



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL (PPGEC)

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE TUBOS DE CONCRETO COM
FIBRAS DE AÇO PRODUZIDOS COM MATERIAIS DA REGIÃO
METROPOLITANA DE BELÉM DO PARÁ.**

MARCO ANTONIO BARBOSA DE OLIVEIRA

Orientadores: Alcebíades Negrão Macedo
Bernardo Borges Pompeu Neto

**BELÉM
2015**

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE TUBOS DE CONCRETO COM
FIBRAS DE AÇO PRODUZIDOS COM MATERIAIS DA REGIÃO
METROPOLITANA DE BELÉM DO PARÁ.**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós
Graduação em Engenharia Civil da Universidade
Federal do Pará, para obtenção do título de
Mestre em Engenharia Civil.

Prof. Dr. Alcebíades Negrão Macedo –
Orientador UFPa

Prof. Dr. Bernardo Borges Pompeu Neto –
Orientador UFPa

Prof^a. Dr. Marcelo de Souza Picanço –
Examinador interno - UFPa

Prof^a. Dr. Laércio Gouvêa Gomes –
Examinador externo - IFPa

Prof^a. Dr. Antonio Eduardo Bezerra Cabral
Examinador externo - UFC

BELÉM - PARÁ

2015

DEDICATÓRIA

Disse Jesus: Eu sou o caminho, a verdade e a vida.

João 14:6.

Disse Jesus: Eu sou o pão da vida, aquele que vem a mim não terá fome e quem crê em mim nunca terá sede.

João 6:35.

Disse Jesus: Eu sou a luz que veio ao mundo para que todo aquele que crê em mim não permanecerá nas trevas.

João 12:46.

À minha mãe, Maria Barbosa
pelo amor e dedicação
incondicional.

AGRADECIMENTOS

Aos Prof.^{os} Drs. Alcebiades Negrão Macêdo e Bernardo Borges Pompeu Neto pela orientação deste trabalho, contribuindo para o meu engradecimento acadêmico e profissional.

Ao Prof.^{os} Drs. Bernardo Nunes de Moraes Neto e Antonio Eduardo Bezerra Cabral pela orientação e enorme disponibilidade no esclarecimento de dúvidas e enriquecimento do trabalho.

Ao Prof. Dr. Dênio Raman de Oliveira do Grupo de Análise Experimental de Estruturas e Materiais (GAEMA) pela liberação de equipamentos para a realização da pesquisa.

À minha família, especialmente a minha mãe Maria Barbosa de Oliveira e minha tia Maria de Nazaré de Oliveira pela fundamental presença nos momentos difíceis de cansaço físico e mental.

À Samanta Monteiro Bezerra, pelo carinho, dedicação, paciência, apoio e compreensão.

À empresa Terraplena Ltda pela possibilidade de realização da pesquisa, disponibilizando sua estrutura funcional para a produção de todos os tubos de concreto e corpos-de-prova utilizados nesse estudo. Agradeço também a todos os funcionários dessa empresa pelo apoio e interação na busca da otimização do processo de produção.

À empresa Belgo Bekaert Arames S.A. pela doação das fibras de aço, em especial ao Paulo Cecchini pela atenção e colaboração na tramitação do fornecimento das fibras.

Aos técnicos do laboratório de engenharia civil da UFPa pelo ajuda de forma direta ou indireta na realização dos ensaios.

Aos alunos de graduação, de mestrado da UFPa e aos estagiários do IFPa pelo auxílio nos ensaios de laboratório e consolidação da pesquisa.

RESUMO

As fibras de aço nos tubos de concreto têm proporcionado melhores níveis de comportamento mecânico. Na região norte, singularmente em Belém do Pará, não há estudos sobre a viabilidade técnica desse recurso tecnológico, embora haja uma considerável deficiência de infra-estrutura urbana. Deste modo tornam-se relevantes realizar estudos sobre a alternativa tecnológica. Esse estudo busca analisar o comportamento mecânico dos tubos de concreto com fibras de aço, visando à viabilidade técnica de substituição dos tubos de concreto com armadura convencional. Na metodologia da pesquisa utilizaram-se fibras de aço no estado soltas e coladas em pente do tipo DRAMIX® 3D 65/35 e do tipo DRAMIX® 3D 80/60. Para cada tipo de fibra foram adotados teores de 20 kg/m³ (0,25%), 30 kg/m³ (0,38%) e 40 kg/m³ (0,50%), em massa e fração volumétrica, respectivamente. A dimensão de todos os tubos de concreto foi de diâmetro de 600 mm, espessura de parede de 60 mm e comprimento útil de 1000 mm, e os corpos-de-prova cilíndricos de 100x200mm e prismáticos de 150x150x500mm e 150x150x550mm, que foram submetidos aos ensaios para avaliação de comportamento mecânico e durabilidade. Na produção do concreto com fibras houve a avaliação no estado fresco com abatimento de tronco de cone entre 0 e 10 mm. A dosagem do concreto com fibras foi a rotineiramente empregada pela empresa para o concreto sem fibras, e a dosagem das fibras ocorreu de acordo com a regra da mistura. Como resultados obtiveram que os tubos de concreto com fibras do tipo 80/60 soltas em todos os teores e coladas em pente nos teores de 0,38% e 0,50%, atingiram a mínima carga de ruptura e pós-fissuração estabelecidas pela NBR 8900 (ABNT, 2007), deste modo seriam tecnicamente viáveis quanto à substituição de tubos de concreto armado convencionalmente, dentro das condições e especificações desse estudo.

Palavras-chaves: tubo de concreto; fibras de aço; tenacidade; residual.

ABSTRACT

The steel fibers in the concrete pipes have provided better mechanical performance levels. In the northern region, uniquely in Belem, no studies on the technical feasibility of this technological resource, although there is considerable deficiency of urban infrastructure. Thus become relevant conduct studies on alternative technology. This study seeks to analyze the mechanical behavior of concrete pipes with steel fibers, aiming at the technical feasibility of replacing the concrete pipe with conventional armor. The research methodology we used steel fibers in loose state and glued comb DRAMIX® 3D type 65/35 and 80/60 DRAMIX® 3D type. For each fiber type were adopted contents of 20 kg / m³ (0.25%), 30 kg / m³ (0.38%) and 40 kg / m³ (0.50%) by weight and volume fraction, respectively. The size of all concrete pipes was 600 mm diameter, wall thickness of 60 mm and effective length 1000 mm, and the cylindrical bodies of the test piece of 100x200mm and prismatic of 150x150x500mm and 150x150x550mm, which were subjected to the tests for mechanical behavior evaluation and durability. In the production of concrete with the fibers was reviewed in the fresh state with frustoconical rebate between 0 and 10 mm. The dosage of concrete with fibers was routinely employed by the company for concrete without fibers, and the strength of the fibers takes place under the rule of the mixture. The results obtained that the concrete pipe with fiber type 80/60 loose at all levels and pasted comb the levels of 0.38% and 0.50%, reached the minimum breaking load and post-cracking set by the NBR 8900 (ABNT, 2007), thus would be technically feasible as the replacement of reinforced concrete pipes conventionally, under the conditions and specifications of this study.

Keywords: concrete pipe; steel fibers; toughness, residual.

Lista de tabelas

Capítulo 2

Tabela 2.1 – Valores de resistência mecânica e módulo de elasticidade para diversos tipos de fibras e matrizes (BENTUR; MINDESS, 2007).....	10
Tabela 2.2 – Requisitos especificados pela norma NBR 15530 (ABNT, 2007) para fibras de aço.....	18
Tabela 2.3 – Classificação e geometria das fibras de aço para reforço do concreto (FIGUEIREDO ET AL., 2008).....	19

Capítulo 3

Tabela 3.1 - Caracterização das fibras de aço.....	49
Tabela 3.2 - Dosagem utilizada no procedimento experimental.....	55
Tabela 3.3 - Teor de fibras em massa e fração volumétrica.....	55
Tabela 3.4 - Quantidade de tubos de concreto e copos de prova produzidos para cada série	56

Capítulo 4

Tabela 4.1 – Resultados de compressão diametral.....	72
Tabela 4.2 – Resultados de carregamento contínuo e cíclico para deslocamento de 18mm.....	77
Tabela 4.3 – Resultados de compressão axial.....	80
Tabela 4.4 – Resultados de tração por compressão diametral	82
Tabela 4.5 - Resultados obtidos de tenacidade e fator de tenacidade	86
Tabela 4.6 – Resultados de resistências residuais	88
Tabela 4.7 – Ensaio de compressão modificada JSCE.....	93
Tabela 4.8 - Ensaio de compressão modificada realizado nos corpos-de-prova prismáticos submetidos ao ensaio do RILEM.....	96
Tabela 4.9 - Concreto simples - de referência.....	98
Tabela 4.10 - Concreto armado.....	98

Tabela 4.11 - Concreto com fibras coladas em pente de tipo 65/35 no teor de 0,25% .	98
Tabela 4.12 - Concreto com fibras coladas em pente do tipo 80/60 no teor de 0,25% .	98
Tabela 4.13 - Concreto com fibras coladas em pente de tipo 65/35 no teor de 0,38% .	98
Tabela 4.14 - Concreto com fibras coladas em pente do tipo 80/60 no teor de 0,38% .	99
Tabela 4.15 - Concreto com fibras coladas em pente do tipo 65/35 no teor de 0,50% .	99
Tabela 4.16 - Concreto com fibras coladas em pente do tipo 80/60 no teor 0,50%	99
Tabela 4.17 - Concreto com fibras soltas do tipo 65/35 no teor de 0,25%	99
Tabela 4.18 - Concreto com fibras soltas do tipo 80/60 no teor de 0,25%	99
Tabela 4.19 - Concreto com fibras soltas do tipo 65/35 no teor de 0,38%	99
Tabela 4.20 - Concreto com fibras soltas do tipo 80/60 no teor de 0,38%	100
Tabela 4.21 - Concreto com fibras soltas do tipo 65/35 no teor de 0,50%	100
Tabela 4.22 - Concreto com fibras soltas do tipo 80/60 no teor de 0,50%	100
Tabela 4.23- Concreto com fibras coladas em pente do tipo 65/35 no teor de 0,25% ..	102
Tabela 4.24 - Concreto com fibras coladas em pente do tipo 80/60 no teor de 0,25% .	102
Tabela 4.25 - Concreto com fibras coladas em pente do tipo 65/35 no teor de 0,38% .	103
Tabela 4.26 - Concreto com fibras coladas em pente do tipo 80/60 no teor de 0,38% .	103
Tabela 4.27 - Concreto com fibras coladas em pente do tipo 65/35 no teor de 0,50% .	103
Tabela 4.28 - Concreto com fibras coladas em pente do tipo 80/60 no teor de 0,50% .	103
Tabela 4.29 - Concreto com fibras soltas do tipo 65/35 no teor de 0,25%	104
Tabela 4.30 - Concreto com fibras soltas do tipo 80/60 no teor de 0,25%	104
Tabela 4.31 - Concreto com fibras soltas do tipo 65/35 no teor de 0,38%	104

Tabela 4.32 - Concreto com fibras soltas do tipo 80/60 no teor de 0,38%.....	104
Tabela 4.33 - Concreto com fibras soltas do tipo 65/35 no teor de 0,50%.....	105
Tabela 4.34 - Concreto com fibras soltas do tipo 80/60 no teor de 0,50%.....	105

Lista de figuras

Capítulo 2

Figura 2.1 - Propagação de fissuras e concentrações de tensões (RAMOS 2002)	7
Figura 2.2 - Propagação de fissuras e concentrações de tensões (RAMOS 2002)	7
Figura 2.3 - Fibras com baixo e alto módulo de elasticidade.....	10
Figura 2.4 - Diagrama de tensão por deformação elástica de matriz e fibras de alto e baixo módulo de elasticidade trabalhando em conjunto (FIGUEIREDO, 2005)	11
Figura 2.5 - Concreto reforçado com fibras em que há compatibilidade com agregado graúdo (a) e onde não há (b) (FIGUEIREDO, 2000).....	13
Figura 2.6 - Esquema adotado no ensaio de dobramento das fibras de aço, conforme preconizado pela NBR 15330 (ABNT, 2007).....	20
Figura 2.7 - Curva tensão-deformação (callister, 2012).	24
Figura 2.8 – Posicionamento de corpo-de-prova, LVDT e cutelos no ensaio de tração na flexão com o sistema “yoke” (FIGUEIREDO, 2000a)	25
Figura 2.9 – Determinação da tenacidade à flexão, adaptado da JSCe SF-4 (1984)	26
Figura 2.10 – Avaliação da carga no limite de proporcionalidade (adaptado RILEM TC 162, 2003)	32
Figura 2.11 –Avaliação da resistência à flexão equivalente $f_{eq,2}$ (adaptado RILEM TC 162, 2003)	33
Figura 2.12 – Avaliação da resistência à flexão equivalente a $f_{eq,3}$ (adaptado RILEM TC 162, 2003)	33
Figura 2.13 – Diagrama força versus CMOD (adaptado RILEM TC 162, 2003).....	34
Figura 2.14 – Modelo de distribuição de tensões na seção transversal de um elemento reforçado com fibras durante a flexão (adaptado RILEM TC 162, 2003)...	35
Figura 2.15 – Arranjo do monitoramento das medidas de deslocamento (adaptado RILEM TC 162, 2003).....	36
Figura 2.16 – Posição do entalhe serrado na viga de teste (adaptado RILEM TC 162, 2003)	37
Figura 2.17 - Ouriço formado por fibras de aço mal misturadas ao concreto (FIGUEIREDO, 2000).....	38
Figura 2.18 – Ouriço na bolsa do tubo com fibras do tipo 80/60 com teor 0,50%	46

Capítulo 3

Figura 3.1 – Discriminação da avaliação dos tubos e corpos-de-provas.....	50
Figura 3.2 – Descrição das etapas do processo de produção do tubo de concreto armado e com fibras de aço.....	52
Figura 3.3 – Tubo de concreto simples, armado ou com fibras de aço.....	53
Figura 3.4 – Fibras coladas em pente.....	54
Figura 3.5 – Fibras soltas.....	54
Figura 3.6 – Esquema de ensaio de flexão pela JSCE.....	59
Figura 3.7 – Esquema de ensaio de flexão pelo RILEM.....	59
Figura 3.8 – Corpos-de-prova submetidos ao ensaio pelo RILEM.....	60
Figura 3.9 – Ensaio de compressão modificada em L_1 . Amostra com fratura no entalhe feito para indução de fissura no meio do vão.....	61
Figura 3.10 – Ensaio de compressão modificada em L_2 . Amostra com fratura no entalhe feito para indução de fissura no meio do vão.....	61
Figura 3.11 – Corpos-de-prova submetidos ao ensaio pela JSCE.....	61
Figura 3.12 – Ensaio de compressão modificada em L_1 com fratura no terço médio da amostra.....	61
Figura 3.13 – Ensaio de compressão modificada em L_2 com fratura no terço médio da amostra.....	62
Figura 3.14 – Identificação das faixas do tubo.....	63
Figura 3.15 – Faixas retiradas com serra circular da parede do tubo.....	63
Figura 3.16 – Corpos-de-prova extraídos com extratora da faixa entre coroa e flanco esquerdo do tubo.....	63
Figura 3.17 – Corpos-de-prova extraídos com extratora da faixa entre base e flanco esquerdo do tubo.....	63
Figura 3.18 – Corpos-de-prova extraídos.....	63
Figura 3.19 – Quebra dos corpos-de-prova extraídos da parede do tubo.....	64
Figura 3.20 – Retirada das fibras com auxílio de imã.....	64
Figura 3.21 – Lâmina padrão para medida de abertura de fissura de 0,25mm.....	65
Figura 3.22 – Esquema do plano de carregamento do ensaio.....	66
Figura 3.23 – Cutelo inferior, superior e tira de borracha.....	67

Figura 3.24 – Célula de carga e pistão do macaco hidráulico e relógio comparador digital.....	68
Figura 3.25 – Acabamento superficial interno do tubo	69

Capítulo 4

Figura 4.1 – Plano de fissuração do tubo.....	70
Figura 4.2 – Fissura na base.....	70
Figura 4.3 – Fissura no flanco esquerdo	71
Figura 4.4 – Fissura no flanco direito	71
Figura 4.5 – Carga no deslocamento de 18 mm para carregamento contínuo e cíclico	77
Figura 4.6 – Carga de ruptura versus teor de fibras coladas em pente e soltas do tipo 65/35 e 80/60	78
Figura 4.7 – Carga máxima pós-fissuração versus teor de fibras coladas em pente e soltas do tipo 65/35 e 80/60	78
Figura 4.8 – Tração por compressão diametral versus teor de fibras coladas em pente, após análise pelo ANOVA.....	83
Figura 4.9 – Tração por compressão diametral versus teor de fibras soltas, após análise pela ANOVA.....	83
Figura 4.10 – Tenacidade média versus teor de fibras coladas em pente e soltas do tipo 80/60 e 65/35.....	87
Figura 4.11 – Fator de tenacidade médio versus teor de fibras coladas em pente e soltas do tipo 80/60 e 65/35	87
Figura 4.12 – Compressão modificada média (JSCE) versus teor de fibras soltas, após análise pela ANOVA.....	94
Figura 4.13 – Carga versus tempo para tubos com fibras coladas em pente do tipo 65/35 com teor de 0,25%	94
Figura 4.14 – Compressão modificada média (RILEM) versus teor de fibras colocadas em pente, após análise pela ANOVA.....	97
Figura 4.15 – Compressão modificada média (RILEM) versus teor de fibras soltas, após análise pelo ANOVA.....	97

Lista de abreviaturas, siglas e símbolos

Abreviaturas

CA	Concreto armado
Ca(OH) ₂	Hidróxido de cálcio
CMOD	Crack mouth opening displacement
CRFA	Concreto reforçado com fibras de aço
CS	Concreto simples
C-S-H	Silicato de cálcio hidratado
FCP	Fibra colada em pente
FS	Fibra solta
GPa	Gigapascal
MPa	Megapascal

Siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American society for testing and materials
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
JSCE	Japan Society of Civil Engineers
NBR	Norma Brasileira
NM	Norma Mercosul
RILEM	International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures

Símbolos

Letras Romanas

f_{ck}	Resistência característica do concreto à compressão
g/cm^3	Gramas por centímetro cúbico
Kg/cm^3	Kilograma por centímetro cúbico
mm	Milímetro
N/mm^2	Newton por milímetro quadrado

Letras Gregas

ε	Deformação
μm	Micrometro
σ	Tensão

SUMÁRIO

RESUMO	ix
ABSTRACT	x
LISTA DE TABELAS	xi
LISTA DE FIGURAS	xiv
LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS	xviii
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. JUSTIFICATIVA	2
1.2. OBJETIVOS	4
1.2.1. Objetivo geral	4
1.2.2. Objetivo específico	4
1.3. ESTRUTURA DA PESQUISA	4
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1. CONCRETO COM FIBRAS	5
2.1.1. Matriz de concreto	5
2.1.2. Fibras	6
2.1.3. O compósito e interação fibra-matriz.....	6
2.2. VARIÁVEIS QUE INFLUENCIAM A INTERAÇÃO FIBRA-MATRIZ	8
2.2.1. Resistência e Módulo de Elasticidade das Fibras	9
2.2.2. Geometria da fibra.....	12
2.2.2.1. Fator de forma	12
2.2.2.2. Comprimento	12
2.2.2.3. Estrutura de ancoragem	13
2.2.3. Teor de fibra	15
2.2.4. Orientação da fibra.....	15
2.2.5. Resistência da matriz de concreto.....	16
2.3. CONCRETO COM FIBRAS DE AÇO	17
2.3.1. Fibras de aço.....	17
2.3.1.1. Exigências da Norma Brasileira.....	17
2.4. CONTROLE DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS	21
2.4.1. Definição de Resiliência	21

2.4.2. Definição de ductilidade	22
2.4.3. Definição de Tenacidade.....	23
2.4.4. Tenacidade e fator de tenacidade de concreto com fibras de aço	24
2.4.2. Resistências a Flexão	27
2.4.2.1. Definição.....	27
2.4.2.2. Resistência à flexão de concreto reforçado com fibras	29
2.4.3. Trabalhabilidade.....	37
2.5. TUBOS DE CONCRETO COM FIBRAS DE AÇO.....	39
2.5.1. Exigências da Norma Brasileira.....	39
2.5.2. Influência das fibras de aço no comportamento mecânico do tubo de concreto	39
2.5.2.1. Haktanir et al. (2007)	39
2.5.2.2. Fugii (2008)	40
2.5.2.3. Figueiredo et al. (2010)	40
2.5.2.4. De La Fuente et al. (2011).....	41
2.5.2.5. De La Fuente et al. (2012).....	42
2.5.2.6. Abolmaali et al. (2012).....	42
2.5.2.7. Escariz (2012)	43
2.5.2.8. A. Mohsen (2014).....	43
2.5.2.9. Mohamed et al. (2014)	44
2.5.2.10. Mohamed et al. (2015)	45
2.5.3. Trabalhabilidade no tubo de concreto com fibras	45
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	47
3.1. MATERIAIS	47
3.1.1. Caracterização dos materiais	47
3.1.1.1. Cimento	47
3.1.1.2. Agregados	47
3.1.1.3. Fibras de aço.....	48
3.2. PROGRAMA EXPERIMENTAL	49
3.2.1. Processo de produção dos tubos de concreto com fibras de aço	51
3.3. PLANEJAMENTO DE ENSAIOS.....	52
3.3.1. Variáveis de resposta.....	52
3.3.1.1. No estado fresco	52

3.3.1.2. No estado endurecido	52
3.3.2. Variáveis de controle.....	53
3.4. DOSAGEM DOS EXEMPLARES	55
3.5. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	56
3.6. MÉTODOS DE ENSAIOS	57
3.6.1. Ensaio de compressão axial.....	57
3.6.2. Ensaio de tração por compressão Diametral.....	58
3.6.3. Ensaio de Flexão.....	58
3.6.4. Ensaio de Compressão Modificada.....	60
3.6.5. Ensaio de Absorção de Água nos tubos de concreto	62
3.6.6. Ensaio de Teor Efetivo de Fibras nos tubos de concreto	64
3.6.7. Ensaio de Compressão Diametral nos tubos de concreto.....	64
4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	70
4.1. ABATIMENTO DO TRONCO DE CONE - <i>SLUMP TEST</i>	70
4.2. PLANO DE FISSURAMENTO DOS TUBOS.....	70
4.3. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DIAMETRAL DOS TUBOS	71
4.4. ENSAIOS COMPLEMENTARES.....	79
4.4.1. Resistência à compressão axial	79
4.4.2. Resistência à tração por compressão diametral.....	81
4.4.3. Resultados obtidos a partir do ensaio de flexão.....	84
4.4.3.1. Tenacidade e fator tenacidade	84
4.4.3.2. Resistências residuais.....	88
4.4.3.3. Curvas carga versus deslocamentos.....	89
4.4.4. Resistência à compressão diametral.....	91
4.4.5. Absorção de água dos tubos de concreto	98
4.4.6. Verificação do teor efetivo de fibras nos tubos de concreto.....	102
5. CONCLUSÕES	107
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	111
7. ANEXOS	119

1. INTRODUÇÃO

A fim de melhor parametrizar a aplicação dos tubos de concreto houve recentemente a da revisão da norma brasileira NBR 8890 (ABNT, 2007) quanto aos requisitos e métodos de ensaios, tendo como inovador a inclusão de fibra de aço como reforço. Em paralelo houve também a edição da norma brasileira NBR 15530 (ABNT, 2007) que trata da especificação da fibra de aço para concreto.

Importa referir que a utilização da fibra de aço remete a uma variante tecnológica de caráter relevante para o cenário da indústria da construção civil, visto a necessidade de obras particulares e públicas. Deste modo a fibra de aço exerce o papel importante como nova tecnologia para substituição parcial ou integral das armaduras convencionais de tubos de concreto.

No entanto, o comportamento do concreto reforçado com fibras de aço depende da interação da fibra com a matriz de concreto. Nessa interação tem-se forte influência das propriedades das fibras como: tipo, resistência, ancoragem, fator de forma, comprimento e teor de fibra, tendo o fator de forma a maior parcela de contribuição, desde que sejam controlados os fatores de produção.

Têm sido realizados diversos estudos do concreto com fibras de aço para tubos de concreto. Entre esses estudos podem-se destacar os realizados por De La Fuente et al. (2012), Mohsen (2014) e Mohamed et al. (2015), que realizou pesquisas quanto à utilização da fibra como alternativa tecnológica para reforço de tubo de concreto. Contudo, novas pesquisas devem ser realizadas, a fim de melhorar o desempenho mecânico e durabilidade dos tubos de concreto de com fibras, visando consolidar a fibra de aço como potencial alternativa.

O concreto reforçado com fibras de aço, ou CRFA, utilizado no tubo de concreto tem proporcionado melhores níveis de capacidade resistente pós-fissuração, tenacidade, durabilidade e menor abertura de fissuras, quando comparados ao mesmo estágio de carga-deformação dos tubos de concreto com armadura convencional.

1.1. JUSTIFICATIVA

De acordo com Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (2012), que através dos seus índices de atendimento total de água, coleta e tratamento esgoto, e investimento em novas ligações de água e esgoto, tem-se que entre os 100 Municípios analisados, colocam os Municípios de Santarém na posição de 91º, Macapá na 96º, Belém na 97º e Ananindeua na 99º e Porto Velho na 100º, ficando entre os 10 piores do *ranking* de saneamento no ano 2012.

Portanto há uma enorme carência e deficiência de saneamento básico na região norte, especificamente na Região Metropolitana do Município de Belém do Pará. Deste modo surge a necessidade de demanda de obras na infra-estrutura urbana, tendo a possibilidade do uso em larga escala de tubos de concreto para execução de obras de saneamento urbano de esgotos sanitários e drenagem de águas pluviais.

Quanto à utilização do concreto reforçado com fibras de aço na produção de tubos de concreto não se tem conhecimento de pesquisas e aplicação deste compósito na região norte, particularmente no estado do Pará, que em extensão geográfica detém enorme representatividade. Desta maneira, urge a necessidade também de estudos e pesquisas sobre o tema com os materiais da região, dado as características particulares de seus componentes (agregados miúdos e graúdos), a fim de tornar essa alternativa mais abrangente e competitiva, otimizando sua aplicação como recurso tecnológico, é necessário demonstrar sua viabilidade técnica. De maneira geral, ainda há diversos parâmetros a serem abordados e estudados que vão da análise do comportamento do compósito matriz-fibra, controle tecnológico, métodos de dosagem e racionalização da aplicação no tubo de concreto de concreto com fibras.

A utilização das fibras como reforço para tubos de concretos de menores diâmetros, poderá gerar a eliminação da etapa de montagem da armadura, visto que as fibras são adicionadas no concreto como um componente (NUNES, 2006). A substituição das telas de aço por fibras proporciona redução no tempo total de produção dos tubos, em função da mobilidade de lançamento do concreto na forma e da mão-de-obra desnecessária em etapas do processo, por não haver mais a montagem de telas (DE LA FUENTE et. al.; 2011).

Entre vantagens oferecidas pelas fibras de aço nos tubos de concreto pode-se citar: maior influência na distribuição e reforço na parede dos tubos de concreto, por apresentar maior esbeltez; apresentam menores níveis de fissuração para baixos níveis de deformação, pois as fibras atuam no início do processo de fissuração, visto que está próxima a superfície da parede do tubo; não é necessário cobrimento mínimo e posicionamento próximo a linha neutra na parte central da parede dos tubos de concreto com armaduras convencionais, como telas ou vergalhões, que nesse caso, a atuação da armadura convencional ocorre para maiores de níveis de deformação e fissuração (FIGUEIREDO, 2011).

Os tubos com fibras de aço podem trabalhar de maneira semelhante ou superior aos tubos de concreto armado com barras tradicionais, principalmente no estado limite de utilização ou serviço, tendo em vista que dificultam com maior intensidade a propagação das fissuras nesse estágio (DE LA FUENTE et. al., 2011). O comportamento apresentado pelos os tubos de concreto com fibras no estado limite de utilização é relevante, haja visto que o maior interesse de aplicação recai nesse estágio, que remete aos critérios de durabilidade do componente (FIGUEIREDO, 2011).

Ademais, os tubos de concreto têm processo de produção em série, ou seja, em significativas quantidades por possuírem semelhança dos componentes produzidos. Deste modo, havendo uma racionalização do processo de produção dos tubos de concreto com fibras de aço, por conseguinte poderá refletir no fator econômico, é claro que a partir de uma dosagem dos materiais adequada, das etapas do processo de produção definidos e de mão-de-obra treinada.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. O objetivo geral desta dissertação é:

Avaliar a viabilidade técnica dos tubos de concreto de classe PA-1, utilizando armadura descontínua (fibras de aço) com orientação aleatória em substituição a armadura convencional contínua (tela de aço).

1.2.2. Os objetivos específicos são:

- Utilizar tratamento estatístico para análise, entre si, dos resultados das fibras de aço do tipo 65/35 e 80/60, no estado soltas e coladas em pente nos teores analisados;
- Analisar os resultados de fator de tenacidade pela Norma JSCE SF-4 e resistência residual pelo RILEM TC 162-TDF para subsidiar a compreensão do comportamento.

1.3. ESTRUTURA DA PESQUISA

No primeiro capítulo é abordada a introdução, justificativa e objetivos a cerca da importância do estudo e os objetivos a ser alcançados.

No segundo capítulo apresenta a revisão bibliográfica que engloba os aspectos mais relevantes do concreto reforçado com fibras de aço.

No terceiro capítulo expressa a metodologia de pesquisa abordando o programa experimental com caracterização dos materiais, dosagem e métodos de ensaios.

No quarto capítulo tem-se a apresentação e análise dos resultados a partir de tabelas e gráficos.

O quinto capítulo exprime as conclusões da pesquisa.

No sexto capítulo estão descritas as referências bibliográficas utilizadas na pesquisa.

No sétimo capítulo estão contidos os anexos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. CONCRETO COM FIBRAS

2.1.1. Matriz de concreto

Pela versatilidade do concreto simples tem-se como perfeitamente normal a sua aplicação nos tubos de concreto para águas pluviais e esgotos sanitários. Entretanto pelas restrições na capacidade de resistir às deformações antes da ruptura, ocasionada pelos esforços de tração, isto confere ao concreto simples um comportamento frágil (FIGUEIREDO, 2011).

O concreto possui micro-fissuras e vazios mesmo antes de sofrer a ação de esforços. A ruptura à tração do concreto ocorre pela união de algumas fissuras, quando se tem várias fissuras tem-se a ruptura à compressão (METHA; MONTEIRO, 2008). Os vazios presentes no concreto estão localizados na zona de transição agregado-pasta, ou bolhas de ar oriundo da mistura deficiente, ou pelas tensões induzidas pela retração limitada da pasta de cimento e agregados. O carregamento no concreto age mais intensamente nos vazios e nas micro-fissuras (NUNES, 2006). No concreto simples, a resistência à tração tem caráter inferior em relação à resistência à compressão, por apresentar comportamento frágil (FIGUEIREDO, 2011).

A resistência à tração direta do concreto é inferior a apresentada pela resistência à compressão, variando desta última de 7% a 11% (METHA; MONTEIRO, 2008). O concreto tem menor desempenho diante das fissuras formadas ou presentes no seu interior, quando submetido aos esforços de tração do que em relação aos esforços de compressão (FIGUEIREDO, 2011).

A dificuldade de bloquear a propagação de fissuras ocasionadas pelas tensões de tração determina a capacidade do concreto de combater os esforços de tração. Quando o esforço é de tração ocorre à propagação das fissuras na direção perpendicular à direção principal de tensão (METHA; MONTEIRO, 2008).

No concreto submetido a esforços de tração tem-se um menor gasto energético no momento da ruptura em relação à ruptura por compressão. Desta maneira é extremamente relevante o papel que a fibra desempenha como ponte de

transferência de tensão ao longo das fissuras, proporcionando uma elevação da energia no momento da ruptura à tração. Por conseguinte também contribui na redução da propagação das fissuras a partir da restrição da concentração de tensão na margem da fissura (FIGUEIREDO, 2011).

2.1.2. Fibras

As fibras são materiais na forma descontínua utilizadas como reforço de matrizes, como por exemplo, o concreto. O comprimento das fibras deve superar a maior dimensão da sua seção transversal. São denominadas de micro-fibras, poliméricas em geral e macro-fibras, de aço e poliméricas, que vem sendo mais estudadas quanto à aplicação na matriz de concreto (FIGUEIREDO, 2011).

As fibras são classificadas pelas dimensões como micro e macro-fibras. As micro-fibras possuem diâmetros com dimensão num intervalo de dezenas de micrômetros e agem dificultando a ação das micro-fissuras, enquanto as macro-fibras possuem diâmetros que variam entre 0,2 mm e 1 mm. As fibras utilizadas como reforço de matriz cimentícia podem ser curtas, longas, retas, onduladas, com gancho nas extremidades, coladas em feixe, etc. (VASCONCELOS, 2012).

De acordo com Vasconcelos (2012) devem ser observadas as propriedades físico-químicas para cada tipo de fibra como material constituinte, densidade, rugosidade superficial, estabilidade química, resistência ao fogo. E as propriedades mecânicas como resistência à tração, ductilidade, rigidez, módulo de elasticidade e módulo de ruptura. Do mesmo modo deve ser considerada a conformação geométrica como comprimento, seção transversal e perfil longitudinal.

2.1.3. O compósito e interação fibra-matriz

Um material composto por duas fases principais distinta pode ser considerado um compósito, desta maneira o concreto endurecido trata-se de compósito, visto que as fases principais referem-se à pasta, agregados e os poros. O concreto reforçado com fibras também é considerado um compósito, tendo como fases principais o concreto, que é definido como fase matriz, e as fibras denominadas de fase dispersa. As fibras podem ser de aço, polipropileno, aço, náilon (CALLISTER, 2012).

No concreto simples, a concentração de tensões nas extremidades da fissura ocorre pelo desvio das linhas de tensão. Haverá uma súbita ruptura do material por não haver capacidade resistente do concreto fissurado, conforme figura 2.1 (RAMOS, 2002).

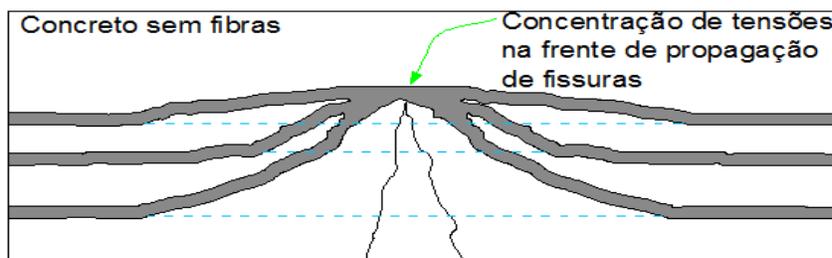


Figura 2.1 – Propagação de fissuras e concentrações de tensões. (RAMOS, 2002)

O concreto que tem comportamento frágil, adquire comportamento pseudo-dúctil ou não frágil, quando a fibra é adicionada ao mesmo, pois, ao ser submetido ao carregamento na fase pós-fissuração, as fibras atuam como ponte de transferência de tensões e reduzem as concentrações de tensões nas extremidades das fissuras (figura 2.2), conseqüentemente também ocorre à redução da velocidade de propagação e da abertura das fissuras, garantindo ao concreto com fibras a capacidade de suportar maiores deformações em relação ao concreto simples ou ao concreto com armaduras convencionais. Nesse caso do último é relativo, pois depende da taxa de armadura. (FIGUEIREDO, 2011).

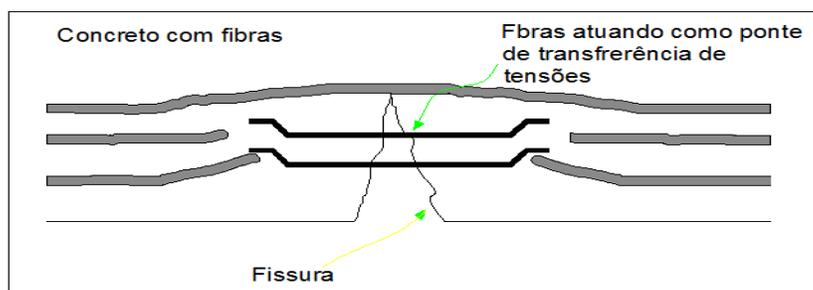


Figura 2.2 – Propagação de fissuras e concentrações de tensões. (RAMOS, 2002)

Para teores elevados de fibras, em que houver mistura ineficiente de fibras no concreto e com matriz de concreto de baixa qualidade poderá ocorrer distribuição não-uniforme das fibras nessa matriz, acarretando segregação e embolamento das

fibras, que provocará redução da resistência e durabilidade do concreto. A ação da fibra como único reforço no concreto para elevados carregamento e deformações não é recomendável por não suportar aos esforços submetidos, sendo necessária neste caso a adição da fibra como complementação da armadura convencional, ocasionando um acréscimo de custo na produção do compósito (GARCIA, 2006).

Deve haver um controle tecnológico para utilização das fibras, a fim de proporcionar uma capacidade resistente residual pós-fissuração, e que não haja dosagens superdimensionadas, inviabilizando técnico e economicamente (NUNES, 2006).

2.2. VARIÁVEIS QUE INFLUENCIAM NA INTERAÇÃO FIBRA-MATRIZ

Deverá haver uma análise da interação fibra-matriz, de maneira que a fibra possa oferecer ao compósito um ganho no comportamento e desempenho do material. Algumas variáveis influenciam diretamente ou indiretamente na interação fibra-matriz, as quais se destacam abaixo:

- A resistência e o módulo de elasticidade das fibras;
- A geometria da fibra (fator de forma, comprimento e estrutura de ancoragem);
- O teor de fibra;
- A orientação da fibra;
- A resistência da matriz de concreto.

Entre as variáveis apontadas acima, pode-se dizer que o teor de fibras e o fator de forma são os parâmetros que mais influenciam no índice de reforço na mistura do concreto reforçado com fibras, conforme mostrado na equação 2.1 (Harajli et al, 2012.):

$$RI_v = \sum_{i=1}^n V_{f,i} \frac{L_{f,i}}{d_{f,i}} \quad (2.1)$$

onde,

$V_{f,i}$ = volume ou teor de fibras em fração volumétrica (%);

n = número total de fibras utilizadas na mistura;

L = comprimento das fibras (mm);

d = diâmetro das fibras (mm);

$\frac{L_{f,i}}{d_{f,i}}$ = fator de forma.

A seguir cada variável citada acima será apresentada de forma mais ampla a seguir:

2.2.1. Resistência e Módulo de Elasticidade das Fibras

A resistência das fibras influencia na resistência pós-fissuração do material, visto que ocorre a transferência de tensões para as fibras no momento da pós-fissuração da matriz, portanto para fibras com maiores resistências haverá maiores níveis de resistência pós-fissuração (FIGUEIREDO, 2011).

Geralmente as fibras de baixo módulo de elasticidade, quando apresentam módulo menor em relação ao módulo da matriz cimentícia, demonstram baixa resistência mecânica, conforme Tabela 2.1, por isso seus teores em volume precisam ser muitos altos para atingir o propósito de reforçar a matriz, remetendo à inviabilização da utilização do compósito (FIGUEIREDO, 2011). Em contrapartida, as fibras de elevado módulo de elasticidade, quando apresentam módulo acima do módulo da matriz cimentícia, possuem um alto estágio de tensão no instante do rompimento da matriz, garantindo sua utilização como reforço. Noutra vertente, se as fibras tiverem um alto módulo de elasticidade e baixa resistência à tração ou ao cisalhamento, poderão vir a ter sua capacidade de reforço pós-fissuração pormenorizada ou insuficiente (FIGUEIREDO, 2011). A figura 2.3 mostra algumas das fibras de baixo e alto módulo utilizadas em matriz cimentícia.

Tabela 2.1 – Valores de resistência mecânica e módulo de elasticidade para diversos tipos de fibras e matriz cimentícia (BENTUR; MINDESS, 2007).

Material	Diâmetro (µm)	Densidade (g/cm³)	Módulo de elasticidade (GPa)	Resistência à tração (GPa)	Deformação na ruptura (%)
Aço	5-500	7.84	190-210	0.5-2	0.5-3.5
Vidro	9-15	2.6	70-80	2-4	2-3.5
Polipropileno Fibrilado	20-200	0.9	1-7.7	0.5-0.75	8.0
Aramida (Kevlar)	10	1.45	65-133	3.6	2.1-4.0
Nylon	-	1.1	4	0.9	13-15
Celulose	-	1.2	10	0.3-0.5	-
Acrílico	18	1.18	14-19.5	0.4-1.0	3
Polietileno	-	0.95	0.3	0.7×10^{-3}	10
Fibra de madeira	-	1.5	71	0.9	-
Sisal	10-50	1-50	-	0.8	3.0
Matriz de cimento (para comparação)	-	2.5	10-45	3.7×10^{-3}	0.02

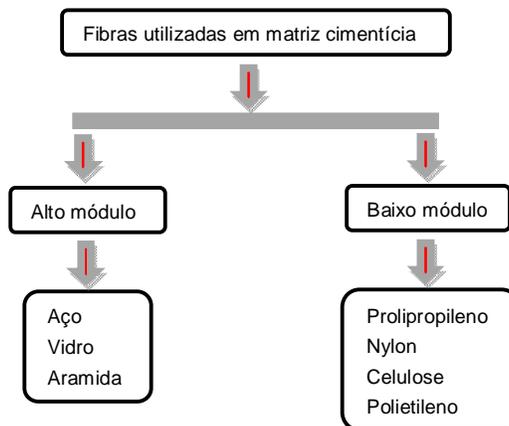


Figura 2.3 - Fibras com baixo e alto módulo de elasticidade.

No esquema da figura 2.4 apresenta-se uma projeção de matriz reforçada com diferentes tipos de fibras, sendo uma com baixa resistência mecânica e módulo de elasticidade e as outras duas com alta resistência mecânica e módulos de elasticidades. Nas três fases é considerado comportamento elástico perfeito. A linha O-A representa a curva de tensão e deformação, sendo as linhas O-B e O-C, respectivamente, o trabalho elástico realizado pelas fibras de alto módulo e com alta

e baixa resistência mecânica, respectivamente. Enquanto a linha O-D demonstra comportamento da fibra de baixo módulo (FIGUEIREDO, 2005).

No ponto A retrata o instante do rompimento da matriz, neste momento ocorre a transferência da tensão para fibra de baixo módulo (ponto D) refletindo numa tensão muito baixa nesse estágio de deformação, necessitando ser fortemente deformada para manter o estágio de tensão. Desta maneira essa fibra apresenta uma baixa capacidade de suportar e reforçar o compósito na pós-fissuração ou irá desencadear uma enorme deformação da matriz-fibra elevando estágio de fissuração (ponto E), isto ocorreria se a fibra de baixo módulo tivesse resistência mecânica disponível para obter o estágio de tensão vinculado ao ponto E, todavia não ocorre (FIGUEIREDO, 2005).

Na linha O-C observa-se que o rompimento das fibras ocorre de forma antecipada, antes do rompimento da matriz, pela a fibra apresentar alto módulo de elasticidade e baixa resistência. Esta entonação torna-se relevante tendo em vista que o principal objetivo da utilização das fibras como reforço de concreto está na função desta de funcionar como ponte de transferência de tensões na pós-fissuração (FIGUEIREDO, 2005).

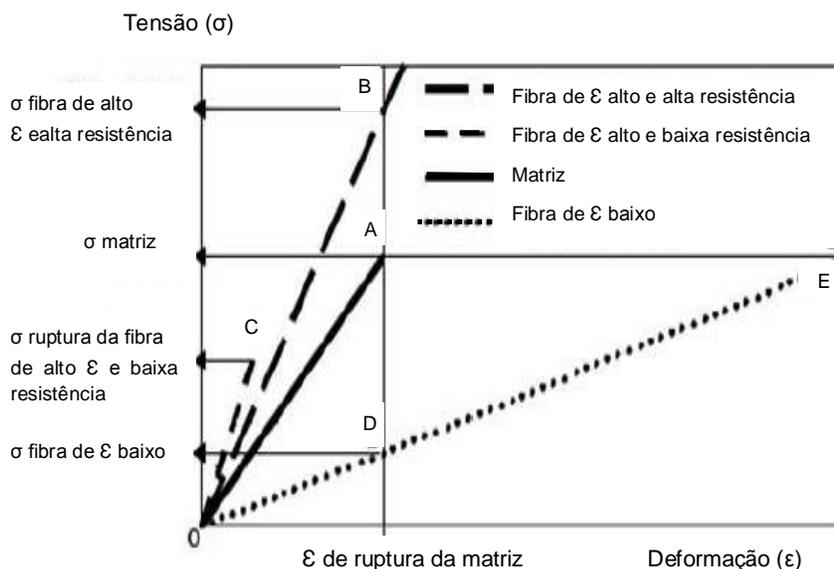


Figura 2.4 – Diagrama de tensão por deformação elástica de matriz e fibras de alto e baixo módulo de elasticidade trabalhando em conjunto. (FIGUEIREDO, 2005).

2.2.2. Geometria da fibra

2.2.2.1. Fator de Forma

A relação entre o comprimento e o diâmetro da fibra, tem influencia direta no comportamento do compósito, sendo caracterizado por um fator adimensional chamado fator de forma (λ), conforme mostra na equação 2.2.

$$\lambda = l/d_e \quad (2.2)$$

onde,

λ = fator de forma da fibra;

l = comprimento da fibra (mm);

d_e = diâmetro equivalente da fibra (mm).

Maior será a capacidade residual pós-fissuração do compósito, quanto maior for o fator de forma, portanto foi considerado como critério mínimo de qualificação da fibra em relação à aplicação na elaboração da norma brasileira de fibras de aço (FIGUEIREDO, 2011).

A variação exagerada do comportamento do concreto reforçado com fibra pode ser ocasionada pela variabilidade do fator de forma da fibra (λ) (FIGUEIREDO, 2011). Desta maneira o fator de forma da fibra é definido pela Equação 2.2:

2.2.2.2. Comprimento

O comprimento das fibras exerce papel fundamental como reforço da interação fibra-matriz (VASCONCELOS, 2012).

Para que a fibra atue como reforço é importante que o seu comprimento seja igual ou superior ao dobro diâmetro máximo do agregado utilizado na mistura, a fim de haja compatibilidade dimensional entre agregado e fibra, de forma que a fibra espalhe-se homoganeamente pelo material e assim possa atuar melhor no combate a propagação das fissuras (FIGUEIREDO, 2011)

Esta compatibilidade torna-se relevante, pois a fratura do concreto geralmente ocorre na interface pasta-agregado em concreto de baixa e moderada resistência mecânica. No concreto sem compatibilidade dimensional entre agregado e fibra, nota-se que o comprimento menor da fibra em relação ao diâmetro máximo do agregado graúdo proporciona uma inclinação maior da fibra na região de fratura, conduzindo a menor ação da fibra como ponte de transferência (FIGUEIREDO, 2011). (figura 2.5b).

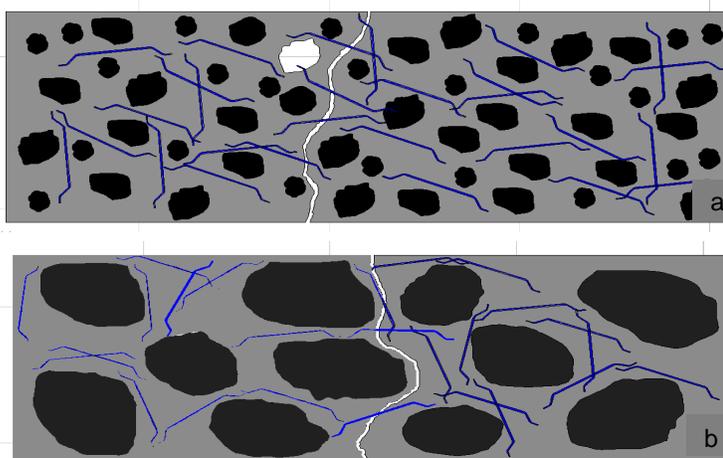


Figura 2.5 – Concreto reforçado com fibras em que há compatibilidade com agregado graúdo (a) e onde não há (b) (adaptado de FIGUEIREDO, 2000)

É sempre importante manter a compatibilidade dimensional para que a fibra possa atuar como ponte de transferência de tensões ao longo da fissura. Quando não for possível aumentar o comprimento da fibra, deve-se então reduzir o diâmetro máximo do agregado ou vice-versa (FIGUEIREDO, 2011).

2.2.2.3. Estrutura de Ancoragem

Para menores deformações, a fibra com ancoragem detém maior resistência ao arrancamento, devido ao gancho na extremidade garantir maior aderência na matriz e com isto aumentar a intensidade da força de arrancamento, repercutindo em menor abertura das fissuras e baixos deslocamentos na interação fibra-matriz. Com prosseguimento do carregamento e deslocamento, ocorre uma maior abertura da fissura, neste momento surge enorme concentração de tensões ao redor da

região de ancoragem nessa interação fibra-matriz, que fragiliza o material (BENTUR; MINDESS, 2007).

No gancho presente na extremidade da fibra, ocorre maior possibilidade de ruptura por ter sido encruado e deformado para formação da ancoragem. No caso da fibra com extremidade reta ocorre menor probabilidade de degradação do concreto na extremidade da fibra e ruptura do concreto, por não possuir gancho para ancoragem, mantendo-se transferência elástica para maiores níveis de abertura da fissura e deformação da fibra. Em consequência consegue-se para maiores aberturas de fissuras atingir maior capacidade resistente residual do concreto, em virtude de se ter maior força de arrancamento garantido pela fibra. (FIGUEIREDO, 2011). Ainda para fibra com extremidade reta verifica-se uma maior instabilidade pós-pico, em função da obtenção de menor carga residual após a carga de pico, dilatando a diferença entre capacidade resistente da matriz e da fibra (FIGUEIREDO, 2011).

O processo de transferência de tensão no compósito matriz-fibra dar-se pela combinação de dois mecanismos essenciais: transferência elástica e transferência por atrito. Na fase de pré-fissuração do material ocorre à transferência elástica, apontando o limite de proporcionalidade e a tensão de primeira fissura do material. Nessa fase, as tensões de cisalhamento exercidas no compósito, particularmente na interação fibra-matriz, não ultrapassam limites de resistência ao cisalhamento, e deste modo não há perda de aderência entre matriz e fibra. Desta maneira, a fibra não desempenha a ponte de transferência de tensões ao longo das fissuras (BENTUR; MINDESS, 2007).

As tensões têm a transferência elástica convertida para transferência por atrito depois da fissuração da matriz. Neste momento, a tensão de cisalhamento por aderência elástica ultrapassa a resistência ao cisalhamento na região de interação fibra-matriz, promovendo a iniciação do processo de deslocamento da fibra. Deste modo, a partir da separação da fibra da matriz tem-se a transferência de tensões ocorrendo unicamente por atrito. (BALAGURI; SHAH, 1992, apud, ESCARIZ, 2013, PG 44). A transferência de tensões por atrito das fibras ocorre de maneira incisiva durante o processo de deslocamento ou rompimento garantindo uma taxa de energia extra para deformação e ruptura do compósito, o que promove melhora na tenacidade do material (BENTUR; MINDESS, 2007).

2.2.3. Teor de Fibra

O teor de fibra está diretamente relacionado à tenacidade do material e à capacidade de resistência do concreto pós-fissuração. O teor de fibras adicionado ao concreto influencia incisivamente no desempenho do concreto reforçado com fibras, portanto o controle de desempenho do compósito está diretamente relacionado ao controle de teor de fibras. (FIGUEIREDO, 2011).

Esse efeito do teor de fibras está intimamente relacionado à ação como ponte de transferência de tensão ao longo da fissura, portanto o teor de fibras estabelece a capacidade de reforço, destarte quanto maior for o teor de fibras, também maior será o número de fibras contribuindo como ponte de transferência ao longo da fissura, conseqüentemente maior capacidade resistente pós-fissuração. (Figueiredo, 2011).

O teor de fibras pode ser considerado como fator importante no desempenho do compósito, pois influenciará no comportamento do compósito de maneira que se apresentará como *strain-softening*, quando ocorre uma perda crescente de capacidade resistente pós-fissuração da matriz, e como *strain-hardening*, quando há um ganho de capacidade resistente pós-fissuração. (NAAMAN, 2008)

2.2.4. Orientação da Fibra

Quanto maior for número de fibras orientadas na direção perpendicular a tensão de tração e fissuração principal, maior será a ação como ponte de transferência de tensão na região de fissuração, proporcionando melhor resistência pós-fissuração (BENTUR; MINDESS, 2007). De acordo com Nunes (2006), as fibras ao se flexionarem ao longo da fissura fornecem um nível de energia adicional, mesmo dispondo de deformação plástica. Em contraponto, uma elevada flexão da fibra no processo de arrancamento pode gerar tensão acima da resistência admissível da fibra provocando rompimento.

Segundo Figueiredo et al. (2008a), as fibras desalinhadas em relação às dispostas de forma alinhadas serão mais frágeis na direção do plano de ruptura por ter maior perda de eficiência, haja vista que dispõem mais energia de deslocamento. As fibras frágeis sofrem uma tensão de cisalhamento bem maior,

corroborando para rompimento da fibra, desta maneira por não estar alinhada em relação à carga principal, a fibra não se deformará plasticamente e haverá ruptura por cisalhamento.

2.2.5. Resistência da Matriz de Concreto

A zona de transição pasta-agregado tem microestrutura diferente da existente na região de interface fibra-matriz. Tal diferença dar-se porque na zona de transição pasta-agregado ocorre a hidratação das partículas de cimento que reagem dando origem as partículas coloidais de silicato de cálcio hidratado - (C-S-H) e cristais de hidróxido de cálcio - $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (BENTUR; MINDESS, 2007). Na região de interface fibra-matriz existe a ação da água preenchendo os vazios no contorno da fibra, que em detrimento da exsudação interna e do deficiente empacotamento dos grãos de cimento ao redor da superfície da fibra, ocorre uma maior porosidade no entorno da matriz da fibra. (BENTUR; MINDESS, 2007).

Com isto haverá uma maior número de grandes cristais de hidróxido de cálcio - $\text{Ca}(\text{OH})_2$, orientados na direção perpendicular à superfície da fibra, gerando uma zona preferencial de clivagem, desta maneira tendo uma menor resistência da matriz em menor aderência na região de interface fibra-matriz, fatores esses relevantes na transferência de tensões. Na ruptura do concreto reforçado com fibras ocorre uma dissipação de energia na aderência fibra-matriz e o arrancamento das fibras (BENTUR; MINDESS, 2007). Entre os fatores que influenciam na aderência fibra-matriz e na resistência da matriz na interface fibra-matriz está uma adequada cura e dosagem do compósito, caso seja necessário utilizando adições minerais e produtos poliméricos (BENTUR; MINDESS, 2007).

O desempenho da fibra torna-se reduzido, quando se tem baixo teor de fibra e maior resistência da matriz, porque pela resistência da matriz ser maior há uma transferência de altos níveis de tensão para as fibras no momento da ruptura, que por apresentar um baixo número de fibras na região de ruptura, acaba havendo um escorregamento e ruptura dessas fibras. Entretanto quando há um maior número de fibras na região de ruptura, após ocorrer à ruptura da matriz, as tensões geradas distribuem-se melhor, havendo uma absorção menor entre as fibras. Desta maneira, há um aumento da tenacidade do compósito, visto que se prolonga a ruptura e

escorregamento das fibras. Portanto, para elevadas resistências mecânicas da matriz, deve-se utilizar maior teor de fibras ou maior aderência fibra-matriz. (FIGUEIREDO, 2011).

2.3. CONCRETO COM FIBRAS DE AÇO

2.3.1. FIBRAS DE AÇO

2.3.1.1. Exigências da Norma Brasileira

Houve um avanço significativo no concreto reforçado com fibras no Brasil com a nova especificação de fibras de aço para concreto ((FIGUEIREDO et al., 2008a). Entre os avanços inseridos tem-se o elevado grau de exigência para a resistência do aço, em detrimento das condições de fabricação de fibras no Brasil. Outro avanço tecnológico está relacionado aos critérios de especificação da fibra que atende aos requisitos do mercado nacional e internacional.

Na elaboração da norma NBR 15530:2007 – *Fibras de aço para concreto – Especificação*, houve a parametrização de duas variáveis: a geometria da fibra e a capacidade resistente do aço que lhe deu origem. A geometria da fibra confere função fundamental no comportamento do compósito, enquanto que a resistência do aço utilizado para produção da fibra incorporada como reforço no concreto tem parcela relevante para o concreto com elevada resistência mecânica. Deste modo, nos requisitos e tolerâncias das fibras de aço são consideradas essas duas variáveis. A classe da fibra está relacionada à resistência a tração do aço e fator de forma. A Norma Brasileira estabelece limites de resistência à tração e fator de forma. A tabela 2.2 apresenta os níveis de resistência mínima e fator de forma para a fibra de aço.

Tabela 2.2 – Requisitos especificados pela norma NBR 15530 (ABNT, 2007) para as fibras de aço.

Classe da fibra	Fator de forma (λ)	Limite de resistência à tração do aço Mpa (*)fu
A I	40	1000
A II	30	500
C I	40	800
C II	30	500
C III	30	800
R I	40	1000
R II	30	500

(*) Esta determinação deve ser feita no aço, no diâmetro equivalente final imediatamente antes do corte.

De acordo com a norma brasileira NBR 15530 (ABNT, 2007) tem-se para as fibras de aço a classificação quanto à conformação geométrica:

- Tipo A: fibra de aço com ancoragem na extremidade;
- Tipo C: fibra de aço corrugada;
- Tipo R: fibra de aço reta.

E quanto à classe, que é definida pela origem do aço, tem-se:

- 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.

A tabela 2.3 apresenta a classificação geométrica dos tipos e classes de fibras de aço existentes na norma NBR 15530 (ABNT, 2007). Essa classificação estabelecida pela norma corresponde integralmente às fibras disponíveis no mercado nacional, em que há a estipulação de requisitos mínimos a ser compatibilizados com comportamento do concreto reforçado com fibras de aço – CRFA (FIGUEIREDO et al., 2008a).

Tabela 2.3 – Classificação e geometria das fibras de aço para reforço do concreto (FIGUEIREDO et al., 2008a).

Tipo	Classe da fibra	Geometria
A	I	
	II	
C	I	
	II	
	III	
R	I	
	II	

A fragilidade do compósito é influenciada sensivelmente pela ductilidade mínima da fibra de aço ((FIGUEIREDO et al., 2008a). A avaliação dessa variável ocorre no ensaio de dobramento da fibra, a partir da amostra de 10 exemplares retirados de forma aleatória do lote analisado. A metodologia do ensaio dá-se na averiguação manual do dobramento da fibra com utilização de pino com diâmetro de 3,2 mm em temperatura superior a 16 °C. As fibras são dobradas até ser obtido um ângulo de 90° podendo haver rompimento no máximo de 10% das fibras analisadas, de acordo com a figura 2.6.

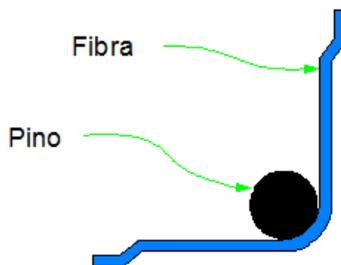


Figura 2.6 – Esquema adotado no ensaio de dobramento da fibra de aço, conforme preconizado na norma NBR 15330 (ABNT, 2007).

Por apresentarem expressivo ganho de resistência à tração e aderência na interação fibra-matriz, as fibras de aço proporcionaram melhor aplicabilidade nos componentes em relação às demais fibras. Por diversos métodos obtêm-se filamentos descontínuos das fibras de aço que apresentam diferentes formas, dimensões e tipos. Quanto a sua caracterização possuem comprimento entre 25 e 60 mm e diâmetro de 0,5 a 1,0mm, com fator de forma no intervalo de 30 a 80. Tem fornecimento na forma solta ou colada em pentes, esta última melhora a mistura e singularidade do material (FIGUEIREDO et. al., 2008a).

Segundo Figueiredo et. al. (2008a), e mediante a NBR 15530 (ABNT, 2007) tem-se três tipos de fibras de aço:

- Fibra de aço corrugada: produzida a partir de fio chato que sobra da produção de lâ 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 na extremidade: 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, acaba por apresentar uma maior resistência mecânica dada o encruamento, a qual pode ser ainda maior quando da utilização de aço com maior teor de carbono.

2.4. CONTROLE DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS

2.4.1. Definição de Resiliência

Segundo Callister (2012), a resiliência é a capacidade de um material absorver energia quando ele é deformado elasticamente e depois, com o descarregamento ter essa energia recuperada. A propriedade associada é o módulo de resiliência, U_r , que representa a energia de deformação por unidade de volume exigida para tencionar um material desde um estado com ausência de carga até a sua tensão limite de escoamento. O módulo de resiliência para um corpo-de-prova submetido a um ensaio de tração uniaxial é tão-somente a área sob a curva tensão-deformação de engenharia computada até o escoamento, conforme apresentado nas equações 2.3 e 2.4:

$$U_r = \int_0^{\epsilon_e} \sigma \, d\epsilon \quad (2.3)$$

Supondo uma região elástica linear,

$$U_r = \frac{1}{2} \sigma_e \epsilon_e \quad (2.4)$$

onde,

ϵ_e = deformação no momento do escoamento (mm/mm).

As unidades de resiliência são o produto das unidades de cada um os dois eixos do gráfico tensão-deformação. Para unidades SI, esta unidade é joules por metro cúbico (J/m^3 , que é equivalente a Pa). É uma unidade de energia, portanto essa área sob a curva tensão-deformação representa a absorção de energia por unidade de volume o material. Materiais resilientes são aqueles que possuem limites de escoamento elevado e módulo de elasticidades baixo. Se incorporarmos a equação 2.5 na equação 2.6:

$$\sigma = E\epsilon \quad (2.5)$$

$$U_r = \frac{1}{2} \sigma_e \epsilon_e = \frac{1}{2} \left(\frac{\sigma_e}{E} \right) \epsilon_e = \frac{\sigma_e^2}{2E} \quad (2.6)$$

onde,

σ = tensão (MPa);

ϵ = deformação (mm/mm);

E = constante de proporcionalidade E é o módulo de elasticidade, ou *módulo de Young* (GPa).

De acordo com Askeland e J. Wright (2014), o módulo de resistência (E_r) é avaliado pela área existente sob a porção elástica de uma curva tensão-deformação, corresponde à energia elástica por volume armazenada por um material durante a aplicação da tensão e posteriormente liberada quando a tensão é removida. No caso de um comportamento elástico linear, tem-se:

$$E_r = \frac{1}{2} \sigma_e \epsilon_e \quad (2.7)$$

2.4.2 Definição de Ductilidade

Segundo Callister (2012), a ductilidade é uma propriedade mecânica importante, pois representa uma medida do grau de deformação plástica que foi suportado quando da fratura. Um material que experimenta uma deformação plástica muito pequena ou mesmo nenhuma deformação plástica quando da sua fratura é chamado de *frágil*. A ductilidade pode ser expressa quantitativamente tanto como *alongamento percentual* como *redução percentual*.

De acordo com Askeland e J. Wright (2014), a ductilidade refere-se à capacidade dos materiais de serem alongados ou dobrados (ou seja, deformados) sem se romper. A ductilidade mede a deformação plástica que um material pode suportar sem se romper. Pode-se estimá-la medindo a distância entre as marcas de referência do corpo-de-prova antes e depois do ensaio, ou seja, o comprimento final. O alongamento percentual descreve a deformação plástica permanente antes da falha, ou seja, não inclui a deformação elástica que desaparece após a fratura, conforme apresentado na equação 2.8:

$$\% \text{ Alongamento} = \frac{l_f - l_0}{l_0} \quad (2.8)$$

onde,

l_0 = comprimento inicial (mm);

l_f = distância entre as marcas de referência após a fratura do espécime, ou seja, comprimento final (mm).

A redução percentual de área consiste em medir a variação percentual da seção transversal na região de fratura, antes e depois do teste, descreve o afinamento ocorrido na amostra durante o ensaio, conforme apresentado na equação 2.9.

$$\% \text{ Redução percentual de área} = \frac{A_0 - A_f}{A_0} \quad (2.9)$$

onde,

A_0 = seção transversal inicial (mm²);

A_f = seção transversal final na superfície de fratura (mm²).

2.4.3 Definição de Tenacidade

De acordo com Callister (2012), a tenacidade é a medida de habilidade de um material em absorver energia até a sua fratura. Quando um entalhe ou ponto de concentração de tensão está presente, a tenacidade ao entalhe é averiguada pelo uso de um ensaio de impacto. A tenacidade pode ser determinada a partir dos resultados de um ensaio de tensão-deformação em tração. Ela é a área sob a curva tensão-deformação até o ponto de fratura. As unidades para a tenacidade são as mesmas para a resiliência, isto é, energia por unidade de volume do material. Para que um material seja tenaz, ele deve apresentar tanto resistência como ductilidade; e freqüentemente materiais dúcteis são mais tenazes do que materiais frágeis.

Embora o material frágil tenha maior limite de escoamento e maior limite de resistência à tração, ele possui menor tenacidade do que o material dúctil, em virtude da sua falta de ductilidade, conforme figura 2.7:

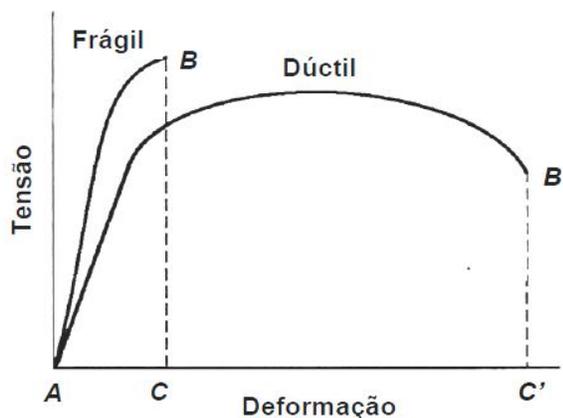


Figura 2.7 – Curva tensão-deformação (CALLISTER, 2012).

Segundo Askland e J. Wright (2014), a tenacidade é a energia absorvida por um material antes de fraturar, sendo medida pela área sob a curva tensão-deformação obtida no ensaio de tração, também conhecida como energia da fratura.

De acordo com a ASTM C 1609 (2010), definiu-se tenacidade do concreto com fibras como a energia absorvida pelo compósito antes e depois da ruptura da matriz, quando submetido a um ensaio de tração na flexão, que no caso das fibras prolongam o estágio de pós-fissuração até a ruptura.

2.4.4. Tenacidade e Fator de Tenacidade de concreto com fibras de aço

O ensaio de tenacidade ocorre através da flexão de corpos-de-prova prismáticos. Entre os ensaios comumente realizados para concreto com fibras têm-se o preconizado pela Japan Society of Civil Engineers (JSCE-SF4, 1984), que determina principalmente o fator de tenacidade à flexão. O método de ensaio japonês consiste na flexão de corpos-de-prova prismáticos sem entalhe com quatro cutelos, que são carregados em três terços, conforme mostra a figura 2.8:

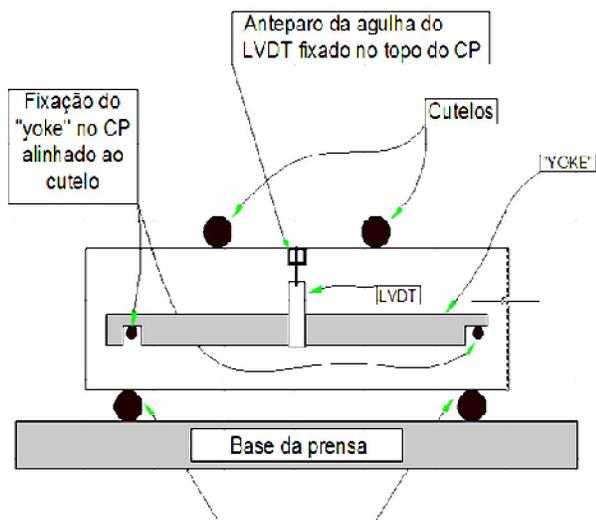


Figura 2.8 – Posicionamento de corpo-de-prova, LVDT e cutelos no ensaio de tração na flexão com o sistema “yoke” (adaptado de FIGUEIREDO, 1999).

Com objetivo de controlar no ensaio o deslocamento ocorrido, tem sido utilizado o controle eletrônico de deslocamento através de transdutor do tipo LVDT (*Linear Variable Displacement Transducer*). O transdutor LVDT deve ser apoiado num dispositivo denominado de *yoke*. Este método de ensaio tem indicado confiabilidade, por ter o corpo-de-prova ensaiado com referência da leitura do deslocamento ocorrido. Segundo Salvador (2013), esse método sofre pouca influência, nas variáveis necessárias para obtenção da tenacidade, do sistema de carregamento utilizado ou das deformações externas.

De acordo com as recomendações da JSCE-SF4 (1984), o corpo-de-prova prismático deve ter seção transversal com dimensões de 10x10, quando a fibra tiver comprimento abaixo de 40 mm, e quando a fibra possuir comprimento acima de 40 mm deverá ter seção transversal com dimensões de 15x15. O comprimento e o vão de ensaio deverá ser três vezes a altura da amostra. A tenacidade à flexão é obtida através da integral da área sob a curva carga-deslocamento entre os pontos 0 e δ_{tb} , sendo definida por T_b , conforme mostra a figura 2.9.

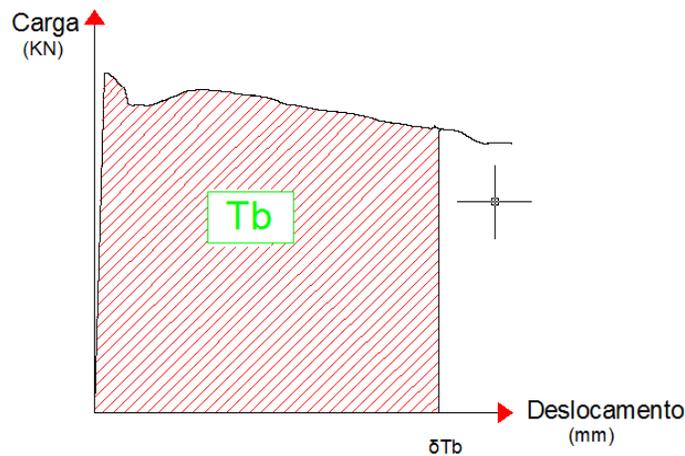


Figura 2.9 – Determinação da tenacidade à flexão, adaptado da JSCE SF-4 (1984)
(adaptado FIGUEIREDO; HELENE, 1997)

Outro parâmetro obtido nesse ensaio é o fator de tenacidade à flexão que é calculado a partir do valor obtido para T_b até o deslocamento correspondente a δ_{tb} , esse deslocamento corresponde a $L/150$, e L equivale ao vão adotado no ensaio, conforme equação 2.10.

A razão da T_b pelo δ_{tb} , representa a carga média equivalente suportada pelo compósito até determinado nível de deslocamento durante o ensaio (SALVADOR, 2013).

$$FT = \frac{T_b}{\delta_{tb}} \cdot \frac{L}{b \cdot h^2} \quad (2.10)$$

onde,

FT = fator de tenacidade à flexão (MPa);

T_b = tenacidade a flexão (kN.mm);

δ_{tb} = deslocamento equivalente a $L/150$ (mm);

b = largura do corpo-de-prova (mm);

h = altura do corpo-de-prova (mm);

L = vão do ensaio (mm).

Neste método de ensaio pode surgir a instabilidade pós-pico, que ocorre pela dilatada diferença entre a carga resistida pela matriz e a suportada pela fibra, isto acontece quando a fibra resiste somente a uma pequena parcela da carga suportada pela a matriz. A fibra recebe uma brusca transferência de tensões da matriz, tendo

um aumento do deslocamento e os dispositivos eletrônicos de medida contínua (LVDT - Linear Variable Displacement Transducer) sofrem um impacto, sendo mais intenso para equipamentos hidráulicos, e menores para equipamentos com sistema de carregamento rígido. Essa instabilidade atinge uma região que pode chegar ao deslocamento de 0,5mm (FIGUEIREDO, 2011).

2.4.2. Resistências à flexão

2.4.2.1. Definição

De acordo com Callister (2012), a resistência à flexão é um ensaio onde um corpo-de-prova na forma de uma barra, com seção reta circular ou retangular, é flexionado até a sua fratura, utilizando uma técnica de carregamento em três ou quatro pontos. No ponto de carregamento, a superfície superior do corpo-de-prova é colocada em um estado de compressão, enquanto a superfície inferior encontra-se em tração.

A tensão é calculada a partir da espessura do corpo-de-prova, do momento fletor e do momento de inércia da seção reta. A tensão de tração máxima existe na superfície inferior do corpo-de-prova, diretamente abaixo do ponto de aplicação da carga. Uma vez que os limites de resistência à tração dos materiais cerâmicos equivalem a aproximadamente um décimo das suas resistências à compressão, e uma vez que a fratura ocorre na face do corpo-de-prova que está sendo submetida a tração, o ensaio de flexão é um substituto razoável para o ensaio de tração.

A tensão no momento da fratura quando se emprega esse ensaio de flexão é conhecida por **resistência á flexão, módulo de ruptura, resistência à fratura ou resistência à dobra**, e consiste em um importante parâmetro mecânico para os materiais cerâmicos frágeis. No carregamento de três pontos para uma seção retangular e circular, a resistência á flexão, σ_{rf} é determinado conforme equação 2.11:

$$\sigma_{rf} = \frac{Mc}{I} \quad (2.11)$$

onde,

σ_{rf} = resistência à flexão (MPa);

M = momento fletor máximo (kN.mm);

c = distância do centro do corpo-de-prova até as fibras mais externas (mm);

I = momento de inércia da seção reta.

Os parâmetros acima possuem variáveis de cálculo para uma seção retangular e circular, que são:

Seção	M	c	I
Retangular	$\frac{FL}{4}$	$\frac{d}{2}$	$\frac{bd^3}{12}$
Circular	$\frac{FL}{4}$	R	$\frac{\pi R^4}{4}$

onde,

F = carga aplicada (kN);

L = distância entre os pontos de suporte (mm);

d = espessura ou altura do corpo-de-prova (mm);

b = largura do corpo-de-prova (mm);

R = raio da seção circular (mm).

Deste modo, substituindo os parâmetros com suas variáveis de cálculo na equação 2.11, obtém a equação 2.12 para corpo-de-prova com seção retangular:

$$\sigma_{rf} = \frac{3F_f L}{2bd^2} \quad (2.12)$$

onde,

F_f = carga no momento da fratura (kN);

Ou ainda substituindo as variáveis de cálculo para corpo-de-prova com seção circular na equação 2.11, obtém a equação 2.13:

$$\sigma_{rf} = \frac{F_f L}{\pi R^3} \quad (2.13)$$

Segundo Askland e J. Wright (2014), a resistência de flexão (ou módulo de ruptura) ocorre quando há uma flexão do corpo-de-prova submetido a um carregamento em três pontos, causando uma tensão trativa que surge no ponto central e inferior da amostra com a fratura tendo início nesse local. A resistência à flexão utiliza a mesma unidade de tensão. Os resultados do teste de flexão são semelhantes às curvas de tensão-deformação; neste caso, porém, o gráfico inclui a tensão e a deflexão, e não a deformação. A deflexão tem unidade de comprimento.

Pode-se também efetuar esse teste com uma configuração de ensaio conhecida como teste de flexão com quatro pontos. O teste de flexão a quatro pontos é mais adequado para materiais que contêm pequenos defeitos dispersos no seu volume. A tensão de flexão entre os apoios é constante, desta maneira a fratura tende a ocorrer de modo aleatório na região entre os apoios ou terço médio da amostra, a não ser que haja um grande defeito capaz de concentrar tensão. A tensão de flexão máxima em um teste de flexão com quatro pontos é dada pela equação 2.14:

$$\sigma_{\text{flexão}} = \frac{3FL}{4wh^2} \quad (2.14)$$

onde,

F = carga (kN);

L = distância entre os dois pontos de apoio;

w = largura do corpo-de-prova (mm);

h = espessura ou altura do corpo-de-prova (mm).

2.4.2.2. Resistência à flexão de concreto reforçado com fibras de aço

Apesar das equações de resistência à flexão apresentadas acima considerar uma resposta baseada na distribuição de tensão-deformação linear, quando não é mais válida após a primeira formação de fissuras, entretanto são aplicadas para determinação das resistências à flexão no primeiro pico de carga ou limite de proporcionalidade e residuais para efeitos de comparação (ACI 544,4, 2009).

Diversos estudos com métodos de ensaio e projeto para concreto reforçado com fibras, que buscam, por meio de modelos numéricos e experimentais, avaliarem o comportamento pós-fissuração do concreto reforçado com fibras. Entre esses

estudos tem-se o método recomendado pela Norma Japonesa JSCE SF-4 (1984) e pelo *International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials Systems and Structures* (RILEM TC 162-TDF, 2002). A seguir serão abordados:

A Norma JSCE SF-4 (1984) determina a resistência à flexão sob quatro pontos, a partir do carregamento em três terços de corpos-de-prova prismáticos sem entalhe, conforme equações 2.15 e 2.16:

$$\sigma_{\text{flexão}} = \frac{Mc}{I} \quad (2.15)$$

$$M = \frac{FL}{6} \quad (2.16)$$

Substituindo na equação 2.15, o momento fletor e os parâmetros c e I para corpo-de-prova com seção retangular que foram mencionados acima, obtêm-se a equação 2.17:

$$\sigma_b = \frac{PL}{bh^2} \quad (2.17)$$

onde,

σ_b = resistência à flexão (MPa); P = carga máxima no ensaio (N);

L = vão de ensaio (mm);

b = largura do corpo-de-prova (mm);

h = altura do corpo-de-prova (mm).

O RILEM TC 162-TDF (2002) a partir do ensaio de flexão em três pontos com entalhe para indução de fissura determina a resistência à flexão no limite de proporcionalidade, médias equivalentes e residuais de concreto reforçados com fibras de aço. O RILEM TC 162-TDF tem a finalidade de melhor caracterizar o comportamento e precisão nos resultados obtidos no concreto reforçado com fibras de aço.

A maioria das estruturas ao projetada para assegurar que apenas na deformação elástica irá resultar quando da aplicação de uma tensão. Torna-se então desejável conhecer o nível de tensão onde a deformação plástica tem início, ou onde ocorre o fenômeno do **escoamento**. O ponto do escoamento pode ser determinado como sendo o ponto onde ocorre o afastamento inicial da linearidade na curva tensão-deformação; este é algumas vezes chamado de **limite de**

proporcionalidade. A prática usual consiste em se definir a tensão limite de escoamento como sendo a tensão necessária para produzir uma determinada quantidade de deformação (por exemplo, $\epsilon = 0,005$) (CALLISTER, 2012).

Deste modo, O RILEM determina inicialmente a carga e resistência no limite de proporcionalidade, definidas como F_L e $f_{fct,L}$, respectivamente, posteriormente são verificadas as cargas médias equivalentes F_2 e F_3 , e as resistências médias equivalentes $f_{eq,2}$ e $f_{eq,3}$. E as cargas residuais $F_{r,1}$, $F_{r,2}$, $F_{r,3}$ e $F_{r,4}$, respectivamente, correspondem aos deslocamentos δ_1 , δ_2 , δ_3 e δ_4 ou refere-se a medida de abertura da fissura, que corresponde aos $CMOD_1$, $CMOD_2$, $CMOD_3$ e $CMOD_4$. A partir das cargas residuais são obtidas as resistências residuais $f_{r,1}$, $f_{r,2}$, $f_{r,3}$ e $f_{r,4}$. Para dimensionamento de estruturas com concreto reforçado com fibras, utiliza-se a resistência média equivalente ($f_{eq,2}$) ou residual ($f_{r,1}$) em $\delta_1 = 0,46$ mm ou $CMOD_1 = 0,50$ mm para verificação do estado limite de utilização, ou resistência média equivalente ($f_{eq,3}$) ou residual ($f_{r,3}$) em $\delta_3 = 2,15$ mm ou $CMOD_3 = 2,50$ mm em para verificação do estado limite último (SALVADOR, 2013).

A resistência média equivalente ($f_{eq,i}$) aborda somente a capacidade de absorção de energia fornecida pelo reforço da fibra e a resistência residual ($f_{r,i}$) determina a tensão como maior precisão. Deste modo o $f_{eq,i}$ e o $f_{r,i}$ são dois parâmetros que podem ser utilizados para demonstrar o comportamento tensão-deformação do concreto reforçado com fibras (BARROS et al, 2005).

O RILEM a partir da figura 2.10, determina a carga no limite de proporcionalidade, definido como F_L , que corresponde o mais elevado valor da carga registrada até um deslocamento de 0,05 mm. Com a carga obtida no limite de proporcionalidade torna-se possível calcular a resistência no limite de proporcionalidade, conforme apresenta a equação 2.18.

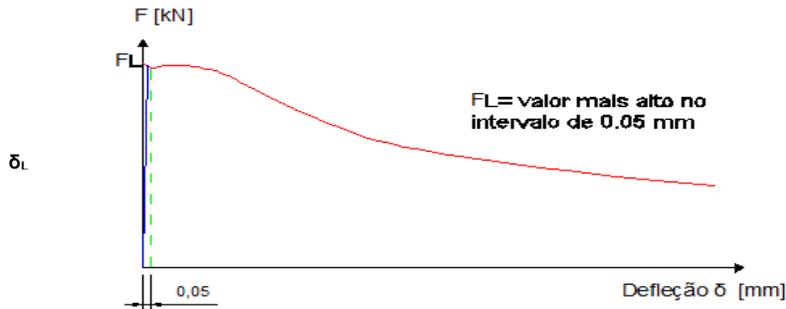


Figura 2.10 – Avaliação da carga no limite de proporcionalidade (adaptado RILEM TC 162, 2003).

$$f_{fct,L} = \frac{3}{2} \cdot \left(\frac{F_L \cdot L}{b \cdot h_{sp}^2} \right) \quad (2.18)$$

onde,

$f_{fct,L}$: resistência no limite de proporcionalidade (N/mm²);

F_L : carga no limite de proporcionalidade (KN);

L : vão de ensaio (mm);

b : largura do corpo-de-prova (mm);

h_{sp}^2 : distância entre a extremidade do entalhe e o topo da seção transversal (mm).

A partir das figuras 2.11 e 2.12 são obtidas áreas sob a curva carga versus deslocamento, tais áreas são definidas como $D_{BZ,2}^f$ e $D_{BZ,3}^f$, que respectivamente correspondem a capacidade de absorção de energia do material até um deslocamento de δ_2 e δ_3 , sendo ($\delta_2 = \delta_L + 0,65$ mm e $\delta_3 = \delta_L + 2,65$ mm, onde δ_L equivale ao deslocamento obtido até a carga no limite de proporcionalidade, determinado de F_L). Os parâmetros $D_{BZ,2}^f$ e $D_{BZ,3}^f$ já considera a influência das fibras de aço, enquanto a parcela definida como D_{BZ}^b considera apenas a energia devido a fratura do concreto simples ou puro, que atinge um deslocamento de $\delta_L + 0,30$ mm. De acordo com as variáveis acima se torna possível calcular as resistências à flexão equivalente $f_{eq,2}$ e $f_{eq,2}$, conforme equações 2.19 e 2.20.

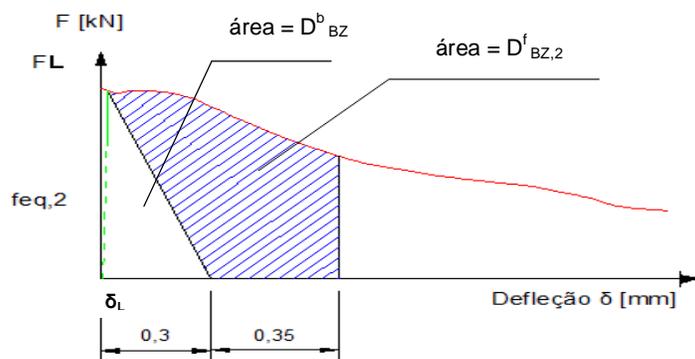


Figura 2.11 – Avaliação da resistência à flexão equivalente $f_{eq,2}$ (adaptado RILEM TC 162, 2003).

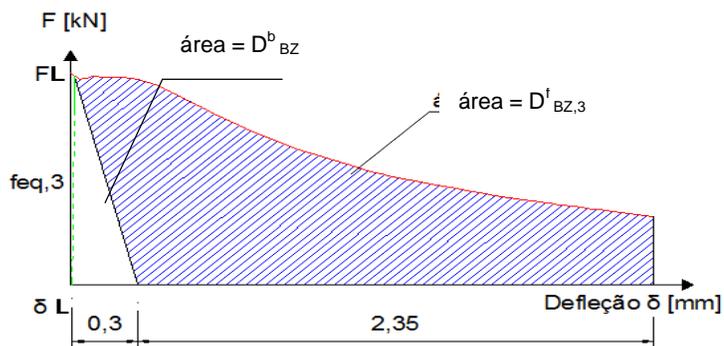


Figura 2.12 – Avaliação da resistência à flexão equivalente $f_{eq,3}$ (adaptado RILEM TC 162, 2003).

$$f_{eq,2} = \frac{3}{2} \cdot \left(\frac{D^f_{BZ,2}}{0,50} \right) \cdot \frac{L}{b \cdot h_{sp}^2} \quad (2.19)$$

$$f_{eq,3} = \frac{3}{2} \cdot \left(\frac{D^f_{BZ,3}}{2,50} \right) \cdot \frac{L}{b \cdot h_{sp}^2} \quad (2.20)$$

onde,

$f_{eq,2}$: resistência equivalente à flexão (N/mm²);

$f_{eq,3}$: resistência equivalente à flexão (N/mm²);

D^b_{BZ} : área de energia absorvida até deslocamento de $\delta_L + 0,30$ mm (N.mm);

$D^f_{BZ,2}$: área de energia absorvida até deslocamento de δ_2 (N.mm);

$D^f_{BZ,3}$: área de energia absorvida até deslocamento de δ_3 (N.mm);

L: vão de ensaio (mm);

b: largura do corpo-de-prova (mm);

h_{sp}^2 : distância entre a extremidade do entalhe e o topo da seção transversal (mm).

A partir da figura 2.13 são obtidas as forças residuais, definidas como $F_{r,1}$, $F_{r,2}$, $F_{r,3}$ e $F_{r,4}$, tanto para deslocamentos verticais no meio do vão de $\bar{\delta}_{r,1} = 0,46$ mm, $\bar{\delta}_{r,2} = 1,31$ mm, $\bar{\delta}_{r,3} = 2,15$ mm e $\bar{\delta}_{r,4} = 3,00$ mm, respectivamente, como para medidas de abertura de fissuras de $CMOD_1 = 0,5$ mm, $CMOD_2 = 1,5$ mm, $CMOD_3 = 2,5$ mm e $CMOD_4 = 3,5$ mm, respectivamente. As resistências residuais, definidas como $f_{r,i}$ são calculadas de acordo com a equação 2.21.

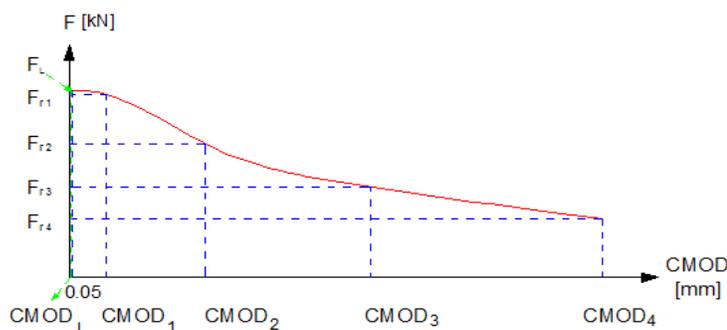


Figura 2.13 – Diagrama força x CMOD (adaptado RILEM TC 162, 2003).

$$f_{r,i} = \frac{3.F_{r,i}.L}{2.b.h_{sp}^2} \quad (2.21)$$

onde,

$f_{r,i}$: resistência residual à flexão (N/mm²);

$F_{r,i}$: força residual à flexão (N);

L: vão de ensaio (mm);

b: largura do corpo-de-prova (mm);

h_{sp}^2 : distância entre a extremidade do entalhe e o topo da seção transversal (mm).

No modelo proposto pelo Comitê RILEM de concreto reforçado com fibras (RILEM TC 162, 2003-TDF) utiliza-se uma viga fletida com seção fissurada, em que a partir do diagrama de distribuição de tensões (figura 2.14), nota-se que a resistência à tração abaixo da linha neutra corresponde ao somatório dos esforços

resistidos na seção pelas fibras, então se houver um aumento de número de fibras na seção de ruptura, será possível suportar maiores carregamentos.

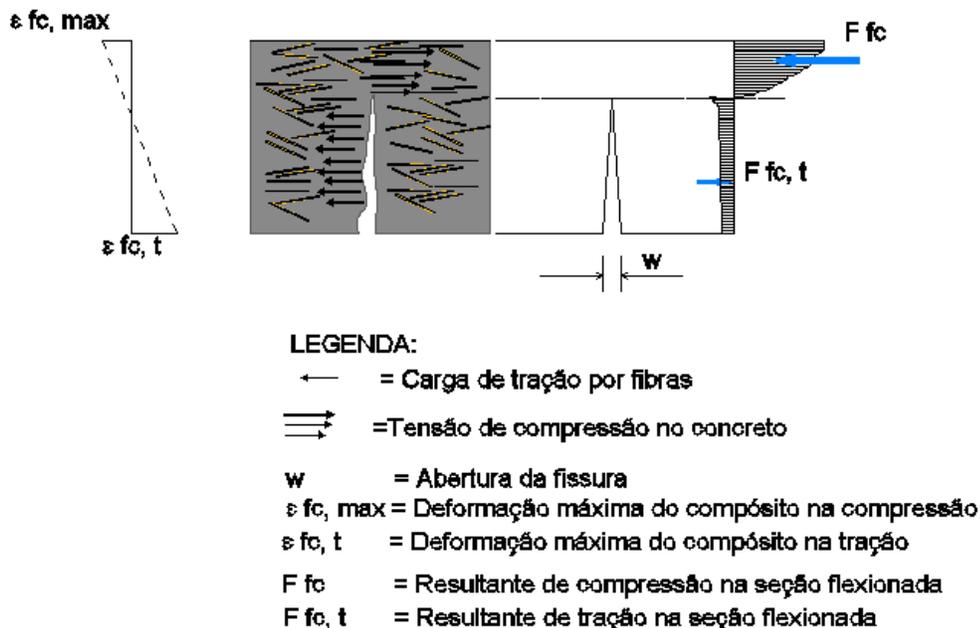


Figura 2.14 – Modelo de distribuição de tensões na seção transversal de um elemento reforçado com fibras durante a flexão (adaptado RILEM TC 162, 2003).

As figuras 2.15 e 2.16 mostram o ensaio padrão recomendado pelo RILEM TC 162, para caracterização do comportamento à flexão de concreto reforçado com fibras de aço. O método estabelece as condições de carga e apoio das amostras, no que se refere ao equipamento e dispositivos de medição, também mostra a superfície de cura, posição do entalhe e dimensões da amostra.

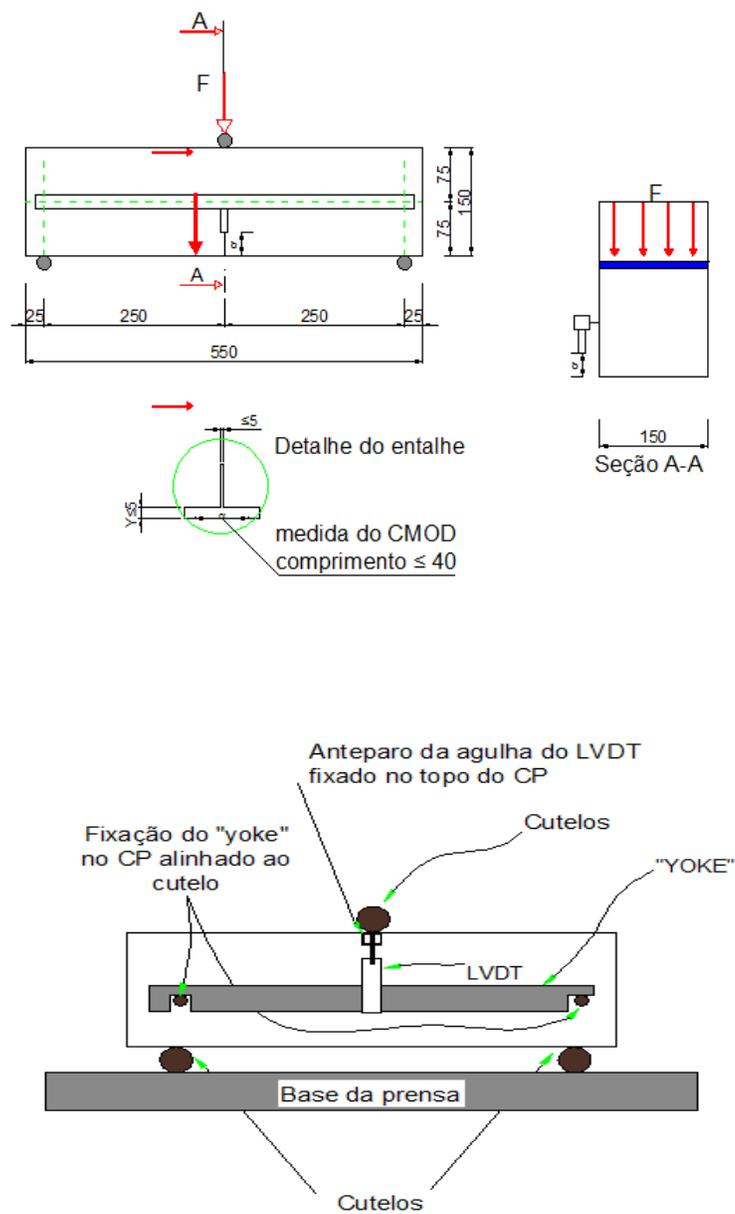


Figura 2.15 – Arranjos do monitoramento das medidas de deslocamento. (adaptado RILEM TC 162, 2003).

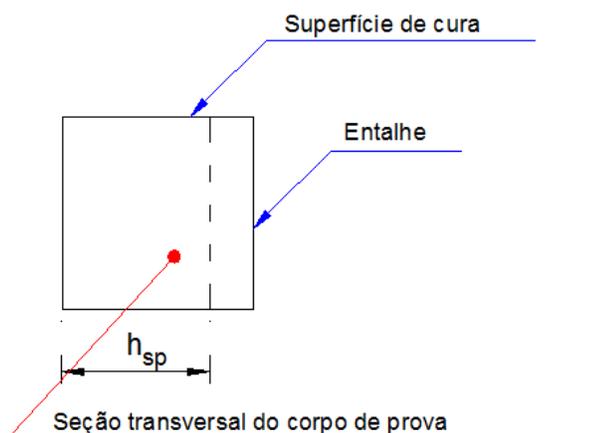


Figura 2.16.– Posição do entalhe serrado na viga de teste (adaptado RILEM TC 162, 2003).

onde,

h_{sp} : profundidade do entalhe.

2.4.3. Trabalhabilidade no concreto com fibras

As fibras possuem maior área superficial, e quando adicionadas ao concreto aumentam a coesão, demandando maior necessidade de água para melhorar a fluidez e trabalhabilidade do concreto no estado fresco (FIGUEIREDO, 2005). A redução da trabalhabilidade ocorre mais intensamente para as fibras com maior comprimento, em função de haver um aumento do atrito interno no compósito, interferindo na mobilidade dos agregados. Sabe-se também que haverá maior interferência na redução de mobilidade da mistura para maior fator de forma das fibras (FIGUEIREDO, 2011).

A avaliação da trabalhabilidade do concreto com fibras pode ser aferida pela ACI 544.1R (ACI, 2002), que recomenda o método de ensaio do cone invertido, em que se mede a trabalhabilidade do concreto com fibras a partir da vibração, compelindo a descer pelo cone invertido. O ensaio de cone invertido não se apresentou apropriado para verificação da trabalhabilidade de concretos reforçados com quaisquer teores de fibra, isto por que: para concretos muito plásticos ocorre à passagem pela extremidade inferior do cone, invalidando o ensaio; e para concretos menos plásticos ocorre entupimento da extremidade inferior, invalidando também o

ensaio. E recomenda também a avaliação da trabalhabilidade de concreto seco pelo o método de ensaio VeBe, considerado mais adequado, que é composto por uma mesa vibratória, um recipiente circular, um tronco de cone e um disco de vidro ou plástico com movimento livre. A realização do ensaio dar-se-á com a colocação do concreto no tronco de cone, dando início na vibração. Ocorre a colocação do concreto com fibras no molde tronco-cônico e cilíndrico, onde é medida a consistência, denominada de índice de Vebe. No entanto embora haja limitações, é viável a utilização do ensaio de abatimento de tronco de cone para determinação da trabalhabilidade. (FIGUEIREDO, 2011).

Ainda com a finalidade de se obter consistência e coesão adequada pode-se vir a utilizar aditivo plastificante redutor de água, visando proporcionar melhor trabalhabilidade da mistura e maior nível de resistência do compósito (MORAES NETO, 2013). Nos concretos secos poderão surgir os ouriços, que são embolamentos formados por aglomerados de fibras (figura 2.17). Com a ocorrência desses ouriços haverá uma redução da homogeneidade de teor de fibra distribuído na mistura (FIGUEIREDO, 2011).



Figura 2.17 – Ouriço formado por fibras de aço mal misturadas ao concreto (FIGUEIREDO, 2000).

Os problemas de ocorrência de ouriço estão proporcionalmente relacionados ao maior fator de forma das fibras. Esse risco da formação de ouriços também está vinculado à adição das fibras na mistura, pois se as fibras forem adicionadas sem cautela na mistura haverá maior possibilidade de formação de ouriços, desta forma a adição de fibras deve ser controlada, a fim de haja uma homogeneização adequada da mistura. As fibras coladas em pente reduzem o risco de formação de ouriços,

pois quando são adicionadas na mistura, ocorre uma dissolução da cola, com isto a homogeneidade da mistura tem maior eficiência (FIGUEIREDO, 2008a).

2.5. TUBOS DE CONCRETO COM FIBRAS DE AÇO

2.5.1. Exigências da Norma Brasileira

A norma NBR 8890 (ABNT, 2007), apresenta as fibras de aço como reforço para tubo de concreto. As fibras para serem utilizadas como reforços no tubo de concreto devem ser de aço trefilado com resistência a tração mínima de 1000 kgf com ancoragem em gancho e fator de forma mínimo de 40, caracterizando uma fibra do tipo AI. Em pesquisas anteriores, entre elas, pode-se citar Chama Neto (2002) e Figueiredo et al. (2006) obtiveram-se melhores resultados de resistência para a fibra do tipo AI, quando aplicadas como reforço nos tubos de concreto.

A NBR 8890 (ABNT, 2007) estabelece que a relação água/cimento, expressa em litros por quilograma, deve ser de 0,50 e 0,45 para tubos destinados as águas pluviais e a esgotos sanitários, respectivamente. A dimensão máxima característica dos agregados deve ser menor valor entre um terço da espessura do tubo e o cobrimento mínimo da armadura.

Os tubos de concreto reforçados com fibras têm o controle realizado diretamente no tubo por meio do ensaio de compressão diametral. O ensaio de compressão diametral determina capacidade resistente e a partir disso ocorre à classificação dos tubos (FIGUEIREDO, 2011).

2.5.2. Influência das fibras de aço no comportamento dos tubos de concreto

2.5.2.1. Haktanir et al. (2007)

No estudo experimental realizado utilizou-se fibra de aço do tipo ZP 308 com comprimento de 30 mm e fator de forma de 40, e DRAMIX RC 80/60 BN com comprimento de 60 mm e fator de forma de 80, em tubos de concreto com diâmetro de 500 mm e espessura de parede 65 mm, que foram avaliados, conforme Norma Turca TS -821 -EN -191. Como conclusão obteve-se que os tubos de concreto com

fibras de aço no teor de 25 kg/m³ obtiveram melhores resultados de resistência e menor propagação da abertura das fissuras, quando submetidos ao ensaio de compressão diametral, pois atingiram uma resistência de 6% maior e de 15% menor da abertura das fissuras em comparação ao obtido pelos tubos de concreto armado.

Comparando a espessura da parede, a resistência do concreto e o reforço das fibras; tem-se que os resultados obtidos pelos tubos de concreto com fibras atendem os requisitos que ficam entre as classes III e IV, conforme ASTM C76.

2.5.2.1. Fugii (2008)

No estudo experimental foram realizados ensaios nos tubos de concreto com teores de fibra 10kg/m³, 15 kg/m³, 20 kg/m³, 25 kg/m³ e 30 kg/m³, obtendo resultados satisfatórios com teores acima de 20 kg/m³ para comercialização do tubo, visto que houve o atendimento das exigências da norma quanto a 100% dos tubos ensaiados a completarem plano de carregamento.

2.5.2.3. Figueiredo et. al. (2010)

O estudo experimental ocorreu segundo NBR 8890 (ABNT, 2007), adotando o ensaio com carregamento contínuo previsto somente para o controle dos tubos armados convencionais. Através do ensaio de compressão diametral houve uma avaliação comparativa entre tubos de concreto com armadura convencional e com fibras de aço. Os tubos tinham diâmetro de 600 mm, espessura da parede com 72 mm e comprimento útil de 2500 mm. Os tubos de concreto com armadura convencional possuíam tela metálica com fios de aço CA 60 de 6 mm de diâmetro espaçados a cada 85 mm longitudinalmente ao tubo e uma armadura longitudinal de suporte com 6 fios de 6 mm CA 60. Os tubos de concreto com fibras de aço utilizaram fibras do tipo AI, com comprimento de 60 mm e fator de forma de 80. Os teores de fibras foram de 0,12%, 0,25% e 0,50%, em fração volumétrica.

Verificou-se que a determinação da resistência à compressão diametral dos tubos de concreto com fibras a partir do ensaio de carregamento contínuo pode ser utilizado como instrumento confiável, desde que haja um controle de monitoramento de deformações diametraes. Para os estágios iniciais de fissuração, houve um

comportamento dos tubos de concreto com fibra superior ao apresentado pelos tubos de concreto com armadura convencional, entretanto para maiores níveis de deslocamento e fissuração houve melhor desempenho dos tubos de concreto armado.

2.5.2.4. De La Fuente et al. (2011)

No estudo experimental e numérico, segundo os procedimentos da Norma Europeia UNE – EN 1916:2002, foram avaliados tubos de concreto no diâmetro de 600 mm, espessura de parede de 72 mm e comprimento útil de 2500 mm, com fibras de aço do tipo DRAMIXA® RC-80/60-BN, ou seja, com comprimento de 60 mm e fator de forma de 80, e nos teores de 0,12%, 0,25% e 0,50%, em fração volumétrica.

Obteve-se como conclusão que a fabricação dos tubos de concreto com fibras de aço é nos sistemas de produção tradicionais, talvez com algumas mudanças no local, se necessário na relação água/cimento. O tempo de produção dos tubos com fibras tem considerável redução em relação aos tubos de concreto armado. O ensaio de carregamento contínuo com deslocamento controlado por meio de LVDT pode substituir os ensaios de carregamentos cíclicos, sem influenciar nos resultados de capacidade de resistência deste tipo de tubos. A carga de fissura independe do teor de fibras e do método de medição. A primeira rachadura apareceu, em todos os casos, na face interna da coroa dos tubos. Os tubos de concreto com fibras no teor de 0,50% apresentaram endurecimento da curva carga-deslocamento, após ruptura total dos tubos na coroa, base e flancos.

A partir disso concluiu-se que, as fibras de aço podem trabalhar de maneira semelhante às barras tradicionais utilizadas no tubo de concreto armado, entretanto as fibras apresentam um melhor desempenho no estado de utilização ou serviço, pois dificultam com a propagação das fissuras com maior intensidade. O grau de correlação entre os resultados experimentais e a simulação numérica pela modelagem do *Model for the Analysis of Pipes* – MAP foi considerado satisfatório, visto que os resultados do modelo apresentaram uma média relativa de erro de 7,0%. Deste modo, o modelo de MAP pode ser usado como um método de projeto para tubos de concreto com fibras de aço de diâmetros entre 600 mm e 1000 mm, de espessuras e classes de resistência distinta.

2.5.2.5. De La Fuente et al. (2012)

No estudo experimental e numérico, onde é apresentado o comportamento mecânico com simulação numérica e os resultados experimentais obtidos de tubos de concreto com fibras de aço nos diâmetros de 600, espessura de parede de 72 mm e nos teores de 0,12% (10 kg/m³), 0,25% (20 kg/m³) e 0,50% (40 kg/m³), diâmetro de 800 mm, espessura de 92 mm e nos teores 0,12% (10 kg/m³), 0,25% (20 kg/m³), 0,32% (25 kg/m³), 0,38% (30 kg/m³), 0,45% (35 kg/m³) e 0,50% (40 kg/m³) e diâmetro de 1000 mm, espessura de parede de 90 mm e nos teores de 0% (0 kg/m³), 0,25% (20 kg/m³), 0,32% (25 kg/m³) e 0,45% (35 kg/m³), respectivamente, com os teores em fração volumétrica e massa, que foram avaliados conforme a Norma Européia UNE-EN 1916-2002. As fibras são de aço são do tipo DRAMIX® RC 80/60 BN.

O estudo conclui que o *Model for the Analysis of Pipes* – MAP é um instrumento adequado para análise da concepção dos tubos. Para os tubos de concreto com fibras de aço especificado como diâmetro/espessura de 600/72 mm é necessário um teor de fibra de 31 kg/m³ de fibras para atingir a carga de ruptura da classe C60, enquanto que para a carga de ruptura da classe C90 é necessário um teor de fibras acima de 60 kg/m³. Para os tubos com fibras de aço 800/92 mm atingem a carga máxima pós-fissuração na classe C60 com teor de fibras de 11 kg / m³, e para a classe C90 com 22 kg/m³ para carga máxima pós-fissuração. Para um tubo de concreto com fibras de aço de 1000/90 mm são necessários para atingir a carga de ruptura os teores de 38 kg/m³ e acima de 60 kg/m³ para as classes de C60 e C90, respectivamente.

2.5.2.6. Abolmaali et. al. (2012)

Na pesquisa experimental foram avaliados o desempenho mecânico de tubos de concreto com fibras de aço com diâmetros de 400 mm a 1200 mm, de acordo com a norma ASTM C497. Foram utilizadas fibras de aço do tipo DRAMIX® RC 65/35 CN vom teores de fibras entre 0,17 % e 0,83%, em fração volumétrica. Os tubos de concreto com fibras de aço atendeu a norma quanto resistência à ruptura e residual pós-fissuração. Os melhores resultados foram obtidos para os tubos de

concreto com fibras nos diâmetros de 600 mm, 900 mm e 1200 mm, respectivamente com teores de fibras de 0,25 %, 0,50 % e 0,83%, em fração volumétrica, sendo nessas condições atendido os requisitos da Classe III, de acordo com ASTM C76. Cabe ressaltar que a produção dos tubos ocorreu com diferentes dosagens de concreto e plantas da fábrica.

2.5.2.7. Escariz (2012)

No estudo experimental foram avaliados o comportamento mecânico de tubos de concreto com fibras de aço com diâmetro 1000 mm, espessura da parede de 80 mm e comprimento de 1500 mm, de acordo com a NBR 8890 (ABNT, 2007). Foram utilizadas fibras de aço soltas do tipo 67/50 nos teores de 0,25% (20 kg/m³), 0,32% (25 kg/m³) e 0,45% (35 kg/m³), fibras coladas em pente do tipo 65/35 e 80/60 nos teores de 0,25% (20 kg/m³), 0,32% (25 kg/m³), 0,45% (35 kg/m³) e 0,57% (45 kg/m³), respectivamente, em volume e em massa. Os resultados do estudo apresentaram que das três amostras de tubos, dois tubos com fibras soltas do tipo 67/50 no teor de 35 kg/m³ atingiram a mínima carga de ruptura e máxima pós-fissuração. Apenas uma amostra de tubo com fibras coladas em pente do tipo 65/35 no teor de 20 kg/m³ atingiu a mínima carga de ruptura e máxima pós-fissuração, enquanto nos teores de 25 kg/m³, 35 kg/m³ e 45 kg/m³, todos atingiram a mínima carga de ruptura e máxima pós-fissuração. Nos tubos de concreto com fibras coladas em pente do tipo 80/60 no teor de 25 kg/m³, dois tubos alcançaram a mínima carga de ruptura e máxima pós-fissuração, nos teores de 35 kg/m³ e 45 kg/m³, todos alcançaram a mínima carga de ruptura e máxima pós-fissuração.

2.5.2.8. A Mohsen (2014)

No estudo experimental houve a avaliação de tubos de concreto com fibras nos diâmetros entre 450 mm e 900 mm, segundo a ASTM C497, visando atingir os requisitos da classe III da ASTM C76. Foram utilizadas fibras do tipo DRAMIX® RC 65/35 CN, fibras com comprimento de 35 mm e fator de 65 nos teores entre 0,04% e 0,67%. Concluiu-se que: os tubos de concreto com fibras de aço apresentou desempenho mecânico e ductilidade favoráveis, sendo uma alternativa viável para

tubos de concreto com armadura convencional; as fibras de aço agem no controle da propagação das fissuras; tubos de concreto com fibras no diâmetro de 450 mm com teores baixos, como igual a 0,08%, em fação volumétrica, atendeu aos requisitos de carga de ruptura da classe III da ASTM C76, no entanto é recomendado adicionar um teor maior de fibras para proporcionar melhor resistência residual pós-fissuração; tubos de concreto com fibras nos teores abaixo de 0,17% não é recomendável, pois obtiveram resultados satisfatórios de carga de ruptura e carga residual pós-fissuração; teores de fibras entre 0,33% e 0,50% foram tidas como ideais para tubos de concreto com fibras de diâmetro até 900 mm; teores de fibras de 0,67% não é recomendável, tendo em vista a viabilidade econômica;

2.5.2.9. Mohamed et. al. (2014)

No estudo experimental houve a avaliação comparativa entre os tubos de concreto com fibras e tubos de concreto armado convencionalmente, ambos com diâmetros de 300 mm, espessura de parede de 69 mm e comprimento de 2450 mm, submetidos ao ensaio de carregamento contínuo, segundo a ASTM C497, visando atender os requisitos da classe V da ASTM C76. As fibras utilizadas foram do tipo DRAMIX® RC 65/35 CN, fibras com comprimento de 35 mm e fator de 65, e DRAMIX® RC 80/60 CN, fibras com comprimento de 60 mm e fator de 80, ambas nos teores de 0,25% (20 kg/m³), 0,50% (40 kg/m³) e 0,75% (60 kg/m³).

Dentre as conclusões desse estudo, houve proximidade dos resultados obtidos pelos corpos-de-prova e tubos de concreto com fibras; com o aumento do teor de fibras houve um melhor desempenho do concreto com fibras, deste modo tubos de concreto com fibras tiveram maiores cargas de ruptura e pós-fissuração com aumento do teor de fibras; o concreto com fibras no teor de 0,25% apresentou desempenho insuficiente para proporcionar contribuição nas propriedades mecânicas do concreto reforçado com fibras de aço; as fibras do tipo 80/60 obteve melhor comportamento em relação as fibras do tipo 65/35; e os tubos de concreto com fibras de aço podem substituir os tubos de concreto armado convencionalmente, nas condições desse estudo, que dependem das cargas a ser atingidas pelo tubo, diâmetro do tubo, tipos e teores de fibras adotados.

2.5.2.10. Mohamed et. al. (2015)

No estudo experimental e numérico houve a avaliação comparativa entre os tubos de concreto com fibras e tubos de concreto armado convencionalmente, ambos com diâmetros de 450 mm e 600 mm, espessura de parede de 69 mm e comprimento de 2450 mm, submetidos ao ensaio de carregamento contínuo e cíclico, segundo a ASTM C497 e EN 1916-2002, respectivamente, visando atender os requisitos da classe V da ASTM C76. As fibras utilizadas foram do tipo DRAMIX® RC 65/35 CN, fibras com comprimento de 35 mm e fator de 65, e DRAMIX® RC 80/60 CN, fibras com comprimento de 60 mm e fator de 80, ambas nos teores de 0,25% (20 kg/m³), 0,38% (30 kg/m³) e 0,50% (40 kg/m³).

Dentre as conclusões desse estudo, obteve-se que: os tubos de concreto com fibras de aço obtiveram um comportamento pós-pico de carga igual ou superior ao obtido pelos tubos de concreto armado para baixas deformações, deste modo é viável a substituição dos tubos de concreto armados por tubos de concreto com fibras; no teor de fibras com 0,38% (30 kg/m³), em fração em volumétrica ou em massa, é possível satisfazer os requisitos de resistência da classe V da ASTM C76 para tubos de concreto com fibras nos diâmetros de 450 mm e 600 mm; os tubos de concreto com fibras podem ser avaliados pelo ensaio de carregamento contínuo, onde não há descarregamento e recarregamento, portanto sem necessidade do carregamento cíclico, onde ocorre descarregamento e recarregamento; e a partir da formulação da Norma ASTM C1765-13 (2013) ficou estabelecido que os tubos de concreto com fibras de aço terão que obedecer aos requisitos de resistência dos tubos de concreto armado convencionalmente estabelecidos na Norma ASTM C76.

De modo semelhante a Norma EN 1916 (2002), os tubos de concreto com fibras serão avaliados pelo ensaio de carregamento cíclico, entretanto não será necessário manter a carga constante por 1 minuto no primeiro e segundo carregamento do ciclo.

2.5.3. Trabalhabilidade no tubo de concreto com fibras

O tubo é produzido com concreto seco, portanto poderão surgir ouriços (figura 2.20), quando o ouriço ocorre no tubo haverá uma falha determinante que causará

menor estanqueidade e capacidade resistente. Para os tubos de concreto, por apresentar consistência seca, recomenda-se a utilização de fibras coladas em pente (FIGUEIREDO, 2008b).



Figura 2.20 – Ouriço na bolsa do tubo com fibras soltas do tipo 80/60 com teor de 0,50%.

Para os tubos fabricados em equipamentos de compactação radial, que possuem menor energia, poderá ocorrer com maior frequência o aparecimento de fibras na superfície lateral do tubo, isto porque nesse tipo de equipamento de compactação não há a vibração da parede da forma, e desta maneira fica deficiente a mistura das fibras. Para solução do problema deve adequar-se a dosagem do concreto, visando garantir maior interação fibra-matriz. Portanto, havendo uma dosagem e energia de compactação apropriada, torna-se possível ter bons resultados de acabamento superficial para tubo. A adição das fibras ocasionará um aumento da coesão e número de vazios que influenciará no acabamento do tubo, sendo mais frequentes no sistema de compactação radial (FIGUEIREDO, 2011).

Se não houver um cuidado com a adequação de dosagem do concreto com fibras poderá ocorrer, com o aumento da coesão, uma necessidade de maior gasto de energia para compactação no processo de moldagem do tubo. Como supra dito, caso não haja um nível mínimo de energia de compactação haverá menor estanqueidade e capacidade resistente. Para tentar solucionar este problema a metodologia de dosagem adotada remete ao procedimento de tentativas e erros por não dispor de adequado modelo reológico que possam parametrizar esta tecnologia. Com o foco de sempre buscar a redução de perdas no processo de fabricação deve-se evitar a interrupção do equipamento ou fissuração do tubo na desforma (FIGUEIREDO, 2011).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. MATERIAIS

Para a realização do procedimento experimental foram empregados materiais disponíveis na Região Metropolitana de Belém, no Estado do Pará. Os tubos de concreto simples, armado, reforçados com fibra de aço e os corpos-de-prova cilíndricos e prismáticos foram produzidos com os materiais fornecidos pela empresa parceira da pesquisa.

3.1.1. Caracterização dos materiais

3.1.1.1 Cimento

No procedimento experimental foi utilizado o cimento Portland composto resistente a sulfatos do tipo (CP II-Z-32 RS) provenientes do fabricante situado no Município de Itaituba, no Estado do Pará. Suas características químicas e físico-mecânicas de acordo com fabricante estão apresentadas de acordo com o Anexo A.

3.1.1.2. Agregados

Os agregados miúdos têm procedência de jazida localizada na BR 316, Km 21, e o agregado graúdo proveniente do fornecedor Santo Antônio, no Município de Ourém, no Estado do Pará.

Para os agregados miúdos e graúdos houve a determinação da composição granulométrica, em conformidade com a NBR NM 248 (ABNT, 2003), da massa específica, para o agregado miúdo, segundo a NBR NM 52 (ABNT, 2009), e para o agregado graúdo, conforme a NBR NM 53 (ABNT, 2009), e da massa unitária para o agregado miúdo e graúdo, em consonância com NBR NM 45 (ABNT, 2006). Ainda houve o ensaio de determinação do inchamento para agregado miúdo, conforme NBR 6467 (ABNT, 2009), e dos ensaios para agregado graúdo de abrasão “Los Angeles” e da determinação da resistência ao esmagamento, conforme NBR NM 51

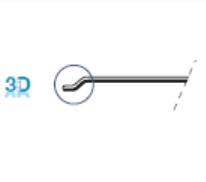
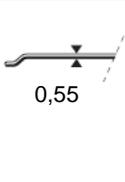
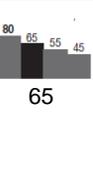
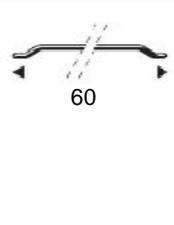
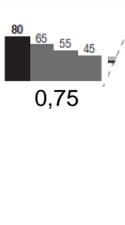
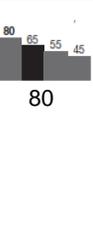
ABNT, 2001) e NBR 9938 (ABNT, 2013), respectivamente. Os resultados estão apresentados nos Anexos B e C.

3.1.1.3. Fibras de aço

A escolha da utilização dos tipos de fibras ocorreu em função de estudos realizados anteriormente, como por exemplo, De La Fuente et. al. (2012) e N. Mohamed et. al. (2015). Inicialmente nos tubos de concreto e corpos-de-prova utilizou-se as fibras de aço no estado coladas em pente DRAMIX® 3D do tipo curta 65/35 e do tipo longa 80/60, que estão em conformidades com a norma brasileira NBR 15530, norma americana ASTM A820 e norma europeia EN 14889-1 – CE 0749 CPD, suas características físico-mecânicas estão apresentadas na tabela 4.4, de acordo com a ficha técnica do catálogo do fabricante Belgo Bekaert Arames S.A – Arcelor Mittal.

Posteriormente optou-se por utilizar tubos de concreto e corpos-de-prova com fibras de aço no estado soltas, correspondente as fibras coladas em pente descoladas manualmente, pois se observou que para o concreto com fibras coladas não se estava obtendo resultados satisfatórios de comportamento mecânico. Tal comportamento pode ser explicado, tendo em vista que no processamento da mistura do concreto com fibras coladas, observou-se que a mistura, após ser processada na betoneira, apresentava-se muitas fibras coladas, talvez pelo fato da areia fina requerer mais água por ter maior área específica, já que seu módulo de finura é 2,03, conforme Anexo B, e ser classificada como fina, por ter módulo de finura menor que 2,40, segundo a NBR 7211 (2009). Ainda ao fato de não haver uma eficiente descolagem das fibras, verificou-se que não havia uma distribuição homogênea nos componentes, visto que ao ser rompidos, visualizavam-se fibras coladas concentradas em regiões no plano de fratura. O equipamento disponível e utilizado para a moldagem e produção dos tubos de concreto com fibras coladas proporcionava baixa capacidade de compactação e adensamento, pois se observou segregação na bolsa do tubo, apesar do seixo rolado de rio utilizado favorecer a plasticidade por apresentar grãos arredondados e textura superficial lisa. Ao final constatou-se que os tubos de concreto

Tabela 3.1 – Caracterização das fibras de aço.

Fibras	Família	Comprimento (mm)	Diâmetro (mm)	Fator de forma (l/d)	Resistência à tração (N/mm ²)
Soltas e coladas em pente curtas - DRAMIX® 3D 65/35		 35	 0,55	 65	1.345
Soltas e coladas em pente longas - DRAMIX® 3D 80/60		 60	 0,75	 80	1.225

Neste capítulo será apresentado o programa experimental utilizado para avaliar de forma comparativa o aspecto técnico dos tubos de concreto com a utilização da fibra de aço em substituição à armadura convencional destinado para águas pluviais do tipo ponta e bolsa, providos de junta rígida. Tem como finalidade avaliar o potencial da tecnologia alternativa, no caso a fibra de aço, visto que possui propriedades diferenciadas que melhoram o desempenho do concreto na pós-fissuração da matriz.

3.2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental tem a discriminação da avaliação dos tubos e corpos-de-prova moldados, conforme mostra figura 3.1

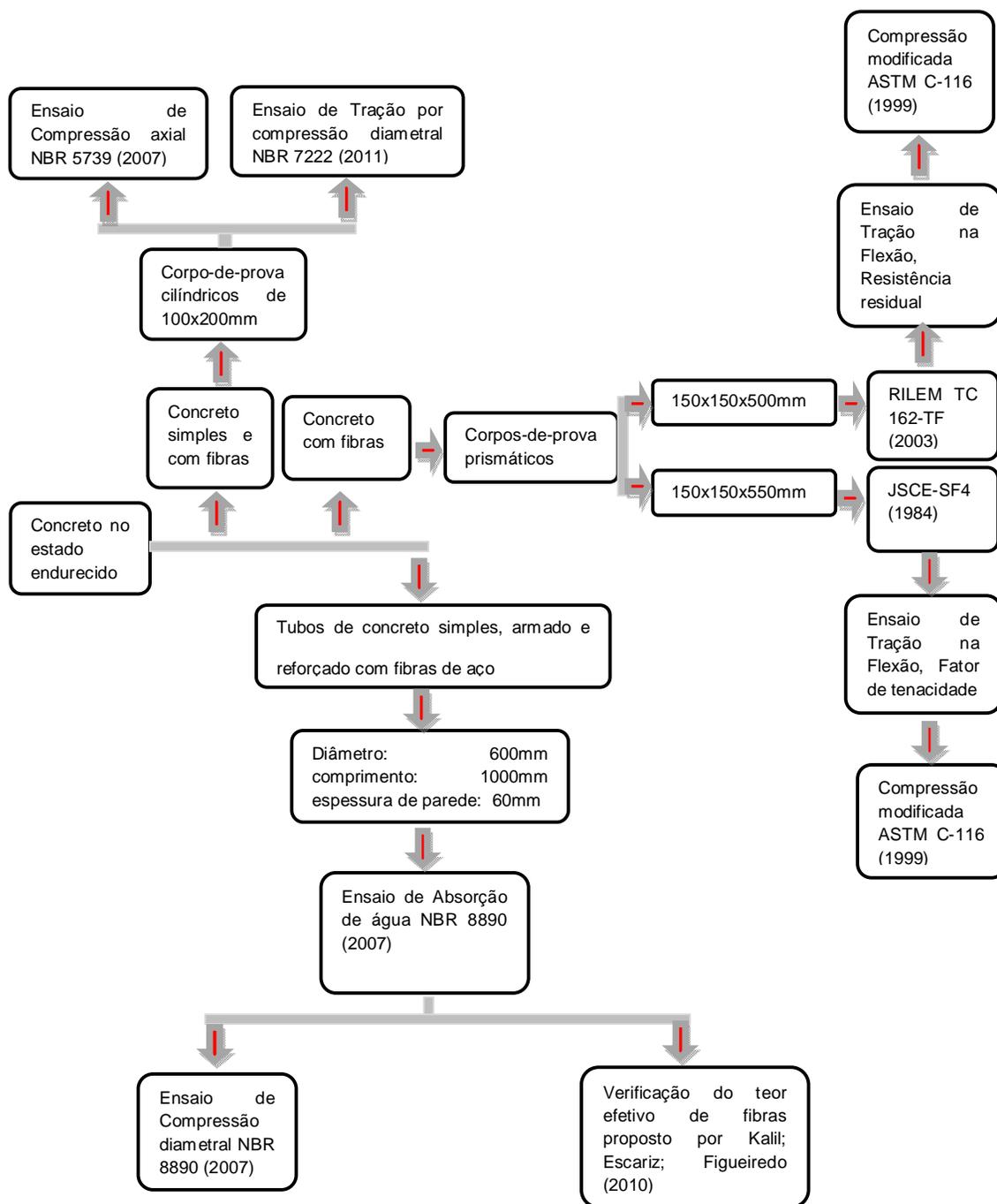


Figura 3.1 – Discriminação da avaliação dos tubos e corpos-de-prova

3.2.1. Processo de produção dos tubos de concreto com fibras de aço

A figura 3.2 mostra um fluxograma com as etapas do processo de produção dos tubos de concreto com fibras de aço.

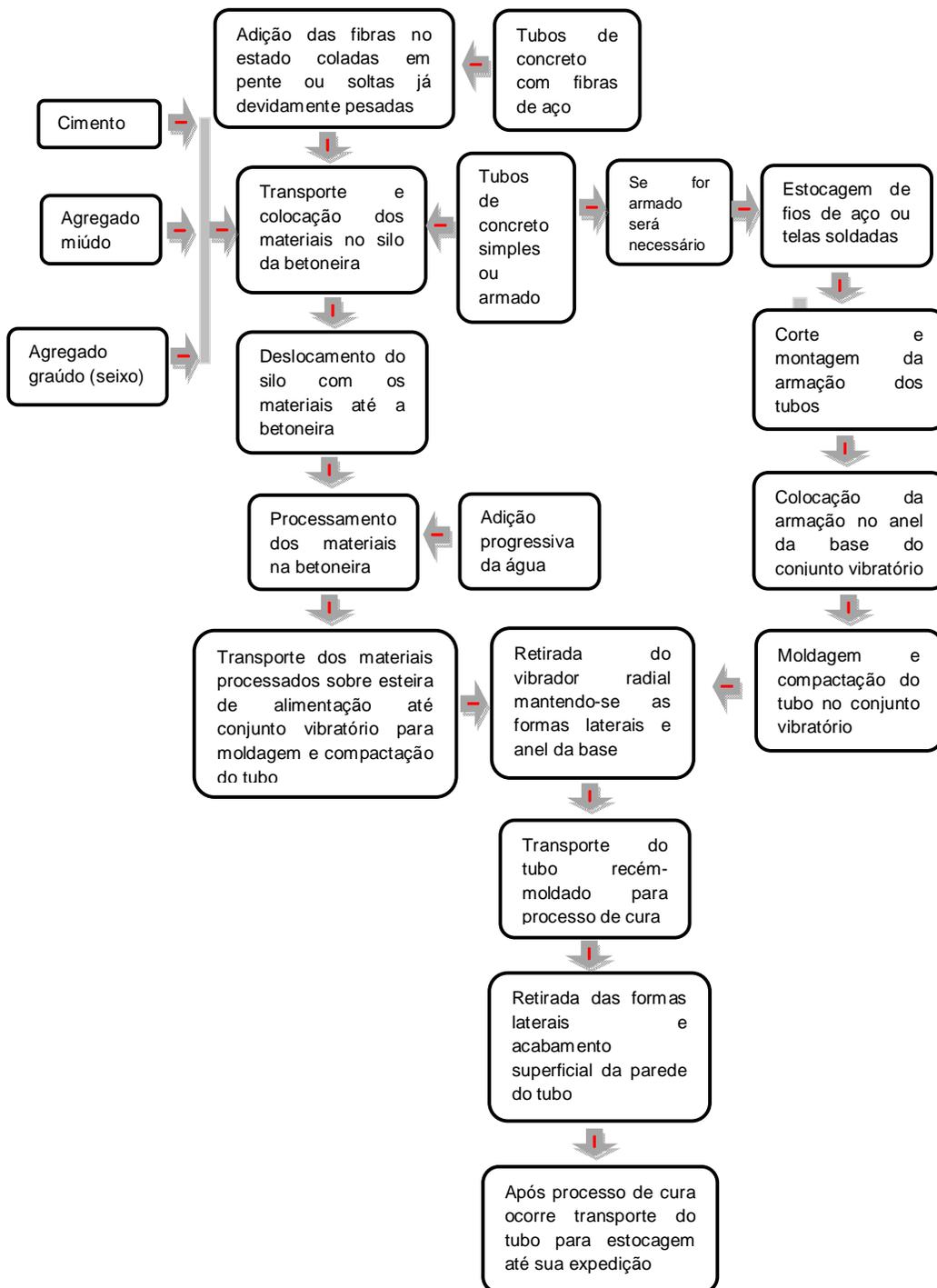


Figura 3.2 – Descrição das etapas do processo de produção do tubo de concreto armado e com fibras de aço.

3.3. PLANEJAMENTO DE ENSAIOS

3.3.1. Variáveis de resposta

Com intuito de alcançar os objetivos traçados na pesquisa, foram estabelecidas variáveis de resposta a seguir:

3.3.1.1. No estado fresco:

Para a produção de todos os tubos de concreto e corpos-de-prova cilíndricos e prismáticos:

- Ensaio de abatimento de tronco de cone – slump test, conforme a NBR NM 67 (ABNT, 1998). O ensaio recomendado seria o de Ve-Be por ser tratar de concreto seco, mas não foi possível a realização por não se dispor do mesmo.

3.3.1.2. No estado endurecido:

Para os tubos de concreto simples, armado e com fibras:

- Ensaio de compressão diametral, conforme a NBR 8890 (ABNT, 2007);
- Ensaio de absorção de água de acordo com a NBR 8890 (ABNT, 2007);
- Verificação do teor real de fibras, de acordo com método proposto por Kalil; Escariz; Figueiredo (2010).

Para os corpos-de-prova cilíndricos de concreto simples e com fibras:

- Ensaio de compressão axial, conforme NBR 5739 (ABNT, 2007);
- Ensaio de tração por compressão diametral, conforme a NBR 7222 (ABNT, 2011).

Para os corpos-de-prova prismáticos com fibras, optou-se por não moldar de concreto simples, pois se observou nas amostras pilotos que ao atingir a ruptura da

matriz havia uma quebra abrupta, partindo-os em dois pedaços, visto que por não possuir adição de fibras não apresentava comportamento pós-ruptura da matriz.

- Ensaio de flexão para determinação do fator de tenacidade, conforme norma japonesa JSCE SF-4 (1984) - *Method of test for flexural strength and flexural toughness of steel fiber reinforced concrete*;
- Ensaio de flexão para determinação das resistências residuais pós-fissuração, conforme a RILEM *Technical Committees - RILEM TC 162-TDF (2003) - Test and design methods for steel fibre reinforced concrete*;
- Ensaio de compressão modificada, de acordo com a ASTM C-116 (1999).

3.3.2. Variáveis de Controle

Com a finalidade de ter variáveis de resposta com maior precisão foram adotadas variáveis de controle, que são descritas a seguir:

- Geometria do tubo: o estudo foi desenvolvido com tubo de concreto nas dimensões, conforme figura 3.3, tendo em vista limitações financeiras, sendo os materiais utilizados fornecidos pela empresa parceira.

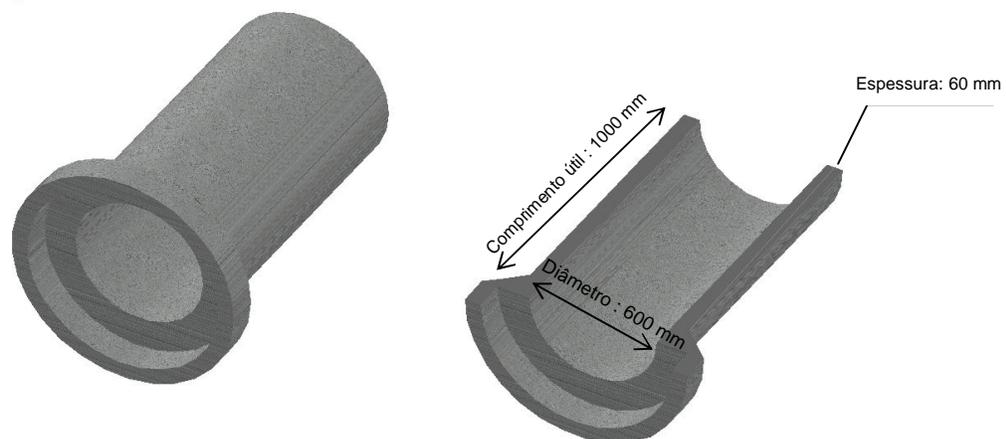


Figura 3.3 – Tubo de concreto simples, armado ou com fibras de aço

- Consumo de cimento: manteve-se constante o consumo de cimento de 395 kg/m³ em todas as dosagens. Esta dosagem foi a que rotineiramente era

empregada pela empresa para produção dos tubos de concreto simples e armado.

- Relação água/cimento: manteve-se constante a relação água/cimento de 0,32 em todas as dosagens. Esta dosagem foi a que rotineiramente era empregada pela empresa para a produção dos tubos de concreto simples e armado.
- Tipo de fibra: foram adotadas fibras de aço do tipo 80/60 e 65/35 no estado soltas e coladas em pente.

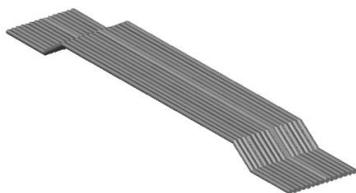


Figura 3.4 - Fibras coladas em pente.

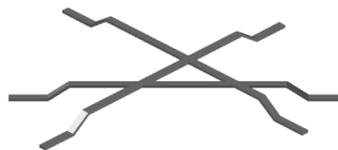


Figura 3.5 – Fibras soltas.

- Teores de fibra: foram adotados os teores de fibra de 20 kg/m³ (0,25%), 30 kg/m³ (0,38%) e 40kg/m³ (0,50%), em massa e em fração volumétrica, respectivamente, em função de estudos realizados anteriormente que indicaram resultados satisfatórios de comportamento do concreto com fibras nessa faixa de teor, por exemplo, Figueiredo et. al. (2010, 2012), De La Fuente et al. (2011, 2012), Abolmaali (2012), Escariz (2012) e Mohamed (2014, 2015).
- Tempo de cura: todos os tubos de concreto e corpos-de-prova moldados permaneceram em processo de cura por período de 28 dias.
- Abatimento de tronco de cone – slump test: todos os tubos e corpos-de-prova produzidos com abatimento de tronco de cone entre 0 e 10 mm.
- Aditivos: em todos os tubos e corpos-de-prova produzidos não foi utilizado nenhum tipo de aditivo na dosagem do concreto.

3.4. DOSAGEM DOS EXEMPLARES

Utilizou-se a mesma dosagem (traço), que é utilizada pela empresa parceira nas quatorze séries referente a todos os tubos de concreto e corpos-de-prova cilíndricos e prismáticos produzidos. Cabe salientar que apesar do concreto ter consistência no estado seco não foi utilizado na confecção dos tubos e corpos-de-prova nenhum tipo de aditivo. A dosagem da fibra de aço, colocadas em substituição, foi obtida de acordo com a regra da mistura em compósitos reforçados com fibras (ASKELAND; J. WRIGHT, 2014). As dosagens do concreto e fibras estão apresentadas nas tabelas 3.2 e 3.3.

Tabela 3.2 – Dosagem utilizada no procedimento experimental

Tipo de Fibra	Teor de Fibras	
	Em massa (kg/m ³)	Em fração volumétrica (%)
CRF - 65/35 - FCP	20	0,25
	30	0,38
	40	0,50
CRF - 65/35 - FS	20	0,25
	30	0,38
	40	0,50
CRF - 80/60 - FCP	20	0,25
	30	0,38
	40	0,50
CRF - 80/60 - FS	20	0,25
	30	0,38
	40	0,50

Tabela 3.3 – Teor de fibras em massa e fração volumétrica

Traço unitário em massa (cimento: areia: seixo)	Relação água/cimento	Consumo de cimento (kg/m ³)	Teor de argamassa (%)
1 : 2,30 : 2,46	0,32	395	57,3

Legenda:

CRF – 65/35 – FCP – Concreto reforçado com fibras de aço do tipo colada em pente, fator de forma de 65 e comprimento de 35 mm.

CRF – 65/35 – FS – Concreto reforçado com fibras de aço do tipo solta, fator de forma de 65 e comprimento de 35 mm.

CRF – 80/60 – FCP – Concreto reforçado com fibras de aço do tipo colada em pente, fator de forma de 80 e comprimento de 60 mm.

CRF – 80/60 – FS – Concreto reforçado com fibras de aço do tipo solta, fator de forma de 80 e comprimento de 60 mm.

3.5. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A tabela 3.4 mostra quantidade de tubos de concreto e corpos-de-prova moldados no procedimento experimental. Salientando que houve retirada de duas faixas de cada tubo de concreto, tendo para cada faixa a extração de três corpos-de-prova, sendo um da ponta, um do meio e outro da bolsa do tubo.

Tabela 3.4– Quantidade de tubos de concreto e corpos-de-prova produzidos para cada série.

Série	Tubos	CP's* extraídos dos tubos		CP's* prismáticos				CP's* cilíndricos	
		Absorção de água	Teor efetivo de fibras	Tenacidade e Fator de Tenacidade	Resistência Residual	Compressão Modificada		Compressão axial	Tração por compressão diametral
						CP's oriundos do ensaio de flexão pela JSCE	CP's oriundos do ensaio de flexão pelo RILEM		
CS	2	12	-	3	3	3	3	3	3
CA	2	12	-	-	-	-	-	-	-
CRF - 65/35 - 0,25% - FCP	1	6	6	3	3	3	3	3	3
CRF - 65/35 - 0,38% - FCP	1	6	6	3	3	3	3	3	3
CRF - 65/35 - 0,50% - FCP	1	6	6	3	3	3	3	3	3
CRF - 80/60 - 0,25% - FCP	1	6	6	3	3	3	3	3	3
CRF - 80/60 - 0,38% - FCP	1	6	6	3	3	3	3	3	3
CRF - 80/60 - 0,50% - FCP	1	6	6	3	3	3	3	3	3
CRF - 65/35 - 0,25% - FS	1	6	6	3	3	3	3	3	3
CRF - 65/35 - 0,38% - FS	1	6	6	3	3	3	3	3	3
CRF - 65/35 - 0,50% - FCP	1	6	6	3	3	3	3	3	3
CRF - 80/60 - 0,25% - FS	1	6	6	3	3	3	3	3	3

CRF - 80/60 - 0,38% - FS	1	6	6	3	3	3	3	3	3
CRF - 80/60 - 0,50% - FS	1	6	6	3	3	3	3	3	3
Método de Ensaio	NBR 8890 (ABNT, 2007)	NBR 8890 (ABNT, 2007)	Método proposto por Kalil; Escariz; Figueiredo (2010)	JSCE SF-4 (1984)	RILEM TC 162-TDF (2003)	ASTM C-116 (1999)		NBR 5739 (ABNT, 2007)	NBR 7222 (ABNT, 2011)
Total	16	96	72	39	39	39	39	39	39

Legenda:

CP's = corpos-de-prova;

CS= concreto simples (concreto de referência);

CA= concreto armado.

CRF – 65/35 – FCP – Concreto reforçado com fibras de aço do tipo colada em pente, fator de forma de 65 e comprimento de 35 mm.

CRF – 65/35 – FS – Concreto reforçado com fibras de aço do tipo solta, fator de forma de 65 e comprimento de 35 mm.

CRF – 80/60 – FCP – Concreto reforçado com fibras de aço do tipo colada em pente, fator de forma de 80 e comprimento de 60 mm.

CRF – 80/60 – FS – Concreto reforçado com fibras de aço do tipo solta, fator de forma de 80 e comprimento de 60 mm.

3.6 MÉTODOS DE ENSAIOS

3.6.1. Ensaio de Compressão Axial

Todos os corpos-de-prova com fibras seguiram os mesmos parâmetros adotados para os corpos-de-prova sem fibras, com a moldagem do corpo-de-prova cilíndrico de 100 mm x 200 mm, adensamento mecânico em mesa vibratória com frequência de 3200 RPM e duração de 8 segundos, desmoldagem após 24 horas e cura em tanque de imersão, de acordo com a NBR 5738 (ABNT, 2003), após a cura por 28 dias foram submetidos ao ensaio de compressão axial, conforme NBR 5739 (ABNT, 2007), com carregamento na direção do eixo axial do corpo-de-prova.

A resistência à compressão axial foi determinada pela equação 3.1, conforme NBR 5739 (ABNT, 2007).

$$f_c = \frac{4.F}{\pi.d} \quad (3.1)$$

onde,

f_c : resistência à compressão axial (MPa);

F: força máxima obtida no ensaio (N);

d: diâmetro do corpo-de-prova (mm).

3.6.2. Ensaio de Tração por Compressão Diametral

Todos os corpos-de-prova cilíndricos desse ensaio também seguiram os mesmos procedimentos tomados para os corpos-de-prova sem fibras.

As dimensões, moldagem, adensamento, desmoldagem e cura ocorreram de maneira semelhante aos produzidos para ensaio de compressão axial, como preconizado na NBR 5738 (ABNT, 2003), sendo após uma cura em tanque de imersão por 28 dias submetidos ao ensaio de tração por compressão diametral, de acordo com a NBR 7222 (ABNT, 2011).

A resistência à tração por compressão diametral foi calculada pela equação 3.2, conforme NBR 7222 (ABNT, 2011).

$$f_{t,D} = \frac{2.F}{\pi.d.h} \quad (3.2)$$

onde,

$f_{t,D}$: resistência à tração (MPa);

F: força máxima obtida no ensaio (N);

d: diâmetro do corpo-de-prova (mm);

h: altura do corpo-de-prova (mm).

3.6.3. Ensaio de Flexão

A moldagem, adensamento mecânico em mesa vibratória com frequência de 3200 rpm e duração de 8 segundos, desmoldagem entre 24 h e 48 horas e cura em tanque de imersão por 28 dias dos corpos-de-prova prismáticos de dimensões de 150x150x500mm³ com vão de ensaio de 450 mm, e 150x150x550mm³ com vão de ensaio de 500 mm, respectivamente, ocorreu de acordo com a Norma Japonesa JSCE SF-2 e SF-4 (1984) e o RILEM TC 162-TDF (2003).

No ensaio de flexão pela Norma Japonesa JSCE SF-4, houve a determinações da tenacidade e principalmente do fator de tenacidade à flexão, enquanto pelo RILEM TC 162-TDF houve principalmente as determinações das resistências residuais. Nos dois ensaios realizados foi utilizado um dispositivo metálico denominado *yoke* que foi fixado na extremidade dos corpos-de-prova

prismático. Nesse dispositivo foi fixado um transdutor LVDT para controle do deslocamento vertical.

Para os corpos-de-prova submetidos ao ensaio da JSCE o carregamento foi aplicado a 90° da face superior do corpo-de-prova. No caso dos corpos-de-prova a serem ensaiados pelo RILEM houve um giro de 90° da face superior do corpo prova para execução do entalhe com uma serra circular de lâmina molhada para indução da fissura, sendo o carregamento aplicado na face oposta ao entalhe realizado. Em ambos, os corpos-de-prova submetidos ao ensaio pela JSCE e pelo RILEM, o carregamento foi aplicado a 90° da face superior do corpo-de-prova ou do sentido de moldagem dos mesmos. As figuras 3.6 e 3.7 mostram o esquema de ensaio da JSCE e do RILEM, respectivamente.

O fator de tenacidade à flexão e resistências residuais foram determinados, conforme equações 2.10 (pág. 26) e 2.21 (pág. 35).

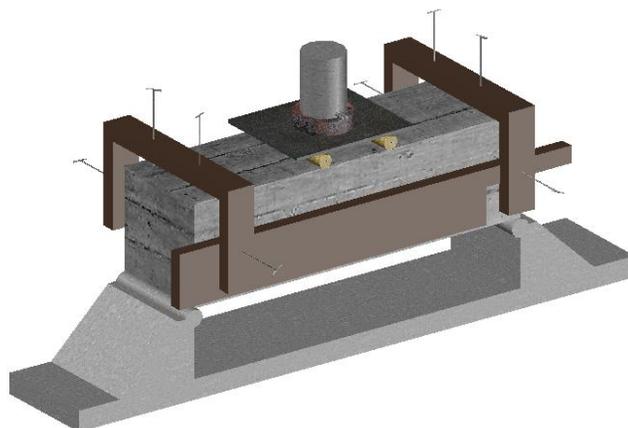


Figura 3.6– Esquema de ensaio de flexão pela JSCE

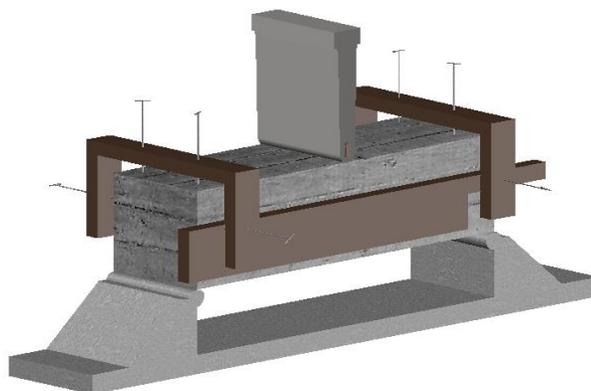


Figura 3.7 – Esquema de ensaio de flexão pelo RILEM

3.6.4. Ensaio de Compressão Modificada

Os corpos-de-prova prismáticos após ser submetidos ao ensaio de flexão pela Norma Japonesa JSCE SF-4 (1984) e do RILEM TC 162-TDF (2003), foram submetidos ao ensaio de compressão modificada, conforme ASTM C-116 (1999). Utilizou-se duas placas metálicas que possuíam rigidez e cada uma nas dimensões de 150 mm x 150 mm, estas foram posicionadas de modo alinhado, sendo uma na parte superior e outra na parte inferior dos corpos-de-prova. Esse ensaio tem intuito de complementar à análise dos resultados obtidos no ensaio de compressão axial. Os resultados de compressão modificada de cada amostra correspondem a média de cada parte do mesmo corpo-de-prova prismático rompido seja pela JSCE ou RILEM. Cada parte foi denominada de L₁ e L₂, seguindo sempre um padrão de identificação e o carregamento aplicado sempre na mesma face longitudinal de cada parte (L₁ e L₂), dos prismas rompidos, conforme mostram as figuras 3.8 e 3.13.

A resistência à compressão modificada foi definida pela equação 3.3 ASTM C-116 (1999).

$$f_{c,mod} = \frac{F}{A_b} \quad (3.3)$$

onde,

$f_{c,mod}$: resistência à compressão modificada (MPa);

F: força máxima obtida no ensaio (N);

A_b : área de aplicação da força (150 mm x 150 mm).



Figura 3.8 – Corpos-de-prova submetidos ao ensaio pelo RILEM



Figura 3.9 – Ensaio de compressão modificada em L_1 . Amostra com fratura no entalhe feito para indução de fissura no meio do vão.



Figura 3.10 - Ensaio de compressão modificada em L_2 . Amostra com fratura no entalhe para indução de fissura no meio do vão.



Figura 3.11 - Corpos-de-prova submetidos ao ensaio pela JSCE.



Figura 3.12 - Ensaio de compressão modificada em L_1 com fratura no terço médio da amostra.



Figura 3.13 - Ensaio de compressão modificada em L₂ com fratura no terço médio da amostra.

3.6.5. Ensaio de Absorção de Água nos Tubos de Concreto

Para esse ensaio foram extraídos corpos-de-prova de duas faixas da parede de cada tubo produzido, seja de concreto simples, armado ou com fibras de aço. A fim de manter um padrão dos resultados obtidos, essas faixas obedeceram sempre uma mesma posição para extração com serra circular, sendo uma faixa entre a coroa e flanco esquerdo do tubo e a outra faixa entre o flanco esquerdo e a base do tubo. De cada faixa foi extraído, com extratora, três corpos-de-prova cilíndricos sendo, portanto um corpo-de-prova correspondente a bolsa, um do meio e um da ponta do tubo, conforme figuras 3.15 a 3.18. O ensaio segue as recomendações da norma NBR 8890 (2007).

A absorção de água foi determinada pela equação 3.4 NBR 8890 (ABNT, 2007).

$$A = \frac{m_1 - m_0}{m_0} \cdot 100 \quad (3.4)$$

onde,

A: índice de absorção de água (%);

m₁: massa do corpo-de-prova após ensaio saturado (g);

m₀: massa do corpo-de-prova seco (g).

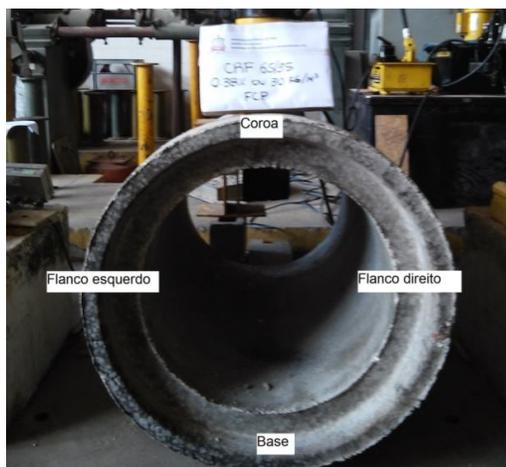


Figura 3.14 – Identificação das faixas do tubo



Figura 3.15 – Faixas retiradas com serra circular da parede do tubo.



Figura 3.16 – Corpos-de-prova extraídos com extratora da faixa entre coroa e flanco esquerdo do tubo.



Figura 3.17 - Corpos-de-prova extraídos com extratora da faixa entre base e flanco esquerdo do tubo



Figura 3.18 – Corpos-de-prova extraídos.

3.6.6. Ensaio de Teor Efetivo de Fibras nos Tubos de Concreto

Os mesmos corpos-de-prova extraídos da parede do tubo que foram submetidos ao ensaio de absorção são destinados também para verificação do teor efetivo de fibras. Nessa verificação ocorre a quebra dos corpos-de-prova com a marreta, sendo posteriormente retiradas as fibras com auxílio de um imã, conforme figuras 3.19 e 3.20. A partir da dimensão do corpo-de-prova é possível obter seu volume, e tendo o peso das fibras retiradas do corpo-de-prova, torna-se possível calcular o teor efetivo de fibras em massa, sendo transformado para kg/m^3 . O ensaio foi realizado mediante o método proposto por Kalil; Escariz; Figueiredo (2010).



Figura 3.19 – Quebra dos corpos-de-prova extraídos da parede do tubo.



Figura 3.20 – Retirada das fibras com auxílio de imã.

3.6.7. Ensaio de Compressão Diametral nos Tubos de Concreto

O ensaio de compressão diametral dos tubos de concreto simples, armados e reforçados com fibras de aço é parametrizado pela NBR 8890 (ABNT, 2007). Nos tubos de concreto simples torna-se necessário obter apenas a carga de ruptura, tendo em vista o comportamento frágil. Os tubos de concreto simples dessa pesquisa são do tipo PS1 com diâmetro de 600 mm destinados a águas pluviais. A carga mínima de ruptura pela NBR 8890 (ABNT, 2007) é de 40 KN/m, como tubo

possui um diâmetro de 600 mm tem-se uma carga de ruptura mínima de ruptura de 24 KN/m.

Os tubos de concreto armado dessa pesquisa são do tipo PA1 com diâmetro de 600 mm e destinados a águas pluviais. A NBR 8890 (ABNT, 2007) exige uma mínima carga de fissura e ruptura de 40 KN/m e 60 KN/m, respectivamente. De acordo com as especificações do tubo nessa pesquisa e por ser submetido ao ensaio de carregamento contínuo, é necessário atingir uma mínima carga de fissura e ruptura de 24 KN/m e 36 KN/m, respectivamente.

Considera-se que o tubo atingiu a carga de fissura quando apresentar uma fissura com abertura de 0,25 mm e comprimento igual ou maior que 300 mm. Para medida da abertura da fissura utiliza-se uma lâmina padrão fabricada em chapa de aço com espessura de 0,2 mm e largura de 12,7 mm, arredondada e afinada na ponta para 1,6 mm, conforme a figura 3.21. A carga de ruptura é obtida quando o tubo não tiver mais ganho de carga.

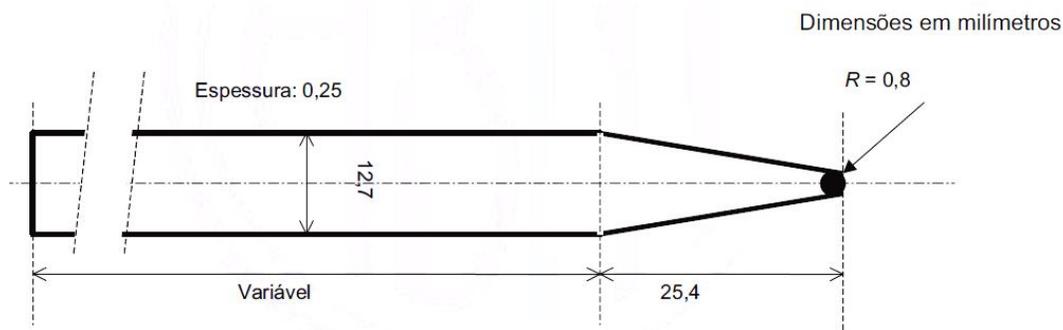


Figura 3.21 – Lâmina padrão para medida de abertura de fissura 0,25 mm

Os tubos de concreto com fibras adotados nessa pesquisa são do tipo PA1 com diâmetro de 600 mm e destinados a águas pluviais. A carga isenta de dano deve ser de 40 KN/m e carga mínima de ruptura de 60 KN/m, segundo a NBR 8890 (ABNT, 2007). Os tubos de concreto com fibras são submetidos ao ensaio cíclico, conforme figura 3.22, e possui uma carga mínima pós-fissuração que é verificada no segundo carregamento do ciclo, sendo obtida em função da carga isenta de dano, pois deve ser 5% acima da carga isenta de dano. De acordo com as especificações dos tubos nessa pesquisa, tem-se uma carga isenta de dano com 24 KN/m, portanto para serem aceitáveis pela norma devem atingir uma carga mínima pós-fissuração de 25,2 KN/m e carga mínima de ruptura de 36 KN/m.

Nos tubos de concreto reforçado com fibras de aço a norma determina que o tubo deverá atingir uma carga mínima estipulada para cada classe sem apresentar nenhum dano ou fissura, sendo mantida essa carga durante um minuto. Sendo atendida essa condição denomina-se de carga isenta de dano. O tubo não apresentando nenhum dano, prosseguirá com o carregamento até atingir a carga máxima, onde não se é mais possível obter acréscimo de carga, sendo posteriormente realizado descarregamento parcial até 95% da carga máxima obtida, e o descarregamento total. Em seguida será reaplicado carregamento no tubo novamente até da carga isenta de dano, mantendo-a por um minuto, neste instante deve-se verificar se o tubo apresenta capacidade resistente pós-fissuração, ou seja, se as fibras conseguem atuar como ponte de transferência de tensões suportando o carregamento.

Se na reaplicação do carregamento o tubo não atingir a carga isenta de dano obtida no primeiro carregamento ou não conseguir mantê-la por um minuto, deverá o ensaio ser interrompido. Se o tubo resistir por um minuto à carga aplicada, deverá ser dada continuidade no ensaio até ser obtida a carga máxima resistente pós-fissuração, que não deve ser inferior a 105% da carga isenta de dano, senão o tubo será rejeitado (Figura 3.22).

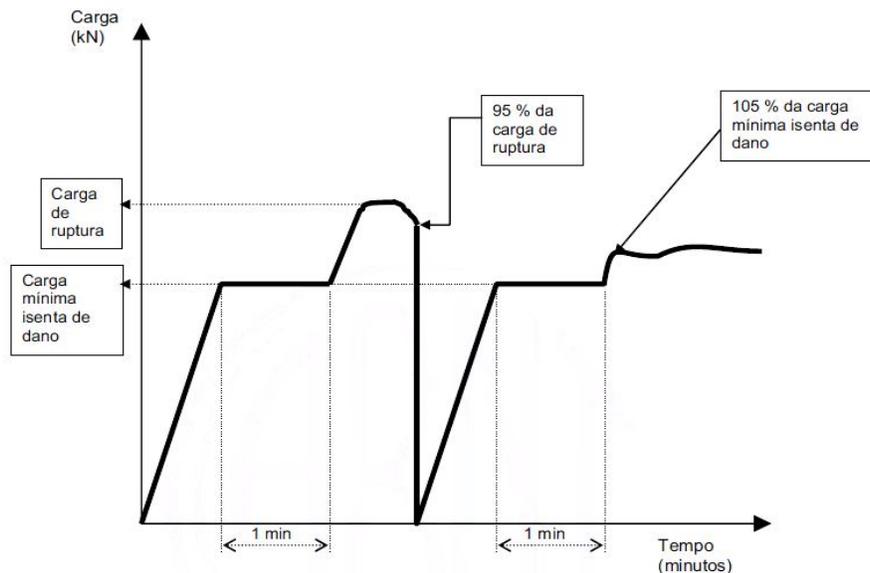


Figura 3.22 - Esquema do plano de carregamento do ensaio

O ensaio de resistência à compressão diametral de tubos de concreto simples, armado ou reforçado com fibras dar-se pela colocação de cutelos de madeira na parte inferior para apoio do tubo e um cutelo na parte superior do tubo, excluindo-se a bolsa, determinado pela NBR 8890 (ABNT, 2007), que consiste no método dos três cutelos. No caso dessa pesquisa, o tubo de concreto foi apoiado sobre dois cutelos de madeira separados entre si e o terceiro cutelo correspondeu a uma viga metálica que foi colocada ao longo da geratriz superior do tubo. Todos os cutelos são colocados no sentido paralelo ao eixo longitudinal do tubo para que haja uma distribuição uniforme do carregamento. Entre os cutelos inferiores ou superiores e a superfície do tubo foi colocada uma tira de borracha para não haver concentração de tensões em determinadas regiões do tubo ocasionadas por irregularidades na superfície do tubo, conforme mostra na figura 3.23.

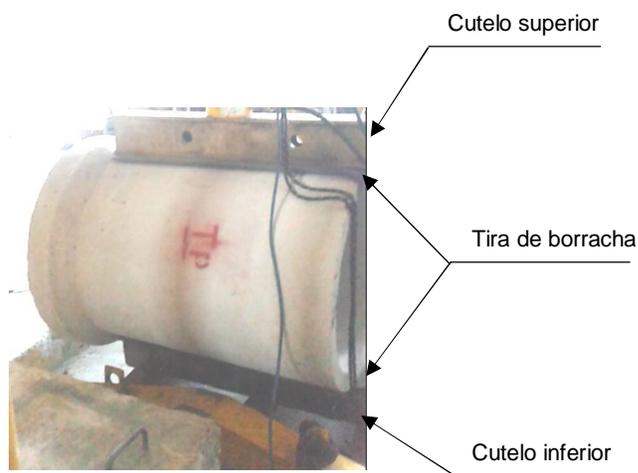


Figura 3.23 – Cutelo inferior, superior e tira de borracha

No ensaio, a leitura da carga aplicada foi verificada no indicador de pesagem acoplado a uma célula de carga de 50 toneladas que fica intercalada entre a viga de reação do pórtico e o pistão do macaco hidráulico com capacidade de 95 toneladas. A leitura do deslocamento diametral foi realizada com relógio comparador digital de alta precisão acoplado no suporte com base magnética, fixada no apoio metálico, conforme mostra na figura 3.24.

Tal relógio foi posicionado na extremidade da região da ponta do tubo em sua geratriz superior, pois a região da bolsa do tubo tem uma contribuição mais intensa

da matriz de concreto no prolongamento do trecho elástico inicial da curva carga versus deformação diametral (SILVA; EL DEBS, 2009). Deste modo a medida de deformações somente na ponta minimiza a influência da bolsa no comportamento do tubo (SILVA, 2011). Medidas de deformações somente na ponta proporcionam maiores deformações para cargas menores, devido menor rigidez na ponta do tubo (DE LA FUENTE et. al., 2012). Desta maneira a avaliação de compressão diametral apenas na ponta do tubo garante maior fator de segurança (DE LA FUENTE et. al., 2012).

A aplicação de carga no macaco hidráulico ocorreu seguindo uma metodologia que a cada um passe de carga de 200 quilogramas era verificado o tempo no relógio comum e o deslocamento diametral no relógio comparador digital. A leitura do tempo foi verificada em segundos, e posteriormente foi convertida para minutos para plotagem do gráfico de carga versus tempo.



Figura 3.24 – Célula de carga, pistão do macaco hidráulico e relógio comparador digital.

De acordo com a norma poderá haver fibras aparentes na superfície externa do tubo, sem que seja rejeitado tal tubo, entretanto não são permitidas fibras aparentes na superfície interna e na ponta do tubo. As fibras aparentes não poderão

ser retiradas da superfície do tubo. Esta exigência da norma tem sido questionada por estudos realizados, pois os autores entendem que esta retirada da fibra não interfere no desempenho do tubo. Nos tubos ensaiados não foram verificadas fibras aparentes na superfície interna e na região da ponta dos tubos, conforme mostra figura 3.25.



Figura 3.25 – Acabamento

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1. Abatimento de tronco de cone – *slump test*

O concreto produzido para todos os tubos de concreto e corpos-de-prova moldados não obteve abatimento de tronco de cone, permanecendo sempre no valor de 0 mm.

4.2. Plano de Fissuramento dos tubos

De acordo com os resultados obtidos no modelo proposto por De La Fuente et. al. (2012), nesse estudo o plano de fissuramento dos tubos seguiu o padrão esperado com quatro principais rotulações, sendo coroa, base e flancos esquerdo e direito, conforme figura 4.1. As fissuras começam na ponta dos tubos e propagam-se para bolsa. Isto ocorre devido ao menor limite de deformação elástica do concreto na ponta. Devido aos esforços de flexão, ocorrem fissuras longitudinais primeiramente na borda interna da coroa, definida como fase fissurada, e posteriormente na fase pré-ruptura ocorrem fissuras longitudinais nas bordas internas da base e externas dos flancos direito e esquerdo dos tubos (DE LA FUENTE et. al., 2012). As figuras de 4.2 a 4.4 mostram o plano de fissuramento dos tubos nessa pesquisa.



Figura 4.1 – Plano de fissuração do tubo



Figura 4.2 – Fissura na base



Figura 4.3 – Fissura no flanco esquerdo



Figura 4.4 - Fissura no flanco direito

Todos os tubos de concreto com fibras suportaram o carregamento sem entrar em colapso. Os tubos de concreto com fibras do tipo 80/60, soltas no teor de 0,25% e 0,50%, e coladas no teor de 0,50%, suportaram maiores níveis de deslocamento diametral e medida de abertura da fissura no estágio pós-ruptura da matriz. Certamente maiores níveis de deslocamento e abertura de fissuras teriam sido atingidos, pois a interrupção dos ensaios ocorria por haver limitação, devido da aplicação da carga ocorrer de forma manual no macaco hidráulico, e assim haver dificuldade de obter-se maiores níveis de carga. Observando a abertura das fissuras notava-se que ocorria deslizamento das fibras do tipo 65/35 e rompimento das fibras do tipo 80/60 ao longo do mecanismo de falha.

4.3. Resistência à compressão diametral dos tubos

A tabela 4.1 apresenta os resultados de compressão diametral do tubos, obtidos no ensaio da Norma NBR 8890 (ABNT, 2007).

Tabela 4.1 - Resultados de compressão diametral.

Série dos tubos	Amostra	Cargas obtidas no ensaio		Cargas pela NBR 8890 (2007)	
		Carga de Ruptura (KN/m)	Carga máxima pós-fissuração (KN/m)	Carga mínima de fissura ou isenta de dano (KN/m)	Carga de Ruptura (KN/m)
CS	1	36	-	-	24
	2	36	-	-	
CA	1	40	-	24	36
	2	40	-	24	
CRF - 65/35 - 0,25% - FCP	1	27	12	24	36
CRF - 65/35 - 0,38% - FCP	1	28	14	24	36
CRF - 65/35 - 0,50% - FCP	1	30	18	24	36
CRF - 80/60 - 0,25% - FCP	1	36	24	24	36
CRF - 80/60 - 0,38% - FCP	1	38	28	24	36
CRF - 80/60 - 0,50% - FCP	1	39	30	24	36
CRF - 65/35 - 0,25% - FS	1	28	18	24	36
CRF - 65/35 - 0,38% - FS	1	36	20	24	36
CRF - 65/35 - 0,50% - FCP	1	36	24	24	36
CRF - 80/60 - 0,25% - FS	1	40	30	24	36
CRF - 80/60 - 0,38% - FS	1	40	34	24	36
CRF - 80/60 - 0,50% - FS	1	42	37,5	24	36

No Anexo D pode-se observar que as duas amostras de tubos de concreto simples obtiveram a carga de ruptura de 36 kN/m, sendo aceitáveis tendo em vista que a norma preconiza a carga mínima de ruptura com 24 kN/m. Percebe-se também que a ruptura ocorreu de maneira frágil, não havendo sinais de resistência residual. Este comportamento era esperado por ser apenas concreto sem fibras. O Anexo D2 apresenta os deslocamentos que atingiram em torno de 2,5 mm a 3,0 mm para as duas amostras.

No Anexo E, pode-se verificar que para os tubos de concreto armado houve para as duas amostras uma carga de fissura de 32 KN/m e carga de ruptura de 40 KN, superando em 33% e 11%, respectivamente, a carga mínima de fissura e de

ruptura que são de 24 KN/m e 36 KN/m, respectivamente, conforme NBR 8890 (ABNT, 2007).

No Anexo E2, é possível observar que os tubos atingiram deslocamentos maiores que o atingido pelo tubo de concreto simples, de referência, visto que houve a participação da armadura na pós-fissuração da matriz. Nas duas amostras verificou-se uma crescente parcela de carregamento até um deslocamento em torno de 2,5 mm a 3,0 mm, onde ocorre a carga de fissura, a partir da carga de fissura nota-se uma estabilização da carga e crescente deslocamento com a continuidade do plano de carregamento.

No Anexo F, nota-se que o tubo de concreto com fibras coladas em pente do tipo 65/35 no teor de 0,25% não atingiu o mínimo da carga ruptura de 36 KN/m. Atingiu a carga mínima isenta de dano de 24 KN/m no primeiro carregamento do ciclo, mantendo-a por 1 minuto, no entanto não alcançou novamente a carga de 24 KN/m no segundo carregamento do ciclo, conforme NBR 8890 (ABNT, 2007).

O anexo G mostra o tubo de concreto com fibras soltas do tipo 65/35 no teor de 0,25% que também não atingiu a carga mínima de ruptura de 36 KN/m. Alcançou a carga mínima isenta de dano de 24KN/m no primeiro carregamento do ciclo, mantendo-a por 1 minuto, entretanto não obteve a carga de 24 KN/m no segundo carregamento do ciclo, conforme NBR 8890 (ABNT, 2007). Esse comportamento foi observado por Escariz (2012) que de acordo a NBR 8890 (ABNT, 2007) avaliou tubos de concreto com fibras soltas do tipo 67/50 nos teores de 20 kg/m³ (0,25%) e 25 kg/m³ (0,32%), também atingiu a carga de ruptura e carga pós-fissuração.

De acordo com Anexo H, verifica-se que o tubo de concreto com fibras coladas em pente do tipo 80/60 no teor de 0,25% obteve a carga de ruptura de 36 KN/m, entretanto não conseguiu manter a carga de 24 KN/m por 1 minuto no segundo carregamento do ciclo, conforme NBR 8890 (ABNT, 2007). Esse desempenho foi verificado por Escariz (2012) quando analisando 03 tubos de concreto com fibras coladas em pente do tipo 80/60, teve apenas uma amostra que atingiu a carga de ruptura e nenhuma das três alcançou a carga mínima de pós-fissuração. No estudo de Mohamed (2104), os tubos de concreto com fibras coladas do tipo 80/60 foram avaliados segundo a norma ASTM C497, e obteve médias de cargas de ruptura que superaram em 15,2% a carga de ruptura estabelecida para classe V da norma ASTM C76.

No Anexo I, observa-se que o tubo com fibras soltas do tipo 80/60 no teor de 0,25% atingiu um valor de 40 KN/m para carga de ruptura, conseguindo superar em 11% a carga mínima de ruptura de 36 KN/m. Da mesma maneira conseguiu manter por 1 minuto a carga de 24 KN/m no segundo carregamento do ciclo e dando prosseguimento no segundo carregamento obteve um valor de 30 KN/m, essa carga é conhecida como carga máxima pós-fissuração. A carga mínima pós-fissuração deve ser 5% maior que a carga de 24 KN/m, portanto deverá ter um valor de 25,2 KN/m. Deste modo a carga máxima pós-fissuração superou em 19% a carga mínima pós-fissuração, sendo, portanto aceitável pela norma NBR 8890 (ABNT, 2007).

O Anexo J mostra o tubo com fibras coladas em pente do tipo 65/35 no teor de 0,38%, que da mesma maneira que o ocorrido para as fibras colada em pente e soltas no teor de 0,25% não obteve o mínimo da norma para a carga de ruptura e a carga no segundo carregamento do ciclo, conforme NBR 8890 (ABNT, 2007).

De acordo com o Anexo K, verifica-se que o tubo com fibras soltas do tipo 65/35 no teor de 0,38% obteve um resultado melhor para a carga de ruptura e a carga no segundo carregamento do ciclo, atingindo e mantendo por 1 minuto a carga mínima isenta de dano no primeiro carregamento do ciclo, contudo ainda não obtendo resultados dentro estabelecidos pela NBR 8890 (ABNT, 2007).

Observa-se no Anexo L, que o tubo com fibras coladas em pente do tipo 80/60 no teor de 0,38% obteve uma carga de ruptura de 38 KN/m e máxima pós-fissuração de 28 KN/m, superando em 6% e 11%, respectivamente, a carga mínima de ruptura de 36 KN/m e a carga mínima pós-fissuração de 25,2 KN/m, pois corresponde a um valor de 5% acima da carga de 24 KN/m, segundo NBR 8890 (ABNT, 2007). No Anexo M, nota-se que o tubo do tipo 80/60 com fibras soltas no teor de 0,38% atingiu a carga de ruptura e máxima pós-fissuração de 40 KN/m e 34 KN/m, respectivamente, superando a mínima carga de ruptura e pós-fissuração em 11% e 42%, sendo aceitáveis pela NBR 8890 (ABNT, 2007). No estudo realizado por Escariz (2012), para três amostras houve apenas um tubo com fibras coladas em pente do tipo 80/60 no teor de 25 kg/m³ (0,32%) que atingiu a mínima carga de ruptura e pós-fissuração.

O Anexo N mostra o tubo com fibras coladas em pente tipo 65/35 no teor de 0,50% que não atingiu a mínima carga de ruptura de 36 KN/m e a carga de 24 KN/m no segundo carregamento do ciclo, conforme NBR 8890 (ABNT, 2007). No Anexo O,

entretanto o tubo com fibras soltas do tipo 65/35 no teor de 0,50%, obteve-se uma carga de ruptura de 36 KN/m e carga de 24 KN/m no segundo carregamento do ciclo, não conseguindo manter a carga durante 1 minuto no segundo ciclo de carregamento, conforme recomendado pela NBR 8890 (ABNT, 2007).

No Anexo P observa-se que o tubo com fibras colada em pente do tipo 80/60 no teor de 0,50% obteve uma carga de ruptura e máxima pós-fissuração de 39 KN/m e 30 KN/m, respectivamente, superando em 8% e 19% a mínima carga de ruptura de 36 KN/m e pós-fissuração de 25,2 KN/m, sendo aceitáveis pela NBR 8890 (ABNT, 2007). No Anexo Q, verifica-se que o tubo com fibras soltas do tipo 80/60 no teor de 0,50% obteve uma carga de ruptura e máxima pós-fissuração de 42 KN/m e 37,5 KN/m, respectivamente, superando em 17% e 49% a mínima carga de ruptura de 36 KN/m e pós-fissuração de 25,2 KN/m, também aceitáveis pela NBR 8890 (ABNT, 2007). A carga máxima pós-fissuração teve um resultado próximo da carga de ruptura, demonstrando um ótimo desempenho da fibra no estágio pós-fissuração. Na pesquisa de Escariz (2012) foi verificado que as três amostras de tubos com fibras coladas em pente do tipo 80/60 nos teores de 35 kg/m³ (0,45%) e 45 kg/m³ (0,57%) alcançaram a mínima carga de carga de ruptura e pós-fissuração, superando-as em 20% e 64%, respectivamente.

De modo geral observa-se que os tubos com fibras soltas e coladas do tipo 80/60 obteve melhor desempenho em relação aos tubos de concreto soltas e coladas do tipo 65/35. Este comportamento foi observado por Escariz (2012) e Mohamed (2014). As fibras do tipo 65/35, denominadas como fibras curtas, deslizam quando atuam como ponte de transferência de tensões, exercendo menor parcela de contribuição (MOHAN e PARTHIBAN, 2011).

A tabela 4.2 e a figura 4.5 mostram os resultados de cargas obtidas no deslocamento de 18 mm, referentes aos tubos de concreto armado e com fibras de aço submetidas ao ensaio contínuo e cíclico, respectivamente. O deslocamento de 18 mm foi adotado, a fim de verificar influência no comportamento pós-fissuração seja pelos ensaios de carregamento contínuo realizados nos tubos de concreto armado ou de carregamento cíclico realizados nos tubos de concreto com fibras. Esse deslocamento não sofre influência da instabilidade pós-pico e re-carregamento dos tubos, pois já ocorreram. O resultado de carga no referido deslocamento foi obtido no Anexo H2 para tubo de concreto armado, e para os tubos de concreto com

fibras nos Anexos de I até T, com índices de numeração igual a 2. A tabela 4.2 e a figura 4.5 mostram carga no referido deslocamento de 18 mm para os tubos de concreto armado e apenas de alguns dos tubos de concreto com fibras produzidas, pois foram somente esses que atingiram o referido deslocamento.

Na figura 4.5 torna-se possível visualizar para os tubos de concreto com fibras, que se têm maiores cargas com aumento do teor de fibras. Observa-se que os tubos com fibras soltas do tipo 80/60 obteve melhores resultados de carga em relação aos tubos com fibras coladas em pente do tipo 80/60, e esse apresentou melhor desempenho que os tubos com fibras soltas do tipo 65/35.

Na figura 4.5 pode-se verificar que somente os tubos com fibras soltas do tipo 80/60 atingiu o deslocamento de 18 mm em todos os teores de fibras, enquanto os tubos com fibras coladas em pente do tipo 80/60 e com fibras soltas do tipo 65/35 alcançaram o deslocamento de 18 mm apenas nos teores de 0,38% e 0,50%. E pode-se notar que apenas os tubos com fibras soltas do tipo 80/60 nos teores de 0,38% e 0,50%, e os tubos com fibras coladas em pente do tipo 80/60 no teor de 0,50% apresentaram comportamento pós-fissuração semelhante ao obtido pelos tubos de concreto armado, pois tiveram a mesma carga de 26 kN no deslocamento de 18 mm.

Os resultados dessa análise de carga versus deslocamento corroboram com os obtidos na carga versus tempo, visto que nesse último os tubos com fibras coladas em pente do tipo nos teores de 0,38% e 0,50%, e com fibras soltas do tipo 80/60 em todos os teores de fibra superaram a mínima carga de ruptura e pós-fissuração estabelecida pela NBR 8890 (ABNT, 2007). Deste modo essa análise pode indicar que os tubos com fibras coladas em pente e soltas do tipo 80/60 nos teores aqui referidos apresentam viabilidade técnica para substituição da armadura convencional dos tubos de concreto armado.

Tabela 4.2 - Resultados de carregamento contínuo e cíclico para deslocamento em 18 mm.

Série	Carga em KN, obtida no deslocamento diametral de 18 mm	
	Ensaio com carregamento contínuo	Ensaio com carregamento cíclico
CA	26,0	
CRF - 65/35 - 0,38% - FS	-	12,0
CRF - 65/35 - 0,50% - FS	-	15,0
CRF - 80/60 - 0,38% - FCP	-	18,0
CRF - 80/60 - 0,50% - FCP	-	26,0
CRF - 80/60 - 0,25% - FS	-	18,0
CRF - 80/60 - 0,38% - FS	-	26,0
CRF - 80/60 - 0,50% - FS	-	35,0

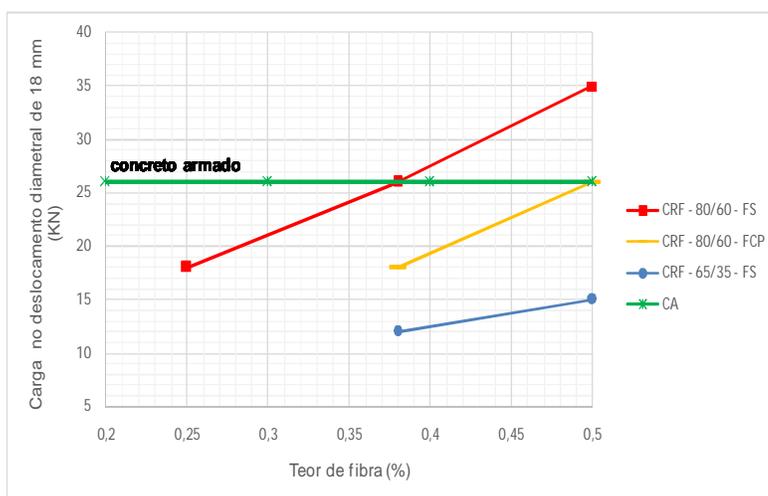


Figura 4.5 - Carga no deslocamento de 18 mm para carregamento contínuo e cíclico.

De acordo com as figuras 4.6 E 4.7, de modo geral é possível dizer que há um crescimento da carga de ruptura e máxima pós-fissuração com aumento do teor de fibras. Observa-se que em todos os teores analisados, as fibras do tipo 80/60 coladas em pente ou soltas apresentaram melhores resultados de carga de ruptura e máxima pós-fissuração em relação à fibra do tipo 65/35, coladas ou soltas. As fibras do tipo 80/60 e 65/35, quando analisadas entre si o mesmo teor de fibras, houve

melhor desempenho das fibras soltas em relação à colada em pente, tanto para carga de ruptura como carga máxima pós-fissuração. Resumindo houve melhor desempenho das fibras soltas do tipo 80/60.

No Anexo R, tem-se correlações entre a carga de ruptura ou carga máxima pós-fissuração versus teor de fibra, é claro que somente válida para tipo de equipamento para produção dos tubos, tipos de tubos, tipos de fibras, teores de fibras e dosagem dos concretos utilizados nesse estudo. A dosagem do concreto e relação água/cimento foi constante para todos os exemplares e não houve uso de aditivos. Os coeficientes das correlações tiveram regressões lineares muito boas com valores próximos do valor unitário.

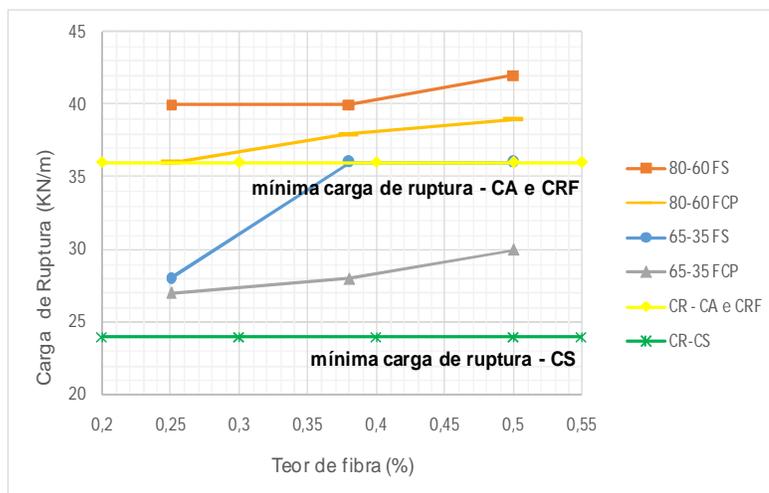


Figura 4.6 - Carga de ruptura versus teor de fibras coladas em pente e soltas do tipo 65/35 e 80/60.

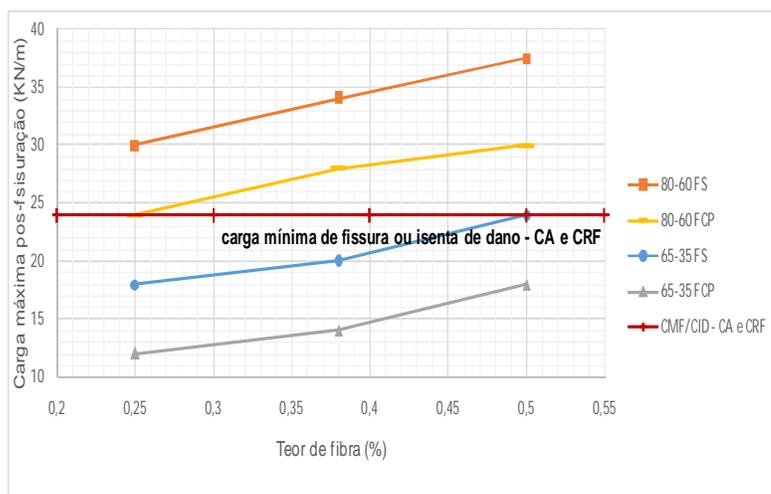


Figura 4.7 - Carga máxima pós-fissuração versus teor de fibras coladas em pente e soltas do tipo 65/35 e 80/60.

4.4. Ensaio Complementares

4.4.1. Resistência à compressão Axial

A tabela 4.3 apresenta que na maioria dos corpos-de-prova com fibras, seja colada em pente ou solta, obtiveram-se resultados acima dos obtidos pelos corpos-de-prova sem fibras. Este acréscimo de resistência alcançou um valor de 18% para a média dos corpos-de-prova com fibras soltas do tipo 80/60 no teor de 0,25%. Este comportamento foi observado por Mohamed et. al. (2015), que obteve um acréscimo de 14%, em média, quando analisados entre os teores de 0,25% e 0,75%, em fração volumétrica para os corpos-de-prova com fibras coladas em pente do tipo 80/60. Para maiores teores de fibra, mais fibras podem resistir à formação de fissuras na direção longitudinal dos corpos-de-prova cilíndricos, resultando em forças de compressão mais elevadas (Yang, 2011). A adição das fibras de aço dificulta a propagação de micro-fissuras no concreto, que poderá acarretar maior resistência à compressão. Em contrapartida pode reduzir a trabalhabilidade e compatibilidade do compósito, resultando em maior porosidade que irá influenciar na resistência à compressão (MOHAMED, 2014).

No entanto a diferença não foi significativa, conforme análise estatística pela ANOVA apresentado no Anexo V1, visto que as fibras de aço não têm finalidade principal de melhorar o desempenho do concreto quando submetido à compressão. Somente as fibras do tipo 80/60 coladas em pente no teor de 0,50% e soltas em todos os teores apresentaram diferenças significativas em relação às fibras do tipo 65/35, coladas em pente e soltas, segundo análise pela ANOVA, no Anexo V1.

De acordo com a tabela 4.3, a diferença de resistência entre as fibras do tipo 80/60 e 65/35 no estado coladas em pente e teor de 0,50% foi de 7,8%. No estudo realizado por Mohamed (2014), a diferença de resistência entre as fibras coladas em pente do tipo 80/60 e 65/35 no teor de 0,75% foi de 8%.

Tabela 4.3 - Resultados de compressão axial

Série	Amostra	Compressão axial	Compressão axial		Coef. de variação
		(Mpa)	Médio (MPa)	Desvio padrão(MPa)	(%)
CS	1	38,6	34,6	3,7	10,59
	2	33,7			
	3	31,5			
CRF - 65/35 - 0,25% - FCP	1	35,5	35,9	2,1	5,85
	2	38,1			
	3	34,0			
CRF - 65/35 - 0,38% - FCP	1	28,8	33,3	5,7	16,98
	2	39,7			
	3	31,6			
CRF - 65/35 - 0,50% - FCP	1	34,2	31,8	2,3	7,18
	2	29,6			
	3	31,6			
CRF - 80/60 - 0,25% - FCP	1	38,5	37,4	1,6	3,85
	2	35,4			
	3	38,4			
CRF - 80/60 - 0,38% - FCP	1	36,6	33,8	5,8	14,72
	2	31,2			
	3	33,6			
CRF - 80/60 - 0,50% - FCP	1	28,2	29,3	1,8	4,42
	2	32,3			
	3	27,4			
CRF - 65/35 - 0,25% - FS	1	34,1	36,2	4,6	12,68
	2	41,5			
	3	33,1			
CRF - 65/35 - 0,38% - FS	1	38,5	35,9	2,9	8,12
	2	32,7			
	3	36,5			
CRF - 65/35 - 0,50% - FS	1	30,2	31,1	2,1	6,71
	2	33,5			
	3	29,6			
CRF - 80/60 - 0,25% - FS	1	41,0	40,7	1,7	4,63
	2	39,0			
	3	42,1			

CRF - 80/60 - 0,38% - FS	1	33,6	39,6	2,7	8,06
	2	40,0			
	3	45,2			
CRF - 80/60 - 0,50% - FS	1	38,2	39,8	2,6	8,95
	2	41,7			
	3	39,5			

4.4.2. Resistência à tração por compressão diametral

Na tabela 4.4 são apresentados os resultados de tração por compressão diametral obtidos no ensaio, conforme Norma NBR 7222 (ABNT, 2011). A partir da tabela 4.4 observa-se que corpos-de-prova com fibras coladas em pente ou soltas apresentaram um acréscimo de resistência ($f_{t,D}$) em comparação ao concreto simples, sem fibras (f_c). Houve uma tendência de crescimento da resistência ($f_{t,D}$) com o aumento do teor de fibras.

De acordo com Mohamed (2014), independente do tipo de fibras, à medida que há um aumento do teor de fibras ocorre um acréscimo da resistência da tração por compressão diametral. Nesse estudo com adição no concreto das fibras do tipo 65/35 e do tipo 80/60 houve, com o aumento do teor de 0,25% para 0,75%, também um aumento da resistência à tração variando entre 20% e 60%. Este comportamento foi observado por Mohan e Parthiban (2011). No estudo de Mohamed (2014), as misturas de concreto com fibras do tipo 80/60 obtiveram maiores acréscimos de resistência à tração. Isto pode ser explicado pelo maior comprimento das fibras, que influenciam com maior intensidade na propagação da micro-fissuras.

Com a análise estatística realizada pela ANOVA, no Anexo V2, observou-se que a adição das fibras no concreto provocou diferenças significativas, no caso, ocorrendo para as fibras do tipo 80/60 coladas e soltas em todos os teores, e do tipo 65/35 soltas nos teores de 0,38% e 0,50%. A partir disso houve a plotagem das figuras 4.8 e 4.9.

Tabela 4.4 - Resultados de tração por compressão diametral

Série	Amostra	Tração por compressão	Tração por compressão diametral		Coef. de variação (%)
		diametral (MPa)	Médio (MPa)	Desvio padrão(MPa)	
CS	1	2,9	3,1	0,2	6,01
	2	3,2			
	3	3,2			
CRF - 65/35 - 0,25% - FCP	1	3,2	3,2	0,3	10,40
	2	2,9			
	3	3,6			
CRF - 65/35 - 0,38% - FCP	1	3,7	3,4	0,3	7,43
	2	3,2			
	3	3,5			
CRF - 65/35 - 0,50% - FCP	1	3,6	3,6	0,1	2,90
	2	3,7			
	3	3,5			
CRF - 80/60 - 0,25% - FCP	1	4,2	4,4	0,2	4,72
	2	4,4			
	3	4,6			
CRF - 80/60 - 0,38% - FCP	1	4,1	4,5	0,4	8,71
	2	4,8			
	3	4,7			
CRF - 80/60 - 0,50% - FCP	1	4,8	4,6	0,2	4,55
	2	4,4			
	3	4,7			
CRF - 65/35 - 0,25% - FS	1	2,9	3,0	0,2	5,92
	2	3,0			
	3	3,2			
CRF - 65/35 - 0,38% - FS	1	3,1	3,2	0,1	2,67
	2	3,1			
	3	3,3			
CRF - 65/35 - 0,50% - FS	1	3,3	3,3	0,1	2,18
	2	3,3			
	3	3,4			
CRF - 80/60 - 0,25% - FS	1	3,3	3,4	0,5	14,48
	2	3,0			
	3	3,9			
CRF - 80/60 - 0,38% - FS	1	3,8	3,8	0,2	6,63

	2	4,0			
	3	3,5			
CRF - 80/60 - 0,50% - FS	1	4,1	4,0	0,2	5,96
	2	3,7			
	3	4,2			

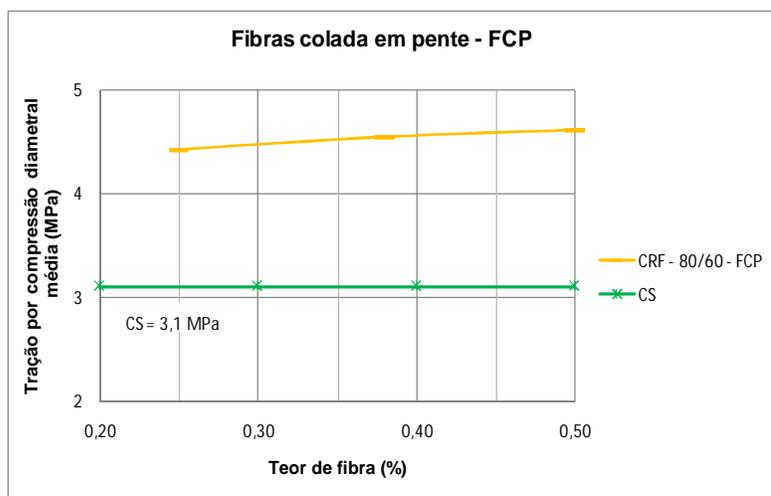


Figura 4.8 – Tração por compressão diametral versus teor de fibras coladas em pente, após análise pela ANOVA.

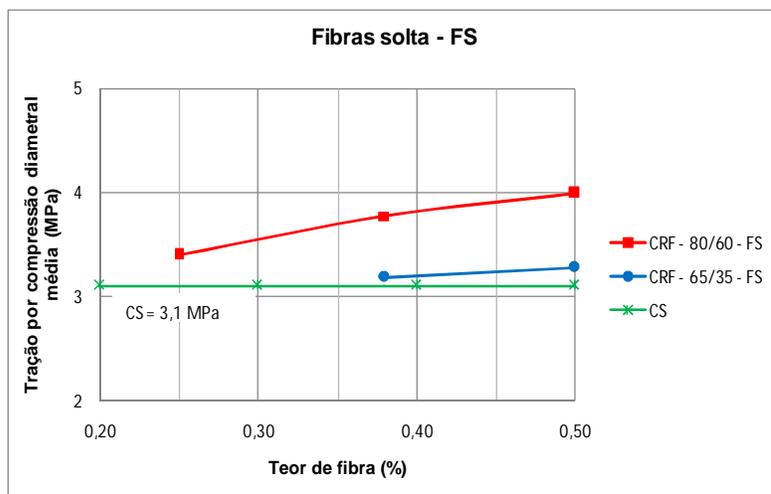


Figura 4.9 – Tração por compressão diametral versus teor de fibras soltas, após análise pela ANOVA.

Houve um acréscimo da resistência de tração por compressão diametral de 48,7% em relação ao concreto sem fibras para corpo-de-prova com fibra de aço colada em pente do tipo 80/60 no teor de 0,50%. No estudo desenvolvido por Mohamed (2014), houve a utilização das fibras do tipo 80/60 e 65/35, e a variação de resistência da tração por compressão diametral ficou na faixa de 13% a 60%.

De maneira diferente do comportamento obtido na compressão, todos os corpos-de-prova submetidos ao ensaio de tração por compressão diametral tiveram uma tendência de crescimento da resistência com o aumento do teor de fibras. Este comportamento foi observado por Mohamed (2014). Pode-se dizer que as fibras, nessa condição, atuam no processo de fissuração, dificultando a ruptura e contribuindo no ganho de carga. Embora os corpos-de-prova ensaiados também possuam dificuldades de adensamento por apresentar consistência seca e ainda menor coesão com o aumento do teor de fibras no concreto.

4.4.3. Resultados obtidos a partir do ensaio de flexão

4.4.3.1. Tenacidade e fator de tenacidade

A abordagem dos ensaios de flexão realizados nos corpos-de-prova prismáticos, segundo a Norma Japonesa JSCE SF-4 (1984), restringiu-se aos resultados de tenacidade e fator de tenacidade, pois os resultados de resistência à flexão serão abordados nos ensaios de flexão pelo RILEM. A tenacidade foi definida de acordo com a figura 2.9 (pág. 26) e a partir do Anexo T, enquanto o fator de tenacidade foi determinado, de acordo com a equação 2.9 (pág. 26).

De acordo com a tabela 4.5 e as figuras 4.10 e 4.11, pode-se dizer que:

- Para todos os corpos-de-prova houve um aumento da tenacidade médio ($T_{b, med}$) e conseqüentemente, do fator de tenacidade médio (FT_{med}) à medida que aumentou-se o teor de fibras. Esse acréscimo do fator de tenacidade com aumento do teor de fibras também foi observado no estudo desenvolvido por Fugii (2008). No caso do estudo realizado por Fugii (2008) obteve-se um fator de tenacidade de 2,33 MPa e 2,97 MPa para as fibras de aço colada em pente do tipo 80/60 nos teores de

20 kg/m³ e 30 kg/m³, respectivamente. Nesse estudo obtiveram-se os resultados de fator de tenacidade de 2,07 MPa e 3,32 MPa para mesmo tipo de fibra e nos teores de 0,25% (20 kg/m³) e 0,38% (30 kg/m³), respectivamente;

- As fibras do tipo 80/60 coladas em pente nos teores de 0,38% e 0,50% e soltas em todos os teores, apresentaram melhores resultados quando comparadas com as fibras do tipo 65/35, coladas ou soltas em todos os teores. A análise realizada pela ANOVA, no Anexo V3, apontou diferença significativa na comparação entre si dos tipos 80/60 e 65/35 nos teores e estado de fibras supracitadas. Isto pode ser explicado porque as fibras do tipo 80/60 em relação ao tipo 65/35, apresentam maior comprimento possibilitando maior embutimento e ancoragem na matriz, além disso, possuem maior diâmetro que garante maior área de contato fibra-matriz e maior fator de forma;

- As fibras soltas do tipo 65/35 em todos os teores utilizados nessa pesquisa apresentaram melhor desempenho em relação às fibras coladas em pente do mesmo tipo em todos os teores. Esse comportamento foi observado para as fibras soltas do tipo 80/60 no teor de 0,50% que apresentou melhor resultado em comparação as fibras coladas do mesmo tipo e teor. A análise realizada pela ANOVA, no Anexo V3, gerou resultados que indicaram diferença significativa das fibras soltas do tipo 65/35 no teor de 0,50% em relação às fibras coladas do mesmo tipo em todos os teores analisados. Da mesma maneira as fibras soltas do tipo 80/60 no teor de 0,50% apresentaram diferença significativa em relação a todos os teores de fibras coladas do mesmo tipo. Tal comportamento das fibras soltas em comparação às fibras coladas em pente pode ser explicado pela maior distribuição das fibras soltas, conforme visto nos resultados da verificação de teor efetivo de fibras realizado nessa pesquisa. Isto garantiu a possibilidade de maior de número de fibras e direcionamento perpendicular dessas ao longo do plano de fissuração.

Os resultados de tenacidade são importantes para o entendimento do comportamento dos tubos de concreto com fibras. Os melhores resultados de desempenho mecânico dos tubos ocorreram quando foi utilizado concreto com fibras do tipo 80/60 coladas nos teores de 0,38% e 0,50% e com fibras soltas em todos os

teores analisados. Os resultados obtidos na análise realizada pela ANOVA para o fator de tenacidade indicaram que houve diferença não significativa para as fibras do tipo 80/60, quando analisados entre si somente os teores de fibras coladas ou somente teores de fibras soltas. Deste modo poderia ser utilizado concreto com fibras coladas no teor de 0,38% e com fibras soltas no teor de 0,25%, visando minorar o consumo de fibras e custo do compósito.

Tabela 4.5 – Resultados obtidos de tenacidade e fator de tenacidade

Série	Amostra	Tenacidade	Tenacidade	Fator de Tenacidade	Fator de Tenacidade		Coef. de variação (%)
		(KN.mm)	Médio (KN.mm)	(MPa)	Médio (MPa)	Desvio padrão (MPa)	
CRF - 65/35 - 0,25% - FCP	1	24,0	23,7	0,79	0,8	0,1	9,54
	2	22,9		0,71			
	3	24,3		0,86			
CRF - 65/35 - 0,38% - FCP	1	42,0	42,0	1,71	1,9	0,2	8,30
	2	41,9		1,88			
	3	42,2		2,02			
CRF - 65/35 - 0,50% - FCP	1	47,0	47,8	1,96	2,1	0,1	6,95
	2	47,4		2,25			
	3	48,9		2,15			
CRF - 80/60 - 0,25% - FCP	1	47,2	46,6	2,2	2,1	0,2	7,72
	2	46,8		1,89			
	3	45,8		2,11			
CRF - 80/60 - 0,38% - FCP	1	75,1	74,6	3,41	3,3	0,1	4,12
	2	73,8		3,38			
	3	74,9		3,16			
CRF - 80/60 - 0,50% - FCP	1	79,5	80,3	3,51	3,6	0,1	4,10
	2	80,1		3,72			
	3	81,2		3,44			
CRF - 65/35 - 0,25% - FS	1	52,3	50,9	2,42	2,3	0,2	7,56
	2	49,5		2,28			
	3	50,9		2,08			
CRF - 65/35 - 0,38% - FS	1	49,4	51,9	2,09	2,3	0,2	9,34
	2	53,4		2,52			
	3	52,9		2,3			
CRF - 65/35 - 0,50% - FS	1	66,2	64,8	2,64	2,9	0,2	8,01
	2	65,2		3,1			

	3	63,0		2,89			
CRF - 80/60 - 0,25% - FS	1	48,9	50,8	2,16	2,3	0,1	4,70
	2	49,8		2,24			
	3	53,7		2,37			
CRF - 80/60 - 0,38% - FS	1	75,9	73,3	3,41	3,3	0,1	4,46
	2	72,6		3,12			
	3	71,4		3,25			
CRF - 80/60 - 0,50% - FS	1	89,7	92,3	4,23	4,1	0,1	3,10
	2	94,9		3,98			
	3	92,3		4,15			

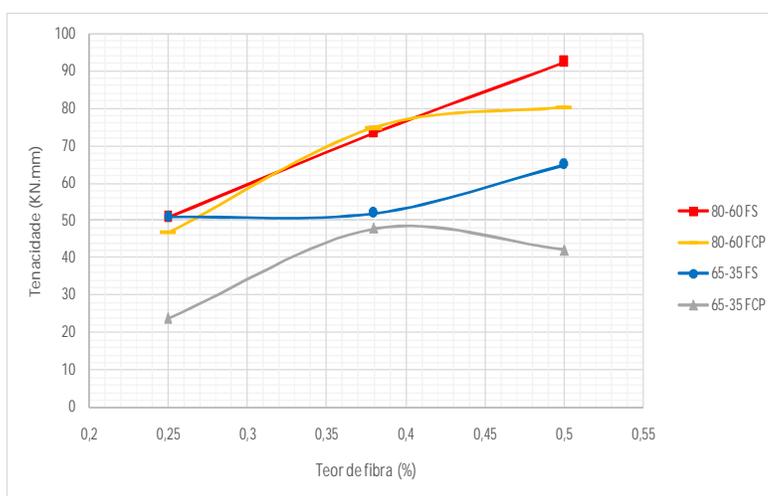


Figura 4.10 - Tenacidade média versus teor de fibras coladas em pente e soltas do tipo 80/60 e 65/35.

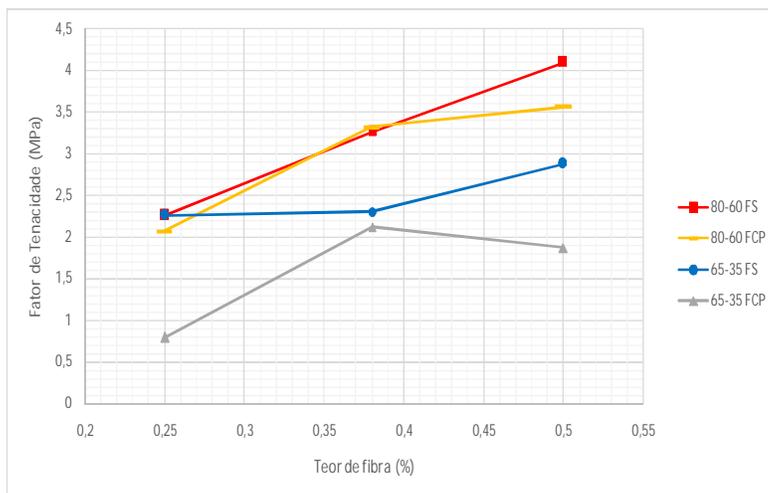


Figura 4.11 - Fator de tenacidade médio versus teor de fibras coladas em pente e soltas do tipo 80/60 e 65/35.

4.4.3.2. Resistências residuais

Agora serão mostrados os resultados de resistência à flexão, particularmente, de resistências residuais que são determinantes para caracterização do concreto com fibras de aço. Foram obtidos a partir de ensaios de flexão realizados em corpos-de-prova prismáticos, conforme o RILEM (2003). A partir da tabela 4.6 e Anexo S são apresentados os resultados de resistências residuais médios dos corpos-de-prova prismáticos submetidos ao ensaio de flexão pelo RILEM TC 162-TDF (2003). Observa-se de modo geral que à medida que aumenta o teor de fibras também ocorre um aumento das resistências residuais ($f_{r,1}$, $f_{r,2}$, $f_{r,3}$ e $f_{r,4}$). Nota-se que as fibras do tipo 80/60 obtiveram maiores resultados de resistências residuais em relação às fibras do tipo 65/35, tanto fibras coladas em pente como soltas.

Tabela 4.6 – Resultados de resistências residuais

Série	Teor de fibra (%)	Resistências residuais médios (MPa)			
		$f_{r,1}$	$f_{r,2}$	$f_{r,3}$	$f_{r,4}$
CRF - 65/35 - FCP	0,25	1,48	1,07	0,81	0,69
	0,38	2,33	2,54	2,18	2,00
	0,50	2,45	2,34	2,04	2,08
CRF - 80/60 - FCP	0,25	1,87	2,00	2,01	2,01
	0,38	2,56	2,61	2,25	2,17
	0,50	3,11	3,69	3,98	3,90
CRF - 65/35 - FS	0,25	2,00	2,64	2,35	2,13
	0,38	4,07	4,24	4,09	3,74
	0,50	3,41	4,19	4,41	4,18
CRF - 80/60 - FS	0,25	4,22	4,22	3,68	3,62
	0,38	2,61	3,27	3,66	3,73
	0,50	2,71	3,51	4,10	4,13

De acordo com os resultados da análise estatística pela ANOVA, no Anexo V4 e V5, a adição no concreto das fibras provocou diferenças significativas, quando comparadas entre si fibras do tipo 80/60 e 65/35. Verifica-se para as fibras do tipo 80/60 em todos os teores, tanto das coladas em pente como soltas, em relação às fibras do tipo 65/35, em todos os teores, coladas ou soltas, que houve maiores diferenças significativas nos resultados de resistência residuais ($f_{r,3}$), conforme Anexo V5, em comparação aos resultados de ($f_{r,1}$), Anexo 4, embora as duas resistências estejam na fase pós-ruptura. Isto pode ser explicado, tendo em vista que no momento da resistência residual ($f_{r,3}$), o comportamento do compósito, é

essencialmente, conduzido pela atuação das fibras, que deslizam ou rompem com o progressivo aumento da abertura das fissuras.

Percebe-se também que as resistências residuais dos corpos-de-prova com fibras soltas apresentaram maiores resultados do que o alcançado pelas fibras coladas em pente, quando comparadas tanto a fibra do tipo 65/35 como a 80/60 nos seus respectivos teores. Este melhor desempenho das fibras soltas em relação às fibras coladas em pente, bem como das fibras do tipo 80/60 em relação ao tipo 65/35, ocorreu de modo assintótico para o comportamento dos tubos com fibras.

Observou-se que durante a realização dos ensaios houve um maior número e distribuição das fibras no estado solta ao longo do plano de fratura. A propagação da abertura da fissura era dificultada pelas fibras do tipo 80/60, que resistiam até ocorrer seu rompimento. Enquanto que ocorria um deslizamento das fibras do tipo 65/35 durante a abertura das fissuras.

4.4.3.3. Curvas Carga *versus* deslocamentos

A partir dos anexos T e U, observa-se que:

Todos os teores dos corpos-de-prova com fibras coladas em pente do tipo 65/35, e nos teores de 0,25% e 0,38% tanto das fibras do tipo 80/60 coladas em pente como das fibras do tipo 65/35 soltas, apresentaram um comportamento em que a resistência residual, $f_{r,1}$, obteve maiores resultados em relação a $f_{r,4}$. Esse comportamento na fase de pós-fissuração tem denominação de *slip-softening*. Segundo Salvador (2013), isto pode ocorrer devido ao seu alto módulo de elasticidade e pelo baixo grau de dano da fibra na matriz, deixando a fibra ainda intensamente ancorada, o que confere maior resistência residual para níveis de menores deslocamentos.

No entanto para níveis maiores de deslocamentos ocorre um maior grau de deslizamento da fibra, e sua resistência ao arrancamento fica condicionada a integridade da matriz de concreto, onde pode haver falhas na região de ancoragem da interface fibra-matriz. Essas falhas podem ocorrer por micro fissurações da matriz nas regiões ao redor das fibras à medida que há uma interceptação da propagação da fissura na matriz pelas fibras (SALVADOR, 2013).

Segundo Bentur e Mindess (2007), as fibras de aço comumente apresentam um comportamento de *slip-softening*, devido à quebra da ligação de interação fibra-matriz dar-se por atrito na transferência de tensão da matriz para a fibra.

No estudo desenvolvido com fibras de aço com fator de forma de 80 por Poh (2008) nos teores de 30kg/m³, 35 kg/m³, 40kg/m³, e por Lima (2012) nos teores de 20 kg/m³ e 40kg/m³, também foi verificado um comportamento de *slip-softening* e de aumento da resistência residual com acréscimo de teor de fibras. Ainda na pesquisa realizada por Barros et al. (2005) com fibras de aço no fator de forma de 65 para os teores de 25kg/m³ e 35 kg/m³ obteve-se um comportamento também similar ao alcançado nessa pesquisa.

A carga e o deslocamento aumentam de forma linear até atingir o primeiro pico de carga ou limite de proporcionalidade. Pode-se verificar que houve uma instabilidade pós-pico para os corpos-de-prova com fibras do tipo 80/60 e 65/35, coladas em pente e soltas, no teor de 0,25%, sendo tal instabilidade mais incisiva para as fibras soltas do tipo 65/35, quando a região afetada pela instabilidade atingiu 1,5 mm de deslocamento, aproximadamente. Essa área relativa da região de instabilidade pode ter garantido um valor maior para o fator de tenacidade da fibra do tipo 65/35. Embora o concreto com fibras no teor de 0,25% tenha apresentado instabilidade pós-pico, no entanto apresentou um comportamento pós-fissuração melhor em relação ao concreto simples, de referência.

A instabilidade dar-se com uma redução abrupta do carregamento e elevação de níveis de deslocamento após a ruptura da matriz, que poderá ocorrer em decorrência das fibras não suportarem a transferência de tensões após a ruptura da matriz de concreto, ocasionadas pelo aumento de resistência mecânica da matriz ou baixo teor de fibras, ou ainda de baixa rigidez que provoca um deslocamento rápido do corpo-de-prova e conseqüentemente do LVDT com rompimento da matriz (FIGUEIREDO, 2011). Depois da carga de pico, a carga começa a cair com um aumento progressivo do deslocamento. A queda de carga representa o aparecimento de fissuras, devido à falha na matriz (MOHAMED, 2014).

Pode-se dizer que no intervalo de deslocamento de 0,00 mm a 0,05 mm constata-se um regime elástico sem interferências das fibras, independente dos teores utilizados. Esse comportamento já havia sido constatado por Figueiredo et al. (2012).

Verifica-se um comportamento de *slip-hardening*, apesar de não ser muito peculiar das fibras de aço com baixos teores, no entanto ocorreu para os corpos-de-prova nos teores de 0,50% das fibras coladas em pente do tipo 80/60 e das fibras soltas do tipo 65/35, bem como nos teores de 0,38% e 0,50% das fibras soltas do tipo 80/60, quando a resistência residual $f_{r,1}$ foi inferior a atingida pelo $f_{r,4}$. Esse comportamento ocorre devido ao desfibrilamento das fibras, que tende a aumentar a capacidade resistente pós-fissuração à medida que aumenta o deslocamento (R MONTE et al., 2014).

O comportamento de *slip-hardening* foi também verificado no estudo de Pujadas et al. (2012) e Moraes Neto (2013) para fibras de aço com fator de forma de 80 nos teores de 20 kg/m³ e 40kg/m³. Assim como também por Lourenço (2012) e Gomes (2013) para fibras com fator de 65 nos teores 20 kg/m³, 30 kg/m³ e 45kg/m³, e nos teores de 15 kg/m³ e 30 kg/m³, respectivamente.

Os resultados de resistência residuais também são importantes para a compreensão do comportamento dos tubos de concreto com fibras. Os melhores resultados de desempenho mecânico dos tubos ocorreram quando foi utilizado concreto com fibras do tipo 80/60 coladas nos teores de 0,38% e 0,50% e com fibras soltas em todos os teores analisados. Na análise realizada pela ANOVA, tanto $f_{r,1}$ como $f_{r,3}$, apontaram que houve diferença não significativa entre si dos teores de fibras, quando analisadas somente coladas ou somente soltas. Deste modo poderia ser utilizado concreto com fibras coladas no teor de 0,25%, como também concreto com fibras soltas no teor de 0,25%, visando minorar o consumo de fibras e custo do compósito.

Em todos os corpos-de-prova submetidos ao ensaio de flexão constatou-se que as fissuras surgiram no bordo inferior da amostra e propagaram-se na direção do bordo superior da mesma. À medida que se aumentou o teor de fibras houve uma redução da velocidade do deslocamento vertical e o tempo de abertura de fissuras das amostras.

4.4.4. Resistência à compressão modificada

Analisando os resultados de compressão modificada realizados nos corpos-de-prova prismáticos submetidos ao ensaio de flexão pela JSCE SF-4 (1984).

Observa-se diante dos resultados da análise estatística realizada pela ANOVA, no Anexo V6, que a adição das fibras no concreto provocou diferenças significativas, no caso, ocorreu para as fibras do tipo 65/35 soltas nos teores de 0,25% e 0,50% e do tipo 80/60 soltas e coladas em pente nos teores de 0,25% e 0,50%. Enquanto que as fibras do tipo 80/60 ou 65/35, coladas ou soltas, quando comparadas entre si para o mesmo teor, seja 0,25% ou 0,50%, apresentaram diferenças não significativas. Isto pode expressar que a resistência a compressão modificada aqui referida, com o teor de fibras constante, não sofreu influência nos resultados do tipo e estado das fibras.

Este comportamento não foi observado nos resultados da análise realizada pela ANOVA para resistência à compressão axial, no Anexo V6. Embora os corpos-de-prova tenham a mesma dosagem, tipos de agregados, condições de cura, forma de aplicação de carga e idade de ruptura do concreto. Tal comportamento pode ter sido diferente entre si, visto que foram moldados corpos-de-prova com geometria e dimensão distintos, já que foram corpos-de-prova cilíndricos e prismáticos, respectivamente, para os ensaios de compressão axial e modificados.

A distinção entre os resultados da resistência à compressão axial e modificada pode ter sido influenciada pela menor dificuldade de compactação e adensamento do concreto com fibras nos corpos-de-prova prismáticos, haja visto que possuem maiores dimensões, apesar de ter sido mantida a mesma frequência de vibração para corpos-de-prova cilíndricos e prismáticos. Desta maneira a forma e a dimensão do corpo-de-prova podem ser fatores que influenciam nos resultados de resistência à compressão.

De acordo com a tabela 4.7 observa-se que a adição no concreto das fibras soltas ou coladas do tipo 80/60 ou 65/35 no teor de 0,25% acarreta uma tendência de maior resistência à compressão modificada, enquanto que no teor de 0,50% ocorre uma tendência de menor resistência à compressão modificada. A resistência do concreto com fibras em relação ao concreto sem fibras teve um acréscimo máximo de 15% para as fibras coladas do tipo 80/60 no teor de 0,25% e uma redução máxima de 15,3% para as fibras soltas do tipo 80/60 no teor de 0,50%. As figuras 4.12 e 4.13 mostram resultados das fibras soltas do tipo 65/35 e do tipo 80/60 coladas e soltas, ambas nos teores de 0,25% e 0,50%, após análise realizada pela ANOVA.

Tabela 4.7 - Ensaio de compressão modificada JSCE.

Série	Amostra	Compressão	Compressão modificada		Coef. de variação
		modificada (MPa)	Médio (MPa)	Desvio padrão (MPa)	(%)
JSCE	1	38,7	37,8	1,1	2,86
	2	36,6			
	3	38,1			
CRF - 65/35 - 0,25% - FCP	1	39,7	40,0	0,3	0,75
	2	40,0			
	3	40,3			
CRF - 65/35 - 0,38% - FCP	1	43,0	39,5	5,5	13,89
	2	33,2			
	3	42,4			
CRF - 65/35 - 0,50% - FCP	1	34,6	34,4	0,2	0,44
	2	34,3			
	3	34,4			
CRF - 80/60 - 0,25% - FCP	1	40,8	43,4	1,7	3,92
	2	43,3			
	3	46,2			
CRF - 80/60 - 0,38% - FCP	1	42,0	42,5	1,0	2,24
	2	41,9			
	3	43,6			
CRF - 80/60 - 0,50% - FCP	1	38,7	38,6	2,7	7,00
	2	40,3			
	3	36,9			
CRF - 65/35 - 0,25% - FS	1	43,0	42,7	1,3	3,12
	2	43,8			
	3	41,2			
CRF - 65/35 - 0,38% - FS	1	39,0	40,1	1,2	3,05
	2	39,8			
	3	41,4			
CRF - 65/35 - 0,50% - FS	1	28,0	32,3	3,7	11,56
	2	34,2			
	3	34,7			
CRF - 80/60 - 0,25% - FS	1	39,8	40,6	1,3	3,14
	2	42,1			
	3	40,0			
CRF - 80/60 - 0,38% - FS	1	39,5	39,1	0,6	1,41

	2	39,4			
	3	38,5			
CRF - 80/60 - 0,50% - FS	1	31,8	32,0	1,5	4,72
	2	33,6			
	3	30,6			

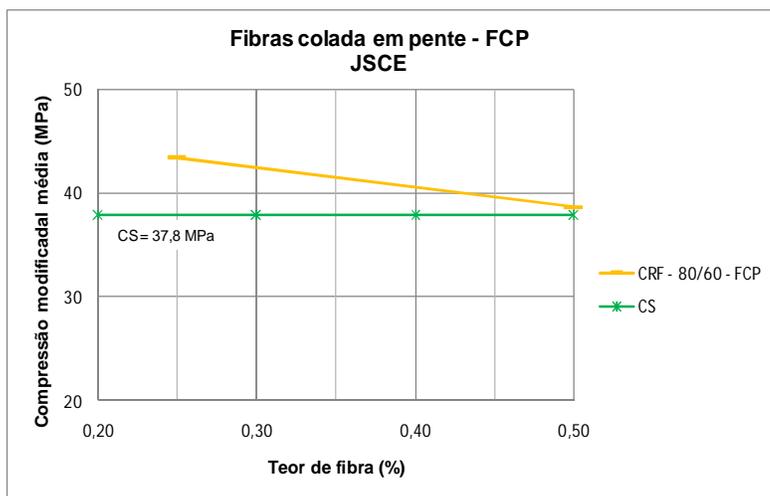


Figura 4.12 - Compressão modificada média (JSCE) versus teor de fibras coladas em pente, após análise pela ANOVA.

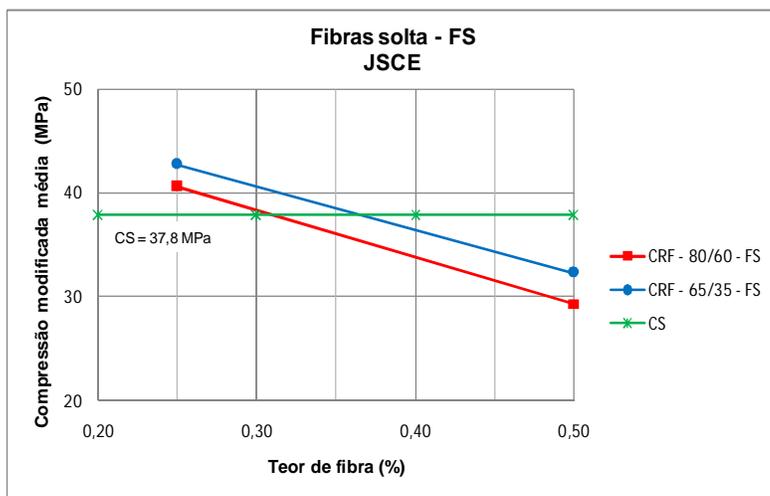


Figura 4.13 - Compressão modificada média (JSCE) versus teor de fibras soltas, após análise pela ANOVA.

Analisando os resultados de compressão modificada realizados nos corpos-de-prova prismáticos submetidos ao ensaio de flexão pelo RILEM (2003). Verificou-se nos resultados da análise estatística realizada pela ANOVA, no Anexo V7, que a

adição das fibras no concreto provocou diferenças significativas, no caso, ocorrendo para as fibras do tipo 65/35 soltas nos teores de 0,25% e do tipo 80/60 soltas e coladas em pente nos teores de 0,25% e 0,50%. Enquanto que as fibras do tipo 80/60 ou 65/35, coladas ou soltas, quando comparadas entre si para o mesmo teor, seja 0,25% ou 0,50%, apresentaram diferenças não significativas, com exceção para as fibras do tipo 80/60 no teor de 0,50% que apresentaram diferenças significativas, quando comparadas entre si coladas e soltas. Isto pode expressar que a resistência a compressão modificada aqui referida, com o teor de fibras constante, não sofreu influência nos resultados do tipo e estado das fibras.

Este comportamento não foi observado nos resultados da análise realizada pela ANOVA para resistência à compressão axial, no Anexo V7. Embora os corpos-de-prova tenham a mesma dosagem, tipos de agregados, condições de cura, forma de aplicação de carga e idade de ruptura do concreto. Tal comportamento pode ter sido diferente entre si, visto que foram moldados corpos-de-prova com geometria e dimensão distintos, já que foram corpos-de-prova cilíndricos e prismáticos, respectivamente, para os ensaios de compressão axial e modificados.

A distinção entre os resultados da resistência à compressão axial e modificada pode ter sido influenciada pela menor dificuldade de compactação e adensamento do concreto com fibras nos corpos-de-prova prismáticos, haja visto que possuem maiores dimensões, apesar de ter sido mantida a mesma frequência de vibração para corpos-de-prova cilíndricos e prismáticos. Desta maneira a forma e a dimensão do corpo-de-prova podem ser fatores que influenciam nos resultados de resistência à compressão.

O comportamento aqui apresentado ocorreu de modo semelhante para resistência à compressão modificada dos corpos-de-prova oriundos do ensaio de flexão pela JSCE.

De acordo com a tabela 4.8 observa-se que a adição no concreto das fibras soltas ou coladas do tipo 80/60 ou 65/35 no teor de 0,25% acarreta uma tendência de maior resistência à compressão modificada, enquanto que no teor de 0,50% ocorre uma tendência de menor resistência à compressão modificada. A resistência do concreto com fibras em relação ao concreto sem fibras teve um acréscimo máximo de 18,6% para as fibras coladas ou soltas do tipo 80/60 no teor de 0,25% e uma redução máxima de 12,3% para as fibras soltas do tipo 80/60 no teor de 0,50%.

As figuras 4.14 e 4.15 mostram resultados das fibras soltas do tipo 65/35 no teor de 0,25% e do tipo 80/60 coladas e soltas nos teores de 0,25% e 0,50%, após a análise realizada pela ANOVA.

Tabela 4.8 - Ensaio de compressão modificada realizado nos corpos-de-prova prismáticos submetidos ao ensaio do RILEM.

Série RILEM	Amostra	Compressão modificada (MPa)	Compressão modificada		Coef. de variação (%)
			Médio (MPa)	Desvio padrão (MPa)	
CS	1	36,3	35,0	1,2	3,30
	2	34,1			
	3	34,6			
CRF - 65/35 - 0,25% - FCP	1	39,5	39,4	1,0	2,42
	2	40,3			
	3	38,4			
CRF - 65/35 - 0,38% - FCP	1	43,0	39,5	5,5	13,89
	2	33,2			
	3	42,4			
CRF - 65/35 - 0,50% - FCP	1	34,6	33,6	1,5	4,40
	2	34,3			
	3	31,9			
CRF - 80/60 - 0,25% - FCP	1	39,4	41,5	1,6	3,93
	2	42,9			
	3	42,2			
CRF - 80/60 - 0,38% - FCP	1	37,9	40,9	2,9	7,00
	2	41,2			
	3	43,6			
CRF - 80/60 - 0,50% - FCP	1	40,2	38,3	1,9	4,83
	2	37,2			
	3	37,6			
CRF - 65/35 - 0,25% - FS	1	39,6	40,6	0,9	2,24
	2	40,7			
	3	41,4			
CRF - 65/35 - 0,38% - FS	1	43,0	39,0	4,1	10,39
	2	39,0			
	3	34,9			
CRF - 65/35 - 0,50% - FS	1	31,2	35,5	3,7	10,50
	2	37,5			

	3	37,8			
CRF - 80/60 - 0,25% - FS	1	39,6	41,5	4,1	9,87
	2	46,2			
	3	38,7			
CRF - 80/60 - 0,38% - FS	1	38,6	36,3	2,3	6,34
	2	34,0			
	3	36,2			
CRF - 80/60 - 0,50% - FS	1	29,0	30,7	2,0	6,51
	2	32,9			
	3	30,2			

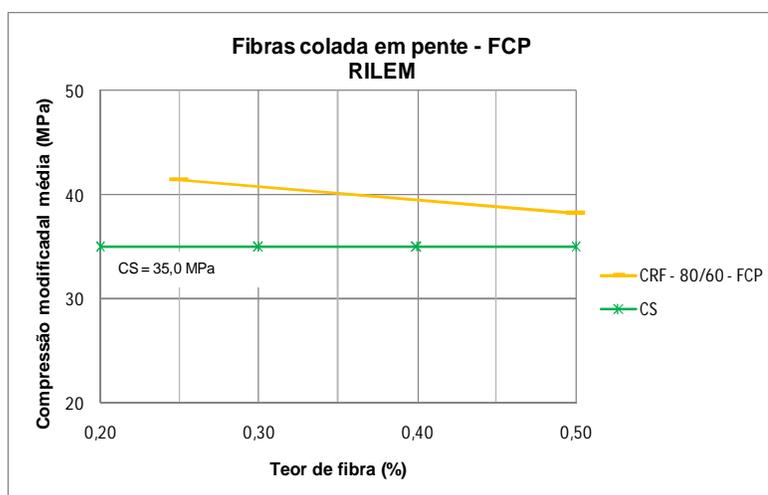


Figura 4.14 - Compressão modificada média (RILEM) versus teor de fibras coladas em pente, após análise pela ANOVA.

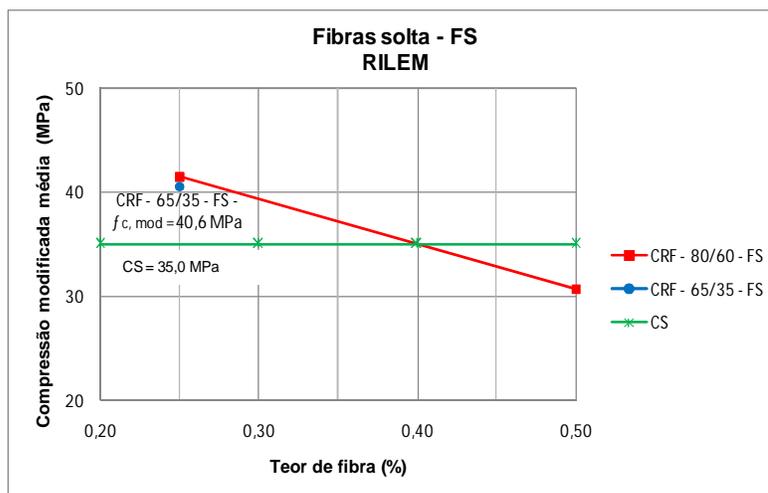


Figura 4.15 - Compressão modificada média (RILEM) versus teor de fibras soltas, após análise pela ANOVA.

4.4.5. Absorção de água nos tubos de concreto

As tabelas de 4.9 até 4.22 apresentam os resultados de absorção de água obtidos no ensaio da Norma NBR 8890 (2007).

Tabela 4.9 - Concreto simples – de referência

ABSORÇÃO (%)					
Série	Amostra	Ponta (%)	Bolsa (%)	Média (%)	Média Final (%)
CS	FE - B	4,08	5,41	4,75	4,48
	C - FE	4,08	4,35	4,22	
CS-média		4,08	4,88		

Tabela 4.10 - Concreto armado

ABSORÇÃO (%)						
Série	Amostra	Ponta (%)	Meio (%)	Bolsa (%)	Média (%)	Média Final (%)
CA	FE - B	4,29	5,00	5,60	4,96	4,77
	C - FE	3,66	4,65	5,42	4,58	
CA-média		3,98	4,82	5,51		

Tabela 4.11 - Concreto com fibras coladas em pente do tipo 65/35 no teor de 0,25%.

ABSORÇÃO (%)						
Série	Amostra	Ponta (%)	Meio (%)	Bolsa (%)	Média (%)	Média Final (%)
CRF 65/35 - 0,25% - FCP	FE - B	4,17	4,19	5,00	4,45	4,14
	C - FE	3,30	3,43	4,75	3,83	
CRF- média		3,73	3,81	4,88		

Tabela 4.12 - Concreto com fibras coladas em pente do tipo 80/60 no teor de 0,25%.

ABSORÇÃO (%)						
Série	Amostra	Ponta (%)	Meio (%)	Bolsa (%)	Média (%)	Média Final (%)
CRF 80/60 - 0,25% - FCP	FE - B	3,56	4,93	5,56	4,68	5,11
	C - FE	4,60	5,63	6,39	5,54	
CRF- média		4,08	5,28	5,98		

Tabela 4.13 - Concreto com fibras coladas em pente do tipo 65/35 no teor de 0,38%.

ABSORÇÃO (%)						
Série	Amostra	Ponta (%)	Meio (%)	Bolsa (%)	Média (%)	Média Final (%)
CRF 65/35 - 0,38% - FCP	FE - B	3,02	3,33	5,21	3,85	3,49
	C - FE	2,76	3,27	3,35	3,13	
CRF-média		2,89	3,30	4,28		

Tabela 4.14 - Concreto com fibras coladas em pente do tipo 80/60 no teor de 0,38%.

ABSORÇÃO (%)						
Série	Amostra	Ponta (%)	Meio (%)	Bolsa (%)	Média (%)	Média Final (%)
CRF 80/60 - 0,38% - FCP	FE - B	2,75	3,04	4,41	3,40	3,43
	C - FE	2,99	3,59	3,81	3,46	
CRF-média		2,87	3,32	4,11		

Tabela 4.15 - Concreto com fibras coladas em pente do tipo 65/35 no teor de 0,50%.

ABSORÇÃO (%)						
Série	Amostra	Ponta (%)	Meio (%)	Bolsa (%)	Média (%)	Média Final (%)
CRF 65/35 - 0,50% - FCP	FE - B	3,56	3,55	3,96	3,69	3,78
	C - FE	3,42	3,97	4,23	3,87	
CRF-média		3,49	3,76	4,10		

Tabela 4.16 - Concreto com fibras coladas em pente do tipo 80/60 no teor de 0,50%.

ABSORÇÃO (%)						
Série	Amostra	Ponta (%)	Meio (%)	Bolsa (%)	Média (%)	Média Final (%)
CRF 80/60 - 0,50% - FCP	FE - B	3,24	3,67	5,15	4,02	3,66
	C - FE	2,39	3,33	4,19	3,30	
CRF-média		2,81	3,50	4,67		

Tabela 4.17 - Concreto com fibras soltas do tipo 65/35 no teor de 0,25%.

ABSORÇÃO (%)						
Série	Amostra	Ponta (%)	Meio (%)	Bolsa (%)	Média (%)	Média Final (%)
CRF 65/35 - 0,25% - FS	FE - B	4,02	4,32	4,96	4,43	4,49
	C - FE	4,33	4,39	4,94	4,55	
CRF- média		4,18	4,35	4,95		

Tabela 4.18 - Concreto com fibras soltas do tipo 80/60 no teor de 0,25%.

ABSORÇÃO (%)						
Série	Amostra	Ponta (%)	Meio (%)	Bolsa (%)	Média (%)	Média Final (%)
CRF 80/60 - 0,25% - FS	FE - B	3,76	4,38	4,41	4,18	4,09
	C - FE	3,60	4,15	4,26	4,00	
CRF- média		3,68	4,27	4,34		

Tabela 4.19 - Concreto com fibras soltas do tipo 65/35 no teor de 0,38%.

ABSORÇÃO(%)						
Série	Amostra	Ponta (%)	Meio (%)	Bolsa (%)	Média (%)	Média Final (%)
CRF 65/35 - 0,38% - FS	FE - B	3,85	3,97	4,22	4,01	3,67
	C - FE	2,96	3,39	3,66	3,34	
CRF- média		3,41	3,68	3,94		

Tabela 4.20 - Concreto com fibras soltas do tipo 80/60 no teor de 0,38%.

CRF 80/60 - 0,38% - FS						
Série	Amostra	Ponta (%)	Meio (%)	Bolsa (%)	Média (%)	Média Final (%)
CRF 80/60 - 0,38% - FS	FE - B	3,44	3,60	4,35	3,80	4,07
	C - FE	4,28	4,37	4,38	4,34	
CRF- média		3,86	3,99	4,37		

Tabela 4.21 - Concreto com fibras soltas do tipo 65/35 no teor de 0,50%.

ABSORÇÃO (%)						
Série	Amostra	Ponta (%)	Meio (%)	Bolsa (%)	Média (%)	Média Final (%)
CRF 65/35 - 0,50% - FS	FE - B	3,84	4,33	4,83	4,33	4,01
	C - FE	2,91	3,95	4,21	3,69	
CRF-média		3,38	4,14	4,52		

Tabela 4.22 - Concreto com fibras soltas do tipo 80/60 no teor de 0,50%.

ABSORÇÃO (%)						
Série	Amostra	Ponta (%)	Meio (%)	Bolsa (%)	Média (%)	Média Final (%)
CRF 80/60 - 0,50% - FS	FE - B	4,16	4,46	4,75	4,46	4,61
	C - FE	4,56	4,76	4,97	4,76	
CRF-média		4,36	4,61	4,86		

*CRF: Concreto reforçado com fibras de aço

*FCP: Fibras colada em pente

*FS: Fibras soltas

*FE – B: Amostras ou corpos-de-provas retiradas da parede do tubo na faixa correspondente a região do flanco esquerdo e base

*C – FE: Amostras ou corpos-de-prova retirada da parede do tubo na faixa correspondente a região da coroa flanco esquerdo e base

Mediante os resultados obtidos no ensaio de absorção de água dos corpos-de-prova extraídos da parede do tubo de concreto, sendo duas faixas de cada tubo, uma próxima a coroa e flanco esquerdo e outra entre o flanco esquerdo e base, em que cada faixa foram retirados corpos-de-prova da ponta, meio e bolsa, torna-se possível dizer que todas as médias finais ficaram abaixo do preconizado pela norma NBR 8890 (ABNT, 2007), que determina absorção máxima de 8% para tubos de concreto destinados a águas pluviais. Ficaram também abaixo do limite máximo estabelecido para tubos de redes de esgotos, que determina absorção máxima de 6%.

Em todas as médias finais pode-se observar que as absorções tiveram seus valores entre 3,43% e 5,11% para os tubos de concreto simples, armado e com fibras do tipo 80/60 e 65/35 no estado coladas em pente e soltas.

No estudo realizado Fugii (2008) foi verificado uma variação do índice de absorção média de água na faixa de 3% a 3,8% para todos os tubos de concreto simples, armado e com fibras de aço do tipo 80/60 colada em pente.

No estudo desenvolvido por Escariz (2012) obteve uma variação dos resultados de absorção de água na faixa de 3,4% a 5,8% para tubos de concreto simples e com fibras de aço soltas do tipo 67/50, curtas coladas em pente do tipo 65/35 e longas coladas em pente do tipo 80/60.

De maneira geral observa-se que os tubos com fibras tiveram menores índices de absorção em relação aos tubos de concreto sem fibras ou dos tubos de concreto armado. É importante enfatizar esse desempenho porque o equipamento para fabricação dos tubos da pesquisa não é dos mais recomendados para utilização de tubos com fibras de aço longas, por ser apenas um conjunto vibratório radial e apresentar dificuldade de adensamento com surgimento de ouriços de fibras, aumentando porosidade. Esse comportamento dos resultados próximos de absorção entre tubos com fibras e sem fibras foi verificado no estudo realizado por Fugii (2008).

É possível notar que para todos os tubos houve um aumento dos índices de absorção de água na seqüência da ponta, meio e bolsa. Sendo, portanto como esperado tendo maior absorção na bolsa dos tubos, isto ocorre pela vibração do equipamento não proporcionar adensamento homogêneo.

De maneira geral verifica-se que ocorre um aumento da absorção à medida que há um aumento do teor de fibra, tanto para colada em pente e soltas, e do tipo 80/60 e 65/35, ocasionado devido às fibras proporcionarem maior dificuldade de coesão e adensamento do concreto. Tal comportamento foi obtido por Escariz (2012) para as fibras soltas do tipo 67/50 e para as fibras coladas em pente do tipo 80/60.

Quando comparadas entre si, as fibras coladas em pente e soltas seja tipo 80/60 ou 65/35, constata-se que as fibras soltas apresentaram maiores índices de absorção, isto pode ter ocorrido por ter havido maior distribuição das fibras soltas no tubo como foi verificado nos resultados de teor efetivo de fibras. Embora no estudo de Escariz (2012) tenham sido utilizadas fibras soltas do tipo 67/50, no entanto também se observou maiores índices de absorção das fibras soltas em relação as fibras coladas em pentes do tipo 65/35 e 80/60.

Observa-se que a fibra do tipo 80/60 obteve menores índices de absorção em relação ao tipo 65/35, tanto para coladas em pente como soltas. Esse comportamento também ocorreu no estudo de Escariz (2012) em que as fibras coladas em pentes do tipo 80/60 apresentaram menor absorção em relação ao tipo 65/35 colada em pente. Tal comportamento pode ter sido em decorrência das fibras do tipo 80/60 possuir menor número de fibras por metro cúbico em comparação ao tipo 65/35.

4.4.6. Verificação do teor efetivo de fibras nos tubos de concreto

As tabelas de 4.23 até 4.34 apresentam os resultados de teor efetivo de fibras obtido pelo método proposto por Kalil; Escariz; Figueiredo.

Tabela 4.23 - Concreto com fibras coladas em pente do tipo 65/35 no teor de 0,25%.

		Ponta			Meio			Bolsa			TEOR REAL	
		Mf (g)	Vf (cm ³)	Tef (kg/m ³)	Mf (g)	Vf (cm ³)	Tef (kg/m ³)	Mf (g)	Vf (cm ³)	Tef (kg/m ³)	MÉDIA (kg/m ³)	MÉDIA FINAL (kg/m ³)
FIBRA COLADA EM PENTE - FCP	CRF 65/35 - 0,25% - FCP -FE-B	5,4	400,6	13,5	6,7	432,0	15,5	9,5	510,5	18,6	15,9	17,5
	CRF 65/35 - 0,25% - FCP -C-FE	6,1	432,0	14,1	8,6	424,1	20,3	11,7	510,5	22,9	19,1	

Tabela 4.24 - Concreto com fibras coladas em pente do tipo 80/60 no teor de 0,25%.

		Ponta			Meio			Bolsa			TEOR REAL	
		Mf (g)	Vf (cm ³)	Tef (kg/m ³)	Mf (g)	Vf (cm ³)	Tef (kg/m ³)	Mf (g)	Vf (cm ³)	Tef (kg/m ³)	MÉDIA (kg/m ³)	MÉDIA FINAL (kg/m ³)
FIBRA COLADA EM PENTE - FCP	CRF 80/60 - 0,25% - FCP -FE-B	5,6	471,2	11,9	8,4	455,5	18,4	11,4	510,5	22,3	17,6	17,6
	CRF 80/60 - 0,25% - FCP -C-FE	6,7	408,4	16,4	7,6	424,1	17,9	9,6	513,7	18,7	17,7	

Tabela 4.25 - Concreto com fibras coladas em pente do tipo 65/35 no teor de 0,38%.

		Ponta			Meio			Bolsa			TEOR REAL	
		Mf (g)	Vf (cm ³)	Tef (kg/m ³)	Mf (g)	Vf (cm ³)	Tef (kg/m ³)	Mf (g)	Vf (cm ³)	Tef (kg/m ³)	MÉDIA (kg/m ³)	MÉDIA FINAL (kg/m ³)
FIBRA COLADA EM PENTE - FCP	CRF 65/35 - 0,38% - FCP - FE-B	9,1	455,5	20,0	13,4	486,9	27,5	16,5	510,5	32,3	26,6	27,4
	CRF 65/35 - 0,38% - FCP - C-FE	9,2	432,0	21,3	14,6	471,2	31,0	16,4	510,5	32,1	28,1	

Tabela 4.26 - Concreto com fibras coladas em pente do tipo 80/60 no teor de 0,38%.

		Ponta			Meio			Bolsa			TEOR REAL	
		Mf (g)	Vf (cm ³)	Tef (kg/m ³)	Mf (g)	Vf (cm ³)	Tef (kg/m ³)	Mf (g)	Vf (cm ³)	Tef (kg/m ³)	MÉDIA (kg/m ³)	MÉDIA FINAL (kg/m ³)
FIBRA COLADA EM PENTE - FCP	CRF 80/60 - 0,38% - FCP - FE-B	10,4	463,4	22,4	10,8	479,1	22,5	14,8	510,5	29,0	24,7	27,0
	CRF 80/60 - 0,38% - FCP - C-FE	12,4	471,2	26,3	14,7	486,9	30,2	16,2	510,5	31,7	29,4	

Tabela 4.27 - Concreto com fibras coladas em pente do tipo 65/35 no teor de 0,50%.

		Ponta			Meio			Bolsa			TEOR REAL	
		Mf (g)	Vf (cm ³)	Tef (kg/m ³)	Mf (g)	Vf (cm ³)	Tef (kg/m ³)	Mf (g)	Vf (cm ³)	Tef (kg/m ³)	MÉDIA (kg/m ³)	MÉDIA FINAL (kg/m ³)
FIBRA COLADA EM PENTE - FCP	CRF 65/35 - 0,50% - FCP - FE-B	13,7	455,5	30,1	19,4	471,2	35,3	18,0	510,5	41,2	35,5	38,3
	CRF 65/35 - 0,50% - FCP - C-FE	14,5	408,4	35,5	20,3	432,0	47,0	20,8	510,5	40,7	41,1	

Tabela 4.28 - Concreto com fibras coladas em pente do tipo 80/60 no teor de 0,50%.

		Ponta			Meio			Bolsa			TEOR REAL	
		Mf (g)	Vf (cm ³)	Tef (kg/m ³)	Mf (g)	Vf (cm ³)	Tef (kg/m ³)	Mf (g)	Vf (cm ³)	Tef (kg/m ³)	MÉDIA (kg/m ³)	MÉDIA FINAL (kg/m ³)
FIBRA COLADA EM PENTE - FCP	CRF 80/60 - 0,50% - FCP - FE-B	12,4	400,6	31,0	16,0	432,0	37,0	21,4	510,5	41,9	36,6	37,8
	CRF 80/60 - 0,50% - FCP - C-FE	13,5	416,3	32,4	16,6	432,0	38,4	23,4	510,5	45,8	38,9	

Tabela 4.29 - Concreto com fibras soltas do tipo 65/35 no teor de 0,25%.

		Ponta			Meio			Bolsa			TEOR REAL	
		Mf (g)	Vf (cm³)	Tef (kg/m³)	Mf (g)	Vf (cm³)	Tef (kg/m³)	Mf (g)	Vf (cm³)	Tef (kg/m³)	MÉDIA (kg/m³)	MÉDIA FINAL (kg/m³)
FIBRA SOLTA - FS	CRF 65/35 - 0,25% - FS - FE-B	7,8	432,0	18,1	8,2	432,0	19,0	11,2	510,5	21,9	19,6	18,7
	CRF 65/35 - 0,25% - FS - C-FE	6,8	432,0	15,7	7,6	424,1	17,9	10,1	510,5	19,8	17,8	

Tabela 4.30 - Concreto com fibras soltas do tipo 80/60 no teor de 0,25%.

		Ponta			Meio			Bolsa			TEOR REAL	
		Mf (g)	Vf (cm³)	Tef (kg/m³)	Mf (g)	Vf (cm³)	Tef (kg/m³)	Mf (g)	Vf (cm³)	Tef (kg/m³)	MÉDIA (kg/m³)	MÉDIA FINAL (kg/m³)
FIBRA SOLTA - FS	CRF 80/60 - 0,25% - FS - FE-B	7,1	471,2	15,0	9,2	455,5	20,2	11,0	510,5	21,5	18,9	18,8
	CRF 80/60 - 0,25% - FS - C-FE	7,1	408,4	17,4	7,6	424,1	18,0	10,6	510,5	20,8	18,7	

Tabela 4.31 - Concreto com fibras soltas do tipo 65/35 no teor de 0,38%.

		Ponta			Meio			Bolsa			TEOR REAL	
		Mf (g)	Vf (cm³)	Tef (kg/m³)	Mf (g)	Vf (cm³)	Tef (kg/m³)	Mf (g)	Vf (cm³)	Tef (kg/m³)	MÉDIA (kg/m³)	MÉDIA FINAL (kg/m³)
FIBRA SOLTA - FS	CRF 65/35 - 0,38% - FS - FE-B	10,8	447,7	24,1	12,8	486,9	26,3	14,6	510,5	28,6	26,3	28,6
	CRF 65/35 - 0,38% - FS - C-FE	12,5	447,7	27,9	14,4	494,8	29,1	18,1	510,5	35,5	30,8	

Tabela 4.32 - Concreto com fibras soltas do tipo 80/60 no teor de 0,38%.

		Ponta			Meio			Bolsa			TEOR REAL	
		Mf (g)	Vf (cm³)	Tef (kg/m³)	Mf (g)	Vf (cm³)	Tef (kg/m³)	Mf (g)	Vf (cm³)	Tef (kg/m³)	MÉDIA (kg/m³)	MÉDIA FINAL (kg/m³)
FIBRA SOLTA - FS	CRF 80/60 - 0,38% - FS - FE-B	12,2	439,8	27,7	14,6	510,5	28,6	16,3	510,5	31,9	29,4	28,5
	CRF 80/60 - 0,38% - FS - C-FE	11,6	455,5	25,5	13,3	494,8	26,9	15,5	510,5	30,4	27,6	

Tabela 4.33 - Concreto com fibras soltas do tipo 65/35 no teor de 0,50%.

		Ponta			Meio			Bolsa			TEOR REAL	
		Mf (g)	Vf (cm ³)	Tef (kg/m ³)	Mf (g)	Vf (cm ³)	Tef (kg/m ³)	Mf (g)	Vf (cm ³)	Tef (kg/m ³)	MÉDIA (kg/m ³)	MÉDIA FINAL (kg/m ³)
FIBRA SOLTA - FS	CRF 65/35 - 0,50% - FS - FE-B	17,3	455,5	38,0	18,3	471,2	38,8	20,5	510,5	40,2	39,0	38,8
	CRF 65/35 - 0,50% - FS - C-FE	18,5	494,8	37,4	19,2	502,7	38,2	20,4	510,5	40,0	38,5	

Tabela 4.34 - Concreto com fibras soltas do tipo 80/60 no teor de 0,50%.

		Ponta			Meio			Bolsa			TEOR REAL	
		Mf (g)	Vf (cm ³)	Tef (kg/m ³)	Mf (g)	Vf (cm ³)	Tef (kg/m ³)	Mf (g)	Vf (cm ³)	Tef (kg/m ³)	MÉDIA (kg/m ³)	MÉDIA FINAL (kg/m ³)
FIBRA SOLTA - FS	CRF 80/60 - 0,50% - FS - FE-B	15,3	400,6	38,2	17,1	432,0	39,6	20,4	510,5	40,0	39,2	39,0
	CRF 80/60 - 0,50% - FS - C-FE	15,8	416,3	38,0	16,8	432,0	38,9	20,1	510,5	39,4	38,7	

*CRF: Concreto reforçado com fibras de aço

*FCP: Fibras colada em pente

*FS: Fibras soltas

*FE – B: Amostras ou corpos-de-provas retiradas da parede do tubo na faixa correspondente a região do flanco esquerdo e base

*C – FE: Amostras ou corpos-de-prova retirada da parede do tubo na faixa correspondente a região da coroa flanco esquerdo e base

Para os tipos 80/60 e 65/35 nos teores de 0,25% (20 kg/m³), 0,38% (30 kg/m³) e 0,50% (40 kg/m³), em fração volumétrica e massa, respectivamente, analisando a média final dos resultados de teor efetivo de fibras, pode-se verificar que obtiveram resultados com valores em torno de 90% do teor teórico que foi adicionado na mistura. Isto para todos os corpos-de-prova extraídos da parede do tubo em duas faixas, uma faixa localizada próximo a coroa e flanco esquerdo e a outra no flanco esquerdo e base do tubo, sendo em cada uma dessas faixas analisados a região da ponta, meio e bolsa do tubo. Esse resultado foi muito bom, tendo em vista que o equipamento de produção dos tubos serem apenas um conjunto vibratório radial.

No estudo desenvolvido por Escariz (2012) obteve-se resultados de teor efetivo de fibras em torno de 90% do teor teórico que foi adicionado na mistura, aproximadamente, para as fibras soltas do tipo 67/50 e curtas coladas em pente do tipo 65/35 nos teores de 20 kg/m³, 25 kg/m³ e 35 kg/m³. Para as fibras longas colada

em pente do tipo 80/60 houve um teor real de 25%, 18% e 19% a menor do teor teórico para os teores de 20 kg/m³, 25 kg/m³ e 45 kg/m³.

Em todos os corpos-de-prova analisados foi possível notar que houve um aumento do teor efetivo de fibras na seqüência ponta, meio e bolsa do tubo, deste modo sendo maior na bolsa, isto pela dificuldade de energia de adensamento homogêneo pelo equipamento utilizado na pesquisa. O que explica ter sido obtido também maior absorção de água nos mesmos corpos-de-prova ensaiados.

É possível observar que o corpo-de-prova com fibras soltas apresentou melhor distribuição ao longo do tubo, visto que obteve maiores teores efetivo na média final. Isto pode explicar melhores resultados no comportamento mecânico dos tubos com fibras soltas.

5. CONCLUSÕES

A partir da análise dos resultados obtidos para os tubos de concreto com fibras, pode-se concluir que:

Houve um aumento da carga de ruptura e máxima pós-fissuração dos tubos de concreto com fibras de aço à medida que aumentou o teor de fibras de aço. Em todos os teores de fibras analisados, os tubos com fibras do tipo 80/60 coladas em pente ou soltas apresentaram melhores resultados de carga de ruptura e máxima pós-fissuração em relação aos tubos com fibras do tipo 65/35, coladas ou soltas. Os tubos com fibras do tipo 80/60 e 65/35, quando analisadas entre si o mesmo teor de fibras, houve melhor desempenho dos tubos com fibras soltas em relação aos tubos com fibras coladas, tanto para carga de ruptura como carga máxima pós-fissuração.

Para os tubos com fibras que obtiveram melhores desempenhos, quando comparados aos tubos com fibras do tipo 65/35, analisando entre si coladas ou soltas, houve menores índices de absorção para os tubos com fibras do tipo 80/60 coladas no teor de 0,50% e com fibras soltas no teor de 0,25%. Tal comportamento pode ter ocorrido devido às fibras do tipo 80/60 possuir menor número de fibras por metro cúbico em comparação ao tipo 65/35. Para os tubos com fibras soltas nos teores de 0,38% e 0,50% obtiveram-se maiores índices de absorção. Isto pode ser explicado por ter havido maior distribuição das fibras soltas nos tubos, visto que os tubos com fibras soltas apresentaram maiores resultados de teores efetivos de fibras. Houve a determinação dos índices de absorção na região da ponta, meio e bolsa do tubo. Constatou-se neste estudo que a maior absorção ocorreu nas bolsas dos tubos, devido à vibração do equipamento não proporcionar compactação e adensamento homogêneo. Corroborado pelos maiores resultados de teor efetivo de fibras nas bolsas dos tubos, ou seja, maior presença de fibras nessa região.

Resumindo, houve melhor desempenho dos tubos de concreto com fibras do tipo 80/60, coladas no teor de 0,50%, e com fibras soltas em todos os teores analisados, pois atingiram as mínimas carga de ruptura e máxima pós-fissuração, estabelecidas pela NBR 8890 (ABNT, 2007). Deste modo mostrando-se tecnicamente viáveis quanto à substituição dos tubos de concreto com armadura convencional. É claro que somente válida para tipo de equipamento para produção dos tubos, tipos de tubos, tipos de fibras, teores de fibras e dosagem dos concretos

utilizados nesse estudo. A dosagem do concreto e relação água/cimento foi constante para todos os exemplares e não houve uso de aditivos. Por ventura para dosagem do concreto e relação água/cimento distintos e/ou uso de aditivos, poderia haver melhores resultados de desempenho para os tubos de concreto com fibras soltas e coladas do tipo 65/35 e 80/60. O concreto com fibras foi produzido como o rotineiramente empregado pela empresa para fabricação dos tubos de concreto simples e armado.

Quanto aos ensaios complementares, pode-se dizer que:

Para a resistência à compressão axial, a adição no concreto das fibras de aço, do tipo 80/60 ou 65/35, coladas em pente ou soltas, provocou diferença não significativa, conforme análise estatística realizada pela ANOVA, visto que as fibras de aço não têm finalidade principal de melhorar o desempenho do concreto quando submetido à compressão.

Para a resistência de tração por compressão diametral, a adição no concreto das fibras utilizadas na pesquisa gerou uma tendência de acréscimo de resistência. De acordo com análise realizada pela ANOVA, a adição das fibras do tipo 80/60 coladas e soltas em todos os teores, e do tipo 65/35 soltas nos teores de 0,38% e 0,50%, provocou diferenças significativas.

No fator de tenacidade, a análise realizada pela ANOVA, apontou que a adição no concreto das fibras provocou diferença significativa:

- entre si das fibras do tipo 80/60 e 65/35, pois as fibras do tipo 80/60 coladas em pente nos teores de 0,38% e 0,50% e soltas em todos os teores, apresentaram melhores resultados quando comparadas com as fibras do tipo 65/35, coladas ou soltas em todos os teores;
- das fibras soltas do tipo 80/60 no teor de 0,50% em relação a todos os teores de fibras coladas do mesmo tipo;

Para as fibras soltas do tipo 80/60, quando analisados entre si somente os teores de fibras coladas ou somente teores de fibras soltas, a adição no concreto das fibras provocou diferenças não significativas. Deste modo poderia ser utilizado concreto com fibras coladas no teor de 0,38% e com fibras soltas no teor de 0,25%, visando minorar o consumo de fibras e custo do compósito.

Para as resistências residuais, de acordo com os resultados da análise pela ANOVA, a adição no concreto das fibras provocou diferenças significativas entre si das fibras do tipo 80/60 e 65/35, tendo em vista que as fibras do tipo 80/60 em todos os teores, tanto das coladas em pente como soltas, em relação às fibras do tipo 65/35, em todos os teores, coladas ou soltas, que houve diferenças significativas nos resultados de resistência residuais, $f_{r,1}$ e $f_{r,3}$, sendo as diferenças significativas mais acentuadas as resistência residual $f_{r,3}$, pois esse estágio do comportamento do compósito, é essencialmente, conduzido pela atuação das fibras, que vão deslizando ou rompendo-se, no progressivo aumento da abertura das fissuras.

Na análise realizada pela ANOVA, tanto $f_{r,1}$ como $f_{r,3}$, apontaram que houve diferença não significativa entre si dos teores de fibras, quando analisadas somente coladas ou somente soltas. Deste modo poderia ser utilizado concreto com fibras coladas no teor de 0,25%, como também concreto com fibras soltas no teor de 0,25%, visando minorar o consumo de fibras e custo do compósito.

Para a resistência à compressão modificada das amostras oriundas do ensaio de flexão pela JSCE, conforme os resultados da ANOVA, a adição das fibras no concreto provocou diferenças significativas para as fibras do tipo 65/35 soltas nos teores de 0,25% e 0,50% e do tipo 80/60 soltas e coladas em pente nos teores de 0,25% e 0,50%. Enquanto que as fibras do tipo 80/60 ou 65/35, coladas ou soltas, quando comparadas entre si para o mesmo teor, seja 0,25% ou 0,50%, apresentaram diferenças não significativas. Para o concreto com fibras soltas ou coladas do tipo 80/60 ou 65/35 no teor de 0,25% houve uma tendência de maior resistência à compressão modificada, enquanto que no teor de 0,50% ocorreu uma tendência de menor resistência à compressão modificada.

Para a resistência à compressão modificada das amostras oriundas do ensaio de flexão pelo RILEM, conforme os resultados da ANOVA, a adição das fibras no concreto provocou diferenças significativas para as fibras do tipo 65/35 soltas nos teores de 0,25% e do tipo 80/60 soltas e coladas em pente nos teores de 0,25% e 0,50%. Enquanto que as fibras do tipo 80/60 ou 65/35, coladas ou soltas, quando comparadas entre si para o mesmo teor, seja 0,25% ou 0,50%, apresentaram diferenças não significativas, com exceção para as fibras do tipo 80/60 no teor de 0,50% que apresentaram diferenças significativas, quando comparadas entre si coladas e soltas. Também uma tendência de aumento e redução da resistência nos

teores de 0,25% e 0,50%, respectivamente, tanto para as fibras do tipo 80/60 como do tipo 65/35.

Sugestões de trabalhos futuros:

- ✓ Novos estudos de tubos de concreto com fibras produzidos com materiais semelhantes ao utilizado nessa pesquisa;
- ✓ Análise de tubos de concreto com fibras de maiores dimensões;
- ✓ Estudo de reforço misto de fibras de aço e tela metálica ou mistura de fibras de aço e poliméricas nos tubos de concreto;
- ✓ Análise comparativa de custo entre tubos de concreto com fibras de aço e com armadura convencional;
- ✓ Avaliação do desempenho de tubos de concreto e corpos-de-prova com fibras de aço usando aditivos.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABOLMAALI, A., MIKHAYLOVA, A., WILSON, A.; LUNDY, J., "Performance of steel fibrereinforced concrete pipes. **Journal of the Transportation Research Board.** vol 2313, n. 1, p. 168-177, 2012.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **Manual of concrete practice: part 5.** ACI. State-of-the-art Report on Fiber Reinforced Concrete. (ACI 544.1R-96). ACI Committee 544. Detroit, USA, 2002.

____. ACI 544. **Design considerations for steel fibre reinforced concrete,** (544.4R-88). Farmington Hills, MI, USA: American Concrete Institute; 2009. 18pp.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS ASTM C76-13 - **Standard specification for reinforced concrete culvert, storm drain, and sewer pipe.**

____. ASTM A820 - **Standard Specification for Steel Fibers for Fiber-Reinforced Concrete.**

____. ASTM C497-13 - **Standard test methods for concrete pipe, manhole sections or tile.**

____. ASTM C1765-13 - **Standard specification for steel fibre reinforced concrete culvert, storm drain, and sewer pipe.**

ASKELAND, D. R.; J. WRIGHT, W. **Ciência e Engenharia dos Materiais.** Cengage Learning CTP. 2ª. Edição. Rio de Janeiro. 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 45:2006 - **Agregados em estado solto – Determinação da massa unitária.** Rio de Janeiro, 2006.

____. ABNT NBR NM 51:2001 - **Agregado graúdo - Ensaio de abrasão “Los Angeles.** Associação Brasileira de Normas Técnicas.

___ ABNT NBR NM 52:2009 - **Agregado Miúdo: Determinação de massa específica e massa específica aparente.** Associação Brasileira de Normas Técnicas.

___ ABNT NBR NM 53:2009 - **Agregado Graúdo: Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água.** Associação Brasileira de Normas Técnicas.

___ ABNT NBR NM 67:1998 - **Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone.** Associação Brasileira de Normas Técnicas.

___ ABNT NBR NM 248:2003 - **Determinação da composição granulométrica.** Associação Brasileira de Normas Técnicas.

___ ABNT NBR 5738:2003 - **Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos ou prismáticos de concreto.** Associação Brasileira de Normas Técnicas.

___ ABNT NBR 5739:2007 - **Concreto: ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos.** Associação Brasileira de Normas Técnicas.

___ ABNT NBR 6467:2009 – **Determinação do inchamento de agregado miúdo – Método do Ensaio.** Associação Brasileira de Normas Técnicas.

___ ABNT NBR 7222:2011 - **Argamassa e concreto: Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos.** Associação Brasileira de Normas Técnicas.

___ ABNT NBR 8890:2007 - **Tube de concreto de seção circular para águas pluviais e esgotos sanitários — Requisitos e métodos de ensaios.** Associação Brasileira de Normas Técnicas.

____. ABNT NBR 9938:2013 - **Determinação da resistência ao esmagamento de agregados graúdos — Método de ensaio**. Associação Brasileira de Normas Técnicas.

____. ABNT NBR 15530:2007 - **Fibras de aço para concreto – Especificação**. Associação Brasileira de Normas Técnicas.

A MOHSEN. **Evaluation of the Performance of Steel Fiber Reinforced Concrete Pipes Produced by Packerhead Method**. Universidade do Texas. Faculdade de Ciência em Engenharia Civil. Dissertação, Texas, 2014.

BARROS J. A. O., CUNHA V. M. C. F., RIBEIRO A. F., and ANTUNES J. A. B., “Post-cracking behaviour of steel fibre reinforced concrete”, *Materials and Structures*, Vol. 38, n. 1, 2005, pp. 47-56.

BENTUR, A.; MINDESS, S. **Fibre Reinforced Cementitious Composites**. United Kingdom. Elsevier, 2007.

CALLISTER, W. D. **Ciência e Engenharia dos Materiais: Uma Introdução**. LTC – Livros Técnicos e Científicos. 8ª. Edição. Rio de Janeiro. 2012.

CHAMA NETO, P. J. **Avaliação de desempenho de tubos de concreto reforçados com fibras de aço**. 2002. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2002.

DE LA FUENTE, A.; AGUADO, A.; MOLINS, C. **Diseño óptimo integral de tubos de hormigón**, Hormigón y Acero, 2010.

DE LA FUENTE, A.; AGUADO, A.; MOLINS, C.; MOLINS, C.; ESCARIZ, R. C. **Nuevas tendencias para el refuerzo óptimo de tubos de hormigón**, V Congreso de ACHE, At Barcelona, España, 2011.

DE LA FUENTE, A.; FIGUEIREDO, A. D.; AGUADO, A.; MOLINS, C.; CHAMA NETO, P.J. Experimentación y simulación numérica de tubos de hormigón com fibras. **Materiales de Construccion**, vol. 61, p. 275-288, 2011.

DE LA FUENTE, A.; FIGUEIREDO, A. D.; AGUADO, A.; MOLINS, C.; CHAMA NETO, P.J. Steel fibre reinforced concrete pipes. Part 2: Numerical model to simulate the crushing test. **Revista IBRACON de Engenharia e Materiais**, vol. 5, p. 12-25, 2012.

European Standards, EN 1916. **Concrete pipes and fit tings, unrein forced, steel fibre and reinforced**. European Committee for Standardization; 2002. 89p.

ESCARIZ, R. C. **Análise comparativa de desempenho mecânico de tubos de concreto reforçados com macrofibras poliméricas e fibras de aço**. São Paulo. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Dissertação Mestrado de Engenharia Civil). São Paulo, 2012.

FIGUEIREDO, A. D. Evaluation of the test method for crushing strength of steel fiber reinforced concrete pipes In: 7th INTERNATIONAL RILEM SYMPOSIUM ON FIBRE-REINFORCED CONCRETE: Design and Applications, BEFIB 2008, Chennai, Índia. **Fiber Reinforced Concrete: Design and Applications**. Babneux – France: RILEM Publications S.A.R.L., p. 989 – 1000. 2008b.

_____. **Concreto reforçado com fibras**. 248p. Tese (Livre-Docência) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

FIGUEIREDO, A. D.; CHAMA NETO, P. J.; FARIA, H. M. A nova normalização brasileira sobre fibras de aço. **Concreto e Construções**, v. 36, p. 67-76, 2008a.

FIGUEIREDO, A. D.; DE LA FUENTE, A.; AGUADO, A.; MOLINS, C.; CHAMA NETO, P.J. Steel fiber reinforced concrete pipes. Part 1: technological analysis of the mechanical behavior. **Revista IBRACON de Engenharia e Materiais**, vol. 5, p. 1-11, 2012.

FIGUEIREDO, A. D.; DE LA FUENTE, A.; AGUADO, A.; MOLINS, C.; VIÑOLAS, B. Análise de Viabilidade do Uso de Fibras Metálicas em Tubos de Concreto. Parte1: Campanha Experimental. In: 52º Congresso Brasileiro do Concreto, 2010. Fortaleza. Novas tecnologias do Concreto para o Crescimento Sustentável. **Anais**. Instituto Brasileiro do Concreto – IBRACON. São Paulo, 2010.

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

GARCIA, T. V. **Aplicació de l'assaig Barcelona pel control del formigo reforçat amb fibres utilitzat en lá construcció d'un edifici industrial**. 2006, 94p. (Projecte de Fi Carrera) – Escola Técnica 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.

METHA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestruturas, propriedades e materiais**. São Paulo: IBRACON, 2008.

MINISTÉRIO DAS CIDADES. Diagnóstico dos serviços de água e esgotos – 2012. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento 2012. Disponível em: < <http://www.snis.gov.br> >. Acesso em: Julho 2014.

MOHAMED et. al.. Full-scale pipes using dry-cast steel fibre-reinforced concrete. **Construction and Building Materials**, v. 72, p. 411-422, 2014.

MOHAMED et. al.. Mechanical performance of full-scale precast steel fibre-reinforced concrete pipes. **Construction and Building Materials**, v. 84, p. 287-299, 2015.

MOHAMED, N. **Experimental and Numerical Study on Full-Scale Precast Steel Fibre-Reinforced Concrete Pipes**. 2015. Tese (Doutorado em Ciência da Engenharia) - Escola de Pós-graduação e Pós-doutorado da Universidade de Western Ontario, Canadá, 2015.

NAAMAN, A. E. Development and evolution of tensile strength-hardening FRC composites In: 7th International RILEM Symposium on Fiber Reinforced Concrete: Design and Applications, 2008, Chennai, India. **Fiber Reinforced Concrete: Design and Applications**. Babneux – France: RILEM Publications S.A.R.L., v.1, p.1-28. 2008.

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

MOHAN, K.S.R.; PARTHIBAN, K. Strength and behaviour of fly ash based steel fibre reinforced concrete composite. **International Journal of Civil and Structural Engineering**. vol. 2, n. 1, p. 318–28, 2011.

MORAES NETO, B. N. **Comportamento à punção de lajes lisas em concreto reforçado com fibras de aço sob carregamento simétrico**. 2013. Tese (Doutorado em Estruturas e Construção Civil) - Universidade de Brasília. 2013.

PUJADAS, P. A.; BLANCO, A.; DE LA FUENTE, A.; AGUADO, A. PUJADAS, P. A. Cracking behavior of FRC slabs with traditional reinforcement. **Materials and Structures**, v. 45, n. 5, p. 707-725, 2012.

RAMOS, M. F. **Análise Experimental de Tubos de Concreto Reforçados com Fibras de Aço**. Campinas, UNICAMP. Universidade Estadual de Campinas.

Faculdade de Engenharia Civil. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Campinas, 2002.

RILEM TC 162. **Final Recommendation of RILEM TC 162-TDF: Test and design method for steel fiber reinforced concrete – σ - ϵ design method.** Materials and Structures. Vol. 36. October 2003. Pp, 560-657.

SALVADOR, R. P. **Análise comparativa de métodos de ensaio para caracterização do comportamento mecânico do concreto reforçados com fibras.** São Paulo. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Dissertação (Mestrado de Engenharia Civil). São Paulo, 2013.

SILVA. J. L. da. **Análise de tubos circulares de concreto armado para o ensaio de compressão diametral com base na teoria da confiabilidade.** 2011. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. 2011.

SILVA. J. L. da.; EL DEBS. M.K. Influência da bolsa no comportamento estrutural de tubos de concreto armado submetidos ao ensaio de compressão diametral. In: 51º Congresso Brasileiro do Concreto, 2009, Curitiba. **Anais.** Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON), 2009.

THE JAPAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS, “**JSCE-SF2: Method of making specimens for strength and toughness tests of steel fiber reinforced concrete,** Concrete library of JSCE, Part III-2 Method of tests for steel fiber reinforced concrete, 1984. n. 3, pp. 48-55.

_____. **JSCE-SF4: Method of tests for flexural strength and flexural toughness of steel fiber reinforced concrete,** Concrete library of JSCE, Part III-2 Method of tests for steel fiber reinforced concrete, 1984. n. 3, pp. 58-61.

VASCONCELOS, R. E. **Fratura do concreto reforçado com fibras de aço e de polipropileno em meios normal e agressivo.** 2012. Tese (Doutorado em

Engenharia Mecânica). Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP. Campinas, 2012.

YANG, K. Test s on concrete reinforced with hybrid or monolithic steel and polyvinyl alcohol fibres. **ACI Materials Journal**. vol.108, n. 6, p. 664–72, 2011.

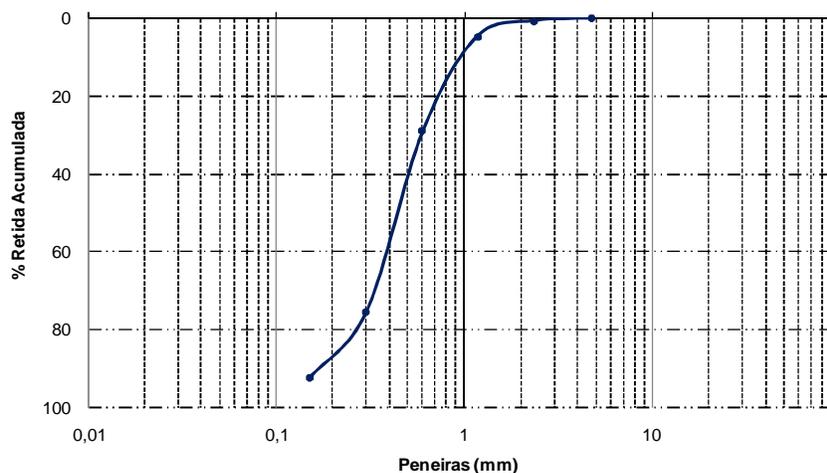
ANEXO A - Caracterização química e físico-mecânica do cimento (Itaituba Indústria de Cimentos do Pará S/A – ITANCIMPASA/NASSAU).

COMPOSIÇÃO QUÍMICA							
Ensaio	Norma	Unidade	Resultado	Limites da Norma			
				NBR 11578/91			
Perda ao Fogo-PF	NBR NM 18	%	5,01	≤ 6,5%			
Dióxido de Silício-SiO ₂	NBR NM 11-2	%	23,09	Não aplicável			
Óxido de Alumínio-Al ₂ O ₃	NBR NM 11-2	%	6,39	Não aplicável			
Óxido de Ferro-Fe ₂ O ₃	NBR NM 11-2	%	3,47	Não aplicável			
Óxido de Cálcio-CaO	NBR NM 11-2	%	57,14	Não aplicável			
Óxido de Magnésio-MgO	NBR NM 11-2	%	1,73	≤ 6,5%			
Anidrido Sulfúrico-SO ₃	NBR NM 16	%	2,24	≤ 4,0%			
Resíduo Insolúvel-R.I.	NBR NM 22	%	9,51	≤ 16,0%			
CaO Livre	NBR NM 13	%	0,42	Não aplicável			
Anidrido Carbônico - CO ₂	NBR NM 20	%	3	≤ 5,0%			
COMPOSIÇÃO POTENCIAL		MÓDULOS QUÍMICOS					
Silicato Tricálcico-C3S		ni	Fator de Saturação de CaO-FSC	ni			
Silicato Dicálcico-C2S		ni	Módulo de Sílica-MS	ni			
Aluminato Tricálcico-C3A		11,06%	Módulo de Alumina-MA	ni			
Ferro Aluminato Tetracálcico-C4AF		10,56%	Sulfato de Cálcio-CaSO ₄	3,81%			
CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-MECÂNICA							
Ensaio	Norma	Unidade	Resultado	Limites da Norma			
				NBR 11578/91			
Finura na peneira 75 µm	NBR 11579	%	4,1	≤ 12,0%			
Finura na peneira 45 µm	NBR 12826	%	21,8	Não aplicável			
Massa Específica Real	NBR NM 23	g/cm ³	3,02	Não aplicável			
Área Específica - Blaine	NBR NM 76	cm ² /g	4,114	≥ 2.600 cm ² /g			
Consistência Normal	NBR NM 43	%	26,6	Não aplicável			
Tempo de Início de Pega	NBR NM 65	h:min	02:15	≥ 1h			
Tempo de Fim de Pega	NBR NM 65	h:min	03:15	≤ 10h			
Expansibilidade à Quente	NBR 11582	mm	0	≤ 5mm			
Resistência à compressão (MPa) - (NBR 7215-1996)							
Idade (dias)	Corpo-de-prova nº				Média	Desvio relativo máximo (%)	Limites da Norma
	1	2	3	4			NBR 11578/91
1	15,781	14,806	14,806	**	15,1	4,5	Não aplicável
3	22,929	22,641	23,360	23,270	23,0	1,6	≥ 10 Mpa
7	26,688	28,831	28,247	27,858	27,9	4,3	≥ 20 Mpa
28	34,133	33,743	33,743 34,523	34,718	34,3	1,6	≥ 32 Mpa

Observações relativas à amostra
ni = não informado pelo fabricante

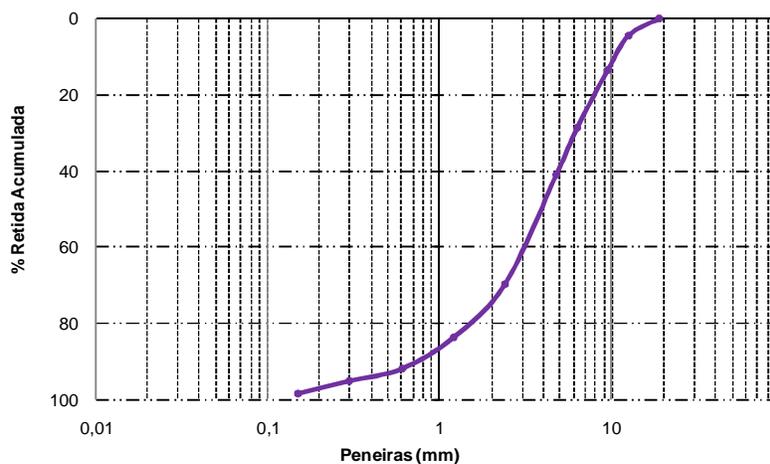
ANEXO B – Resultados de caracterização física e granulométrica do agregado miúdo.

Abertura das Peneiras (mm)	Peso retido (g)	Porcentagem retida (%)	Porcentagem retida acumulada (%)	Método do Ensaio
4,80	0,9	0,1	0	ABNT NBR NM 248:2003
2,36	7,1	0,8	1	
1,18	40,3	4,0	5	
0,6	242,4	24,2	29	
0,3	464,7	46,5	76	
0,15	170,8	17,0	93	
< 0,15	73,8	7,4	100,00	
Total	1000,00	100,00	-	
Diâmetro máximo (mm)	1,20			ABNT NBR NM 248:2003
Módulo de finura (mm)	2,03			ABNT NBR NM 248:2003
Massa específica (kg/dm ³)	2,63			ABNT NBR NM 52:2009
Massa Unitária (kg/dm ³)	1,46			ABNT NBR NM 45:2006
Índice de vazios (%)	45,24			ABNT NBR NM 45:2006
Coefficiente de inchamento	1,42			ABNT NBR 6467:2009
Umidade crítica (%)	3,40			ABNT NBR 6467:2009

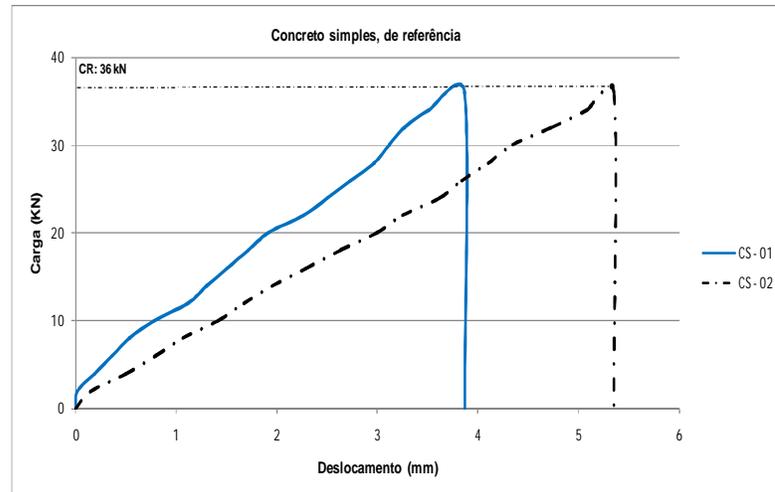


ANEXO C – Resultados de caracterização física e granulométrica do agregado
graúdo (seixo)

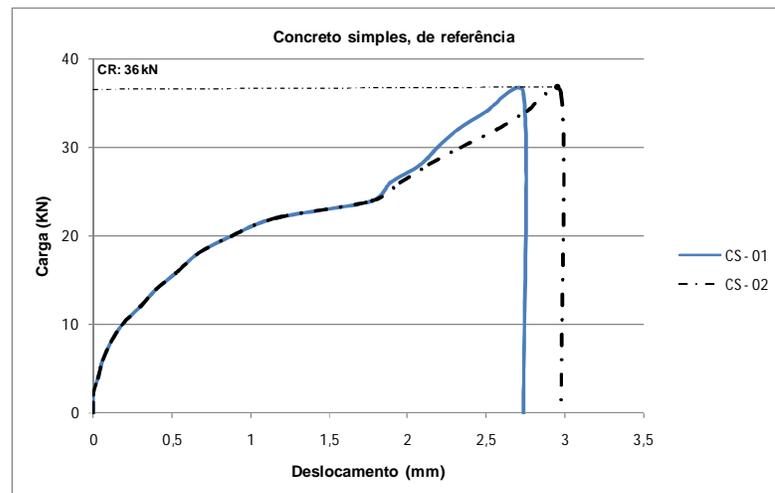
Abertura das Peneiras (mm)	Peso retido (g)	Porcentagem retida (%)	Porcentagem retida acumulada (%)	Método do Ensaio
19	0,00	0,0	0,00	ABNT NBR NM 248:2003
12,5	232	4,7	5	
9,6	453	9,1	14	
6,3	754	15,1	29	
4,8	605	12,1	41	
2,4	1438	28,7	70	
1,2	709	14,1	84	
0,6	405	8,1	92	
0,3	167	3,3	95	
0,15	148	3,0	98	
<0,15	89	1,8	100,00	ABNT NBR NM 248:2003
Total	5000,00	100,00	-	
Diâmetro máximo (mm)	12,5			ABNT NBR NM 248:2003
Módulo de finura (mm)	4,93			ABNT NBR NM 248:2003
Massa específica (kg/dm ³)	2,53			ABNT NBR NM 53:2009
Massa Unitária (kg/dm ³)	1,56			ABNT NBR NM 45:2006
Índice de vazios (%)	38,34			ABNT NBR NM 45:2006
Abrasão de "Los Angeles" (%)	47,12			ABNT NBR NM 51:2001
Resistência ao esmagamento (%)	48,00			ABNT NBR 9938:2013



ANEXO D – Resultados de carga versus tempo e carga versus deslocamento diametral de tubos de concreto simples, de referência.

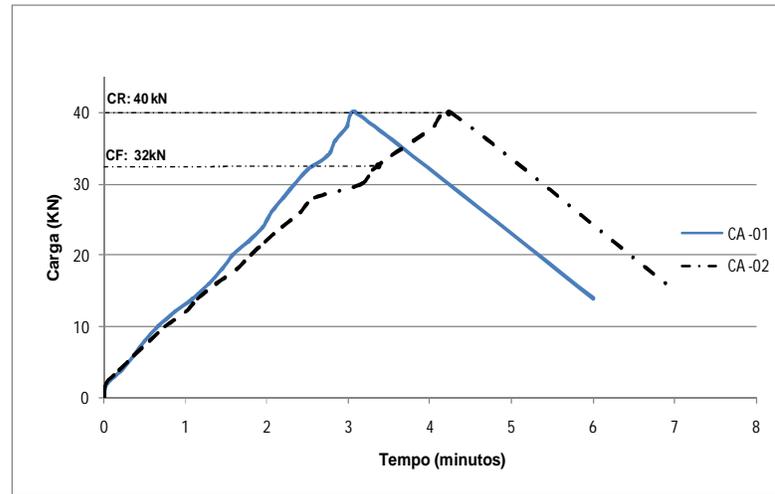


D1. Carga versus tempo para as amostras 01 e 02.

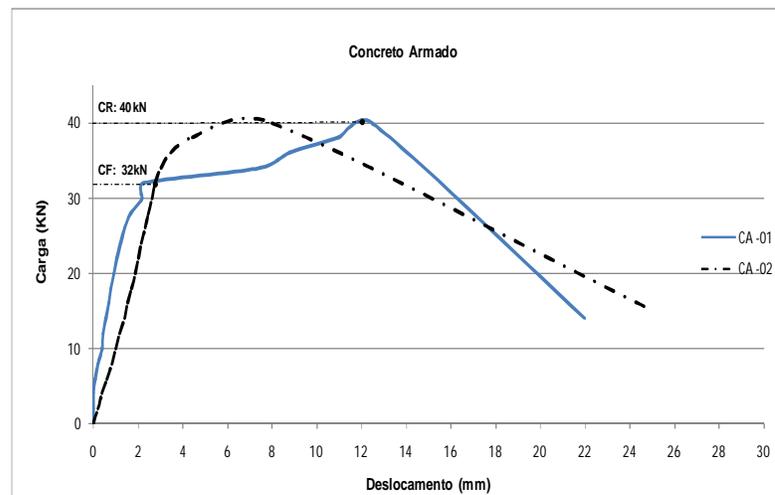


D2. Carga versus deslocamento para as amostras 01 e 02.

ANEXO E – Resultados de carga versus tempo e carga versus deslocamento diametral de tubos de concreto armado.

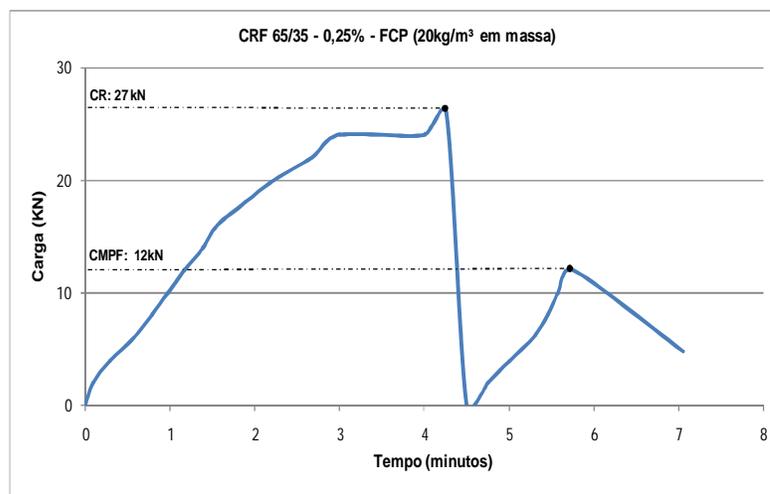


E1. Carga versus tempo para as amostras 01 e 02.



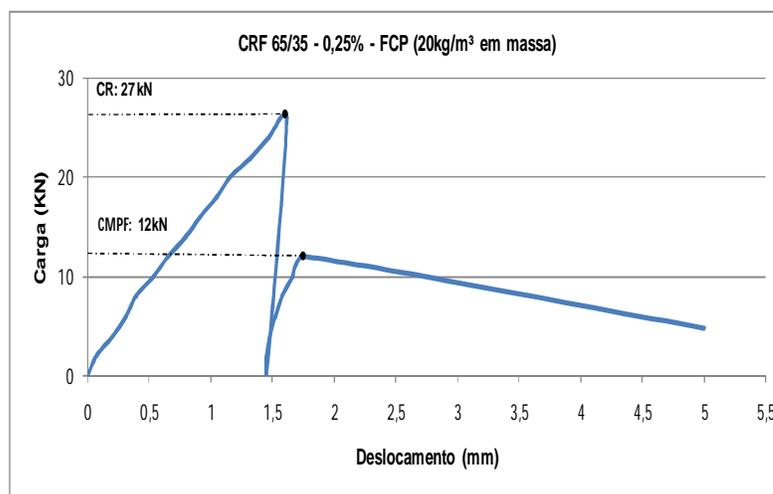
E2. Carga versus deslocamento para as amostras 01 e 02

ANEXO F – Resultados de carga versus tempo e carga versus deslocamento diametral para tubo de concreto com fibras de aço coladas em pente do tipo 65/35 no teor de 0,25%.



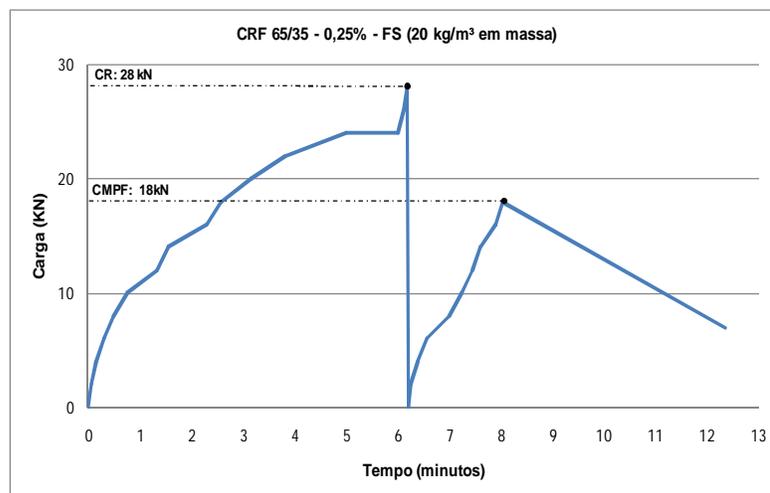
I

F1. Carga versus tempo para tubo com fibras coladas em pente do tipo 65/35 no teor de 0,25%.

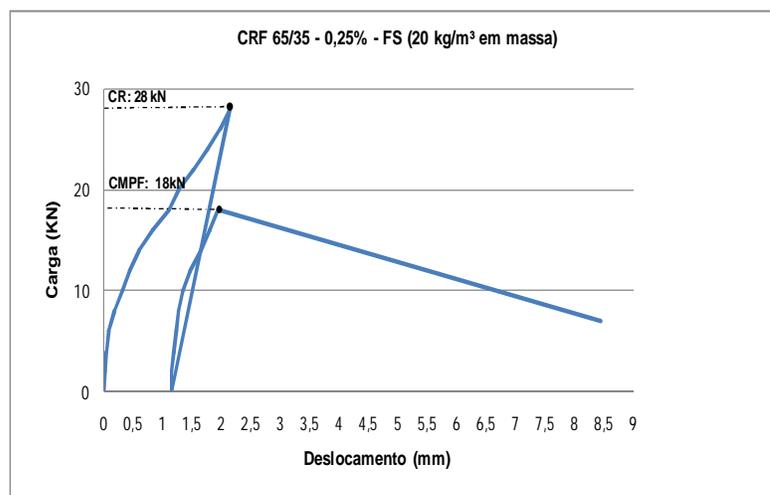


F2. Carga versus deslocamento para tubo com fibras coladas em pente do tipo 65/35 no teor de 0,25%.

ANEXO G – Resultados de carga versus tempo e carga versus deslocamento diametral para tubo de concreto com fibras de aço soltas do tipo 65/35 no teor de 0,25%.

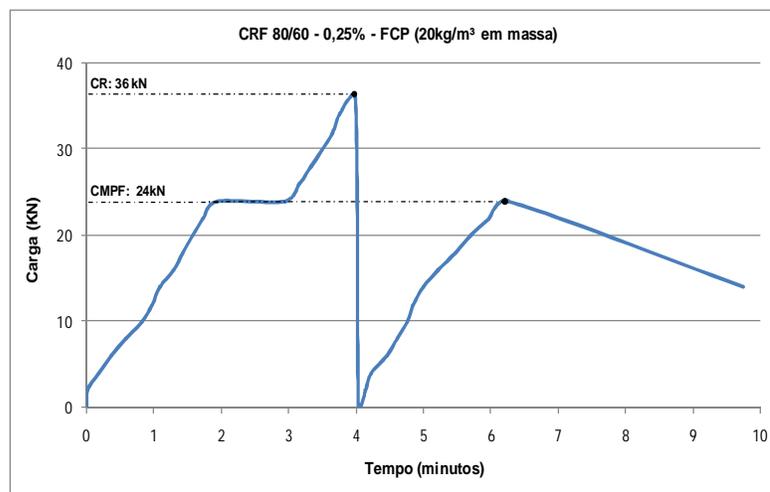


G1. Carga versus tempo para tubo com fibras soltas do tipo 65/35 no teor de 0,25%.

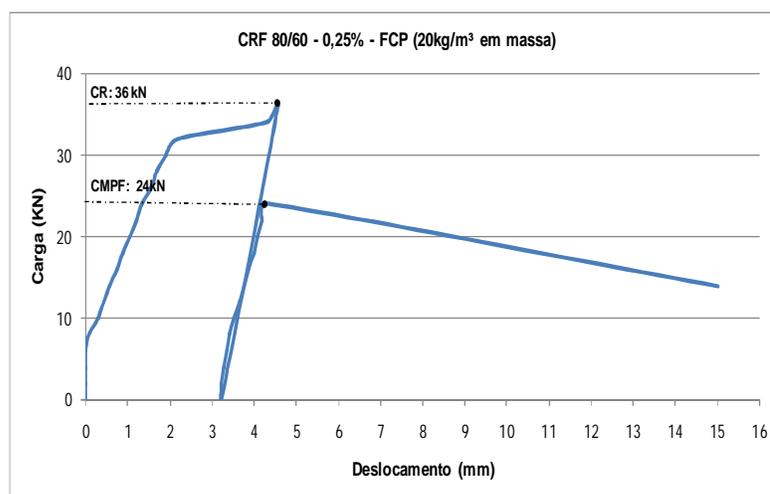


G2. Carga versus deslocamento para tubo com fibras soltas do tipo 65/35 no teor de 0,25%.

ANEXO H – Resultados de carga versus tempo e carga versus deslocamento diametral para tubo de concreto com fibras de aço coladas em pente do tipo 80/60 no teor de 0,25%.

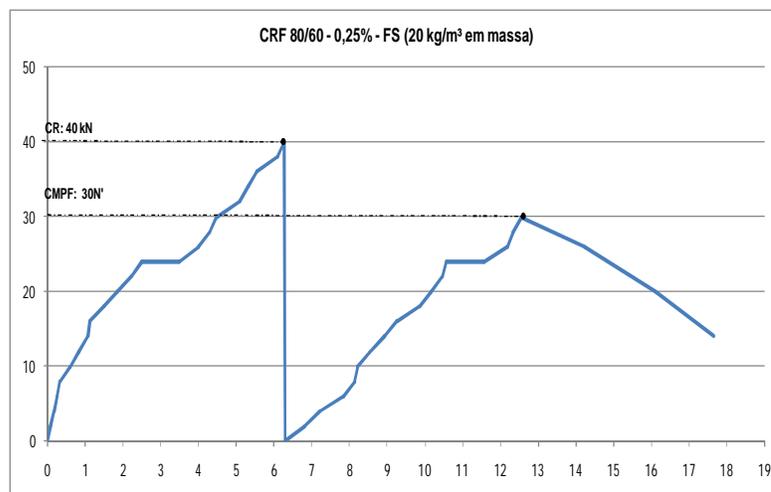


H1. Carga versus tempo para tubo com fibras coladas em pente do tipo 80/60 no teor de 0,25%.

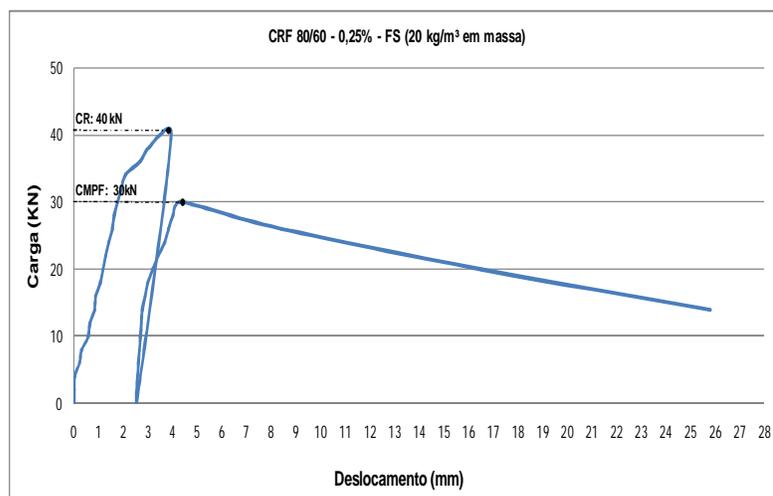


H2. Carga versus deslocamento para tubo com fibras coladas em pente do tipo 80/60 no teor de 0,25%.

ANEXO I – Resultados de carga versus tempo e carga versus deslocamento diametral para tubo de concreto com fibras de aço soltas do tipo 80/60 no teor de 0,25%.

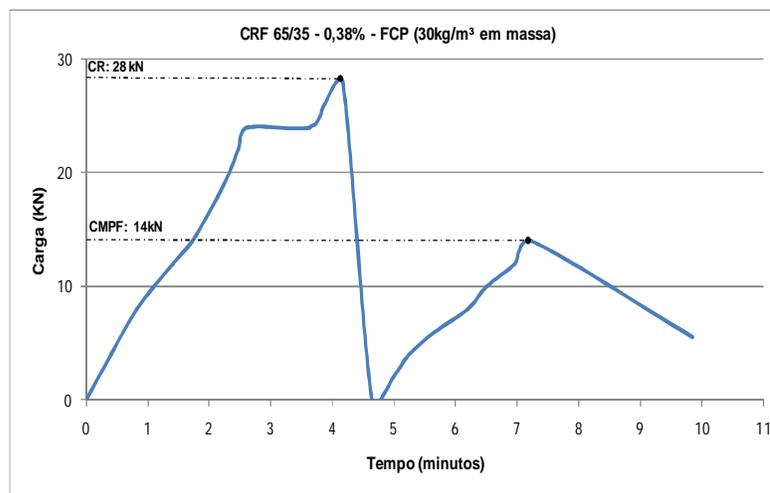


I1. Carga versus tempo para tubo com fibras soltas do tipo 80/60 no teor de 0,25%.

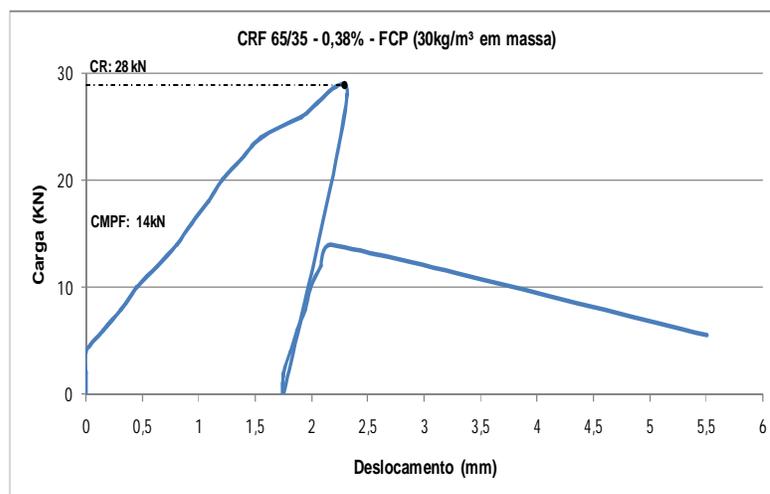


I2. Carga versus deslocamento para tubo com fibras soltas do tipo 80/60 no teor de 0,25%.

ANEXO J – Resultados de carga versus tempo e carga versus deslocamento diametral para tubo de concreto com fibras de aço coladas em pente do tipo 65/35 no teor de 0,38%.

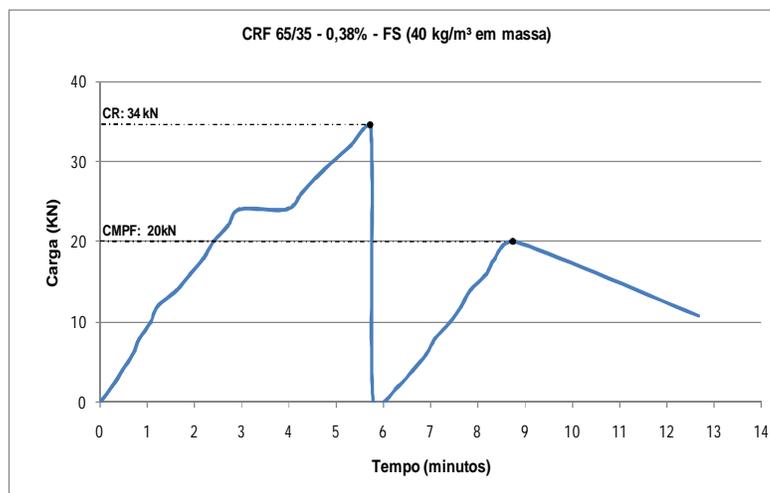


J1. Carga versus tempo para tubo com fibras coladas em pente do tipo 65/35 no teor de 0,38%.

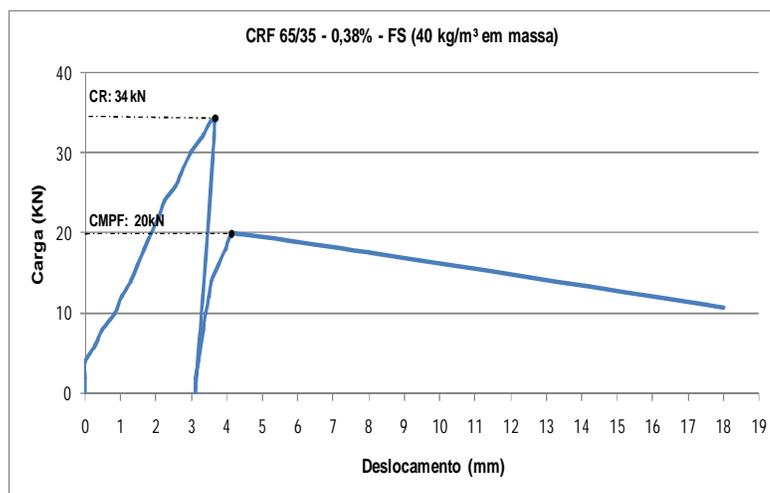


J2. Carga versus deslocamento para tubo com fibras coladas em pente do tipo 65/35 no teor de 0,38%.

ANEXO K – Resultados de carga versus tempo e carga versus deslocamento diametral para tubo de concreto com fibras de aço soltas do tipo 65/35 no teor de 0,38%.

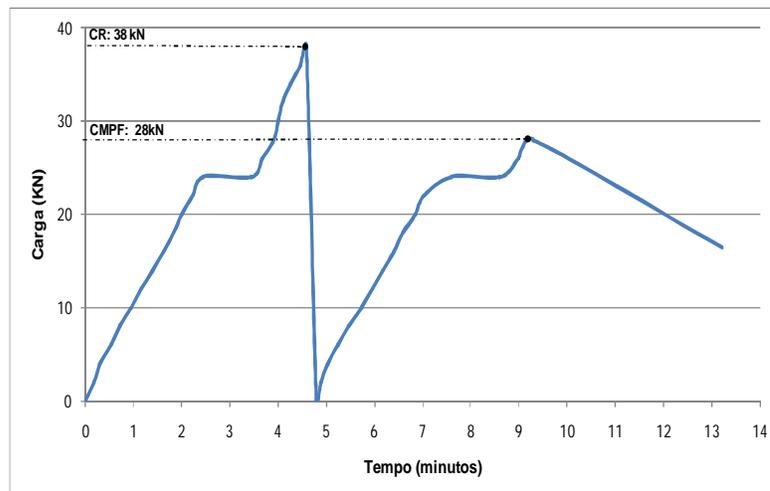


K1. Carga versus tempo para tubo com fibras soltas do tipo 65/35 no teor de 0,38%.

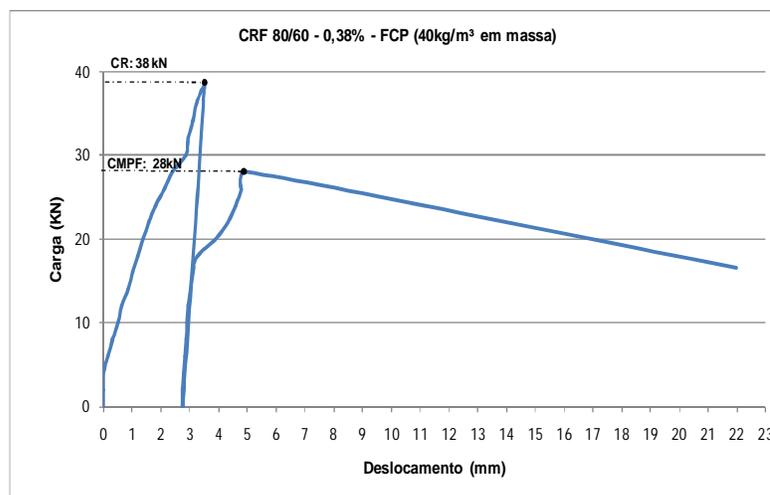


K2. Carga versus deslocamento para tubo com fibras soltas do tipo 65/35 no teor de 0,38%.

ANEXO L – Resultados de carga versus tempo e carga versus deslocamento diametral para tubo de concreto com fibras de aço coladas em pente do tipo 80/60 no teor de 0,38%.

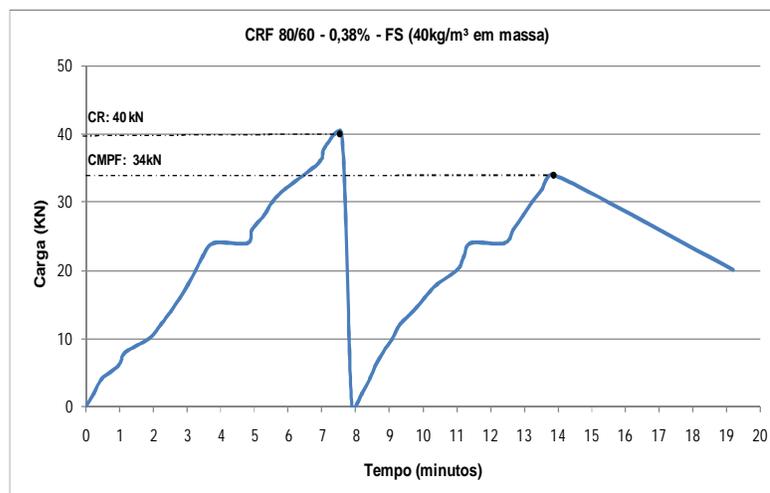


L1. Carga versus tempo para tubo com fibras coladas em pente do tipo 80/60 no teor de 0,38%.

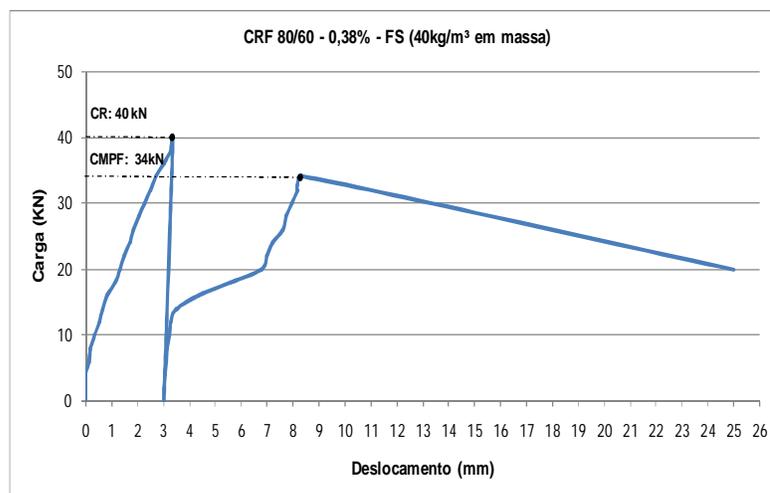


L2. Carga versus deslocamento para tubo com fibras coladas em pente do tipo 80/60 no teor de 0,38%.

ANEXO M – Resultados de carga versus tempo e carga versus deslocamento diametral para tubo de concreto com fibras de aço soltas do tipo 80/60 no teor de 0,38%.

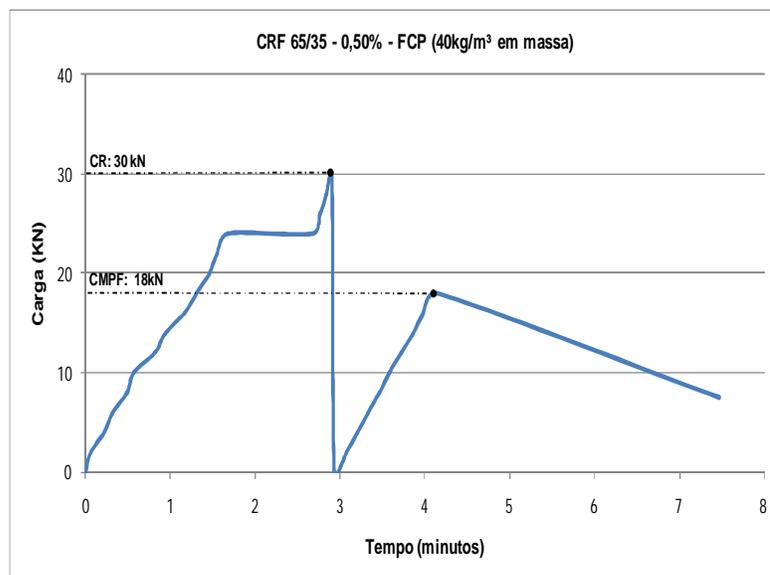


M1. Carga versus tempo para tubo com fibras soltas do tipo 80/60 no teor de 0,38%.

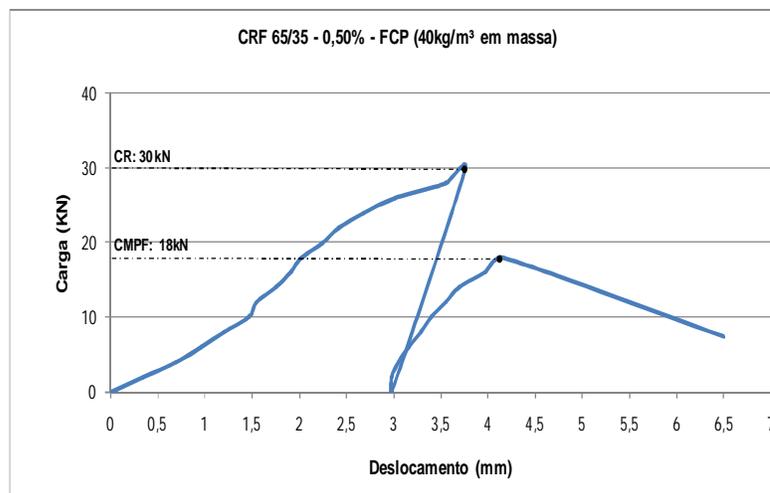


M2. Carga versus deslocamento para tubo com fibras soltas do tipo 80/60 no teor de 0,38%.

ANEXO N – Resultados de carga versus tempo e carga versus deslocamento diametral para tubo de concreto com fibras de aço coladas em pente do tipo 65/35 no teor de 0,50%.

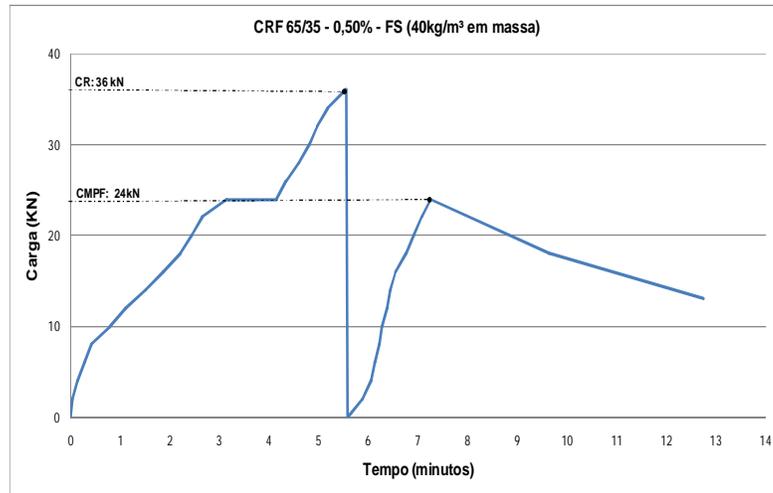


N1. Carga versus tempo para tubo com fibras coladas em pente do tipo 65/35 no teor de 0,50%.

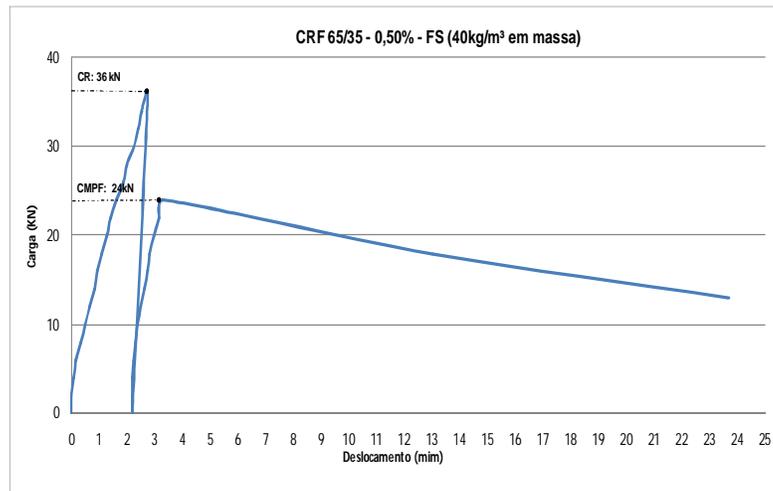


N2. Carga versus deslocamento para tubo com fibras coladas em pente do tipo 65/35 no teor de 0,50%.

ANEXO O – Resultados de carga versus tempo e carga versus deslocamento diametral para tubo de concreto com fibras de aço soltas do tipo 65/35 no teor de 0,50%.

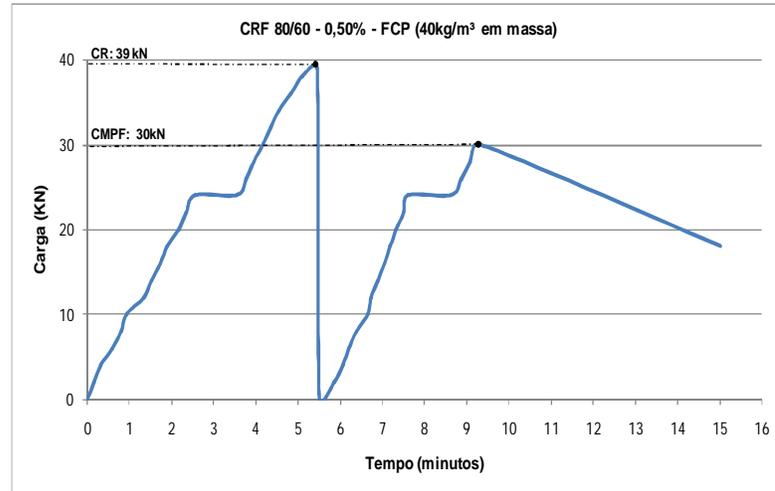


O1. Carga versus tempo para tubo com fibras soltas do tipo 65/35 no teor de 0,50%.

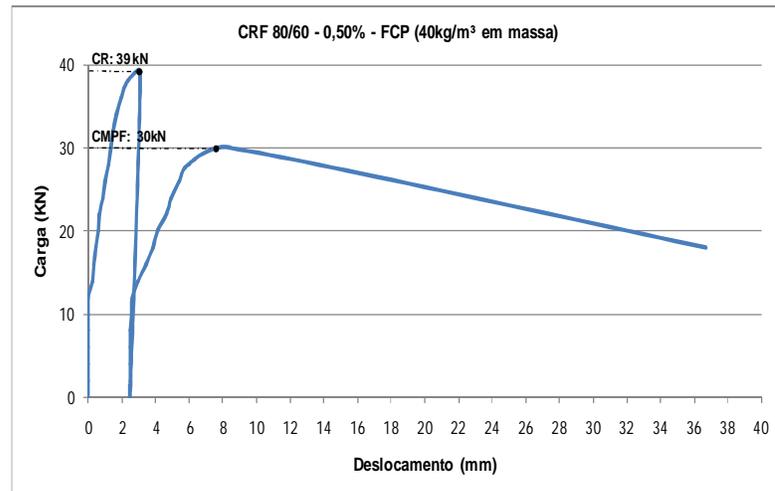


O2. Carga versus deslocamento para tubo com fibras soltas do tipo 65/35 no teor de 0,50%.

ANEXO P – Resultados de carga versus tempo e carga versus deslocamento diametral para tubo de concreto com fibras de aço coladas em pente do tipo 80/60 no teor de 0,50%.

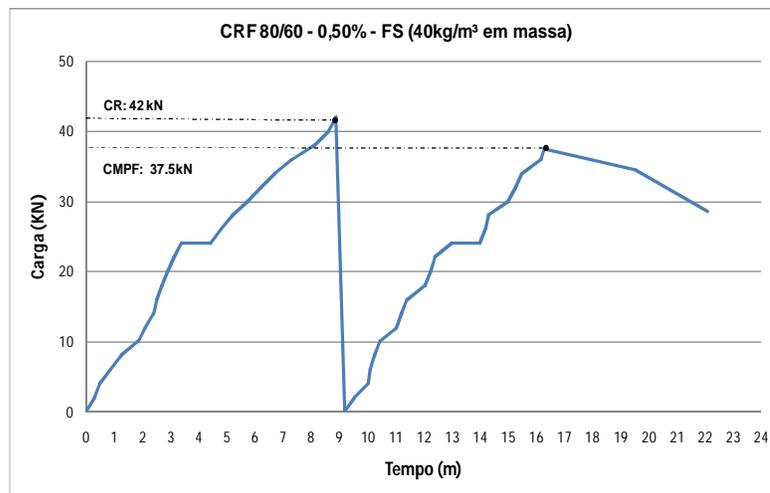


P1. Carga versus tempo para tubo com fibras coladas em pente do tipo 80/60 no teor de 0,50%.

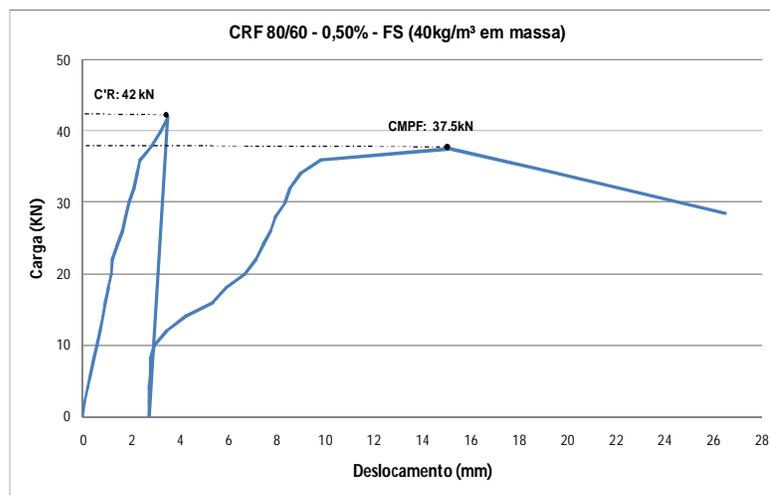


P2. Carga versus deslocamento para tubo com fibras coladas em pente do tipo 80/60 no teor de 0,50%.

ANEXO Q – Resultados de carga versus tempo e carga versus deslocamento diametral para tubo de concreto com fibras de aço soltas do tipo 80/60 no teor de 0,50%.



Q1. Carga versus tempo para tubo com fibras soltas do tipo 80/60 no teor de 0,50%.



Q2. Carga versus deslocamento para tubo com fibras soltas do tipo 80/60 no teor de 0,50%.

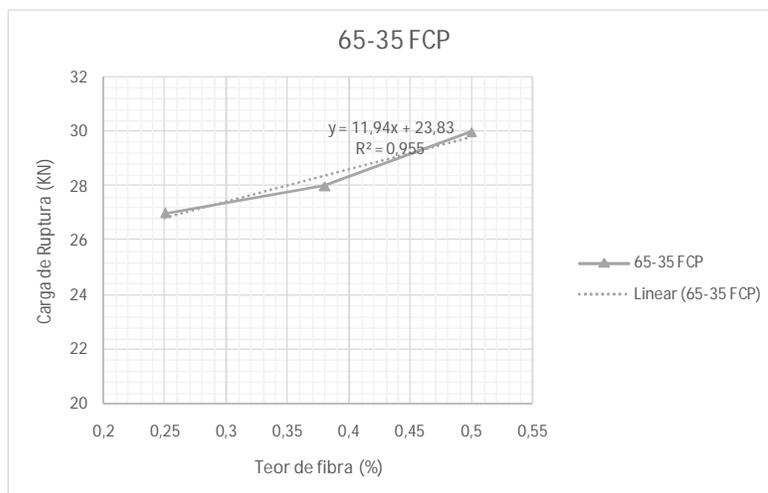
Nomenclatura:

*CR: carga de ruptura

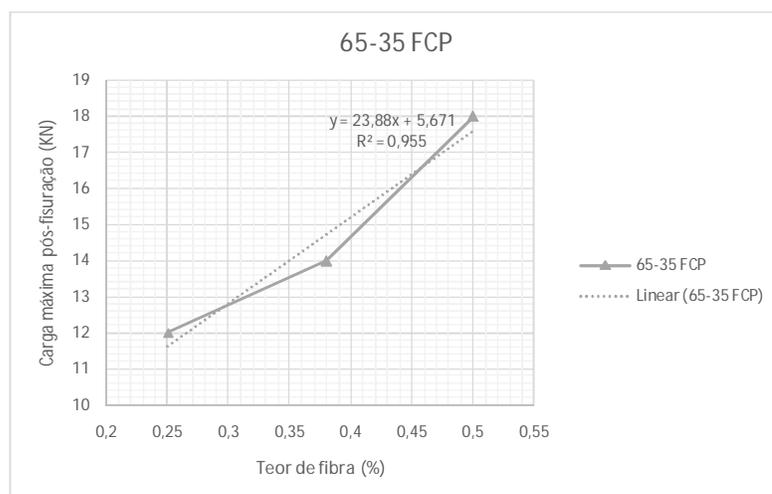
*CF: carga de fissura

*CMPF: carga máxima pós-fissuração

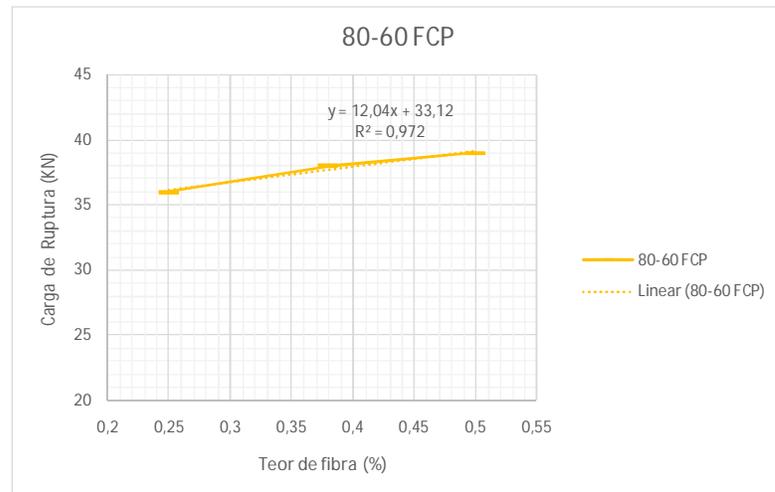
ANEXO R – Resultados de correlações da carga de ruptura e máxima pós-fissuração dos tubos de concreto com fibras de aço versus teor de fibras coladas em pente ou soltas do tipo 65/35 ou 80/60.



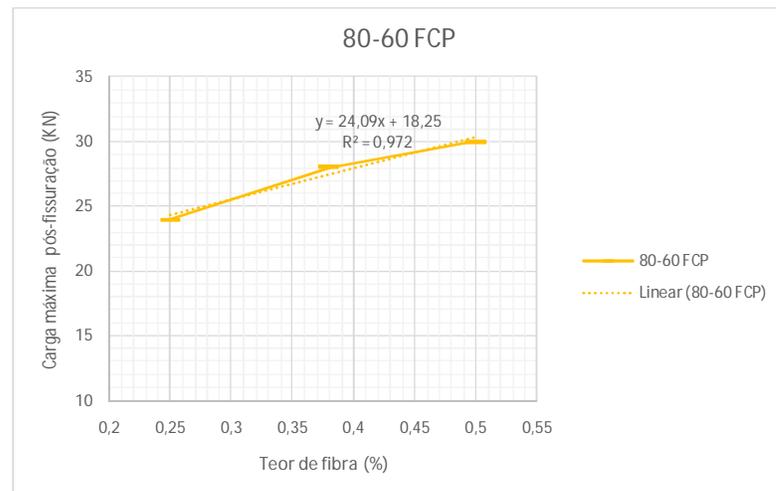
R1. Carga de ruptura versus teor de fibras coladas em pente do tipo 65/35.



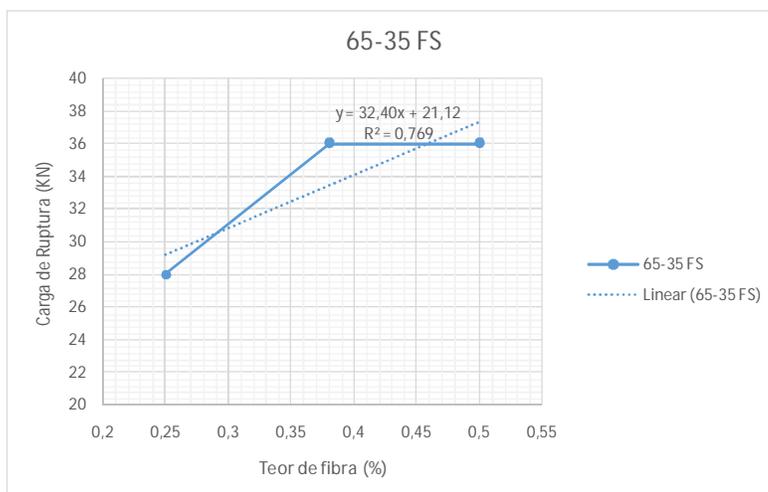
R2. Carga máxima pós-fissuração versus teor de fibras coladas em pente do tipo 65/35.



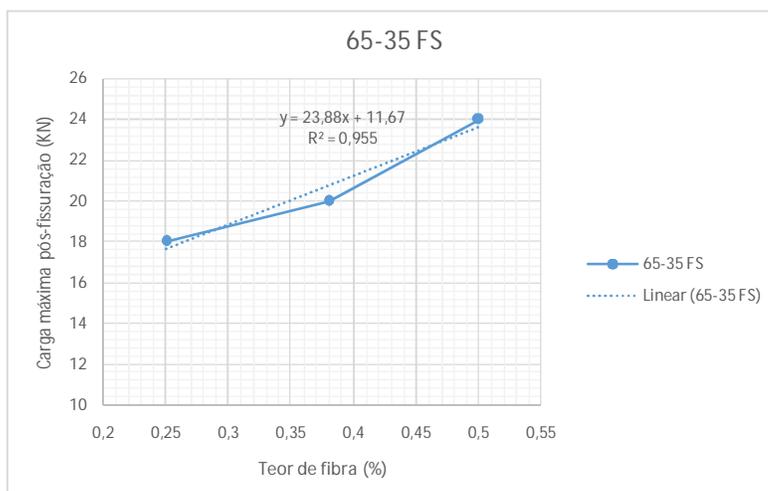
R3. Carga de ruptura versus teor de fibras coladas em pente do tipo 80/60.



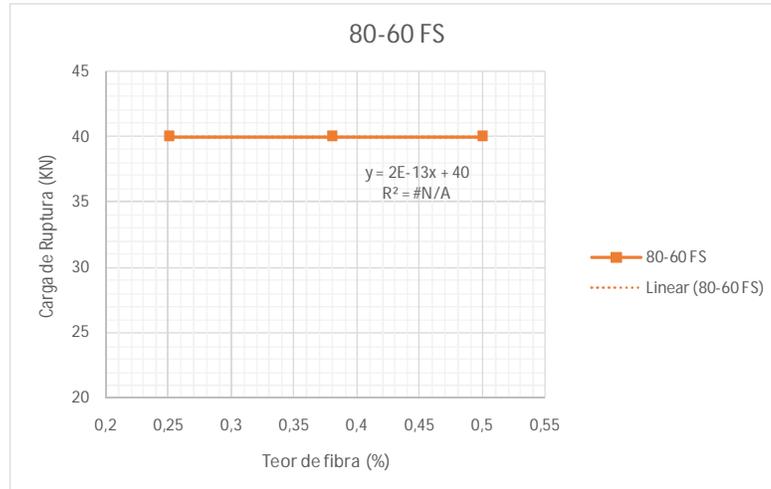
R4. Carga máxima pós-fissuração versus teor de fibras coladas em pente do tipo 80/60.



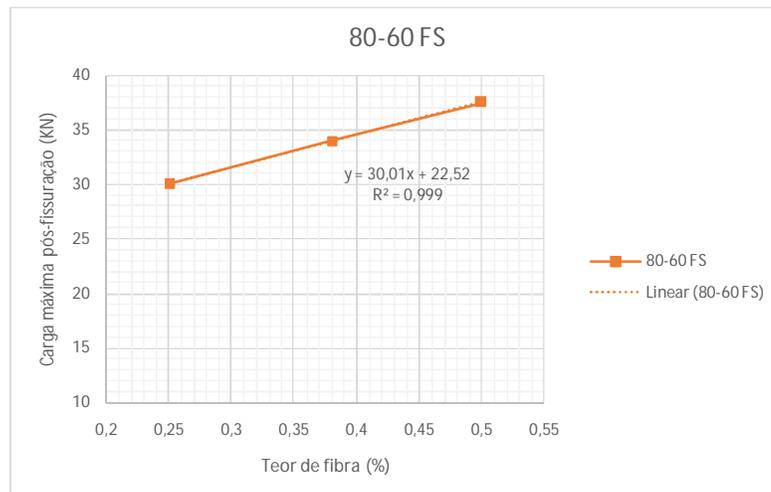
R5. Carga de ruptura versus teor de fibras soltas do tipo 65/35.



R6. Carga máxima pós-fissuração versus teor de fibras soltas do tipo 65/35.

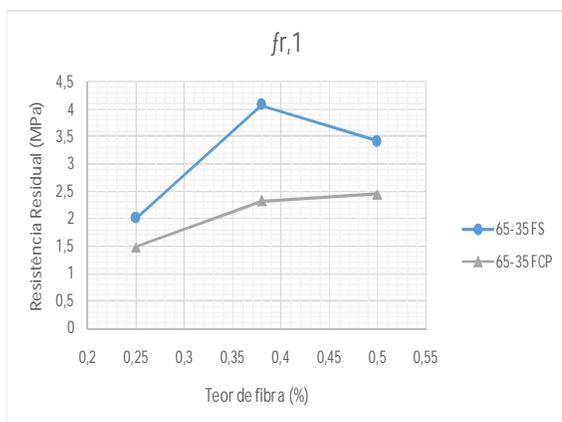


R7. Carga de ruptura versus teor de fibras soltas do tipo 80/60.

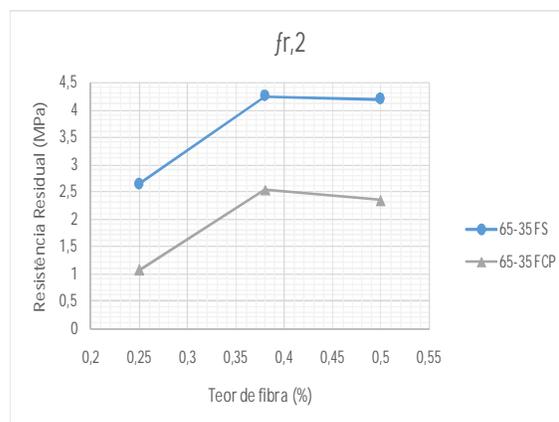


R8. Carga máxima pós-fissuração versus teor de fibras soltas do tipo 80/60.

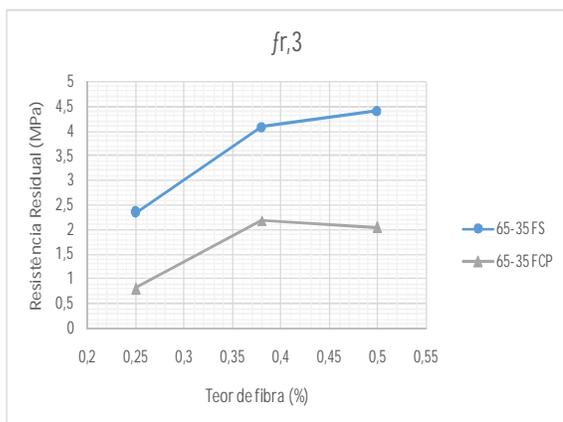
ANEXO S – Resultados de resistências residuais versus teor de fibras coladas em pente ou soltas do tipo 65/35 ou 80/60.



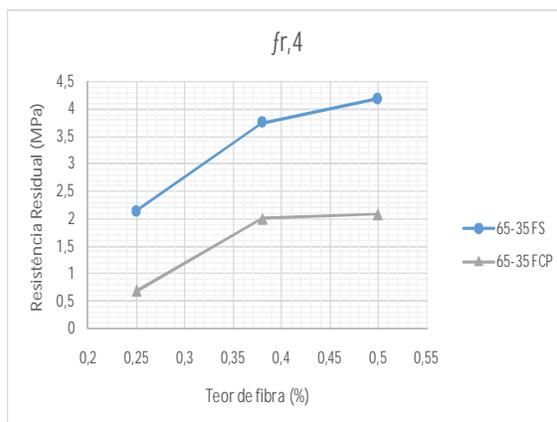
S1. Resistência residual ($f_{r,1}$) versus teor de fibras do tipo 65/35 coladas em pente e soltas.



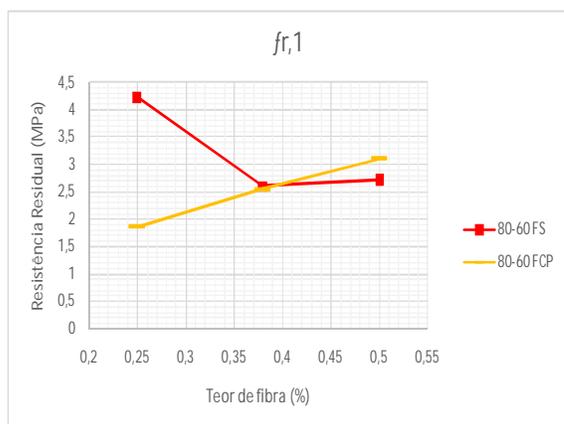
S2. Resistência residual ($f_{r,2}$) versus teor de fibras do tipo 65/35 coladas em pentes e soltas.



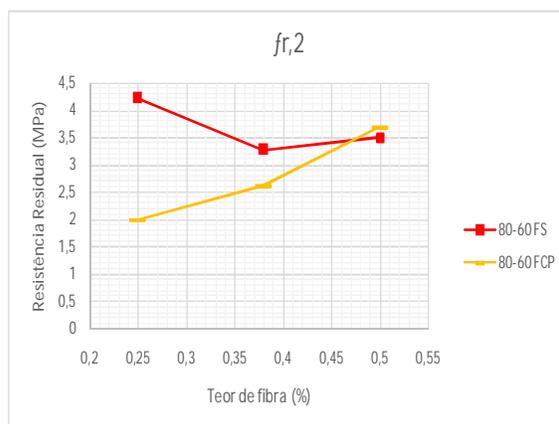
S3. Resistência residual ($f_{r,3}$) versus teor de fibras do tipo 80/60 coladas em pente e soltas.



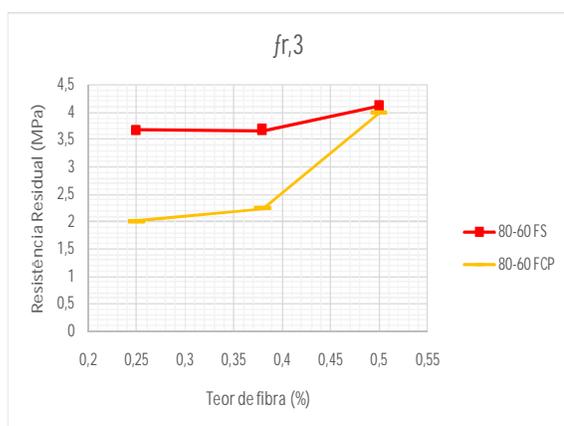
S4. Resistência residual ($f_{r,4}$) versus teor de fibras do tipo 80/60 coladas em pente e soltas.



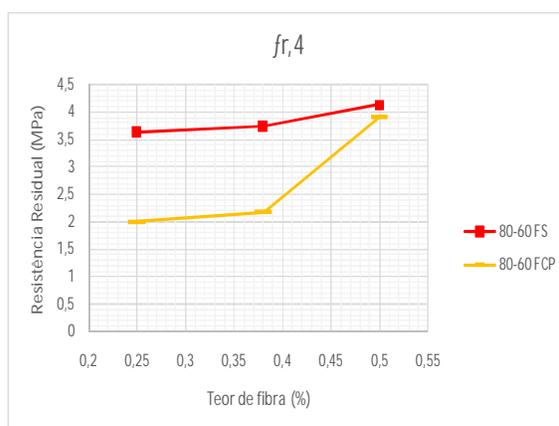
S5. Resistência residual ($f_{r,1}$) versus teor de fibras do tipo 80/60 coladas em pente e soltas.



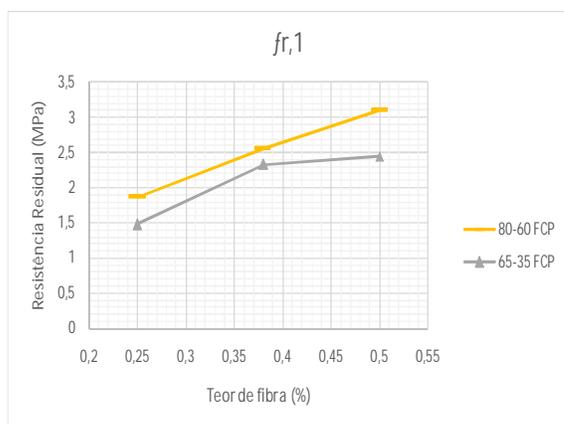
S6. Resistência residual ($f_{r,2}$) versus teor de fibras do tipo 80/60 coladas em pentes e soltas.



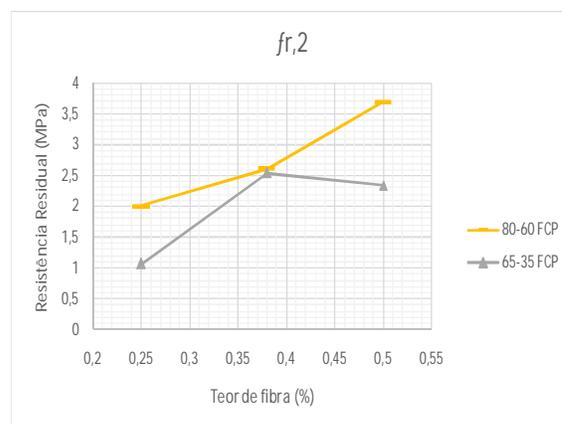
S7. Resistência residual ($f_{r,3}$) versus teor de fibras do tipo 80/60 coladas em pente e soltas.



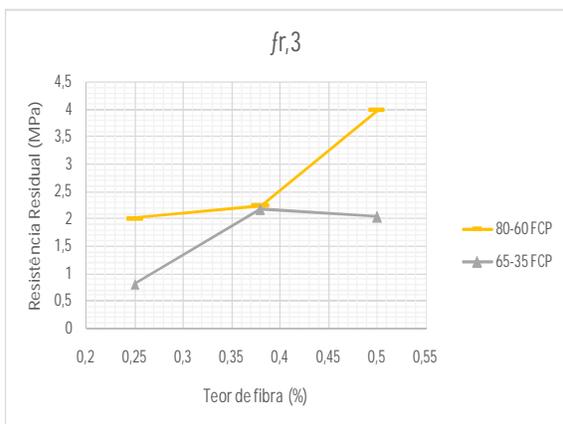
S8. Resistência residual ($f_{r,4}$) versus teor de fibras do tipo 80/60 coladas em pente e soltas.



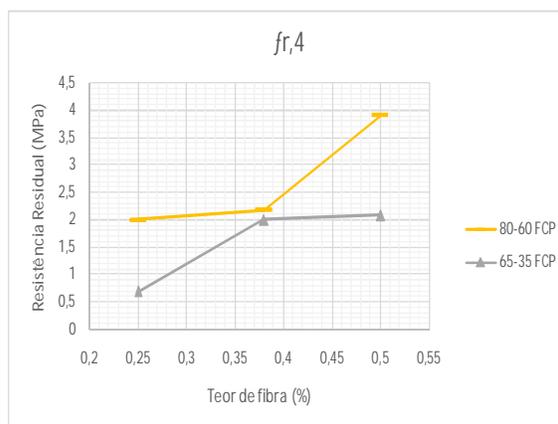
S9. Resistência residual ($f_{r,1}$) versus teor de fibras coladas em pente do tipo 80/60 e 65/35.



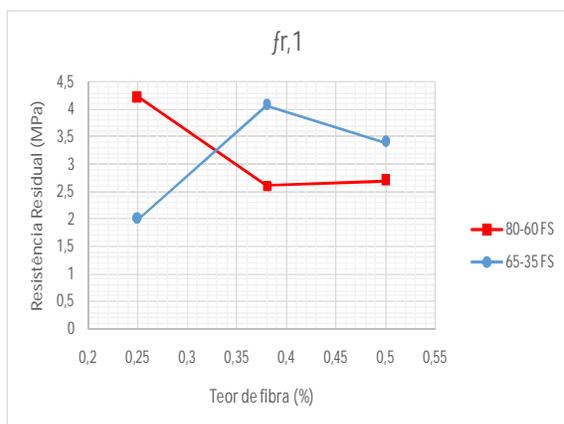
S10. Resistência residual ($f_{r,2}$) versus teor de fibras coladas em pente do tipo 80/60 e 65/35.



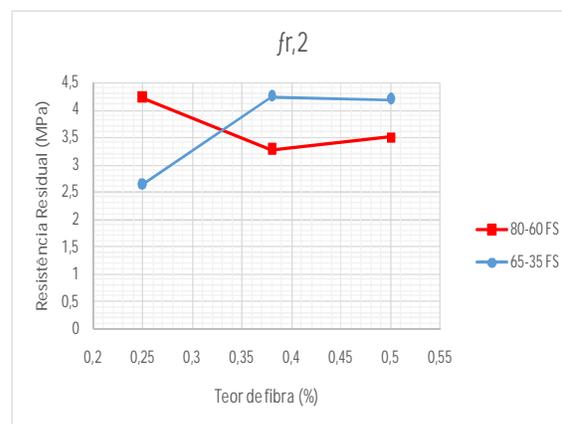
S11. Resistência residual ($f_{r,3}$) versus teor de fibras coladas em pente do tipo 80/60 e 65/35.



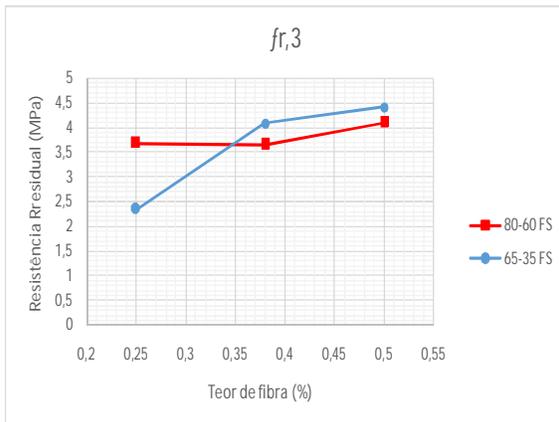
S12. Resistência residual ($f_{r,4}$) versus teor de fibras coladas em pente do tipo 80/60 e 65/35.



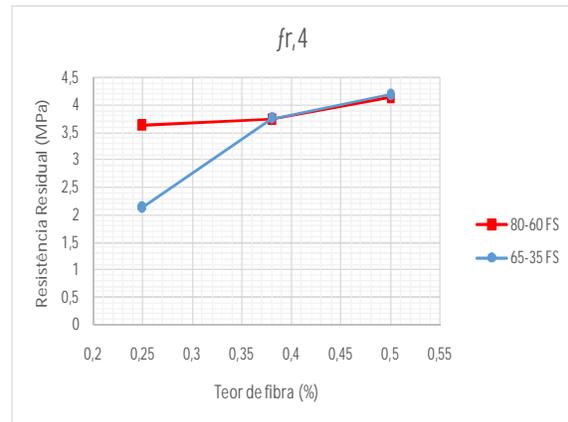
S13. Resistência residual ($f_{r,1}$) versus teor de fibras soltas do tipo 80/60 e 65/35.



S14. Resistência residual ($f_{r,2}$) versus teor de fibras soltas do tipo 80/60 e 65/35.

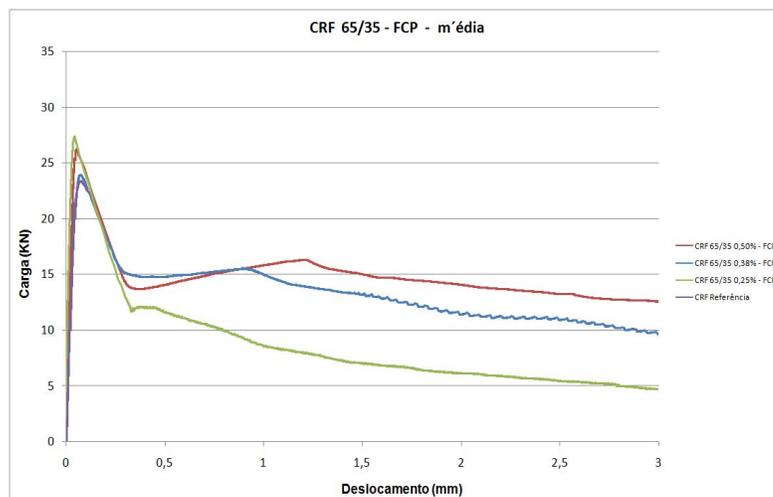


S15. Resistência residual ($f_{r,3}$) versus teor de fibras soltas do tipo 80/60 e 65/35.

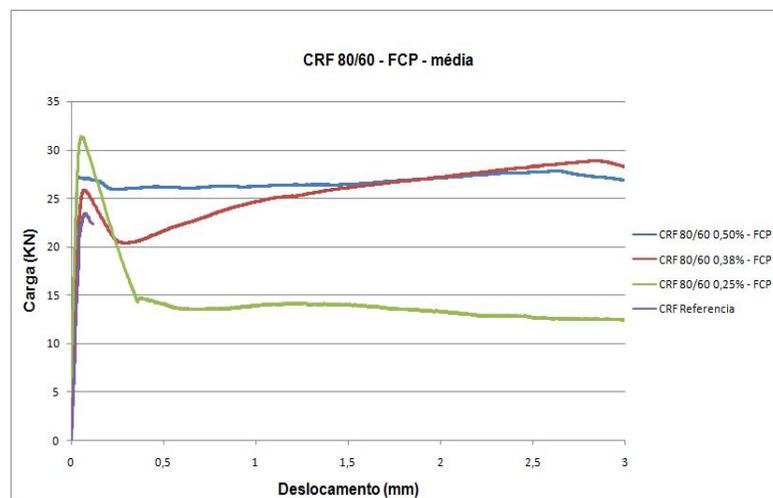


S16. Resistência residual ($f_{r,4}$) versus teor de fibras soltas do tipo 80/60 e 65/35.

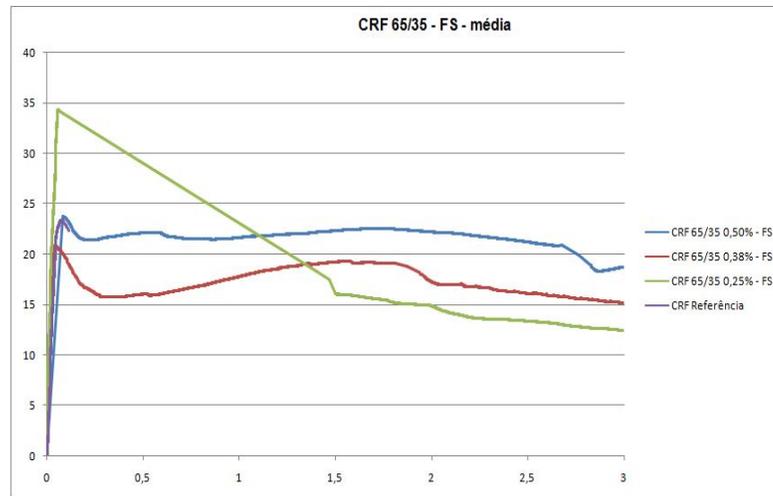
ANEXO T – Resultados médios de carga versus deslocamento das fibras coladas em pente ou soltas do tipo 65/35 ou 80/60 obtidos no ensaio de flexão pela JSCE SF-4 (1984).



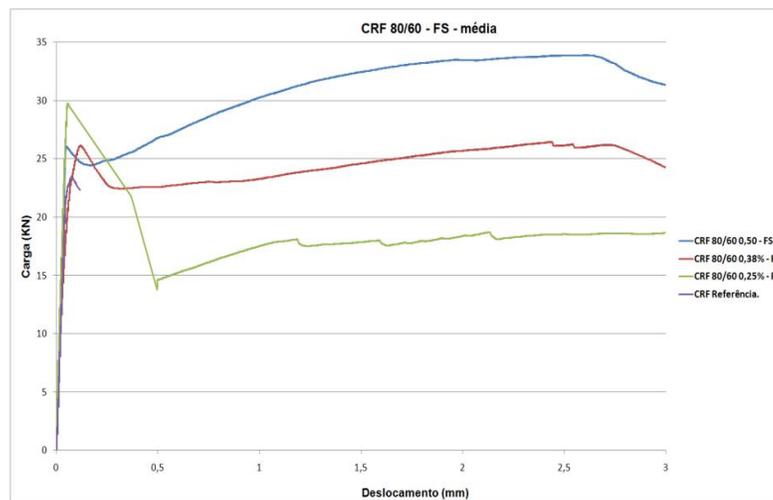
T1. Carga versus deslocamento para fibras coladas em pente do tipo 65/35 (média).



T2. Carga versus deslocamento para fibras coladas em pente do tipo 80/60 (média).

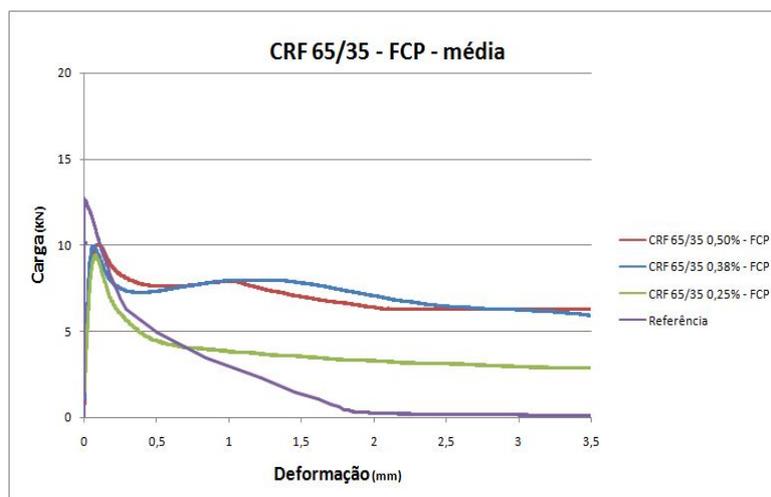


T3. Carga versus deslocamento para fibras de aço soltas do tipo 65/35 (média).

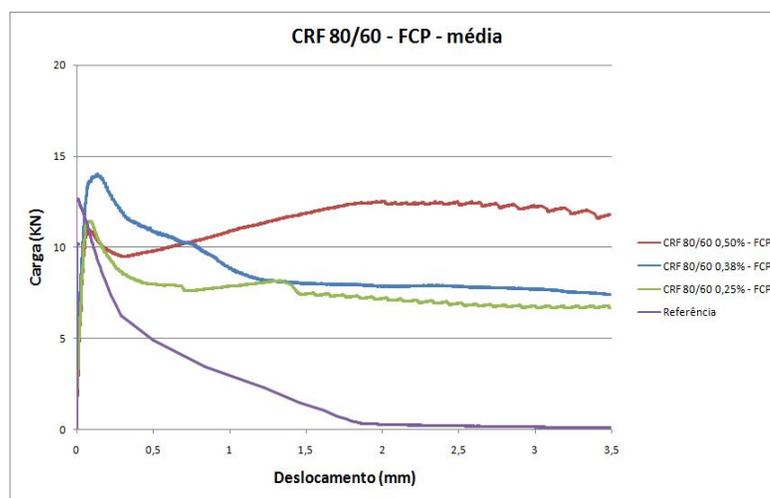


T4. Carga versus deslocamento para fibras de aço soltas do tipo 80/60 (média).

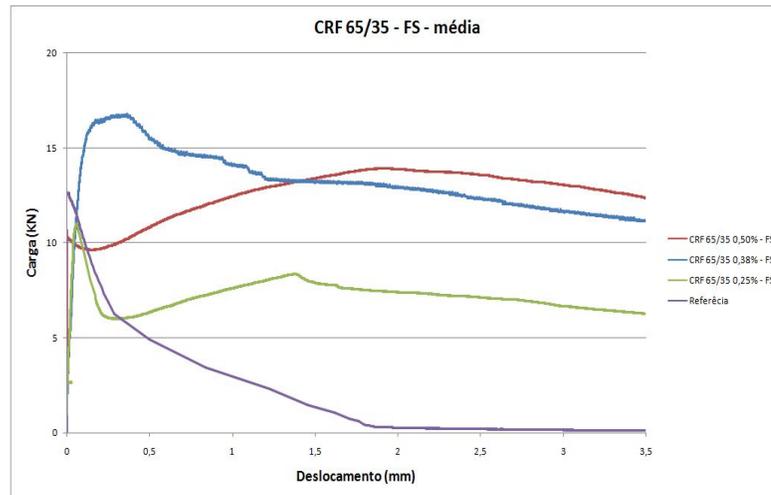
ANEXO U – Resultados médios de carga versus deslocamento das fibras coladas em pente ou soltas do tipo 65/35 ou 80/60 obtidos no ensaio de flexão pelo RILEM TC 162-TDF (2003).



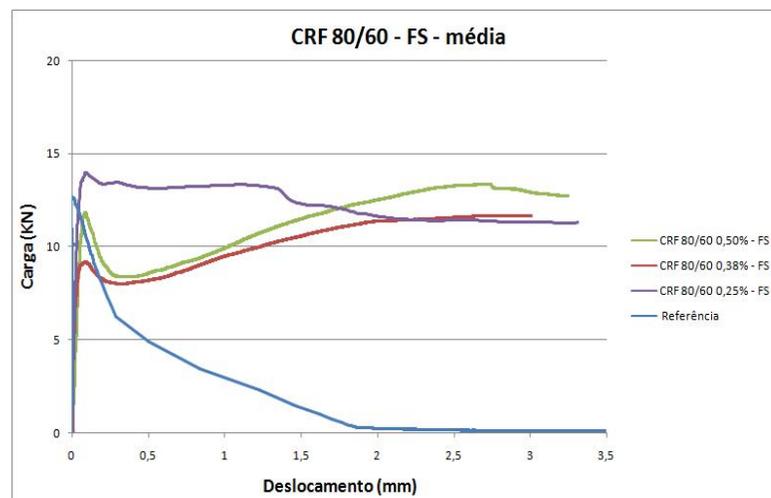
U1. Carga versus deslocamento para fibras coladas em pente do tipo 65/35 (média).



U2. Carga versus deslocamento para fibras coladas em pente do tipo 80/60 (média).



U3. Carga versus deslocamento para fibras soltas do tipo 65/35 (média).



U4. Carga versus deslocamento para fibras soltas do tipo 80/60 (média).

				Signif									
CRF 80/60 FS - 0,50%	Dif. Signif.	Dif. Signif.	Dif. Signif.	Dif. não Signif	Dif. Signif.	Dif. Signif.	Dif. não Signif.	Dif. Signif.					

V7. Compressão modificada de corpos-de-prova oriundos do ensaio de flexão pelo RILEM

(ANOVA).