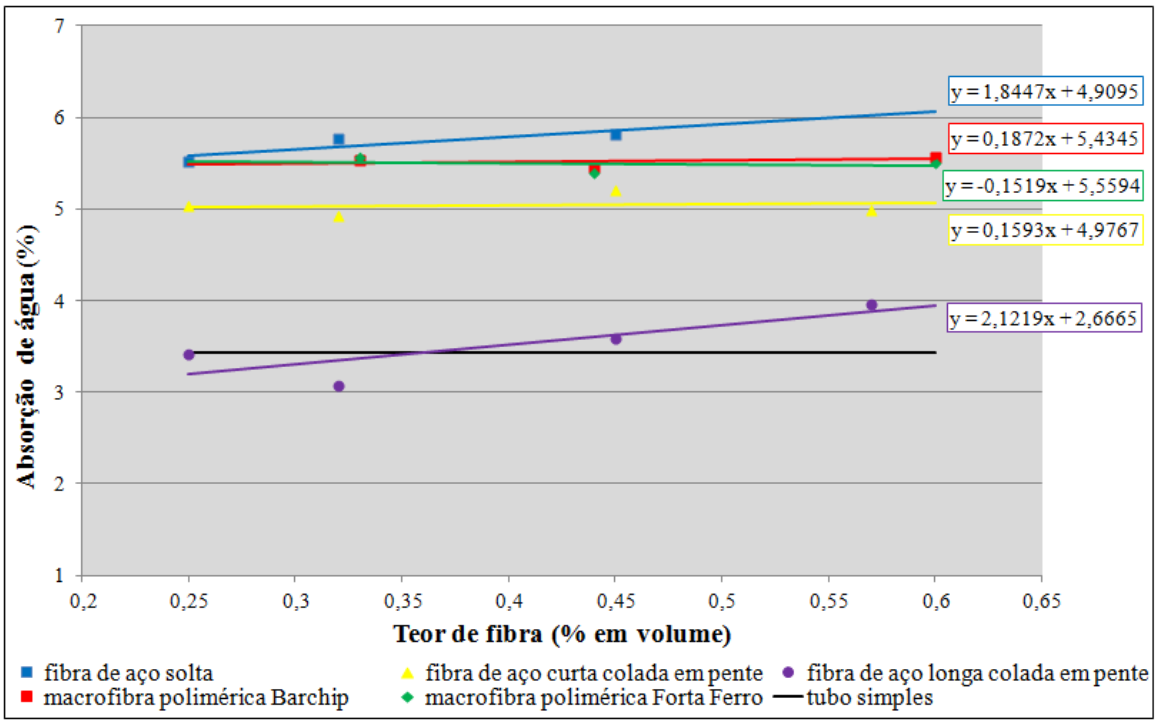


Figura 5.20 – Correlação logarítmica da absorção de água dos testemunhos extraídos dos tubos de concreto e seus respectivos consumos teóricos de fibras

Analisando o gráfico da absorção de água versus teor de fibras, nota-se que existe uma tendência de, ao aumentar o teor de fibras incorporado ao concreto, haver também um aumento da absorção de água. Isto, naturalmente, está relacionado à maior dificuldade de compactação gerada pela incorporação das fibras e de aplicação do material, o que acabou por demandar um aumento na relação água/cimento. Percebe-se também que os maiores níveis de absorção foram atingidos para as famílias de concretos com maiores relações água/cimento.

Além disso, observa-se que a fibra de aço longa colada em pente apresenta uma absorção de água muito menor do que as demais fibras, ou seja, ela dificultou menos a compactação, ao contrário do que se esperava. Isto pode estar associado ao fato da fibra de

aço longa colada em pente possuir menor quantidade de fibras por metro cúbico também em relação às demais fibras. Outro fator que pode ter reduzido a absorção de água é o fato das mesmas serem coladas em pente, pois a fibra de aço que também é colada em pente apresentou melhor desempenho em relação às demais. Porém esta fibra possui maior quantidade de fibras por metro cúbico em relação à fibra longa colada em pente e por isso apresentou maior absorção de água.

Na Figura 5.21 está clara a tendência de as fibras de aço aumentarem a carga de ruptura e, ao contrário disso, as macrofibras poliméricas tenderem a diminuir este valor. É possível observar também que os tubos com fibra de aço solta foram os que apresentaram maior absorção de água e mesmo assim apresentaram desempenho superior às macrofibras poliméricas, o que evidencia que além de proporcionarem um aumento na absorção de água, as macrofibras poliméricas também dificultam a compactação dos tubos, o que gera maior número de vazios, comprometendo a resistência final do tubo.

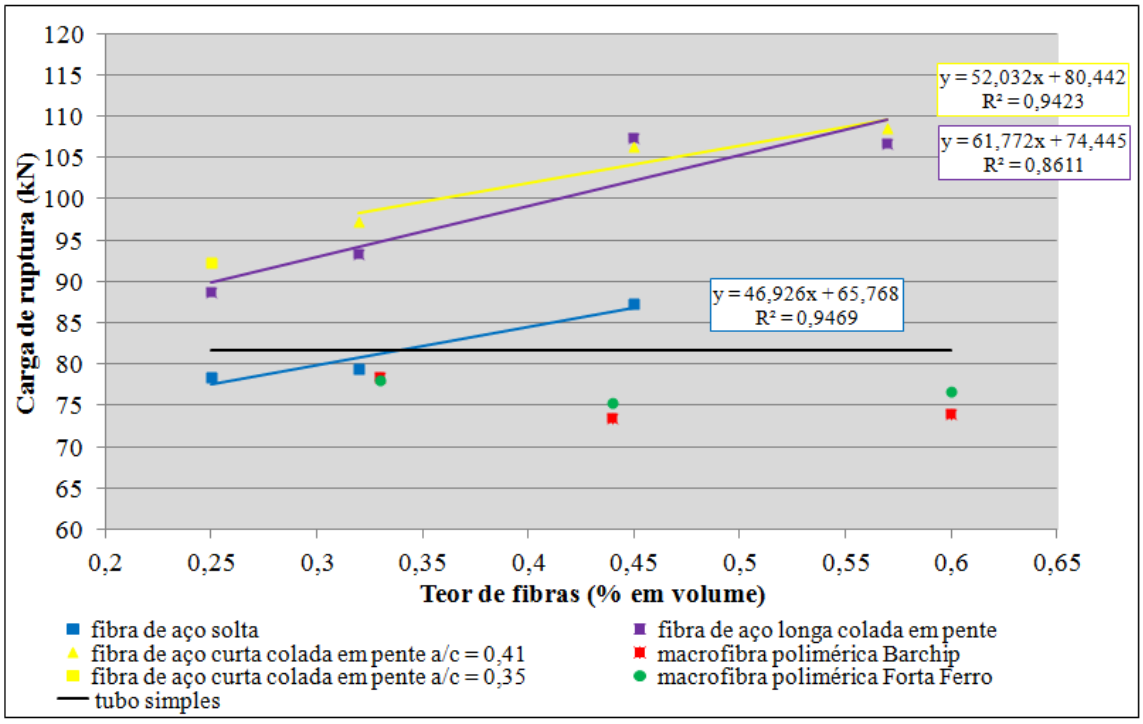


Figura 5.21 - Correlação da carga de ruptura dos tubos de concretos e seus respectivos consumos teóricos de fibras

O gráfico acima mostra que o aumento do teor de fibras de aço produziu um aumento na resistência média dos tubos de concreto, medida por meio da carga de ruptura. As fibras curtas e longas coladas em pente são as que proporcionam ao tubo maior resistência à ruptura, o que está de certo modo relacionado ao fato das mesmas serem coladas em pente. Dessa

forma, as fibras acabam prejudicando menos a trabalhabilidade do material e, consequentemente, não demandaram aumento na relação água/cimento, como ocorreu para o caso da fibra solta. Ou seja, as fibras coladas em pente ficam distribuídas mais facilmente dentro do tubo em relação às fibras soltas.

Além disso, a fibra curta colada em pente, apesar de possuir o menor comprimento, é que apresenta maior desempenho, pois proporcionou aumento da carga de ruptura, mesmo com a matriz dos tubos produzidos com esta fibra apresentando maior absorção de água e, consequentemente, maior porosidade em relação à fibra longa colada. Isto pode estar relacionado ao fato da mesma possuir o maior número de fibras por quilograma (14.500/kg no caso da fibra curta colada em pente, 4.600/kg no caso da fibra longa colada em pente e 5.710 no caso da fibra solta). Nunes (1998) demonstrou que fibras com fator de forma equivalente mas que apresentem maior número de fibras na seção de ruptura tendem a apresentar maior resistência residual para baixos níveis de deflexão. Isto pode ser correlacionado a uma maior facilidade da fibra curta colada em pente dificultar a iniciação da primeira fissura no tubo, aumentando a carga máxima atingida no primeiro ciclo de carregamento.

A fibra longa colada em pente também aumenta a carga de ruptura, não porque tenha um elevado desempenho como a primeira, mas porque a matriz não foi prejudicada para esta série e manteve a compactação do material que ficou numa faixa próxima dos tubos simples de referência.

A fibra solta de menor desempenho não elevou a carga em baixos teores, porque a matriz também foi prejudicada em termos de compactação, mas depois até compensa um pouco elevando a resistência.

Por fim, as fibras de aço proporcionam ao tubo de concreto maior resistência à ruptura em relação ao tubo sem fibras e àqueles reforçados com macrofibras poliméricas. Os tubos com macrofibras poliméricas não apresentam grande variação na resistência à ruptura, porém ambas as fibras indicam uma pequena redução dessa resistência. Isto porque as macrofibras poliméricas não têm resistência mecânica e módulo de elasticidade suficientemente elevados para impactar positivamente no comportamento do material e, ainda por cima, não facilitaram a compactação como era esperado. Logo, fica claro que a carga de ruptura é uma combinação de efeitos da fibra e da porosidade da matriz.

A porosidade da matriz está diretamente relacionada com a relação água/cimento e por isso foi elaborado o gráfico de carga de ruptura versus relação a/c como mostra a Figura 5.22.

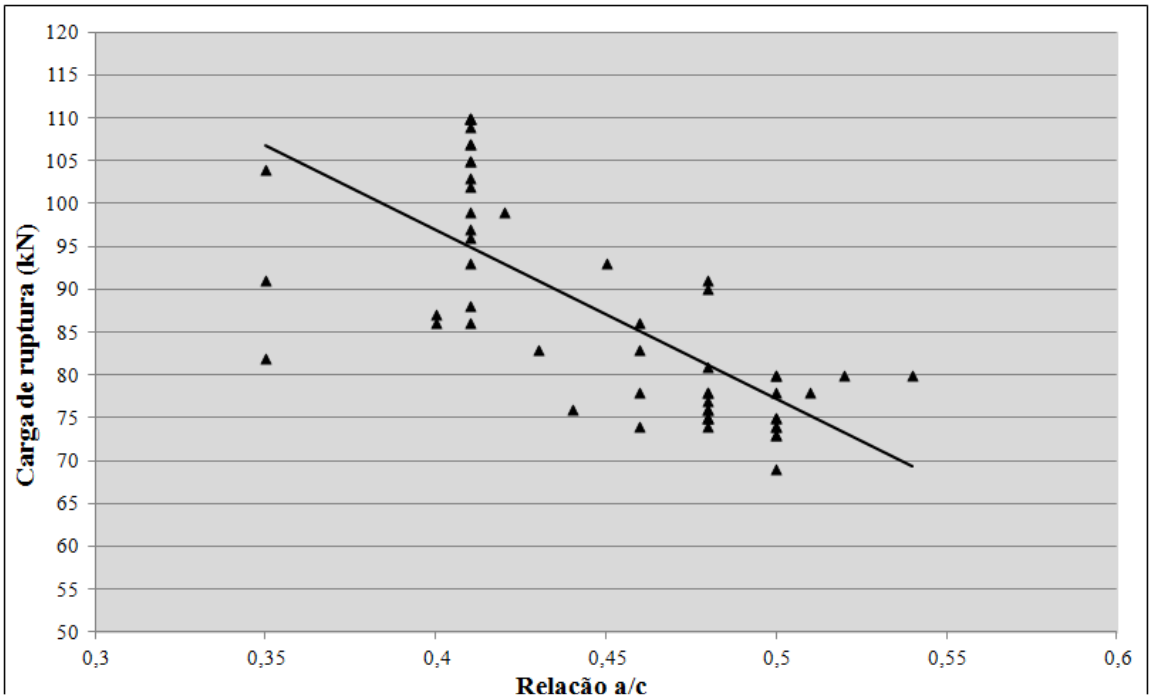


Figura 5.22 – Correlação entre a carga de ruptura e a relação água/cimento dos tubos reforçados com fibras

O gráfico acima mostra que há uma tendência geral de queda da carga de ruptura com o aumento da relação água/cimento. Com isto, evidencia-se que são dois os fatores a interferir simultaneamente na carga de ruptura: a relação água/cimento e o teor de fibras de aço. Este gráfico também sugere que há uma umidade ótima de compactação em torno da relação água/cimento de 0,41. Este comportamento é o esperado para os concretos secos, como é caso dos tubos de concreto (PRUDÊNCIO JR., 1993; TANGO, 1994).

A partir dos resultados obtidos no ensaio de compressão diametral pode-se obter uma curva de dosagem para carga pós-fissuração, para cada tipo de fibra em função do teor de fibras incorporado ao concreto, conforme a Figura 5.23. Para obter a curva de dosagem foi utilizada regressão logarítimica, baseada em resultados prévios já mostrados por Armelin e Banthia (1997) que indicaram ganho não linear de resistência residual pós-fissuração com o aumento do teor de fibras.

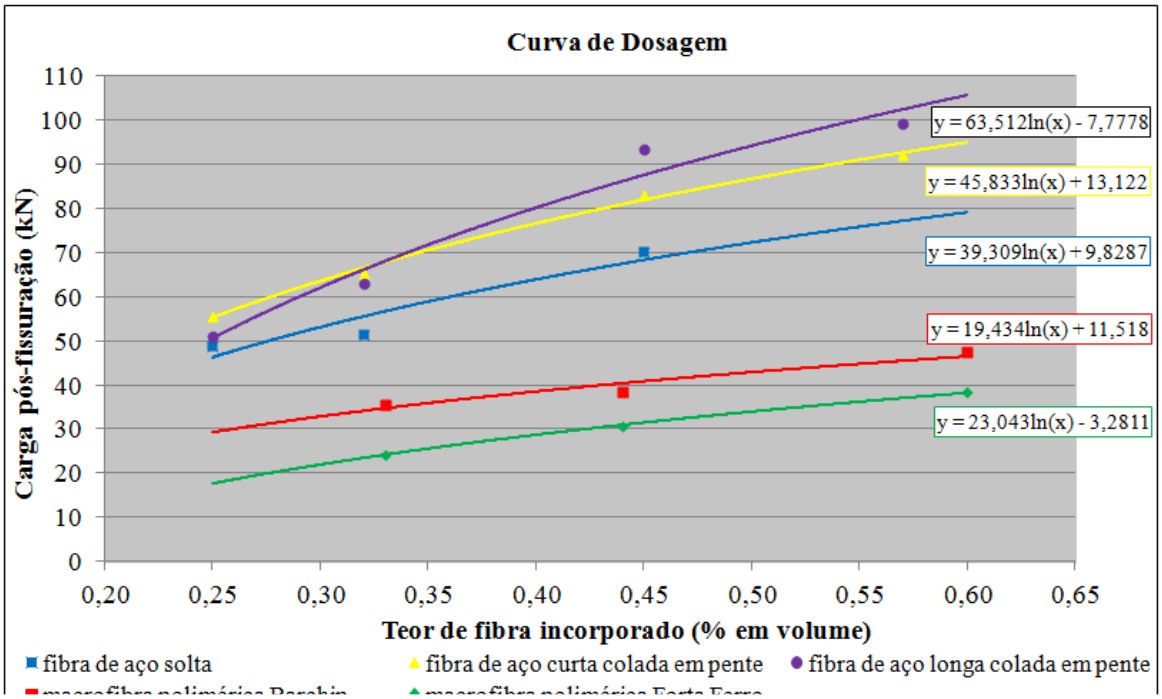


Figura 5.23 – Correlação logarítmica entre os teores das fibras - curva de dosagem

A partir das curvas de dosagem pode-se observar que as fibras de aço apresentam maior desempenho mecânico em relação às macrofibras poliméricas. Além disso, nota-se uma diferença de desempenho entre as fibras de mesmo material, porém menos expressiva, possivelmente influenciado por variações de relação a/c e, da quantidade de fibras por quilo.

A fibra de aço solta apresenta características similares às da fibra de aço curta colada em pente (ver Tabela 4.1), sendo que existem duas principais diferenças entre elas que foram fundamentais para que a fibra curta colada em pente apresentasse melhor desempenho. A primeira é que uma solta e a outra é colada em pente, o que facilita a homogeneização das fibras no concreto. A segunda é a quantidade de fibras por quilo, pois a fibra solta são 5.710 fibras/kg enquanto que a fibra curta colada em pente são 14.500 fibras/kg, ou seja, a fibra curta colada em pente tem 2,5 vezes mais fibras por quilo do que a fibra solta, o que faz com que tenha mais fibras trabalhando como ponte de transferência de tensão num mesmo volume de concreto. Estas duas vantagens que a fibra curta colada em pente tem em relação à fibra solta, compensam o fato da mesma possuir menor comprimento.

Outro fator que pode ter influenciado para que a fibra de aço solta tenha tido um desempenho inferior ao das fibras curta e longa colada em pente é o fato da relação água/cimento resultante para a fibra solta ter sido de 0,48 enquanto que para as fibras curta e longa colada em pente foi de 0,41. Porém esta diferença na relação água/cimento apenas aumenta um pouco a diferença de desempenho das fibras, mas se fosse mantido a mesma

relação água/cimento a fibra solta, provavelmente, não atingiria o desempenho das demais fibras de aço pelas razões anteriormente apresentadas.

A fibra de aço longa colada em pente é a que apresenta melhor desempenho global, isto porque apesar de apresentar menor quantidade de fibras por quilo (4600 fibras/kg) possui maior comprimento (60 mm), maior fator de forma (80) e, além disso, é colada em pente. Dessa forma, pode-se observar que o fator que mais interfere na resistência na fase pós-fissuração é o fator de forma das fibras de aço e o fato de serem coladas em pente, o que facilita a homogeneização das fibras no concreto e aumenta a capacidade de reforço pós-fissuração.

Quanto às macrofibras poliméricas, as mesmas apresentaram desempenhos similares entre si e abaixo das cargas mínimas de ruptura e pós-fissuração exigida pela norma NBR 8890:2007. Além disso, os tubos com estas fibras atingiram cerca da metade da resistência residual pós-fissuração dos valores alcançados com as fibras de aço, ou seja, para o mesmo teor em volume, as macrofibras poliméricas apresentam valores cerca de 50% inferiores ao das fibras de aço. Ademais, a macrofibra polimérica Barchip apresentou desempenho um pouco superior ao da macrofibra polimérica Forta Ferro, isto se deve ao fato da segunda possuir fibras de baixo módulo de elasticidade em sua composição, ou seja, é uma fibra combinada e a fibra de baixo módulo tem desempenho mecânico nulo para garantir o reforço pós-fissuração.

Além disso, o tubo de concreto de diâmetro de 1 m reforçado com fibras necessita de maior reforço e, a maior espessura do tubo pode não favorecer o direcionamento preferencial das fibras (DE LA FUENTE et al., 2011). Isto dificultou a aprovação nos critérios da NBR 8890:2007. Assim, para que estes tubos pudessem atingir as cargas especificadas nesta norma seria preciso aumentar o teor ou o comprimento das fibras, o que iria dificultar a moldagem dos tubos.

6. CONCLUSÕES

Através da análise dos resultados foi possível chegar às seguintes conclusões:

- As fibras de aço apresentaram um desempenho mecânico marcadamente superior ao das macrofibras poliméricas, principalmente no que se refere à capacidade resistente pós-fissuração. As macrofibras poliméricas apresentaram cerca de metade da capacidade resistente residual pós-fissuração apresentada pelas fibras de aço com o mesmo teor em volume. Este comportamento pode ser atribuído a dois fatores principais, quais sejam, a menor resistência e o menor módulo de elasticidade das macrofibras poliméricas. O desempenho das fibras também depende da porosidade da matriz. Quanto mais baixa esta porosidade, melhores são as condições de aderência e melhor a capacidade resistente pós-fissuração.
- A carga de ruptura também foi afetada pelo teor de fibras de aço. Estas fibras tendem a aumentar a carga de ruptura. Este aumento depende também do impacto que as fibras têm na compactação do material. Fibras que dificultam a compactação e aumentam a porosidade reduzindo a carga máxima obtida no ensaio. No entanto, as fibras de aço que possuem maior desempenho podem compensar a maior porosidade aumentando o desempenho neste requisito devido à maior dificuldade de inicialização da fissura no tubo. Fibras de desempenho médio e que não prejudicam a compactação também elevam a carga de ruptura. Fibras de desempenho médio e que dificultam a compactação aumentam a carga de ruptura apenas para os maiores teores. Em geral, as fibras de aço aumentam a carga de ruptura enquanto as macrofibras poliméricas reduzem este valor.
- Ocorreram também diferenças de desempenho entre as fibras produzidas com o mesmo material, no entanto, elas não foram tão expressivas como aquelas observadas para os distintos tipos de matéria prima utilizadas na produção das fibras. As diferenças de desempenho entre fibras de mesmo material podem estar associadas a fatores como o número de fibras por quilograma do produto, por exemplo. Além disso, as fibras produziram diferentes níveis de impacto na trabalhabilidade do concreto o que acabou por demandar alterações na quantidade de água para algumas delas, além de gerarem distintos níveis de dificuldade de compactação do material.
- Os tubos de concreto reforçado com fibras com diâmetro de 1 m necessitam de maiores teores de fibras para atender o mesmo nível de desempenho obtido com tubos de menores dimensões, conforme os resultados apresentados em estudos anteriores com

fibras de aço. Este menor desempenho das fibras em tubos de maiores dimensões pode estar ligado à maior espessura do tubo que pode não ter favorecido o direcionamento preferencial das fibras. Esta situação dificultou a aprovação dos tubos segundo os critérios da NBR 8890:2007. Para tal, os teores de fibras deveriam ser elevados, especialmente para as macrofibras poliméricas, o que pode inviabilizar o produto devido ao elevado impacto que isto produziria na trabalhabilidade do material.

- O controle do teor de fibra efetivamente incorporado ao concreto foi especialmente difícil de ser realizado para as macrofibras poliméricas, especialmente aquelas que utilizam sistemas combinados de macrofibras de alto e baixo módulo de elasticidade. Isto ocorreu devido à maior dificuldade de extrair este tipo de fibra da matriz de concreto endurecido. Para as fibras de aço, o procedimento fica simplificado pela maior resistência da fibra e possibilidade de utilização de imãs para a coleta das mesmas. Com isto, os resultados foram melhores para este tipo de fibras.

Como proposta para futuros estudos podem ser apontados os seguintes trabalhos:

- Análise do reforço destas fibras em tubos de menores dimensões.
- Análise da utilização de reforço misto de fibra e tela metálica para tubos de maiores dimensões.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS[5]

ARMELIN, H. S.; BANTHIA, N. Predicting the flexural postcracking performance of steel fiber reinforced concrete from the pullout of single fibers. ***ACI Materials Journal***, v. 94, n. 1, p. 18-31, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ***NBR 5739:*** concreto - ensaios de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

_____. ***NBR 7211:*** agregados para concreto – especificação. Rio de Janeiro, 2005.

_____. ***NBR 8890:*** tubo de concreto de seção circular para águas pluviais e esgotos sanitários – requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2007.

_____. ***NBR 9778:*** Argamassas e concretos endurecidos - Determinação da absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2005.

_____. ***NBR 11768:*** Aditivos para concreto de Cimento Portland. Rio de Janeiro, 1992.

_____. ***NBR 15530:*** fibras de aço para concreto. Rio de Janeiro, 2007.

_____. ***NBRNM 248:*** agregados – determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

AUSTRALIAN STANDARD. ***AS 4139:*** Fibre-reinforced concrete pipes and fittings. Austrália, 2003.

AUSTRALIAN AND NEW ZEALAND STANDARD. ***AS-NZS 3725:*** Design for installation of buried concrete pipes. Austrália, 2007.

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

BAYASI, Z.; DHAHERI, M. Effect of exposure to elevated temperature on polypropylene fiber-reinforced concrete. ***ACI Materials Journal***, v. 99, n. 1, p. 22-26, 2002.

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

BENTUR, A.; MINDESS, S.; VONDRAN, G. Bonding in polypropylene fibre reinforced concretes. ***The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete***, v. 11, n. 3, p. 153-158, 1989.

BLANCO, A. A.; PUJADAS, P. A.; DE LA FUENTE, A. A.; AGUADO, A. C. Análisis comparativo de los modelos constitutivos del hormigón reforzado com fibras. ***Hormingón y Acero***, v. 61, n. 255, p. 1-19, 2010.

[5] De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas.

BRANDT, A. M. Fibre reinforced cement-based (FRC) composites after over 40 years of development in building and civil engineering. ***Composite Structures***, n. 86, p. 3-9, 2008.

BRASIL. Ministério das Cidades. ***Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos***. Brasília, DF: Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento – SNIS, 2008.

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. Histórico e principais aplicações. In: CHAMA NETO, P. J. (coord.). ***Manual técnico de drenagem e esgoto sanitário***. 1. ed. Ribeirão Preto, SP: Associação Brasileira dos Produtores de Tubos de Concreto, 2008. 332 p.

CHAMA NETO, P. J.; FIGUEIREDO, A. D. Avaliação de desempenho de tubos de concreto reforçados com fibras de aço. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 45., 2003, Vitória-ES. ***Anais***... São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto - IBRACON, 2003.

DE LA FUENTE, A.; AGUADO, A.; MOLINS, C.; FIGUEIREDO, A. D. ; ESCARIZ, R. C. Nuevas tendencias para el refuerzo óptimo de tubos de hormigón. In: CONGRESO DE ASOCIACIÓN CIENTÍFICO-TÉCNICA DEL HORMINGÓN ESTRUCTURAL, V., 2011, Barcelona. ***V Congreso de ACHE***. Madrid: Asociación Científico-técnica del Hormigón Estructural, 2011.

DE LA FUENTE, A.; ARMENGOU, J. O. ***Aplicaciones estructurales del HRF: tubos de saneamiento, paneles de cerramiento y placas de suelo reforzado***. In: Conferência em Jornada Técnica sobre aplicações estruturais de betão com fibras. Barcelona, 2007, p. 97-164.

DE LA FUENTE, A.; LARANJEIRA, F.; MOLINS, C.; AGUADO, A. ***Aplicações estructurais de betão reforçado com fibras de aço: modelo de análise estrutural aplicado a tubos de saneamento.*** In: Congresso Nacional da Prefabricação em Betão, 2°. Lisboa, 2010, p. 1-20. (a)

DE LA FUENTE, A.; FIGUEIREDO, A. D.; AGUADO, A.; MOLINS, C.; VIÑOLAS, B. Análisis de viabilidad del uso de fibras metálicas em tubos de hormingón. Parte 2: Modelo numérico. In: Congresso Brasileiro do Concreto, 52, 2010, Fortaleza-CE. ***Anais***... São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto - IBRACON, 2010. (b)

EL DEBS, M. K. Projeto estrutural. In: CHAMA NETO, P. J. (coord.). ***Manual técnico de drenagem e esgoto sanitário***. 1. ed. Ribeirão Preto, SP: Associação Brasileira dos Produtores de Tubos de Concreto, 2008. 332 p.

FIGUEIREDO, A. D. ***Parâmetros de Controle e Dosagem do Concreto Projetado com Fibras de Aço***. 1997. 342 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Construção Civil) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.

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

FIGUEIREDO, A. D. Concreto com fibras. In: ISAIA, G. C. (Ed.). ***Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações***. São Paulo: IBRACON, 2005. v. 2, cap. 39, p. 1195-1225.

FIGUEIREDO, A. D. ***Evaluation of the test method for crushing strength of steel fiber reinforced concrete pipes***. In: INTERNATIONAL RILEM SYMPOSIUM ON FIBER REINFORCED CONCRETE: Design and Applications, 7., 2008. Chennai, India. Babneux - France: RILEM Publications S.A.R.L. v. 1, p. 989-1000, 2008 (a).

FIGUEIREDO, A. D. Fibras de aço para tubos de concreto. In: CHAMA NETO, P. J. (coord.). ***Manual técnico de drenagem e esgoto sanitário***. 1. ed. Ribeirão Preto, SP: Associação Brasileira dos Produtores de Tubos de Concreto, 2008. 332 p (b).

FIGUEIREDO, A. D. O concreto com reforço de macrofibras poliméricas. ***Revista Concreto e Construções***, v. 59, p. 39-43, 2010.

FIGUEIREDO, A. D.; CHAMA NETO, P. J. ***Estudo da utilização de tubos de concreto com baixos teores de fibras***. In: Simpósio EPUSP sobre Estruturas de Concreto, IV., 2006. São Paulo, 2006.

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-RJ. ***Anais***... São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto - IBRACON, 2007.

FIGUEIREDO, A. D.; CHAMA NETO, P. J. Avaliação de desempenho mecânico de tubos de concreto reforçados com fibras de aço. ***Revista DAE***, v. 178, p. 34-39, 2008.

FIGUEIREDO, A. D.; CHAMA NETO, P. J.; FARIA, H. M. A nova normalização brasileira sobre fibras de aço. ***Concreto e Construções***, v. XXXVI, p. 67-76, 2008.

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***, v. XXXIV, n. 46, p. 44-51, 2007.

FIGUEIREDO, A. D.; ESCARIZ, R. C. ***Drainage concrete pipes with hybrid reinforcement***. In: RILEM International Conference on Strain Hardening Cementitious Composites, 2th, 2011. Rio de Janeiro, 2011.

FIGUEIREDO, A. D.; TANESI, J.; NINCE, A. A. Concreto com fibras de polipropileno. ***Téchne***, São Paulo, v. 10, n. 66, p. 48-51, 2002.

FIORANELLI JR., A. ***Análise de novo procedimento para o projeto estrutural de tubos de concreto enterrados***. 2005. 113 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

FUGII, A. P. ***Avaliação de tubos de concreto reforçados com fibras de aço segundo a NBR 8890***. 2008. 161 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Ilha Solteira, 2008.

GARCEZ, E. O. ***Análise teórico-experimental do comportamento de concretos reforçados com fibras de aço submetidos a cargas de impacto***. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

GARCEZ, E. O.; CAETANO, L. F.; GRAEFF, A. G.; LEMPKE, T. K.; SILVA FILHO, L. C. P.; RIOS, R. D. ***Modelagem dos efeitos de impacto em concretos reforçados com fibras***. In: SEMINÁRIO DE PATOLOGIA DAS EDIFICAÇÕES – Novos Materiais e Tecnologias Emergentes, 2°, 2004. Porto Alegre-RS, 2004.

GARCIA, T. V. ***Aplicació de l'assaig Barcelona pel control del formigó reforçat amb fibres utilitzat en la construcció d'un edifici industrial***. 2006. 94 p. (Projecte de Fi de Carrera) - Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona, Barcelona, 2006.

HAKTANIR, T.; ARI, K.; ALTUN, F.; KARAHAN, O. A comparative experimental investigation of concrete, reinforced-concrete and steel-concrete pipes under three-edge-bearing test. ***Construction and Building Materials***, v. 8, n. 21, p. 1702-1708, 2007.

HESS, M. L. Tipos de sistemas de esgoto. In: AZEVEDO NETTO, J. M. (coord.). ***Sistemas de esgotos sanitários***. São Paulo: CETESB, 1977. 467 p.

KALIL, R. Z.; ESCARIZ, R. C.; FIGUEIREDO, A. D. Elaboração de método de ensaio para determinação do teor de fibras em concreto endurecido. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 52, 2010, Fortaleza-CE. ***Anais***... São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto - IBRACON, 2010.

MANOLIS, G. D.; GAREIS, P. J.; TSONOS, A. D.; NEAL, J. A. Dynamic properties of polypropylene fiber-reinforced concrete slabs. ***Cement and Concrete Composites***, Elsevier Applied Science, v. 19, p. 341-349, 1997.

METHA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. ***Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais***. São Paulo: Pini, 1994. 573 p.

MILLER, K. P. ***Estudo da fluência em vigas de concreto reforçado com fibras de aço, com aplicação de conceitos da mecânica da fratura***. 2008. 305 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

MORGAN, D. R.; RICH, L. D. ***Polyolefin fibre reinforced wet-mix shotcrete***. In: ACI/SCA INTERNATIONAL CONFERENCE ON SPRAYED CONCRETE/SHOTCRETE - "Sprayed Concrete Technology for the 21st Century", 1996. American Concrete Institute and Sprayed Concrete Association. Proceedings. p.127-38.

NAAMAN, A. E.; WONGTANAKITCHAROEN, T.; HAUSER, G. Influence of different fibers on plastic shrinkage cracking of concrete. ***ACI Materials Journal***, v. 102, n. 1, p. 49-58, 2005.

NBN EN 1916 ***Concrete pipes and fittings, unreinforced, steel fibre and reinforced***. Belgisch Instituut voor normalisatie (BIN), Brussel, December, 2002.

NUNES, N. L. ***Estudo da influência da geometria da fibra de aço na tenacidade à flexão dos compósitos de matriz de concreto***. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998. 193p.

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

NUVOLARI, A. (coord.); TELLES, D. D.; RIBEIRO, J. T.; MIYASHITA, N. J.; RODRIGUES, R. B.; ARAUJO, R. ***Esgoto Sanitário: coleta, transporte, tratamento e reuso agrícola***. São Paulo: Edgard Blucher, 2003.

PINTO JR., N. O. ***Aduelas pré-moldadas em concreto reforçado com fibras de aço e polipropileno para revestimento de túneis: análise experimental e teórica***. Projeto de pesquisa – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.

PINTO JR., N. O.; MORAES, A. A. ***Concreto Reforçado com Fibras de Aço (CRFA)***. In: REUNIÃO DO IBRACON – Instituto Brasileiro do Concreto, 38°, 1996. Ribeirão Preto-SP, ***Anais***... v.2, p.471-479, 1996.

PRUDÊNCIO JR., L. R. ***Contribuição à dosagem do concreto projeto***. 1993. 224 p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

PUJADAS, P. A. ***Durabilidade Del hormingón com fibras de polipropileno***. 2009. 207 p. Tesina (Tesina en Ingeniería de La Construcción) - Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, 2009.

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

SALUDES, S. R. ***Ensayo de doble punzonamiento aplicado al horgomigón reforzado com fibras (Ensayo Barcelona)***. 2006. 347 p. Tesina (Tesina en Ingeniería de La Construcción) – Tecnología y Construcción de Estrutucturas, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, 2006.

SILVA, R. P. ***Argamassas com adição de fibras de polipropileno – estudo do comportamento reológico e mecânico***. 2006. 191 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

SILVA, J. L.; EL DEBS, M. K.; BECK, A. T. Avaliação da confiabilidade de tubos de concreto armado no estado limite de fissuração. ***Revista IBRACON de Estruturas e Materiais***. RIEM, v. 1, n. 4, p. 314-330, 2008.

TANGO, C. E. S. Fundamentos de dosagem de concreto para blocos estruturais. In: International Seminar on Structural Masonry for Developing Countries, 5th, 1994, Florianópolis - SC. ***Anais***... Florianópolis, 1994.

TIGUMAN. M. P. ***Estudo comparativo entre métodos de quantificação de tenacidade usando concreto reforçado com macrofibras de polipropileno***. 2004. 84 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2004.

VIÑOLAS, B. P.; DE LA FUENTE, A. A.; AGUADO, A. C. Capacidad estructural de los tubos de saneamiento. Análisis Del sistema terreno-estructura. In: CONGRESSO

BRASILEIRO DO CONCRETO, 52, 2010, Fortaleza – CE. ***Anais***... São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto - IBRACON, 2010.

VONDRAN, G. L. ***Aplications of Steel Fiber Reinforced Concrete***. Concrete International, p. 44-49, 1991.

APÊNDICES

APÊNDICE A – RESULTADOS INDIVIDUAIS OBTIDOS NOS TESTEMUNHOS EXTRAÍDOS DOS TUBOS

Tabela A.1 – Resultados do ensaio de absorção de água dos testemunhos extraídos dos tubos

Tubos		***Massa seca (g)***	***Massa sat. Imersa (g)***	***Massa saturada (g)***	***Absorção (%)***	***Absorção média (%)***	***Índice de vazios (%)***	***Relação a/c***
Simples 1	P	3810,0	2302,0	3962,0	3,99	3,55	9,16	0,44
	B	4345,0	2620,0	4480,0	3,11		7,26	
Simples 2	P	4447,0	2680,0	4572,0	2,81	3,37	6,61	0,43
	B	5085,0	3072,0	5285,0	3,93		9,04	
Simples 3	P	4523,0	2734,0	4666,0	3,16	3,38	7,40	0,41
	B	3557,0	2165,0	3685,0	3,60		8,42	
Fibra de aço solta 20-1	P	1941,6	1207,0	2046,5	5,40	5,43	12,50	0,46
	B	1921,9	1196,0	2026,90	5,46		12,64	
Fibra de aço solta 20-2	P	1424,2	884,0	1505,7	5,72	5,68	13,11	0,46
	B	1549,3	965,0	1636,6	5,63		13,00	
Fibra de aço solta 20-3	P	1439,5	898,0	1518,0	5,45	5,46	12,66	0,46
	B	1697,0	1056,0	1789,7	5,46		12,63	
Fibra de aço solta 25-1	P	1662,9	1034,0	1755,1	5,54	5,34	12,79	0,46
	B	1627,3	1014,0	1710,9	5,14		12,00	
Fibra de aço solta 25-3	P	1443,2	894,0	1529,3	5,97	5,97	13,55	0,51
	B	1591,1	991,0	1617,8	-		-	
Fibra de aço solta 25-4	P	1286,3	798,0	1368,8	6,41	6,14	14,45	0,48
	B	1503,1	937,0	1591,4	5,87		13,49	
Fibra de aço solta 25-5	P	1518,1	943,0	1606,5	5,82	5,76	13,32	0,48
	B	1541,4	959,0	1629,3	5,70		13,11	
Fibra de aço solta 35-1	P	1357,5	842,0	1444,5	6,41	6,28	14,44	0,48
	B	1605,0	1002,0	1703,7	6,15		14,07	
Fibra de aço solta 35-2	P	1446,7	900,0	1528,6	5,66	5,63	13,03	0,48
	B	1562,0	974,0	1649,3	5,59		12,93	
Fibra de aço solta 35-3	P	1467,5	915,0	1550,9	5,68	5,55	13,12	0,48
	B	1623,8	1013,0	1711,8	5,42		12,59	
Fibra de aço curta colada em pente 20-1	P	1586,0	986,0	1679,9	5,92	5,91	13,53	0,35
	B	1470,1	915,0	1556,9	5,90		13,52	
Fibra de aço curta colada em pente 20-2	P	1535,4	953,0	1614,9	5,18	4,92	12,01	0,35
	B	1567,1	974,0	1640,2	4,66		10,97	

Tubos		*Massa seca (g)*	*Massa sat. Imersa (g)*	*Massa saturada (g)*	*Absorção (%)*	*Absorção média (%)*	*Índice de vazios (%)*	*Relação a/c*
Fibra de aço curta colada em pente 20-3	P	1457,8	906,0	1519,9	4,26	4,29	10,12	0,35
	B	1438,4	895,0	1500,5	4,32		10,26	
Fibra de aço curta colada em pente 25-1	P	1494,5	928,0	1570,5	5,09	5,02	11,83	0,41
	B	1536,6	955,0	1612,8	4,96		11,58	
Fibra de aço curta colada em pente 25-2	P	1570,0	977,0	1638,2	4,34	4,59	10,31	0,41
	B	1574,7	983,0	1650,7	4,83		11,38	
Fibra de aço curta colada em pente 25-3	P	1526,7	953,0	1608,7	5,37	5,16	12,51	0,41
	B	1615,5	1007,0	1695,3	4,94		11,59	
Fibra de aço curta colada em pente 35-1	P	1460,4	913,0	1542,9	5,65	5,39	13,10	0,41
	B	1657,0	1033,0	1742,1	5,14		12,00	
Fibra de aço curta colada em pente 35-2	P	1566,9	977,0	1648,7	5,22	5,18	12,18	0,41
	B	1633,6	1021,0	1717,7	5,15		12,07	
Fibra de aço curta colada em pente 35-3	P	1604,3	1000,0	1685,1	5,04	5,06	11,79	0,41
	B	1401,4	875,0	1472,6	5,08		11,91	
Fibra de aço curta colada em pente 45-1	P	1493,6	930,0	1573,4	5,34	5,11	12,40	0,41
	B	1934,3	1206,0	2028,6	4,88		11,46	
Fibra de aço curta colada em pente 45-2	P	1740,0	1082,0	1824,3	4,84	4,87	11,36	0,41
	B	1916,5	1197,0	2010,4	4,90		11,54	
Fibra de aço longa colada em pente 20-1	P	1472,5	888,0	1518,1	3,10	3,07	7,24	0,45
	B	1493,6	901,0	1539,1	3,05		7,13	
Fibra de aço longa colada em pente 20-2	P	1578,6	957,0	1625,1	2,95	4,07	6,96	0,40
	B	1506,8	902,0	1585,2	5,20		11,48	
Fibra de aço longa colada em pente 20-3	P	1491,3	905,0	1540,0	3,27	3,10	7,67	0,40
	B	1565,2	947,0	1611,2	2,94		6,93	
Fibra de aço longa colada em pente 25-1	P	1477,2	886,0	1514,2	2,50	2,59	5,89	0,41
	B	1485,0	891,0	1524,6	2,67		6,25	
Fibra de aço longa colada em pente 25-2	P	1433,9	866,0	1480,5	3,25	3,18	7,58	0,42
	B	1537,8	936,0	1585,7	3,11		7,37	
Fibra de aço longa colada em pente 25-3	P	1639,3	996,0	1697,0	3,52	3,46	8,23	0,41
	B	1679,1	1020,0	1736,1	3,39		7,96	
Fibra de aço longa colada em pente 35-1	P	1560,0	951,0	1614,8	3,51	3,62	8,26	0,41
	B	1544,6	940,0	1602,3	3,74		8,71	

Tubos		*Massa seca (g)*	*Massa sat. Imersa (g)*	*Massa saturada (g)*	*Absorção (%)*	*Absorção média (%)*	*Índice de vazios (%)*	*Relação a/c*
Fibra de aço longa colada em pente 35-2	P	1459,7	891,0	1508,6	3,35	3,63	7,92	0,41
	B	1543,2	947,0	1603,5	3,91		9,19	
Fibra de aço longa colada em pente 35-3	P	1618,0	981,0	1673,4	3,42	3,50	8,00	0,41
	B	1482,2	903,0	1535,1	3,57		8,37	
Fibra de aço longa colada em pente 45-1	P	1631,7	992,0	1693,5	3,79	3,82	8,81	0,41
	B	1675,5	1025,0	1740,0	3,85		9,02	
Fibra de aço longa colada em pente 45-2	P	1474,3	894,0	1530,8	3,83	4,00	8,87	0,41
	B	1429,5	870,0	1489,2	4,18		9,64	
Fibra de aço longa colada em pente 45-3	P	1553,8	946,0	1616,3	4,02	4,07	9,32	0,41
	B	1538,6	936,0	1602,0	4,12		9,52	
Macrofibra polimérica Barchip 3-2	P	1550,4	961,0	1634,0	5,39	5,44	12,42	0,50
	B	1532,5	950,0	1616,5	5,48		12,60	
Macrofibra polimérica Barchip 3-3	P	1687,0	1045,0	1779,4	5,48	5,56	12,58	0,50
	B	1780,9	1104,0	1881,5	5,65		12,94	
Macrofibra polimérica Barchip 3-4	P	1349,6	835,0	1423,3	5,46	5,58	12,53	0,50
	B	1473,2	912,0	1557,2	5,70		13,02	
Macrofibra polimérica Barchip 4-1	P	1519,5	936,0	1600,4	5,32	5,41	12,18	0,50
	B	1388,2	860,0	1464,4	5,49		12,61	
Macrofibra polimérica Barchip 4-2	P	1616,4	1000,0	1701,5	5,26	5,31	12,13	0,50
	B	1663,3	1032,0	1752,3	5,35		12,36	
Macrofibra polimérica Barchip 4-3	P	1291,9	798,0	1364,4	5,61	5,60	12,80	0,50
	B	1686,7	1043,0	1780,9	5,58		12,77	
Macrofibra polimérica Barchip 4-4	P	1661,6	1028,0	1752,8	5,49	5,52	12,58	0,50
	B	1654,5	1025,0	1746,4	5,55		12,74	
Macrofibra polimérica Barchip 5,5-1	P	1741,6	1078,0	1837,3	5,49	5,50	12,60	0,50
	B	1757,7	1090,0	1854,4	5,50		12,65	
Macrofibra polimérica Barchip 5,5-2	P	1581,0	975,0	1672,6	5,79	5,67	13,13	0,50
	B	1822,3	1130,0	1923,4	5,55		12,74	
Macrofibra polimérica Barchip 5,5-3	P	1552,1	958,0	1641,7	5,77	5,54	13,11	0,50
	B	1612,6	999,0	1698,2	5,31		12,24	
Macrofibra polimérica Forta Ferro 3-2	P	1339,5	828,0	1413,1	5,49	5,49	12,58	0,48
	B	1422,3	883,0	1500,3	5,48		12,64	

Tubos		*Massa seca (g)*	*Massa sat. Imersa (g)*	*Massa saturada (g)*	*Absorção (%)*	*Absorção média (%)*	*Índice de vazios (%)*	*Relação a/c*
Macrofibra polimérica Forta Ferro 3-3	P	1664,2	1029,0	1761,1	5,82	5,56	13,24	0,54
	B	1605,0	995,0	1690,1	5,30		12,24	
Macrofibra polimérica Forta Ferro 3-4	P	1447,5	896,0	1533,7	5,96	5,66	13,52	0,52
	B	1557,8	968,0	1641,5	5,37		12,43	
Macrofibra polimérica Forta Ferro 4-1	P	1362,1	840,0	1436,6	5,47	5,44	12,49	0,48
	B	1790,6	1112,0	1887,5	5,41		12,50	
Macrofibra polimérica Forta Ferro 4-2	P	1356,7	838,0	1423,2	4,90	5,12	11,36	0,48
	B	1740,9	1078,0	1833,9	5,34		12,30	
Macrofibra polimérica Forta Ferro 4-4	P	1452,7	897,0	1530,9	5,38	5,61	12,34	0,48
	B	1510,9	936,0	1599,1	5,84		13,30	
Macrofibra polimérica Forta Ferro 5,5-1	P	1504,7	933,0	1607,0	6,80	6,08	15,18	0,51
	B	1585,0	979,0	1670,0	5,36		12,30	
Macrofibra polimérica Forta Ferro 5,5-2	P	1531,4	946,0	1615,5	5,49	5,27	12,56	0,48
	B	1575,5	979,0	1655,0	5,05		11,76	
Macrofibra polimérica Forta Ferro 5,5-3	P	1296,8	803,0	1369,7	5,62	5,60	12,86	0,48
	B	1388,8	861,0	1466,3	5,58		12,80	
Macrofibra polimérica Forta Ferro 5,5-4	P	1357,1	839,0	1427,9	5,22	5,19	12,02	0,48
	B	1620,7	1004,0	1704,4	5,16		11,95	

Tabela A.2 – Resultados do cálculo do teor incorporado de fibra

Tubos		*Massa seca (g)*	*Massa saturada Imersa (g)*	*Massa saturada (g)*	*Absorção (%)*	*Volume (cm³)*	*Massa específica saturada (kg/m³)*	*Massa de fibra (g)*	*Teor incorporado de fibra (kg/m³)*	*Teor médio de fibra (kg/m³)*
Fibra de aço solta 20-1	P	1942	1207	2047	5,4	839,50	2437,76	20,77	24,74	18,95
	B	1922	1196	2027	5,5	830,90	2439,40	11,72	14,11	
Fibra de aço solta 20-2	P	1424	884	1506	5,7	621,70	2421,91	16,51	-	
	B	1549	965	1637	5,6	671,60	2436,87	12,87	19,16	
Fibra de aço solta 20-3	P	1440	898	1518	5,5	620,00	2448,39	12,14	19,58	
	B	1697	1056	1790	5,5	733,70	2439,28	12,59	17,16	

Tubos		*Massa seca (g)*	*Massa saturada Imersa (g)*	*Massa saturada (g)*	*Absorção (%)*	*Volume (cm³)*	*Massa específica saturada (kg/m³)*	*Massa de fibra (g)*	*Teor incorporado de fibra (kg/m³)*	*Teor médio de fibra (kg/m³)*
Fibra de aço solta 25-1	P	1663	1034	1755	5,5	721,10	2433,92	16,68	23,13	21,91
	B	1627	1014	1711	5,1	696,90	2455,02	15,49	22,23	
Fibra de aço solta 25-3	P	1443	894	1529	6,0	635,30	2407,21	11,64	18,32	
	B	1591	991	1618	-	626,80	2581,05	12,91	20,60	
Fibra de aço solta 25-4	P	1286	798	1369	6,4	570,80	2398,04	10,67	18,69	
	B	1503	937	1591	5,9	654,40	2431,85	18,64	28,48	
Fibra de aço solta 25-5	P	1518	943	1607	5,8	663,50	2421,25	15,21	22,92	
	B	1541	959	1629	5,7	670,30	2430,70	14,00	20,89	
Fibra de aço solta 35-1	P	1358	842	1445	6,4	602,50	2397,51	20,67	34,31	34,13
	B	1605	1002	1704	6,1	701,70	2427,96	21,37	30,45	
Fibra de aço solta 35-2	P	1447	900	1529	5,7	628,60	2431,75	19,94	31,72	
	B	1562	974	1649	5,6	675,30	2442,32	24,37	36,09	
Fibra de aço solta 35-3	P	1468	915	1551	5,7	635,90	2438,91	25,77	40,53	
	B	1624	1013	1712	5,4	698,80	2449,63	22,14	31,68	
Fibra de aço curta colada em pente 20-1	P	1586	986	1680	5,9	693,90	2420,95	15,31	22,06	21,39
	B	1470	915	1557	5,9	641,90	2425,46	12,36	19,26	
Fibra de aço curta colada em pente 20-2	P	1535	953	1615	5,2	661,90	2439,79	17,30	26,14	
	B	1567	974	1640	4,7	666,20	2462,02	12,49	18,75	
Fibra de aço curta colada em pente 20-3	P	1458	906	1520	4,3	613,90	2475,81	14,08	22,94	
	B	1438	895	1501	4,3	605,50	2478,12	11,61	19,17	
Fibra de aço curta colada em pente 25-1	P	1495	928	1571	5,1	642,50	2444,36	17,52	27,27	23,07
	B	1537	955	1613	5,0	657,80	2451,81	14,00	21,28	
Fibra de aço curta colada em pente 25-2	P	1570	977	1638	4,3	661,20	2477,62	14,29	21,61	
	B	1575	983	1651	4,8	667,70	2472,22	14,19	21,25	
Fibra de aço curta colada em pente 25-3	P	1527	953	1609	5,4	655,70	2453,41	16,58	25,29	
	B	1616	1007	1695	4,9	688,30	2463,02	14,95	21,72	

Tubos		*Massa seca (g)*	*Massa saturada Imersa (g)*	*Massa saturada (g)*	*Absorção (%)*	*Volume (cm³)*	*Massa específica saturada (kg/m³)*	*Massa de fibra (g)*	*Teor incorporado de fibra (kg/m³)*	*Teor médio de fibra (kg/m³)*
Fibra curta colada em pente 35-1	P	1460	913	1543	5,6	629,90	2449,44	34,35	-	34,08
	B	1657	1033	1742	5,1	709,10	2456,78	21,99	31,01	
Fibra curta colada em pente 35-2	P	1567	977	1649	5,2	671,70	2454,52	21,69	32,29	
	B	1634	1021	1718	5,1	696,70	2465,48	24,77	35,55	
Fibra curta colada em pente 35-3	P	1604	1000	1685	5,0	685,10	2459,64	24,28	35,44	
	B	1401	875	1473	5,1	597,60	2464,19	21,59	36,13	
Fibra curta colada em pente 45-1	P	1494	930	1573	5,3	643,40	2445,45	26,84	41,72	39,62
	B	1934	1206	2029	4,9	822,60	2466,08	27,09	32,93	
Fibra curta colada em pente 45-2	P	1740	1082	1824	4,8	742,30	2457,63	30,63	41,26	
	B	1917	1197	2010	4,9	813,40	2471,60	34,64	42,59	
Fibra de aço longa colada em pente 20-1	P	1473	888	1518	3,1	630,10	2409,30	11,91	18,90	15,77
	B	1494	901	1539	3,0	638,10	2412,00	10,02	15,70	
Fibra de aço longa colada em pente 20-2	P	1579	957	1625	2,9	668,10	2432,42	10,01	14,98	
	B	1507	902	1585	5,2	683,20	2320,26	8,76	12,82	
Fibra de aço longa colada em pente 20-3	P	1491	905	1540	3,3	635,00	2425,20	10,36	16,31	
	B	1565	947	1611	2,9	664,20	2425,78	10,54	15,87	
Fibra de aço longa colada em pente 25-1	P	1477	886	1514	2,5	628,20	2410,38	11,92	18,97	20,48
	B	1485	891	1525	2,7	633,60	2406,25	12,30	19,41	
Fibra de aço longa colada em pente 25-2	P	1434	866	1481	3,2	614,50	2409,28	10,85	17,66	
	B	1538	936	1586	3,1	649,70	2440,66	16,68	25,67	
Fibra de aço longa colada em pente 25-3	P	1639	996	1697	3,5	701,00	2420,83	13,62	19,43	
	B	1679	1020	1736	3,4	716,10	2424,38	15,57	21,74	
Fibra de aço longa colada em pente 35-1	P	1560	951	1615	3,5	663,80	2432,66	26,77	40,33	38,41
	B	1545	940	1602	3,7	662,30	2419,30	19,81	29,91	
Fibra de aço longa colada em pente 35-2	P	1460	891	1509	3,4	617,60	2442,68	29,89	48,40	
	B	1543	947	1604	3,9	656,50	2442,50	32,45	49,43	
Fibra de aço longa colada em pente 35-3	P	1618	981	1673	3,4	692,40	2416,81	23,02	33,25	
	B	1482	903	1535	3,6	632,10	2428,57	18,43	29,16	

Tubos		*Massa seca (g)*	*Massa saturada Imersa (g)*	*Massa saturada (g)*	*Absorção (%)*	*Volume (cm³)*	*Massa específica saturada (kg/m³)*	*Massa de fibra (g)*	*Teor incorporado de fibra (kg/m³)*	*Teor médio de fibra (kg/m³)*
Fibra de aço longa colada em pente 45-1	P	1632	992	1694	3,8	701,50	2414,11	25,72	36,66	36,40
	B	1676	1025	1740	3,8	715,00	2433,57	22,46	31,41	
Fibra de aço longa colada em pente 45-2	P	1474	894	1531	3,8	636,80	2403,89	22,49	35,32	
	B	1430	870	1489	4,2	619,20	2405,04	15,60	-	
Fibra de aço longa colada em pente 45-3	P	1554	946	1616	4,0	670,30	2411,31	23,38	34,88	
	B	1539	936	1602	4,1	666,00	2405,41	29,12	43,72	
Macrofibra polimérica Barchip 3-2	P	1550	961	1634	5,4	673,00	2427,93	1,85	2,75	2,93
	B	1533	950	1617	5,5	666,50	2425,36	2,60	3,90	
Macrofibra polimérica Barchip 3-3	P	1687	1045	1779	5,5	734,40	2422,93	1,92	2,61	
	B	1781	1104	1882	5,6	777,50	2419,94	2,08	2,68	
Macrofibra polimérica Barchip 3-4	P	1350	835	1423	5,5	588,30	2419,34	1,45	2,46	
	B	1473	912	1557	5,7	645,20	2413,52	2,03	3,15	
Macrofibra polimérica Barchip 4-1	P	1520	936	1600	5,3	664,40	2408,79	2,78	4,18	3,92
	B	1388	860	1464	5,5	604,40	2422,90	1,83	3,03	
Macrofibra polimérica Barchip 4-2	P	1616	1000	1702	5,3	701,50	2425,52	3,51	5,00	
	B	1663	1032	1752	5,4	720,30	2432,74	2,02	2,80	
Macrofibra polimérica Barchip 4-3	P	1292	798	1364	5,6	566,40	2408,90	2,45	4,33	
	B	1687	1043	1781	5,6	737,90	2413,47	2,82	3,82	
Macrofibra polimérica Barchip 4-4	P	1662	1028	1753	5,5	724,80	2418,32	3,22	4,44	
	B	1655	1025	1746	5,6	721,40	2420,85	2,71	3,76	
Macrofibra polimérica Barchip 5,5-1	P	1742	1078	1837	5,5	759,30	2419,73	4,53	5,97	5,99
	B	1758	1090	1854	5,5	764,40	2425,95	3,97	5,19	
Macrofibra polimérica Barchip 5,5-2	P	1581	975	1673	5,8	697,60	2397,65	4,40	6,31	
	B	1822	1130	1923	5,5	793,40	2424,25	5,26	6,63	
Macrofibra polimérica Barchip 5,5-3	P	1552	958	1642	5,8	683,70	2401,20	4,22	6,17	
	B	1613	999	1698	5,3	699,20	2428,78	3,98	5,69	

APÊNDICE B – RESULTADOS INDIVIDUAIS OBTIDOS NOS CORPOS-DE-PROVA MOLDADOS

Tabela B.1 – Resultados do ensaio de absorção de água dos corpos-de-prova

CP	***Massa seca (g)***	***Massa sat. imersa (g)***	***Massa saturada (g)***	***Absorção (%)***	***Absorção média (%)***	***Índice de vazios (%)***
Macrofibra polimérica Forta Ferro 3-2	3866,4	2374,0	3988,5	3,16	3,19	7,56
Macrofibra polimérica Forta Ferro 3-3	3789,2	2319,0	3911,1	3,22		7,66
Macrofibra polimérica Forta Ferro 4-3	3795,8	2309,0	3895,8	2,63	2,69	6,30
Macrofibra polimérica Forta Ferro 4-4	3867,5	2358,0	3973,9	2,75		6,58
Macrofibra polimérica Forta Ferro 5,5-1	3718,3	2269,0	3837,5	3,21	3,19	7,60
Macrofibra polimérica Forta Ferro 5,5-2	3691,3	2252,0	3808,3	3,17		7,52
Fibra de aço curta colada em pente 20-2	3763,9	2309,0	3879,0	3,06	3,63	7,33
Fibra de aço curta colada em pente 20-5	3740,9	2321,0	3898,1	4,20		9,97
Fibra de aço curta colada em pente 25-1	3850,9	2350,0	3955,6	2,72	2,68	6,52
Fibra de aço curta colada em pente 25-3	3751,8	2287,0	3851,0	2,64		6,34
Fibra de aço curta colada em pente 35-2	3806,7	2324,0	3899,5	2,44	2,50	5,89
Fibra de aço curta colada em pente 35-5	3817,0	2335,0	3914,8	2,56		6,19

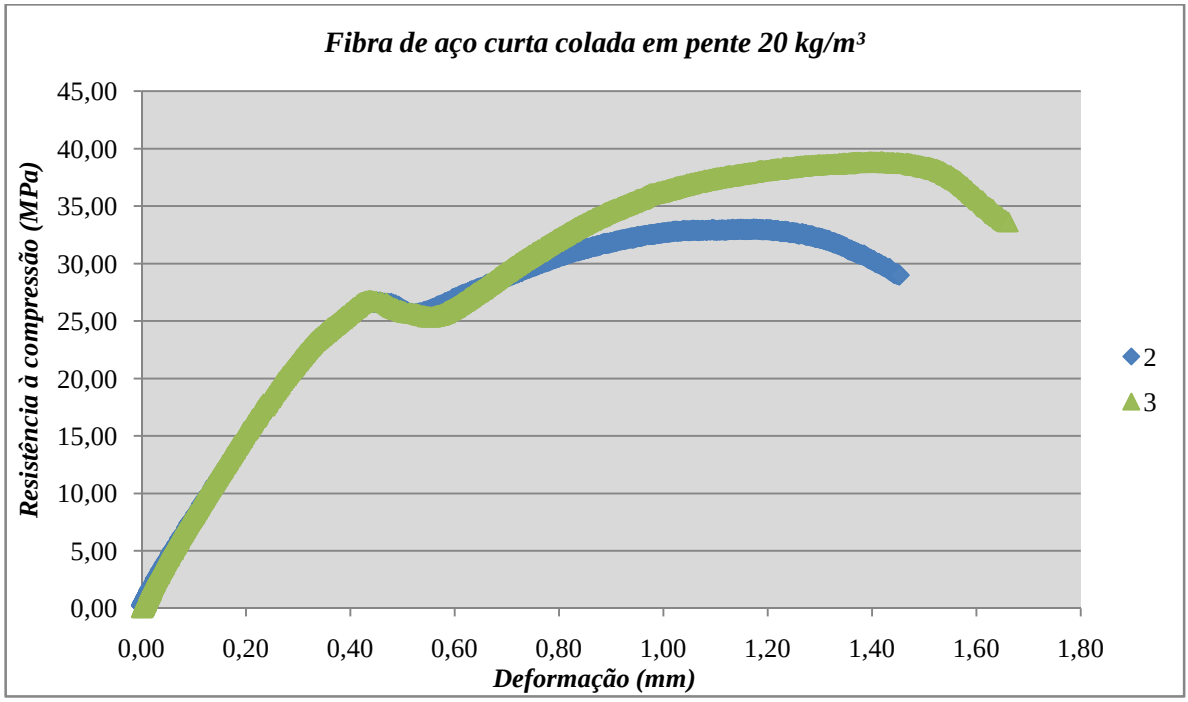


Figura B.1 – Curvas de resistência à compressão pela deformação obtidas no ensaio de compressão axial dos corpos-de-prova com 20 kg/m³ da fibra de aço curta colada em pente

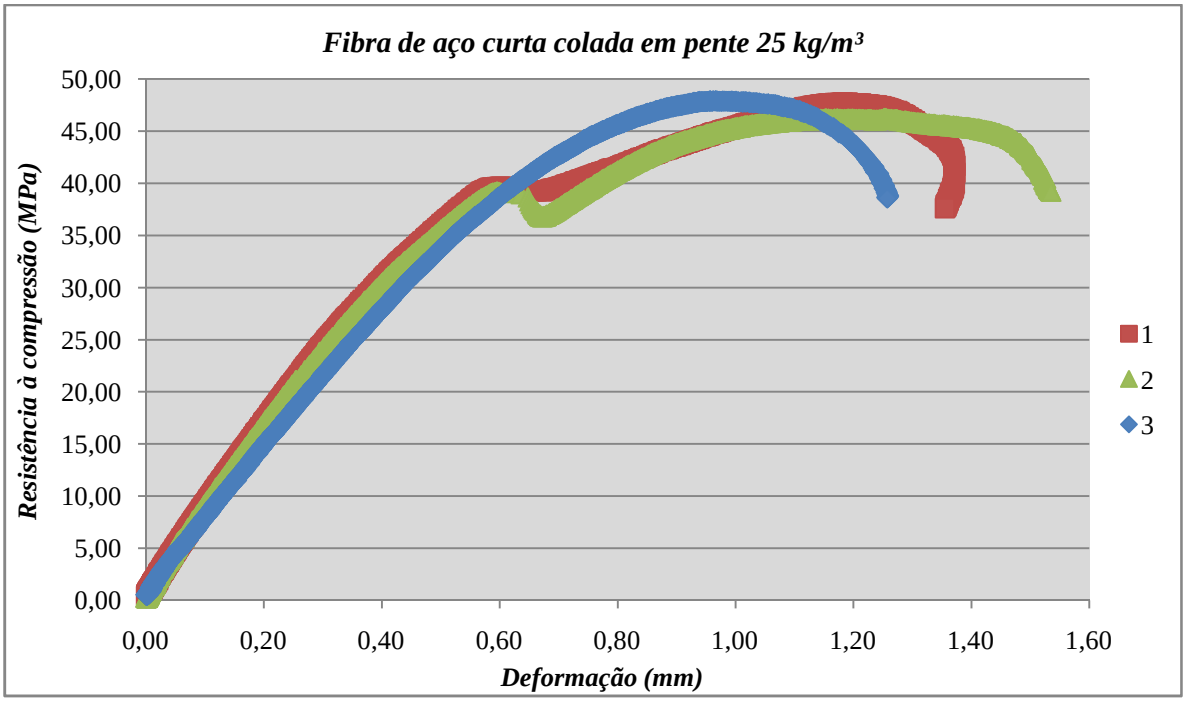


Figura B.2 – Curvas de resistência à compressão pela deformação obtidas no ensaio de compressão axial dos corpos-de-prova com 25 kg/m³ da fibra de aço curta colada em pente

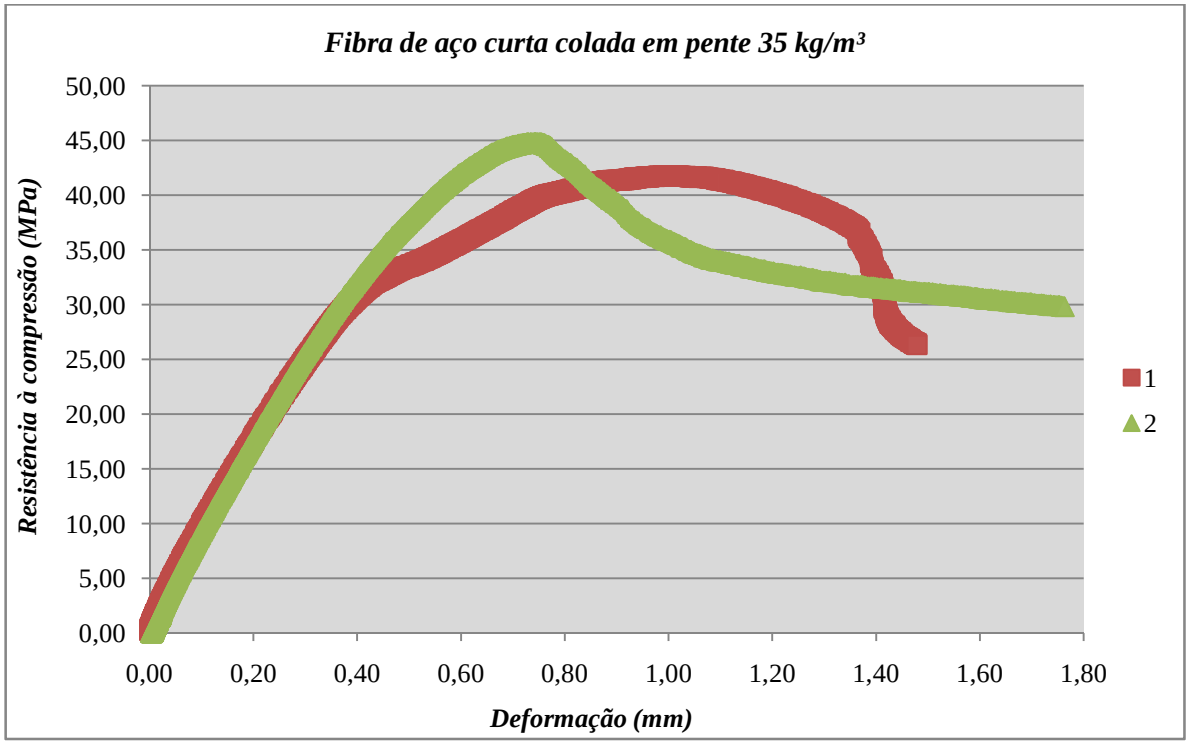


Figura B.3 – Curvas de resistência à compressão pela deformação obtidas no ensaio de compressão axial dos corpos-de-prova com 35 kg/m³ da fibra de aço curta colada em pente

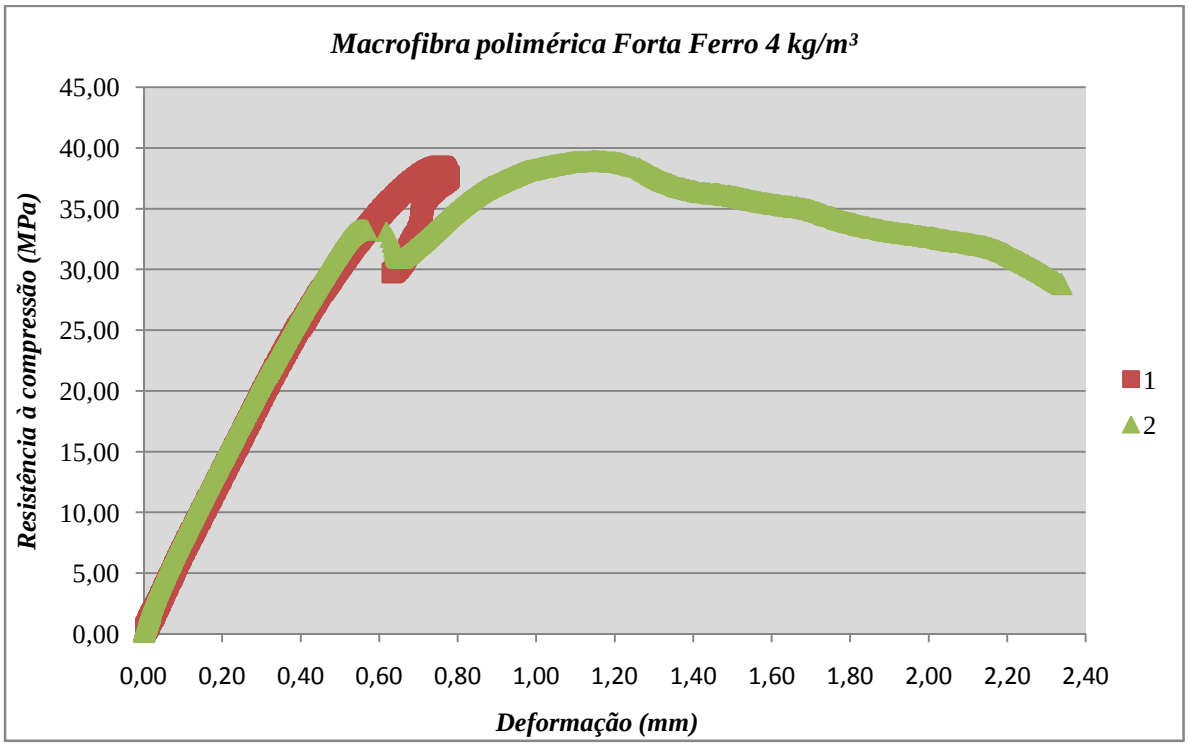


Figura B.4 – Curvas de resistência à compressão pela deformação obtidas no ensaio de compressão axial dos corpos-de-prova com 4 kg/m³ da macrofibra polimérica Forta Ferro

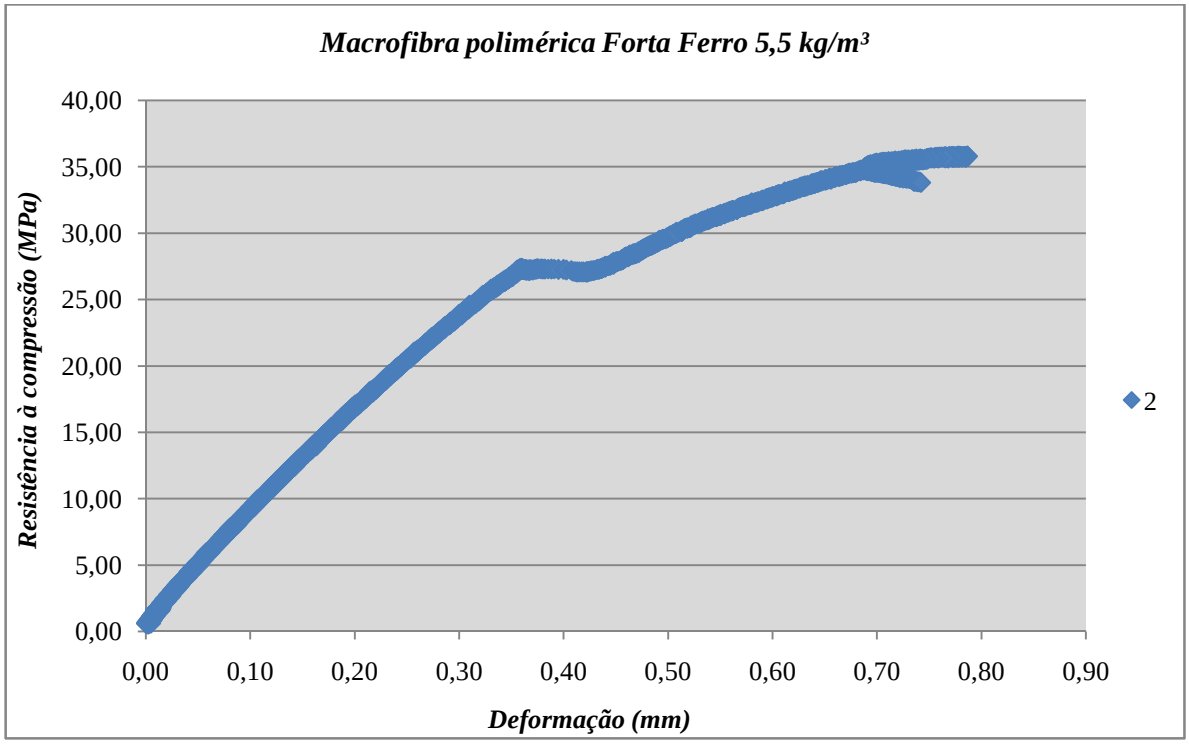


Figura B.5 – Curvas de resistência à compressão pela deformação obtidas no ensaio de compressão axial dos corpos-de-prova com 5,5 kg/m³ da macrofibra polimérica Forta Ferro