

UFPA

PPGEC

Universidade Federal do Pará



Lana Daniele dos Santos Gomes Castro

**Proposta analítica para estimar as
resistências residuais à tração por flexão
em concreto reforçado com fibra de aço**

TESE DE DOUTORADO

Instituto de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

Tese orientada pelo Professor Dênio Ramam C. de Oliveira

Belém – Pará – Brasil

2022



Lana Daniele dos Santos Gomes Castro

Proposta analítica para estimar as resistências residuais à tração por flexão em concreto reforçado com fibra de aço

TESE DE DOUTORADO

Instituto de Tecnologia
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil

Orientação: Professor Dênio Ramam Carvalho de Oliveira

Belém – Pará – Brasil

2022

Universidade Federal do Pará
Instituto de Tecnologia
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil



Lana Daniele dos Santos Gomes Castro

Proposta analítica para estimar as resistências residuais à tração por flexão em concreto reforçado com fibra de aço

Tese de Doutorado

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Pará como requisito para obtenção do Título de Doutora em Engenharia Civil.

Orientação: Professor Dênio Ramam Carvalho de Oliveira

Belém
Junho/2022

CESSÃO DE DIREITOS

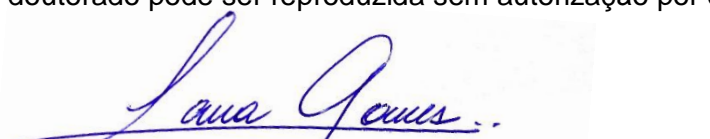
AUTORA: Lana Daniele dos Santos Gomes Castro.

TÍTULO: **Proposta analítica para estimar as resistências residuais à tração por flexão em concreto reforçado com fibra de aço**

GRAU: Doutora

ANO: 2022

É concedida à Universidade Federal do Pará permissão para reproduzir cópias desta tese de doutorado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa tese de doutorado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.



Lana Daniele dos Santos Gomes Castro.

CEP 68746-269, Castanhal – PA – Brasil.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

C355p Castro, Lana Daniele dos Santos Gomes.
Proposta analítica para estimar as resistências residuais à tração por flexão em concreto reforçado com fibra de aço / Lana Daniele dos Santos Gomes Castro. — 2022.
120 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Dênio Ramam Carvalho de Oliveira
Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Belém, 2022.

1. Ensaio de tração na flexão. 2. Vigas entalhadas. 3. Tensão residual. 4. Fibras de aço. 5. Equações empíricas. I. Título.

CDD 620



**PROPOSTA ANALÍTICA PARA ESTIMAR AS
RESISTÊNCIAS RESIDUAIS À TRACÇÃO POR FLEXÃO EM
CONCRETO REFORÇADO COM FIBRA DE AÇO**

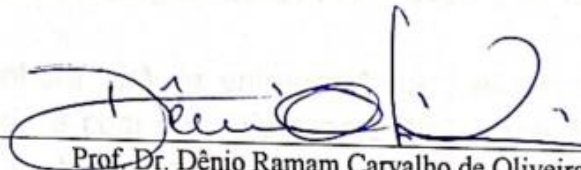
AUTORA:

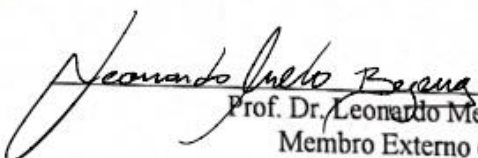
LANA DANIELE DOS SANTOS GOMES CASTRO

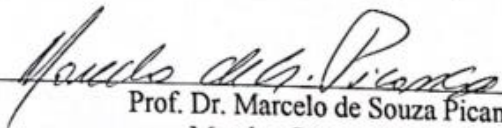
TESE SUBMETIDA À BANCA EXAMINADORA
APROVADA PELO COLEGIADO DO PROGRAMA DE
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL DO
INSTITUTO DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE
FEDERAL DO PARÁ, COMO REQUISITO PARA
OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTORA EM
ENGENHARIA CIVIL NA ÁREA DE ESTRUTURAS E
CONSTRUÇÃO CIVIL.

APROVADO EM: 15/06/2022.

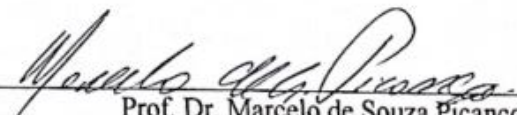
BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. Dênio Ramam Carvalho de Oliveira
Orientador (UFPA)


Prof. Dr. Leonardo Melo Bezerra
Membro Externo (UFC)


Prof. Dr. Marcelo de Souza Picanço
Membro Interno (UFPA)

Visto:


Prof. Dr. Marcelo de Souza Picanço
Coordenador do PPGEC / ITEC / UFPA

*Dedico aos meus pais, Landoaldo e Angela,
meu esposo Francisco André,
irmãos Abel e Igor,
meus amados e eternos sogros, Graça e Lourival (in memoriam),
cunhados Raul, Jessica e Brunna,
sobrinhos, Dom e Maya.*

“Nenhum homem é uma ilha, completa em si mesma; todo homem é um pedaço do continente, uma parte da terra firme. Se um torrão de terra for levado pelo mar, a Europa fica menor, como se tivesse perdido um promontório, ou perdido o solar de um teu amigo, ou o teu próprio. A morte de qualquer homem diminui a mim, porque na humanidade me encontro envolvido; por isso, nunca mandes indagar por quem os sinos dobram; eles dobram por ti.”

John Donne, epígrafe do romance “Por quem os sinos dobram”.

Agradecimentos

Desde a minha infância enfatizava que seria doutora um dia, pois associava esse feito a ser alguém na vida. Hoje, após um caminho pouco retilíneo e sem uma vista tão apreciável, estou bem perto do meu objetivo. Contudo, com um relevante ensinamento, não é o título que me faz ser “alguém na vida”, mas as experiências adquiridas e, principalmente, as pessoas que me acompanharam ao longo do percurso, que foram muitas, e sem elas eu afirmo: não seria ninguém.

Primeiramente agradeço a DEUS por me dar forças em todos os momentos, por me proporcionar milagres e guiar, sempre, pelos melhores caminhos. Afirmo, DEUS é bom o tempo todo.

Minha gratidão especial ao professor **Dênio Ramam**, meu orientador e, sobretudo, um grande amigo. Muito obrigada por todo o auxílio e oportunidades quando eu mais precisei, pela paciência e compreensão, mesmo nos momentos em que não me fiz tão presente por motivos de força maior, os quais foram sempre compreendidos pelo senhor com muita confiança de que tudo daria certo no final. Agradeço também a sua dedicação, pelos ensinamentos, incentivo, por ser uma constante fonte de motivação ao longo desses anos e, principalmente, por ter acreditado em mim.

Agradeço ao meu esposo, **Francisco André**, por toda paciência, pela sua força que me motivava a seguir sempre em frente e pela sua tranquilidade de que tudo daria certo, por suportar todos os meus momentos de estresse e ausência durante o processo. Obrigada por toda a sua capacidade de compreensão, por sua confiança em mim, enfim, pela sua presença em minha vida, presença essa que tornou tudo mais leve. Obrigada pelo seu amor, por me tornar alguém melhor e por ser meu companheiro de todas as horas, por fazer parte da minha vida, Vida.

Aos meus pais, **Landoaldo** e **Angela**, e meus irmão, **Abel** e **Igor**, muito obrigada pela compreensão com a constante ausência e falta de atenção da minha parte, pelo enorme apoio em todos os momentos, pelo esforço que fizeram para que eu pudesse superar cada obstáculo em meu caminho até aqui e, especialmente, pelo amor que sempre me deram. Amo vocês.

Agradeço imensamente ao meu irmão **Abel Neto** e meu amigo **Aaron Kadima**, pois foram de fundamental importância para o desenvolvimento desta tese, vocês foram verdadeiros anjos na minha vida. Agradeço aos meus queridos amigos **Denisson Braun, Vander Melo** e **Joel Martins**, fundamentais na etapa que antecedeu o programa experimental desta tese, sempre com muito comprometimento, competência e seriedade. Agradeço aos amigos **Paulo Mota** e **Luciano Reis** que me incentivaram desde o início, com a logística para obtenção e preparo dos materiais, pelos momentos de descontração, pelo apoio e pela amizade. A minha grande amiga **Karoline Dantas**, além da sua amizade que estimo infinita e imensamente, agradeço por sua ajuda imensurável que tornou possível o desenvolvimento do meu programa experimental fornecendo equipamentos necessários. Agradeço ao **Vitor Hugo**, pelo apoio e disponibilidade durante os meus ensaios. Por fim, agradeço ao meu pai (**Landoaldo**), minha mãe (**Angela**), meu irmão **Igor**, meu esposo (**Francisco André**) e ao **Nazareno**, por me ajudarem na fase experimental: confecção de formas, concretagem, cura do concreto, desmoldagem dos corpos de prova e ensaio. Todos vocês foram essenciais para o desenvolvimento desta pesquisa. Essa vitória é nossa!

Ao grupo GAEMA, por me acolher, colaborar e me impulsionar nessa jornada. A todos os professores integrantes e aos amigos que lá conquistei, por muito me ajudarem desde o período da graduação, ajuda esta, sempre espontânea e desinteressada. Aos Professores do PPGECC pela contribuição na minha formação, durante todo este período de mestrado e doutorado, em especial aos professores: **Marcelo, Bernardo, Pompeu, Alcebíades** e **Adelson**. Agradeço muitíssimo a **Sanny Assis**, por todo apoio e pela sua competência, você é um anjo para todos nós que fazemos parte do PPGECC.

Agradeço ao IFPA por me proporcionar o afastamento total para a conclusão do doutorado, e, principalmente pelos amigos que me deu, dentre eles destaco o **Augusto Vieira, João Melo, Lucimara Leal, Paulo Lobo, Clarissa Cavalcante, Fabrício Fernandes, Saulo Almada**, ao nosso digníssimo e excelentíssimo Diretor Geral **Damião Meira**, e aos demais, muito obrigada pela assistência recorrente, amizade, pelo carinho e dedicação demonstrado.

A todos, meu muito obrigada.

Resumo

CASTRO, L.D.S.G. **Proposta analítica para estimar as resistências residuais à tração por flexão em concreto reforçado com fibra de aço.** Tese de Doutorado, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, Pará, Brasil. 2022.

Nesta pesquisa são apresentadas equações que estimam as tensões residuais, f_{Ri} ($i = 1$ a 4), com base nos principais parâmetros que influenciam no desempenho do concreto reforçado com fibra de aço (CRFA), como as propriedades geométricas das fibras de aço, a resistência à compressão do concreto (f_c) e o volume de fibra (V_f). Para essa finalidade, a pesquisa foi dividida em três etapas, a primeira consistiu em criar um banco de dados extenso e diversificado para, a partir dele, desenvolver as equações de tensões residuais através de regressão múltipla. A etapa seguinte foi experimental, composta 15 vigas (150x150x550) mm entalhadas e ensaiadas à tração na flexão, com volumes de fibra variável, com teores de 0,0%, 0,5%, 1,0%, 1,5% e 2,0%. Por fim, para a análise das equações elaboradas na primeira etapa, outro banco de dados é apresentado, no qual foram inseridos resultados experimentais coletados da literatura e os obtidos nesta pesquisa, e, adicionalmente, foi realizada comparações de desempenho com outros quatro modelos analíticos existentes. Concluiu-se que a proposta analítica apresentada por este estudo, para definir as tensões residuais, em comparação com os demais modelos empíricos existentes, destacou-se pelo seu bom desempenho, uma vez que foi a mais precisa, menos penalizada e dispersa, demonstrando a confiabilidade das equações.

Palavras-chave

Teste de flexão de 3 pontos (3PBT); Vigas entalhadas; Tensão residual; Fibras de aço; Equações empíricas.

Abstract

CASTRO, L.D.S.G. *Analytical proposal to estimate the residual flexural tensile strength for steel fiber reinforced concrete*. PhD thesis, Institute of Technology, Federal University of Pará, Belém, Pará, Brazil, 2022 (in Portuguese).

This research presents equations that estimate the residual resistances, f_{Ri} ($i = 1$ to 4), based on the main parameters that influence the performance of steel fiber reinforced concrete (SFRC), such as the geometric properties of steel fibers, the concrete compressive strength (f_c) and fiber volume fraction (V_f). For this purpose, the research was divided into three stages, the first one consisted of creating an extensive and diversified database to, from it, develop the residual resistances equations through multiple regression. The next stage was experimental, composed of 15 beams (150x150x550) mm notched and tested to flexural tension, with variable fiber volumes, with contents of 0.0%, 0.5%, 1.0%, 1.5% and 2.0%. Finally, for the analysis of the equations elaborated in the first step, another database is presented, in which experimental results collected from the literature and those obtained in this research were inserted, and, additionally, performance comparisons were performed with four other existing analytical models. It was concluded that the analytical proposal presented by this study to define the residual resistances, in comparison with the other existing empirical models, stood out for its good performance, since it was the most accurate, less penalized and dispersed, demonstrating the reliability of the equations.

Keywords

3-point bending tests; notched beams; residual stresses; steel fiber; empirical equations.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	XIII
LISTA DE FIGURAS	XIV
LISTA DE SÍMBOLOS	XVII
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. JUSTIFICATIVA	4
1.2. OBJETIVOS	5
1.2.1. Objetivos gerais	5
1.2.2 Objetivos específicos	6
1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO	7
2. CONCRETO REFORÇADO COM FIBRA DE AÇO (CRFA)	9
2.1. COMPÓSITO ESTRUTURAL: CONCRETO COM FIBRAS	9
2.2. FIBRAS DE AÇO	11
2.3. PROPRIEDADES DO CRFA NO ESTADO FRESCO	15
2.4. PROPRIEDADES DO CRFA NO ESTADO ENDURECIDO	18
2.4.1. Resistência à compressão	21
2.4.2. Resistência à tração direta	22
2.4.3. Resistência à tração por compressão diametral	23
2.4.4. Resistência à tração na flexão de 3 pontos	25
3. MODELOS ANALÍTICOS PARA ESTIMAR AS f_{Ri} DA LITERATURA	28
3.1. CARRILLO <i>et al.</i> (2021)	28
3.2. DOMSKI E KATZER (2019)	29
3.3. VENKATESWARAN <i>et al.</i> (2017)	30
3.4. MORAES NETO (2013)	31
4. PROPOSTA ANALÍTICA PARA ESTIMAR AS RESISTÊNCIAS RESIDUAIS À TRAÇÃO POR FLEXÃO (f_{R1}, f_{R2}, f_{R3} e f_{R4})	33
5. PROGRAMA EXPERIMENTAL	39
5.1. MATERIAIS UTILIZADOS	39
5.2. VIGAS ENTALHADAS	41
5.3. VOLUME DE FIBRAS DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO	42
5.4. SISTEMA DE ENSAIO	43
6. RESULTADOS EXPERIMENTAIS	45
6.1. INFLUÊNCIA DO FATOR DE ORIENTAÇÃO E NÚMEROS DE FIBRAS	46

6.2. RESISTÊNCIA RESIDUAL À FLEXÃO NO COMPORTAMENTO PÓS-FISSURAÇÃO	49
7. VALIDAÇÃO DO MODELO ANÁLITICO PROPOSTO	51
7.1. PROCEDIMENTO DE AVALIAÇÃO	52
7.2. COMPARAÇÃO ENTRE O MODELO PROPOSTO E OS MODELOS EMPÍRICOS DA LITERATURA	52
8. CONCLUSÕES	64
9. REFERÊNCIAS	66
ANEXO A – BANCO DE DADOS UTILIZADO PARA ELABORAR AS EQUAÇÕES ANALÍTICAS PARA ESTIMAR f_{Ri} ($i = 1, 2, 3$ e 4)	86
ANEXO B – BANCO DE DADOS UTILIZADO PARA AVALIAR O DESEMPENHO DAS EQUAÇÕES ANALÍTICAS PARA ESTIMAR f_{Ri} ($i = 1, 2, 3$ e 4)	91
ANEXO C - INFORMAÇÕES ADICIONAIS SOBRE AS FIBRAS DE AÇO: FABRICANTE	96
ANEXO D - INFORMAÇÕES ADICIONAIS SOBRE O ADITIVO UTILIZADO: FABRICANTE	97
ANEXO E – PRODUÇÕES CIENTÍFICAS COM CRFA	100
ANEXO E.1. <i>Proposal to estimate the residual flexural tensile strength for SFRC – Revista Materials and Structure, Qualis A1.</i>	100
ANEXO E.2. <i>Pile caps with inclined shear reinforcement and steel fibers – Revista Scientific Reports, Qualis A1.</i>	101
ANEXO E.3. <i>Experimental analysis of the efficiency of steel fibers on shear strength of beams – Revista Latin American Journal of Solids and Structures, Qualis A2.</i>	102

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1. Classificação das fibras segundo as regulamentações internacionais (Adaptada de MORAES NETO, 2013)	12
Tabela 2.2. Classificação das fibras segundo a NBR 15530 (2019)	13
Tabela 4.1. Banco de dados para elaboração de equações empíricas de tensão residual	34
Tabela 5.1. Materiais constituinte da mistura do concreto	41
Tabela 5.2. Volume de fibras concreto fresco	43
Tabela 6.1. Resultados de resistência à tração na flexão e propriedades mecânicas do concreto	46
Tabela 6.2. Estimativa do fator de orientação (valor médio)	48
Tabela 7.1. Banco de dados para validação e análise de equações empíricas de tensão residual	51
Tabela 7.2. Versão modificada DPC	52
Tabela 7.3. Avaliação quanto à segurança dos modelos empíricos	54
Tabela A.1. Banco de dados utilizado para elaborar as equações analíticas para estimar f_{Ri}	86
Tabela B.1. Banco de dados utilizado para avaliar as equações analíticas para estimar f_{Ri}	91

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Distribuição das tensões (linhas vermelhas) no concreto simples e CRFA, adaptado FIGUEIREDO et al. (2015)	3
Figura 1.2. Fluxograma para utilização as normas de CRFA para fins estruturais: Determinação das tensões residuais	5
Figura 2.1. Muro com tijolo reforçado com palha no Egito (CÁNOVAS, 1988)	9
Figura 2.2. Alguns tipos de fibras de aço encontradas comercialmente	11
Figura 2.3. Curvas <i>Carga de arracamento - Deslizamento</i> para diferentes tipos de fibras e seus respectivos modos de ruptura. Adaptado de DING et al. (2021)	14
Figura 2.4. Processo de arrancamento de uma fibra de aço do tipo <i>hooked end</i> (com extremidade em gancho). Adaptado de ABDALLAH et al. (2018)	14
Figura 2.5. Aglomerado de fibras de aço (ouriço) mal misturadas ao concreto (FIGUEIREDO, 2011)	16
Figura 2.6. Comportamento do CRFA com e sem compatibilização entre as fibras e agregado. (FIGUEIREDO, 2011)	17
Figura 2.7. Modelo micro mecânico, conceito básico. Adaptado de LI et al. (1993)	19
Figura 2.8. Mecanismo de transferência de esforços (adaptado de GARCEZ, 2005)	20
Figura 2.9. Relação <i>tensão-deformação</i> do concreto comprimido e influência de V_f no desempenho do CRFA. adaptado ACI 544.4R (1996)	22
Figura 2.10. Sistema de ensaio à tração direta preconizado por RILEM TC 162-TDF (2001). Adaptado de Moraes Neto (2013)	23
Figura 2.11. Relação carga-abertura da fissura no ensaio de compressão diametral. Adaptado SALAZAR (2010)	24
Figura 2.12 - Análise da resistência à tração na flexão (adaptado RILEM 162 TDF, 2002)	26
Figura 2.13. Comportamento do CRFA sob o ensaio 3PBT(a) com amolecimento (b) com endurecimento. Adaptado de CEB-FIP (2010)	27
Figura 4.1. Interface do software Origin Pro (2020).	36
Figura 4.2. (a) Abertura de fissura e (b) Arrancamento da fibra	37
Figura 4.3. Representação gráfica da regressão das equações de resistência à tração à flexão residual	38
Figura 5.1. Geometria e característica das fibras empregadas no programa experimental	41
Figura 5.2. Materiais utilizados: (a) Cimento Portland CPII-Z-32 RS, (b) Sílica, (c) Areia, (d) Agregado graúdo, (e) Fibras de aço (DRAMIX® 3D 65/60 BG) e (f) Aditivo Superplastificante	42
Figura 5.3. Vigas moldadas e seus respectivos corpos de prova cilíndricos	43

Figura 5.4. Determinação do consumo de fibra no concreto fresco: (a) Amostra com 6L e peneiras; (b) Lavagem da amostra; (c) Secagem do material remanescente; (d) Coleta das fibras para pesagem	44
Figura 5.5. Sistema de ensaio 3PBT	44
Figura 6.1. Seção transversal A_p do prisma com volume de fibra igual à 1,5%	47
Figura 6.2. Resumo do número de fibras contabilizados em uma das seções transversais das vigas	47
Figura 6.3. Curvas <i>tensão-CMOD</i> para o ensaio de flexão 3PBT: $Mix_{C0,0}$ (concreto simples)	50
Figura 6.4. Curvas <i>tensão-CMOD</i> para o ensaio 3PBT: (a) $Mix_{C0,5}$, (b) $Mix_{C1,0}$, (c) $Mix_{C1,5}$ e (d) $Mix_{C2,0}$	50
Figura 7.1. Avaliação quanto à segurança: (a) $f_{R1,exp}/f_{R1,teo}$; (b) $f_{R2,exp}/f_{R2,teo}$; (c) $f_{R3,exp}/f_{R3,teo}$; (d) $f_{R4,exp}/f_{R4,teo}$	54
Figura 7.2. Gráfico de dispersão de resultado experimental-teórico, $f_{Ri,exp}/f_{Ri,teo}$: (a) $f_{R1,exp}/f_{R1,teo}$; (b) $f_{R2,exp}/f_{R2,teo}$; (c) $f_{R3,exp}/f_{R3,teo}$; (d) $f_{R4,exp}/f_{R4,teo}$	55
Figura 7.3. Distribuição normal da relação $f_{Ri,exp}/f_{Ri,teo}$: (a) $f_{R1,exp}/f_{R1,teo}$; (b) $f_{R2,exp}/f_{R2,teo}$; (c) $f_{R3,exp}/f_{R3,teo}$; (d) $f_{R4,exp}/f_{R4,teo}$	56
Figura 7.4. Desempenho e resumo estatístico dos modelos empíricos: (a) $f_{R1,exp}/f_{R1,teo}$; (b) $f_{R2,exp}/f_{R2,teo}$; (c) $f_{R3,exp}/f_{R3,teo}$; (d) $f_{R4,exp}/f_{R4,teo}$	58
Figura 7.5. Comparação dos modelos analíticos com base no índice de reforço: (a) $f_{R1,exp}/f_{R1,teo}$; (b) $f_{R2,exp}/f_{R2,teo}$; (c) $f_{R3,exp}/f_{R3,teo}$; (d) $f_{R4,exp}/f_{R4,teo}$	60
Figura 7.6. Comparação dos modelos analíticos com os resultados experimentais: (a) f_{R1} ; (b) f_{R2} ; (c) f_{R3} ; (d) $f_{R4,exp}$	62

LISTA DE SÍMBOLOS

Neste item são apresentados os símbolos utilizados nesta tese.

$CMOD$	<i>Crack mouth opening displacement</i> , refere-se a abertura da fissura do CRFA
$CRFA$	Concreto reforçado com fibra de aço
λ_f	Fator de forma da fibra (l_f/d_f)
A_p	Área da seção transversal da viga, desconsiderando o entalhe
b	Largura da viga entalhada
d_f	Diâmetro da fibra
D_{maxc}	Diâmetro máximo do agregado graúdo
$E_{c,m}$	Módulo de elasticidade, valor médio
f_c	Resistência a compressão do concreto
f_{cm}	Resistência a compressão do concreto, valor médio
f_L	Limite de proporcionalidade
f_{Lm}	Limite de proporcionalidade, valor médio
FO	Fator de orientação da fibra
F_{Ri}	Carga residual ($i = 1, 2, 3, 4$)
F_{R1}	Carga Residual referente ao $CMOD = 0,5$ mm
F_{R2}	Carga Residual referente ao $CMOD = 1,5$ mm
F_{R3}	Carga Residual referente ao $CMOD = 2,5$ mm
F_{R4}	Carga Residual referente ao $CMOD = 3,5$ mm
f_{Ri}	Tensão residual ($i = 1, 2, 3, 4$)
$f_{Ri,exp}$	Tensão residual, valores experimentais
$f_{Ri,teo}$	Tensão residual, valores teóricos
f_{R1}	Tensão Residual referente ao $CMOD = 0,5$ mm

f_{R2}	Tensão Residual referente ao CMOD = 1,5 mm
f_{R3}	Tensão Residual referente ao CMOD = 2,5 mm
f_{R4}	Tensão Residual referente ao CMOD = 3,5 mm
f_t	Resistência à tração do concreto
f_u	Resistência à tração última das fibras
$f_{y,f}$	Tensão de escoamento da fibra
h_{sp}	Altura do final do entalhe à face superior da viga
L	Comprimento da viga entalhada
$l_{b,f}$	Comprimento de embutimento da fibra de aço na matriz cimentícia
l_f	Comprimento da fibra
M_f	Massa de fibras coletadas após a secagem
N	Número de ganchos nas extremidades das fibras
N_f	Número de fibras na interface das vigas entalhadas após o ensaio de flexão
IR	Índice de reforço ($IR = V_f \cdot \lambda_f$)
V	Volume da amostra igual à 0,006 m ³
V_f	Volume da fibra
V_{fR}	Volume de fibra no concreto no estado fresco

1. INTRODUÇÃO

O concreto simples é caracterizado como um material frágil, com baixa capacidade de deformação e limitada resistência a tenacidade e à tração (SATPUTE *et al.*, 2016). Neste contexto, surgiram tecnologias para suprir essas restrições mecânicas, como o consolidado concreto armado, onde o mecanismo de reforço é proporcionado pelas barras de aço, e mais recentemente, o uso de fibras no concreto. Embora o concreto reforçado com fibras não seja uma tecnologia nova, o seu desenvolvimento tecnológico só foi intensificado no início da década de 60 nos Estados Unidos, onde investigações foram realizadas, tanto experimental como teoricamente, com o intuito de explicar as propriedades mecânicas desse material e a sua utilização como reforço no concreto simples. O conhecimento adquirido nos anos seguintes sobre o concreto reforçado com fibras de aço (CRFA), fruto dos investimentos em pesquisas, conferiu a esse material um papel relevante nas aplicações da construção civil, com destaque para os pré-fabricados (NEHDI *et al.* (2015); ZANG *et al.*, 2021), revestimentos de túneis (GONG *et al.*, 2017; WANG *et al.*, 2020), pisos industriais (HEDEBRATT, 2012), tubos de águas pluviais e esgotos (MORAES NETO *et al.*, 2013), elementos de contenção (CASTRO *et al.*, 2021), estruturas sujeitas a sismos e impactos (ZANG e COSTA, 2017; SURIANINOV *et al.*, 2020), reforço de elementos estruturais (XARGAY *et al.* 2021), dentre outras.

Nota-se que o uso de fibras é promissor, uma vez que, a adição da fibra de aço na matriz do concreto pode trazer benefícios nas suas propriedades mecânicas (MOBASHER *et al.*, 2015), pois tem a capacidade de melhorar a sua energia de absorção (BARROS, 1995; LARANJEIRA *et al.*, 2010; GOMES *et al.* 2018), a fadiga (CAVERZAN *et al.*, 2011), tenacidade (LOK e ZHAO 2004; GOEL *et al.*, 2012), controla a abertura de fissuras com efeito de ponte nas transferências de tensões (ZOLLO, 1997; SUNAGA *et al.*, 2020;

LAKAVATH *et al.*, 2022), e há a possibilidade de reduzir o consumo de armadura principais de tração, compressão e cisalhamento nos elementos estruturais (NZAMBI *et al.*, 2021a), ampliando sua esfera de aplicação de piso industrial (TIBERTI *et al.*, 2017, MEDA e PLIZZARI, 2004; BELLETTI *et al.*, 2008) às estruturas especiais robustas de concreto armado (DI-PRISCO *et al.*, 2009, NAAMAN e REINHARDT, 2003, WALRAVEN, 2007).

BABAR *et al.* (2015) e KYTINOÛ *et al.* (2020), explicam que, além das vantagens citadas acima, o mecanismo de reforço proporcionado pelas fibras também garante ao concreto ductilidade, melhores condições de confinamento para as armaduras, maior impermeabilidade e controle sobre a retração e fissuração, gerando impacto direto na durabilidade. Para CHALIORIS e SFIRI (2011), o desempenho do concreto reforçado com fibras de aço (CRFA) depende das características das fibras. Os parâmetros que mais influenciam, direta ou indiretamente, no comportamento pós-fissuração do concreto com fibra de aço, são o fator de forma ($\lambda_f = l_f/d_f$), que representa a razão entre o comprimento e diâmetro da fibra, o volume de fibra (V_f), a resistência à compressão do concreto (f_c) (DOMSKI e KATZER, 2019), além da distribuição e orientação das fibras (SOROUSHIAN e LEE, 1990; FERRARA e MEDA, 2006; ENFEDAQUE *et al.*, 2021).

De acordo com CHU e KWAN (2019) e FOTOUHI *et al.* (2020), outro fator relevante é a interação *fibra-concreto* que se desenvolve no momento da formação de uma fissura, onde as fibras passam a atuar como pontes de tensão através da transferência de esforços entre o concreto e as fibras, como ilustra a Figura 1.1b. Contudo, na Figura 1.1a, é possível verificar que no concreto simples há um acúmulo de tensão na extremidade da fissura, o que potencializa a propagação da mesma.

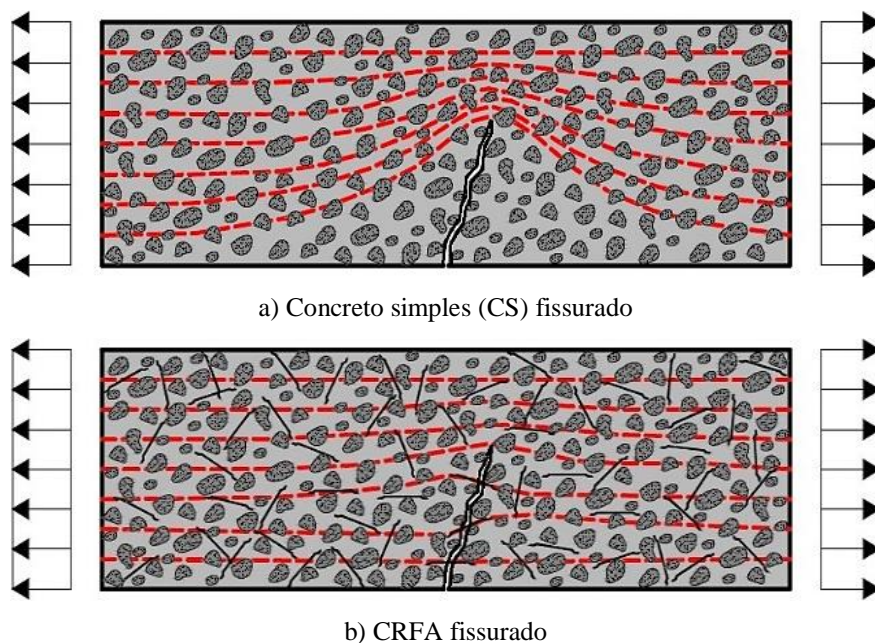


Figura 1.1. Distribuição das tensões (linhas vermelhas) no concreto simples e CRFA, adaptado FIGUEIREDO *et al.* (2015).

Entretanto, para projetos estruturais com concreto reforçado com fibras de aço, as especificações prévias das resistências residuais à tração por flexão são essenciais, pois estas, além de definirem o comportamento do concreto reforçado com fibra de aço fissurado, são empregadas regularmente para o dimensionamento e verificação estrutural preconizados por documentos normativos, como por exemplo, RILEM TC 162-TDF (2002), EHE-08 (2010), CEB-FIP (2010) e NBR 16935 (2021). Contudo, atualmente as tensões residuais, f_{Ri} (onde $i=1-4$), são obtidas apenas experimentalmente através da caracterização do CRFA, a partir do ensaio de tração por flexão de 3 pontos (3PBT) de vigas entelhadas, o que torna o uso do concreto com fibras de aço, voltado para o dimensionamento de elementos estruturais, pouco prático.

Na literatura existem algumas aproximações analíticas para estimar as resistências residuais do CRFA. No entanto, a maioria dos modelos analíticos que estimam os valores das resistências residuais fazem análises de regressão linear ou múltipla, com base no comportamento dos parâmetros geométricos das fibras e o volume de fibra utilizado

(MORAES NETO *et al.*, 2013; DOMSKI e KATZER, 2019; TIBERTI *et al.*, 2017), do número de gancho nas extremidades da fibra (VENKATESHWARAN *et al.*, 2017; SILVA *et al.*, 2020) e das propriedades mecânicas da matriz do concreto, como a resistência à compressão (CARRILLO *et al.* 2021). Desta maneira, a dispersão e a precisão desses modelos dependem diretamente da interpretação do comportamento influenciador desses parâmetros, o que tornam os resultados mais heterogêneos.

1.1. JUSTIFICATIVA

Apesar do vasto interesse e da evolução científica em relação ao concreto reforçado com fibra de aço nas últimas décadas, apenas recentemente, algumas considerações de projeto estão sendo disponibilizadas em documentos normativos, contudo, a aplicação do CRFA ainda é limitada, conforme explica CEB-FIP (2010) e ACI 318-19 (2019), devido à falta de familiaridade com o material, resistência cultural e, principalmente, devido às recomendações normativas existentes não garantirem o preparo, o controle e o dimensionamento adequado do concreto com fibra de aço, especialmente por necessitarem de parâmetros, como os valores das tensões residuais, f_{Ri} ($i=1$ a 4), para o dimensionamento estrutural obtidos apenas após o processo de caracterização do material, como mostra o fluxograma da Figura 1.2. Nesse sentido, elaborou-se uma proposta analítica para estimar os valores de tensões residuais, f_{Ri} , com o intuito de dispensar a etapa experimental de caracterização prévia do CRFA, o qual é obtido das curvas *carga-deslocamento* ou *carga-CMOD* (*Crack mouth opening displacement*), que atualmente são determinadas somente através do ensaio de tração por flexão, o que torna o uso do concreto com fibras de aço pouco viável. A Figura 1.2 mostra, de forma resumida, a quantidades de etapas necessárias para a utilização do CRFA atualmente, aplicado às estruturas, conforme as especificações normativas. Assim como, a otimização do processo de dimensionamento do CRFA com o uso das equações

propostas por esta pesquisa para determinar f_{Ri} ($i=1$ a 4). Adicionalmente, frisa-se que as divergências entre pesquisadores em sobre o uso de fibras ainda é considerável, o que ratifica a relevância de mais estudos esclarecedores, tanto experimentais quanto teóricos.

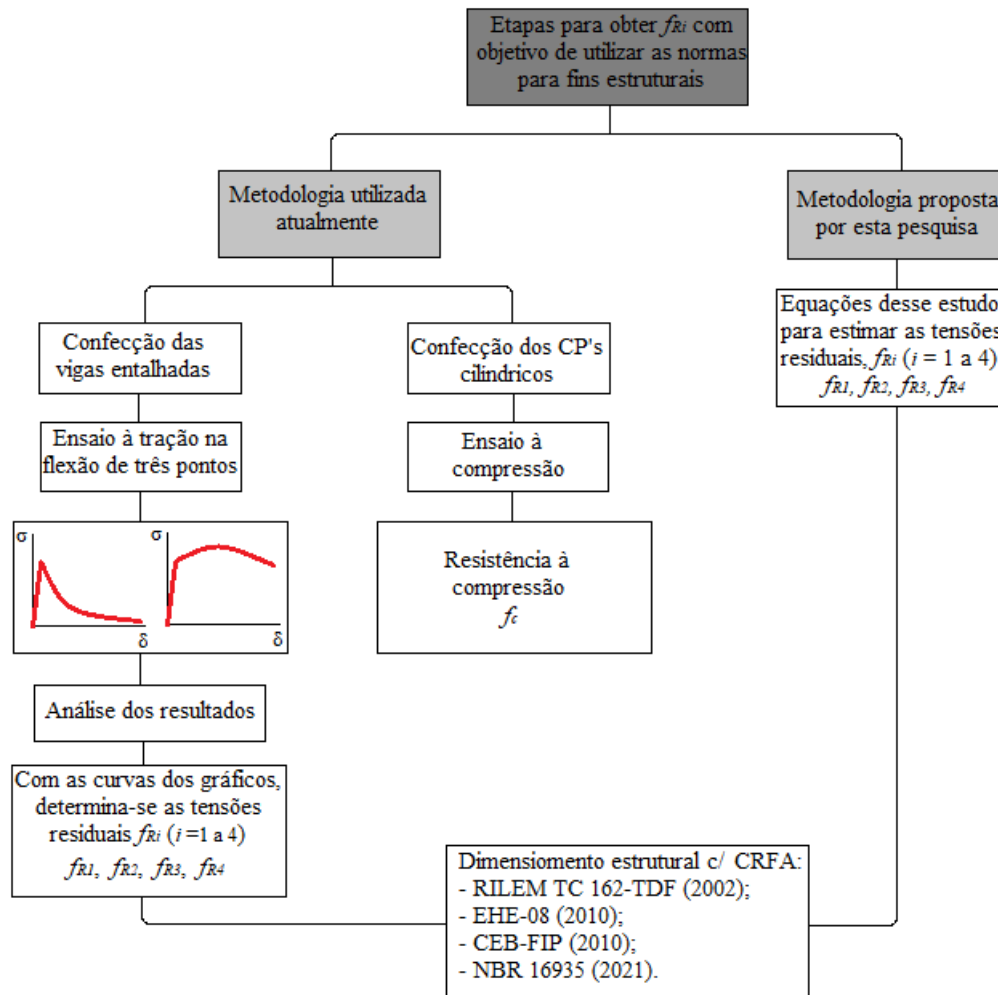


Figura 1.2. Fluxograma para utilização das normas de CRFA para fins estruturais: Determinação das tensões residuais.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivos gerais

O presente estudo propõe uma abordagem teórica e experimental. Na abordagem teórica é apresentada uma base de dados consistente, com finalidade de formular equações empíricas para determinar as tensões residuais, f_{Ri} ($i=1-4$), as quais podem auxiliar o uso das

recomendações normativas para CRFA, para fins estruturais, de modo mais prático. A etapa experimental tem finalidade de complementar a abordagem teórica, através de ensaios de tração na flexão em 15 vigas entalhadas com volume de fibra variável, com finalidade comparar os resultados obtidos experimentalmente com os teóricos, complementarmente, aprimorar o conhecimento em torno do concreto reforçado com fibras de aço.

1.2.2. Objetivos específicos

- Apresentar um banco de dados com resultados de vigas entalhadas submetidas à ensaio de tração na flexão, retiradas da literatura, para elaborar equações empíricas que estimem os valores das tensões residuais, f_{Ri} ($i=1-4$), de forma prática e precisa;
- Ensaiai 15 vigas com entalhe, com volume de fibras igual à 0,0%, 0,5%, 1,0%, 1,5% e 2,0%). A partir dos resultados obtidos, curvas de *carga-CMOD*, determinar as respectivas tensões residuais que serão utilizadas para validar as equações propostas por essa pesquisa;
- Apresentar um segundo banco de dados com vigas entalhadas, para analisar as equações elaboradas por este estudo para estimar f_{Ri} , assim como, verificar o desempenho dos demais modelos empíricos encontrados na literatura;
- Por fim, discutir e analisar os resultados obtidos, com a intenção de utilizar as formulações de tensões residuais, apresentadas por esta pesquisa, em substituição a fase de caracterização do concreto com fibras de aço, ou seja, mostrar a possibilidade de retirar a fase experimental composta pelo ensaio de tração por flexão em três pontos de vigas entalhadas, necessária atualmente para o dimensionamento estrutural com CRFA. O que tornaria o uso do concreto com fibra, para fins estruturais, mais prático.

1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO

A presente tese foi formatada segundo as recomendações da NBR 14724 (2021), porém, considerando o modelo de apresentação sugerido pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) da Universidade Federal do Pará (UFPA). Dessa forma, este trabalho está organizado em 9 (nove) capítulos e 5 anexos, os quais, serão apresentados a seguir:

- Capítulo 1: Discute os aspectos introdutórios da pesquisa e a sua significância. Além disso, apresenta-se também a justificativa, os objetivos do estudo e a estrutura do trabalho;
- Capítulo 2: Neste, são apresentados e discutidos os conceitos teóricos necessários para o entendimento desta tese: concreto reforçado com fibras de aço (CRFA), definição de fibras de aço, propriedades do concreto com fibras de aço no estado fresco e no estado endurecido, assim como, as diretrizes para o ensaio de tração por flexão de três pontos em vigas entalhadas;
- Capítulo 3: Apresenta os modelos analíticos, encontrados na literatura, para estimar as tensões residuais: CARRILLO *et al.* (2019), DOMSKI e KATZER (2019), VENKATESHWARAN *et al.* (2017) e MORAES NETO (2013);
- Capítulo 4: Apresenta o modelo empírico proposto por este estudo para estimar as tensões residuais, f_{Ri} ;

- Capítulo 5: Esclarece a concepção do programa experimental, como as características das vigas entalhadas, materiais utilizados, sistema de ensaio e verificação do volume de fibras no estado fresco;
- Capítulo 6: Apresenta e comenta os resultados parciais obtidos a partir dos resultados experimentais;
- Capítulo 7: Expõe a validação do modelo analítico proposto no capítulo 4;
- Capítulo 8: Conclusões;
- Capítulo 9: Referências utilizadas para o embasamento desta pesquisa e que compuseram os bancos de dados;
- Anexo A: Banco de dados utilizado para elaborar o modelo analítico proposto por esta pesquisa;
- Anexo B: Banco de dados utilizado para validar o modelo analítico proposto por esta pesquisa;
- Anexo C: Características das fibras utilizadas no programa experimental, informações do fabricante;
- Anexo D: Características do aditivo utilizado no programa experimental, informações do fabricante;
- Anexo E: Produções científicas com CRFA durante o doutorado.

2. CONCRETO REFORÇADO COM FIBRA DE AÇO (CRFA)

2.1. COMPÓSITO ESTRUTURAL: CONCRETO COM FIBRAS

A aplicação de fibras em matrizes com características predominantemente frágeis na construção civil remete, praticamente, à origem da civilização humana, destaca-se o antigo Egito, onde a palha era aplicada como reforço na fabricação de tijolos, como mostra a Figura 2.1.



Figura 2.1. Muro com tijolo reforçado com palha no Egito (CÁNOVAS, 1988).

De um modo geral, CALLISTER e RETHWISCH (2020) definem o compósito como o material formado a partir da combinação de pelo menos dois componentes (material multifásico = matriz + reforço) com propriedades físicas, químicas e mecânicas distintas, que após a sua combinação apresenta comportamento diferenciado, comparativamente aos materiais que lhe deram origem. Em relação aos compósitos reforçados com fibras, estes podem ser classificados de acordo com o comprimento e a disposição da fibra na matriz, com distribuições contínuas ou descontínuas e aleatórias (CALLISTER e RETHWISCH, 2020).

Em um contexto atual da construção civil, a definição de compósito pode ser aplicada ao concreto armado, onde os componentes distintos são o concreto, que corresponde à matriz (material frágil à tração), e as armaduras, que assumem papel de reforço e conferem ductilidade ao concreto armado. No que diz respeito ao uso de fibras, o CEB-FIP (2010) define o concreto reforçado com fibra como um material formado a partir da mistura de uma matriz com fibras discretas e descontínuas. O ACI 544.1R (2002) ressalta a utilização de fibras discretas (metálicas, minerais, sintéticas e naturais) em materiais cimentícios, com destaque tecnológico para o concreto reforçado com fibras de aço (CRFA).

Segundo o ACI 544.4R (2018), quando as fibras são dosadas apropriadamente, garantem ao concreto maior ductilidade e tenacidade, em consequência da grande absorção de energia gerada pela transferência de tensões entre o concreto e as fibras durante o início e a estabilização do processo de fissuração. Para o ACI 544.1R (2002), o concreto reforçado com fibras de aço é um material formado essencialmente por cimento hidráulico, agregados finos e/ou graúdos, fibras descontínuas de aço e, em condições específicas, com possíveis adições de finos e aditivos. Dentre as vantagens de se utilizar fibras no concreto, ressalta-se principalmente o aprimoramento do comportamento à tração direta, à flexão, ao cisalhamento, à fadiga e ao impacto (GOMES *et al.*, 2018).

Contudo, apesar das inúmeras vantagens do CRFA, para o dimensionamento estrutural com reforço de fibras de aço, recorre-se à ensaios de caracterização prévios para obter as tensões residuais, f_{Ri} (onde $i=1-4$), o que torna o uso da fibra pouco funcional. Nesse sentido, surgiram algumas aproximações analíticas para estimar as resistências residuais do CRFA, como as propostas que serão discutidas nos próximos capítulos e o modelo analítico apresentado por este estudo.

2.2. FIBRAS DE AÇO

No que diz respeito às fibras de aço, o comprimento (l_f), o diâmetro (d_f), o fator de forma (λ_f), e a tensão de escoamento ($f_{y,f}$) são as grandezas que melhor representam o desempenho de uma fibra. Neste contexto, define-se fator de forma ($\lambda_f = l_f / d_f$) como a razão entre o comprimento e o diâmetro da fibra (para fibras com seção transversal retangular, adota-se um diâmetro equivalente de mesma área). Segundo AWOYERA *et al.* (2022), o diâmetro das fibras com seção transversal que varia entre 0,25 mm e 0,75 mm e para as fibras com seção retangular, tem-se para a largura (w) e espessura (e) as seguintes variações: $0,25 \text{ mm} \leq w \leq 0,9 \text{ mm}$ e $0,25 \text{ mm} \leq e \leq 0,75 \text{ mm}$. Quanto ao mecanismo de ancoragem, existe uma vasta diversidade de tipos, conforme mostra a Figura 2.2, com destaque para as fibras com ganchos na extremidade (*hooked end*), lisas, lisas com extremidades alargadas, onduladas, recartilhada, torcida e dentre outras.

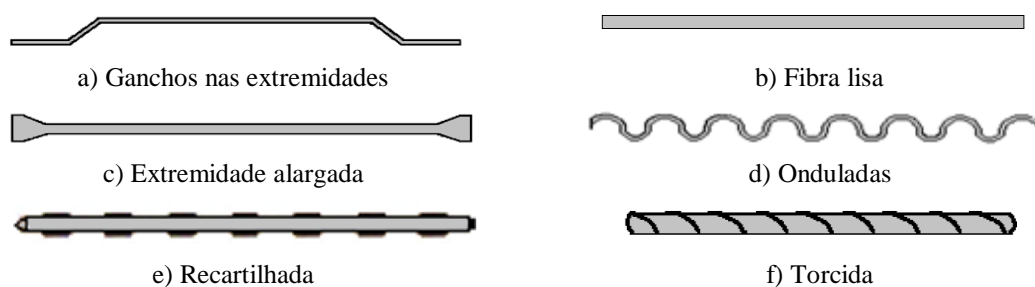


Figura 2.2. Alguns tipos de fibras de aço encontradas comercialmente.

A aderência é a principal responsável pela ligação entre a fibra de aço e o concreto, logo, fibras com maior área de contato garantem resultados mais satisfatórios, dessa forma, conclui-se que o mecanismo de ancoragem, tensão de escoamento, a forma e seção transversal das fibras são de primordial relevância. Ressalta-se que ancoragem é proporcionada principalmente pela deformação geométrica da fibra de aço e da propriedade

da matriz, que atua acompanhada do atrito físico e desempenha um papel importante caso ocorra o deslizamento da fibra de aço (ABDALLAH *et al.*, 2017).

No que diz respeito à classificação das fibras, segundo as regulamentações internacionais, as recomendações do BS EN 14889-1 (2006) e ASTM A 820 M (2016) classificam as fibras segundo o processo de fabricação. A JSCE (2010) categoriza as fibras de acordo com as suas respectivas seções transversais, como mostra a Tabela 2.1.

Tabela 2.1. Classificação das fibras segundo as regulamentações internacionais. (Adaptada de MORAES NETO, 2013)

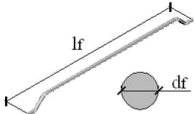
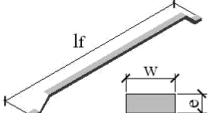
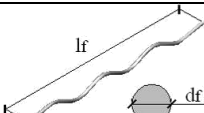
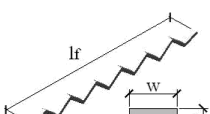
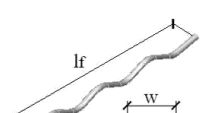
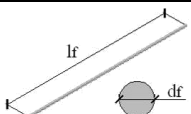
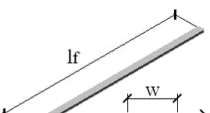
BS EN 14889-1 (2006)	ASTM A 820 M (2016)	JSCE (2010)
Grupo I- Fios trefilados	Tipo I- Fios trefilados	Tipo 1- Seção quadrada
Grupo II- Chapas cortadas	Tipo II- Chapas cortadas	Tipo 2- Seção circular
Grupo III- Extr. de metais fundido:	Tipo III- Extr. de metais fundidos	Tipo 3- Seção crescente
Grupo IV- Raspas de fios trefilado	Tipo IV- Outras fibras	-
Grupo V- Obtida do processo. de fresagem	-	-

A NBR 15530 (2019) também fornece especificações e requisitos para fibras de aço utilizadas como reforço do concreto, classificadas de acordo com a fabricação, forma, teor de carbono e dentro das tolerâncias de comprimento e geometria, como segue na Tabela 2.2.

- Classe I: Origem de arame trefilado a frio; Classe II: Oriunda de chapa laminada cortada a frio; Classe III: Provenientes de arame trefilado e escarificado.

- Tipo A: Fibras com ancoragem; Tipo B: Fibras corrugadas (onduladas); Tipo R: Fibras retas (lisas).

Tabela 2.2. Classificação das fibras segundo a NBR 15530 (2019).

Tipo	Classe	Geometria	Fator de forma mínimo	Limite de resistência à tração (MPa)
A ⁽¹⁾	I		40	1000
	II		30	500
C ⁽²⁾	I		40	800
	II		30	500
	III		30	800
R ⁽³⁾	I		40	1000
	II		30	500

Apesar das diferentes técnicas de fabricação e diversos tipos de fibras de aço são fornecidos no mercado atualmente, as fibras de aço do tipo *hooked end*, com ganchos nas extremidades, apresentam excelentes propriedades de adesão e comportamento de arrancamento (ABDALLAH e REES, 2019), pois os ganchos aperfeiçoam o desempenho à tração por flexão (LEE *et al.*, 2019), a resistência à tração direta (WANG *et al.*, 2019) e tenacidade (CHEN *et al.*, 2021; GOMES *et al.*, 2018) quando comparadas com fibras do tipo ondulada, extremidade alargada, torcida e recartilhada (DING *et al.*, 2021), como mostra a Figura 2.3,

pois no processo de arrancamento, ocorre o endireitamento da ponta do gancho sem que haja a quebra da fibra de aço (LEE e KIM, 2010; ESMAEILI *et al.*, 2021; DING *et al.*, 2021), ver Figura 2.4.

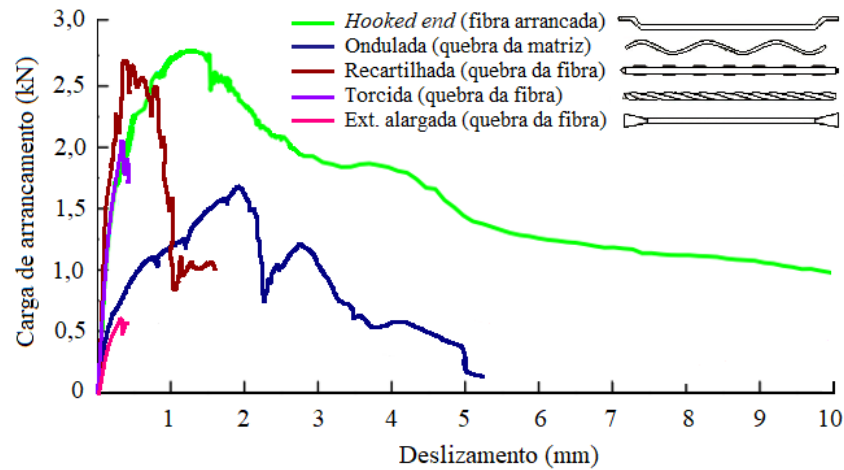


Figura 2.3. Curvas *Carga de arrancamento - Deslizamento* para diferentes tipos de fibras e seus respectivos modos de ruptura. Adaptado de DING *et al.* (2021)

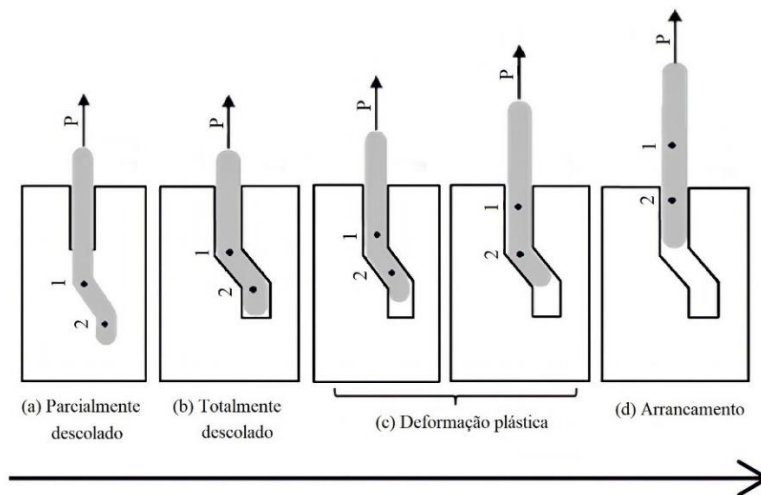


Figura 2.4. Processo de arrancamento de uma fibra de aço do tipo *hooked end* (com extremidade em gancho). Adaptado de ABDALLAH *et al.* (2018).

2.3. PROPRIEDADES DO CRFA NO ESTADO FRESCO

Segundo ZEYAD *et al.* (2018), a trabalhabilidade é a propriedade mais afetada pela adição de fibras à matriz cimentícia, pois as fibras atuam como um material inerte, provocando o intertravamento da mistura. Dessa forma, segundo SONG (2017), para uma determinada mistura de CRFA, a capacidade de moldagem ou fluidez do concreto com fibra depende diretamente de parâmetros como o volume de fibras, V_f , e fator de forma, $\lambda_f = l_f/d_f$, como mostra a equação 1. Nota-se que a capacidade de fluidez, trabalhabilidade, diminui proporcionalmente com o aumento do V_f e λ_f (HEMMY, 2003).

$$\text{Capacidade de fluidez} = \lambda_f^2 \cdot V_f \quad (1)$$

Embora a vibração facilite o uso do CRFA no estado fresco, em casos extremos o lançamento, o adensamento e o acabamento adequados não podem ser assegurados, mesmo com vibração extra (SHI *et al.*, 2020). Adicionalmente, ressalta-se que a vibração excessiva causa outros problemas ao concreto com fibras, como exsudação e segregação no estado fresco, e, adicionalmente, pode comprometer a resistência mecânica do concreto com fibra no estado endurecido. Nestas condições, o ACI 544.1R (2018) determina que a dosagem do concreto com fibra deve prezar pela boa trabalhabilidade, para que o lançamento, o adensamento e o acabamento sejam realizados com o mínimo esforço, sem gerar prejuízos da mistura no estado fresco.

Além disso, as fibras tendem a se aglomerar quando o processo de preparo é impróprio, formando os chamados “ouriços”, como mostra a Figura 2.5, os quais reduzem as propriedades mecânicas do concreto com fibra (LESOVIK *et al.*, 2021). FIGUEIREDO e

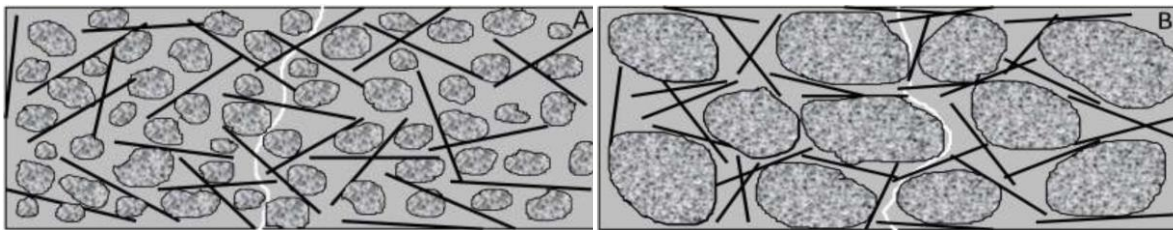
CECCATO (2015) explicam que o preparo de CRFA com elevado consumo de fibra é possível, desde que sejam utilizadas composições mais finas e utilização de aditivos plastificantes redutores de água (CUENCA *et al.*, 2015), pois estes permitirão diminuir a porcentagem de água sem comprometer a trabalhabilidade da mistura. Outra alternativa é o uso de fibras de aço coladas em pentes, pois quando essas são misturadas ao concreto, a cola dissolvida repele as fibras e permite uma melhor trabalhabilidade do concreto (GOMES *et al.*, 2018).



Figura 2.5. Aglomerado de fibras de aço (ourição) mal misturadas ao concreto (FIGUEIREDO, 2011)

Sobre a quantidade de fibras no concreto, MINELLI *et al.* (2014) e FIGUEIREDO e CECCATO (2015) mostram que é necessário utilizar um volume de fibra $V_f > 1,0\%$ para alcançar resultados mais satisfatórios no estado endurecido, para DING (2011) e LABIB (2020) o volume de fibra entre 0,5% e 2,0% são recomendados para CRFA. De acordo com NAAMAN (2003), a utilização de fibra com consumo superior à 2,0%, em condições comuns de preparo e adensamento do CRFA, torna-se pouco viável, pois pode levar à aglomeração das fibras e/ou segregação do concreto. Além do volume de fibras, o desempenho do concreto com fibras depende diretamente da geometria das fibras e da composição do concreto utilizado, para FIGUEIREDO e CECCATO (2015) o comprimento

da fibra (l_f) deve ser compatível com o diâmetro máximo do agregado graúdo (D_{max}), LI *et al.* (2021) recomendam que o comprimento da fibra de aço seja de 2 a 5 vezes o tamanho máximo do agregado, pois dessa forma, potencializa-se a performance da fibra no concreto no estado endurecido e facilita o preparo do CRFA no estado fresco, como ilustra a Figura 2.6.



a) l_f e $D_{máx}$ compatibilizados.

b) l_f e $D_{máx}$ não compatibilizados.

Figura 2.6. Comportamento do CRFA com e sem compatibilização entre as fibras e agregado. (FIGUEIREDO, 2011).

A NBR 16938 (2021), especifica algumas avaliações do concreto com fibras no estado fresco, que compreende a verificação da consistência pelo abatimento do tronco de cone, que deve ser feita conforme a NBR 16889 (2020), ou do espalhamento do concreto, de acordo com a NBR 15823-2 (2017), em função do tipo de concreto previamente especificado, concreto convencional ou autoadensável, respectivamente.

Outra análise da referida norma, NBR 16938 (2021), estabelece um procedimento para a determinar o volume de fibra na mistura de concreto, por meio do método de lavagem. O qual se aplica às amostras de concreto com fibras descontínuas de aço, poliméricas ou de vidro. Onde são retiradas duas amostras de concreto com fibras de 6 (seis) litros, medidos em recipientes rígidos. Essas amostras são acomodadas e lavadas em peneiras sobrepostas da série normal ou intermediária, que atendam a NBR NM-ISO 3310-1 (2011) ou a NBR NM-ISO 3310-2 (2010), de modo que a peneira superior possua abertura de malha de 4,8

mm e a peneira inferior com abertura de malha de 0,6 mm. As fibras são retiradas do material remanescente após a secagem, com o auxílio de um imã, e pesadas na sequência. O volume de fibras na mistura é calculado para cada amostra, de acordo com NBR 16938 (2021), através da equação 2:

$$V_{fR} = \frac{M_f}{V} \quad (2)$$

Onde,

V_{fR} corresponde ao volume de fibra real no concreto no estado fresco;

M_f é massa de fibras coletada após secagem;

V é volume da amostra, igual à 6 (seis) litros, que equivale à 0,006 m³.

2.4. PROPRIEDADES DO CRFA NO ESTADO ENDURECIDO

A ductilidade, a tenacidade e a resistência à tração são apenas algumas das vantagens do CRFA em comparação com o concreto simples, pois como já mencionado, esse comportamento distinto entre estes materiais pode ser atribuído à interação *fibra-matriz*, o qual se desenvolve no momento da formação das primeiras fissuras, ou seja, conforme as fissuras se propagam e o concreto começa a colapsar, a atuação das fibras de aço se potencializa e mantém absorção de esforços, enquanto declina a contribuição da matriz de concreto na resistência, como ilustra a Figura 2.7, nota-se como ocorrem transferência de esforços entre o concreto e as fibras e a contribuição de ambos elementos.

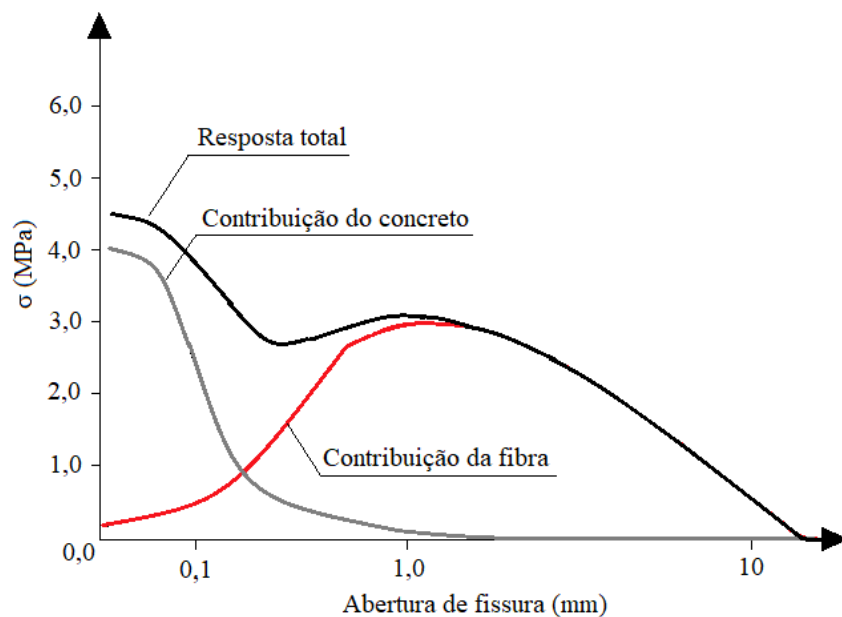


Figura 2.7. Modelo micro mecânico, conceito básico. Adaptado de LI *et al.* (1993).

Para explicar esse mecanismo de transferência de esforços, GARCEZ (2005) apresenta a Figura 2.8, onde se verifica que após a ocorrência de uma fissura (fase 5 da Figura 2.8), a transferência de esforços se dá por atrito, sendo essa tensão distribuída na interface da *fibra-concreto*. Para níveis de solicitação superior ao de formação de uma fissura, ocorre o deslocamento das fibras (fase 4 da figura) e inicia o processo de arrancamento das fibras da matriz de concreto (fase 2). Dessa forma, tem-se um elevado o gasto energético para que ocorra o arrancamento da fibra, o que justifica a melhora na tenacidade do CRFA. Quando a solicitação se intensifica, a abertura da fissura aumenta e as fibras começam a atuar como pontes de transferência de tensão (fase 3) até o seu total arrancamento ou ruptura (fase 2 e 1, respectivamente).

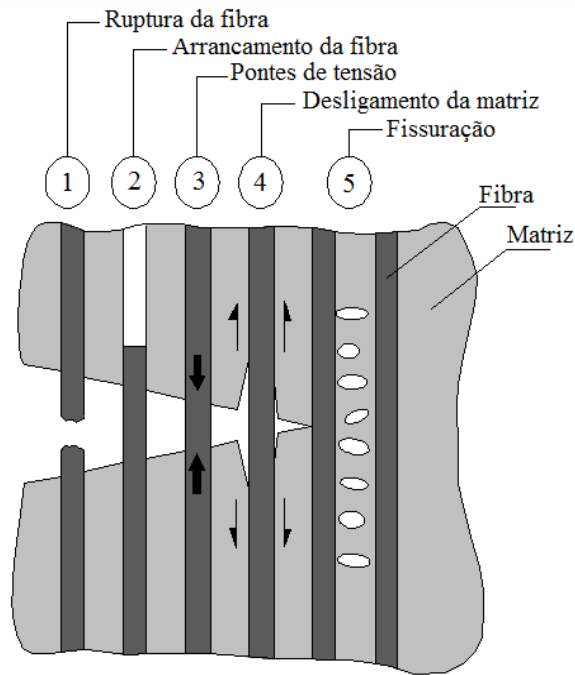


Figura 2.8. Mecanismo de transferência de esforços (adaptado de GARCEZ, 2005).

Adicionalmente, GOMES *et al.* (2018) corrobora que o comportamento mecânico do CRFA depende, diretamente, do consumo e orientação das fibras na matriz. Contudo, mais especificamente, o arrancamento da fibra depende do tipo de fibra, das suas propriedades mecânicas e geométricas, assim como, das propriedades mecânicas da interface *fibra-matriz* e do ângulo de inclinação da fibra em relação à direção de carregamento. Quando se comenta a respeito das características geométricas das fibras, remete-se ao fator de forma, λ_f , que é obtido pela razão entre o comprimento das fibras (l_f) e seu diâmetro (d_f), como apresentado na equação 3. Geralmente, quanto maior λ_f , maior será a capacidade resistente pós-fissuração do CRFA, DEGHEHARD *et al.* (2019).

$$\lambda_f = \frac{l_f}{d_f} \quad (3)$$

Para entender melhor como as fibras atuam, será explicado nos tópicos seguintes alguns esforços influenciados pelo uso de fibras no concreto, tais como a resistência a compressão, tração direta, por compressão diametral e por flexão.

2.4.1. Resistência à compressão

É indiscutível que o concreto reforçado com fibras de aço não pode ser caracterizado por apenas uma propriedade mecânica, a resistência à compressão, como acontece com os concretos convencionais, onde o f_c é determinante. Pois, visto que a adição de fibras tem a capacidade de aumentar significativamente a tenacidade deixando a resistência à compressão praticamente inalterada (MONDO, 2011). A adição habitual de fibra ($V_f < 1,0\%$) não altera significativamente a resistência à compressão e o comportamento antes do limite de proporcionalidade (f_L) do gráfico *tensão x deformação*, NZAMBI *et al.* (2021).

Contudo, KHALOO e KIM (1996) obtiveram em seu estudo ganhos de resistência à compressão na ordem de 37%, para $V_f = 1,5\%$, em comparação com o concreto sem adição de fibras. Na pesquisa de USMAN *et al.* (2020), a resistência a compressão do CRFA aumentou em 25%. Adicionalmente, AHMAD *et al.* (2020) relataram que o aumento da resistência a compressão é menor que 10%, quando adicionadas fibras de aço em frações volumétricas de até 1,5%. O ACI 544.1R (2002) relata que a adição de fibras no concreto contribui para aumentar a resistência à compressão do concreto na ordem de 12%, para consumos de fibra superiores a 1,5%, contudo, adverte que o objetivo da adição de fibras no concreto não é aprimorar a resistência a esse esforço, Figura 2.9.

Contrariando as informações apresentadas, LIMA (2012) revela que a adição de fibras à massa de concreto pode, inclusive, reduzir ligeiramente a resistência à compressão do

concreto, pois de acordo com o autor, as fibras provocam a incorporação de vazios à matriz e sempre que o método de preparo desse material se mostrar inadequado pode ocorrer formação de aglomerados de fibras “ouriços”. Por fim, SOROUSHIAN e BAYASI (1991) e RAMAKRISHNAN *et al.* (1980) descobriram que as fibras de aço do tipo *hooked end* e *crimped* são mais eficazes em melhorar o comportamento à compressão do CRFA em comparação com fibras de aço sem mecanismos de ancoragem adicionais.

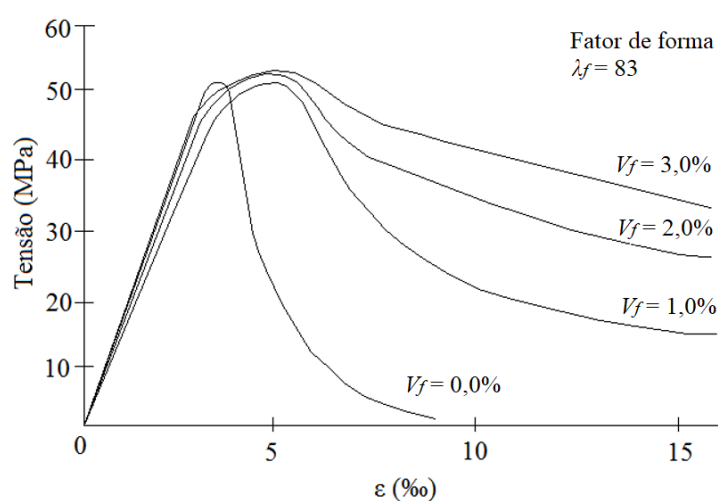


Figura 2.9. Relação *tensão-deformação* do concreto comprimido e influência de V_f no desempenho do CRFA. adaptado ACI 544.4R (1996).

2.4.2. Resistência à tração direta

A resistência à tração direta do concreto reforçado com fibras de aço é difícil de ser avaliada experimentalmente, uma vez que, o problema surge principalmente da necessidade das amostras possuírem uma seção transversal suficientemente grande, de modo que seja obtida uma distribuição de fibras semelhante à dos elementos estruturais em tamanho real. DINH *et al.* (2010) relata que outra problemática está em fixar as garras do maquinário nas extremidades do corpo de prova, além do que, há certo obstáculo para confeccionar os entalhes preconizados pelo modelo normativo RILEM TC 162–TDF (2002), como mostra a

Figura 2.10, sobretudo quando os mesmos são realizados em idades precoces, antes dos 28 dias de cura do concreto. Ressalta-se também que os resultados provenientes dos ensaios de tração direta geralmente são dispersos.

De forma complementar, o concreto apresenta resistência a tração direta bem inferior à resistência a compressão cuja relação está, segundo MEHTA e MONTEIRO (2008), em torno de 7,0% a 11,0%, ou seja, as microfissuras presentes no corpo de prova no momento de ensaio prejudicam mais o material quando solicitados à tração direta do que à compressão.

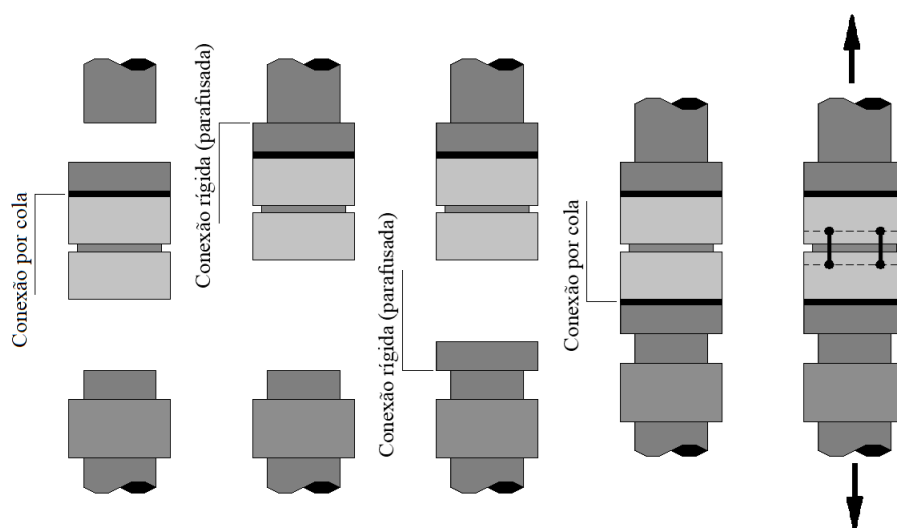


Figura 2.10. Sistema de ensaio à tração direta preconizado por RILEM TC 162-TDF (2001). Adaptado de Moraes Neto (2013).

2.4.3. Resistência à tração por compressão diametral

FIGUEIREDO e CECCATO (2015) citam que o aumento da resistência à tração por compressão diametral ocasionado pelas fibras varia proporcionalmente com l_f (comprimento das fibras) e D_{max} (dimensão máxima do agregado graúdo). Essa variação pode ser compreendida em ganhos de resistência na ordem de 60%, dependendo do volume de fibra, V_f , incorporado ao concreto. Para BENTUR e MINDESS (1990), seria possível alcançar

acréscimos de até 133%, caso a orientação das fibras coincidisse com a orientação das tensões principais de tração. No estudo realizado por GÓIS e BARBOZA (2015), no qual avaliaram 3 diferentes tipos de fibra com fatores de forma ($\lambda_f = l_f/d_f$) e $V_f=0,8\%$, concluíram que para $\lambda_f = 50$ foi obtido um aumento de resistência igual à 16,5% e de apenas 4,6% para $\lambda_f = 30$, quando comparados com o concreto de referência. Contudo, para o CRFA com fibras mais longas, $\lambda_f = 80$, cujo comprimento é quatro vezes maior que o diâmetro máximo do agregado, a resistência à tração indireta obteve ganhos de $\approx 40\%$. Adicionalmente, SALAZAR (2010) relata que após o limite de proporcionalidade, L_P , conforme a Figura 2.11, ocorre uma perda de carga e que neste momento se inicia mobilização das fibras na fase de endurecimento. Nesta fase, ocorre uma capacidade do material em recuperar resistência, onde a intensidade da recuperação dependerá das propriedades do concreto reforçado com fibras de aço.

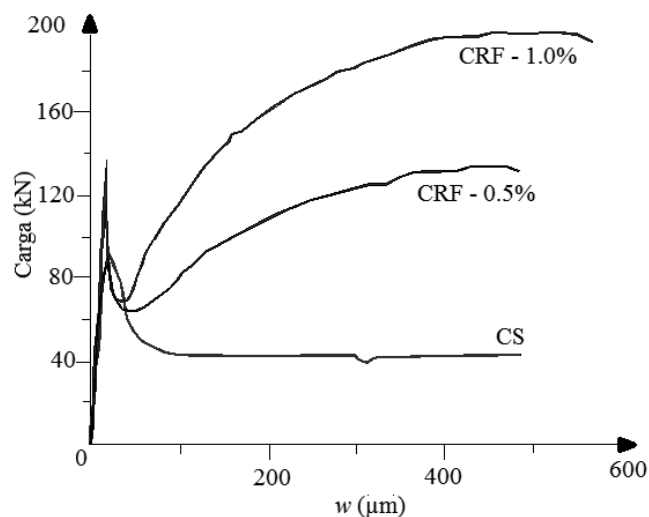


Figura 2.11. Relação carga-abertura da fissura no ensaio de compressão diametral. Adaptado SALAZAR (2010).

2.4.4. Resistência à tração na flexão de 3 pontos

KANG *et al.* (2021) concluíram que a fibra de aço influencia significativamente na resistência à tração na flexão do CRFA, em comparação com o concreto simples (sem adição de fibras), com aumento na resistência de, aproximadamente, 100%. Os estudos de FU *et al.* (2018) apontam que não é necessário um elevado volume de fibras de aço para alcançar excelentes resultados, pois com volume de fibra máximo de 1,0% os autores alcançaram esse objetivo. SONG e HWANG (2004) relataram que ao utilizar $V_f = 2,0\%$, fibras do tipo *hooked end* e $\lambda_f = 64$, é possível obter o aumento na resistência à tração na flexão de $\approx 127\%$.

Para esse ensaio, a confecção das vigas segue o modelo proposto por RILEM 162-TDF (2002), com dimensões de (150x150x550) mm. As quais são entalhadas no meio do vão por serragem úmida em toda a sua largura, com finalidade de induzir a falha em uma seção definida, os entalhes têm 5 mm de largura e 25 mm de profundidade. Durante o ensaio à tração por flexão de três pontos, 3PBT, as vigas entalhadas são carregadas no meio do vão ($l/2 = 250$ mm), como mostra a Figura 2.12. Neste ensaio são registradas as aberturas de fissura através da relação *carga-CMOD* (*Crack Mouth Opening Displacement*), a partir desses dados são determinadas as tensões residuais, através da equação 4, e o limite de proporcionalidade do material, equação 5. Uma curva típica de *carga-CMOD* é apresentada na Figura 2.12b. Recorda-se que essas informações são utilizadas em recomendações normativas como RILEM TC 162-TDF (2002), EHE-08 (2010), CEB-FIP (2010) e a NBR 16935 (2021).

$$f_{Ri} = \frac{3 \cdot F_{Ri} \cdot L}{2 \cdot b \cdot h_{sp}^2} \quad i = 1 - 4 \quad (4)$$

Onde,

F_{Ri} corresponde a carga no $CMOD_i$;

L e b representam o comprimento e a largura da viga entalhada, respectivamente;

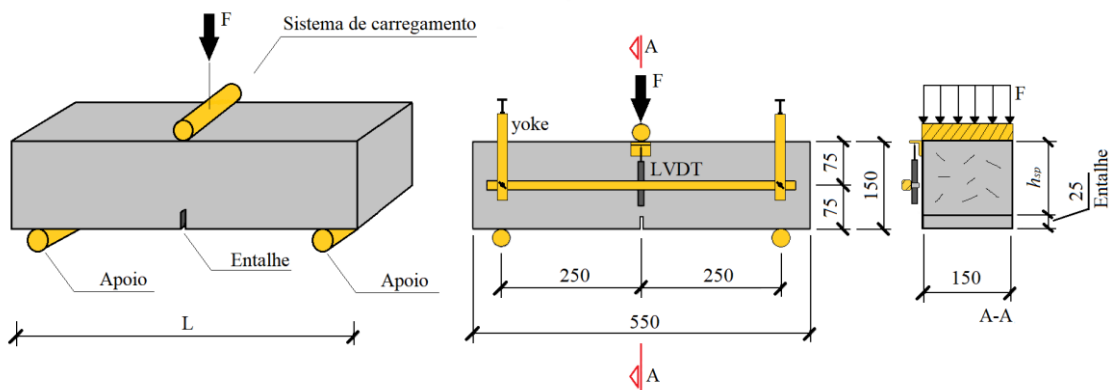
h_{sp} é a altura do final do entalhe à face superior da viga.

A tensão referente ao limite de proporcionalidade, f_L , também é calculada admitindo uma distribuição linear das tensões na seção transversal da viga entalhada, através de equação 5.

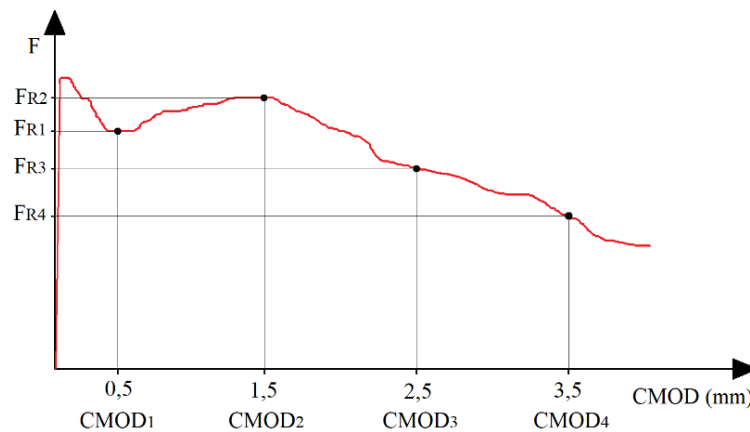
$$f_L = \frac{3 \cdot F_L \cdot L}{2 \cdot b \cdot h_{sp}^2} \quad (5)$$

Onde,

F_L representa a carga máxima registrada na relação *Carga-CMOD*, para $CMOD \leq 0,05$ mm;



a) Sistema de ensaio



b) Relação *carga-CMOD*

Figura 2.12 - Análise da resistência à tração na flexão (adaptado RILEM 162 TDF, 2002).

Neste contexto, o CEB-FIP (2010) comenta que a fase pós-fissuração pode apresentar, dependendo da composição do concreto reforçado com fibra de aço, comportamento com amolecimento (*softening*) ou endurecimento (*hardening*), conforme mostra a Figura 2.13. A NBR 16935 (2021) define esses dois desempenhos como o comportamento mecânico pós-fissuração do concreto reforçado com fibras em que a manutenção de carga fica abaixo ou acima da carga referente ao limite de proporcionalidade, f_L .

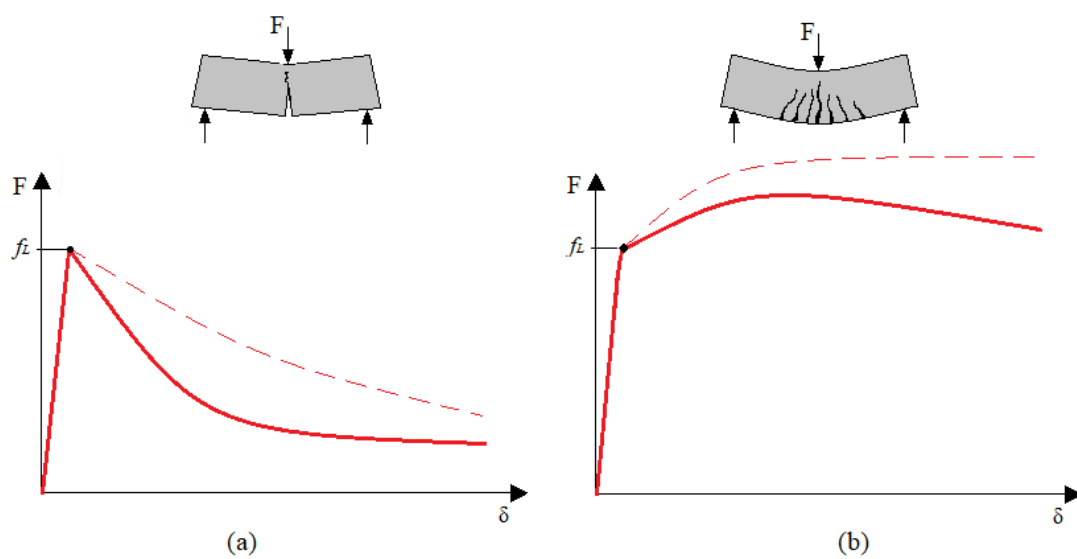


Figura 2.13. Comportamento do CRFA sob o ensaio 3PBT(a) amolecimento (b) endurecimento. Adaptado de CEB-FIP (2010).

3. MODELOS ANALÍTICOS DA LITERATURA PARA ESTIMAR f_{Ri}

O modelo proposto por este estudo foi avaliado segundo um banco de dados formado com resultados experimentais de tensões residuais, f_{Ri} , retirados da literatura e dos resultados obtidos experimentalmente nessa pesquisa, adicionalmente, seu desempenho foi comparado com outros quatro modelos analíticos dos autores CARRILLO *et al.* (2021), DOMSKI e KATZER (2019), VENKATESHWARAN *et al.* (2017) e MORAES NETO (2013), os quais serão descritos a seguir.

3.1. CARRILLO *et al.* (2021)

As regressões lineares de CARRILLO *et al.* (2021), equações 6-9, são compostas pelo índice de reforço ($IR = V_f \cdot \lambda_f$), parâmetro que leva em consideração as propriedades geométricas das fibras e o volume de fibras, o número de ganchos nas extremidades das fibras (N), a resistência à tração das fibras (f_u) e a resistência à compressão do concreto (f_c). Segundo os autores, a raiz quadrada de f_c foi inserida nas equações devido a sua relação amplamente aceita para avaliar o comportamento à tração do concreto, e definida na seção 5.1.5.1 do CEB-FIP (2010). Ainda de acordo com os autores, como o f_u influencia o modo de ruptura de uma única fibra, esse parâmetro também influenciará na ruptura de todas as fibras ao longo de uma fissura, pois há uma ligação direta entre o ensaio de arrancamento e o estado de tensão de cada fibra em uma fissura (MARKOVICH *et al.*, 2001; NZAMBI *et al.*, 2021b). O modelo proposto foi criado a partir de uma base de dados formada por 126 vigas entalhadas retiradas da literatura, validado através da comparação entre os resultados teóricos e experimentais.

$$f_{R1} = \frac{1}{3200} \cdot (IR + N^3) \cdot \sqrt{f_u \cdot f_c} \quad (6)$$

$$f_{R2} = \frac{1}{2800} \cdot (IR + N^3) \cdot \sqrt{f_u \cdot f_c} \quad (7)$$

$$f_{R3} = \frac{1}{3000} \cdot (IR + N^3) \cdot \sqrt{f_u \cdot f_c} \quad (8)$$

$$f_{R4} = \frac{1}{3600} \cdot (IR + N^3) \cdot \sqrt{f_u \cdot f_c} \quad (9)$$

Onde,

IR é o índice de reforço proporcionado pelas fibras ($IR = V_f \cdot \lambda_f$);

f_u é a resistência à tração das fibras;

f_c é a resistência à compressão do concreto;

V_f é o volume de fibras e;

$\lambda_f = l_f/d_f$ o fator de forma, razão entre o comprimento e diâmetro da fibra de aço, l_f e d_f , respectivamente.

3.2. DOMSKI e KATZER (2019)

O modelo analítico proposto por DOMSKI e KATZER (2019) foi estabelecido para concreto não convencional, com agregado reciclado de cerâmica vermelha. Segundo os autores, o concreto à base de agregado reciclado cria um ambiente mais complexo para o reforço de fibras, o que proporcionaria resultados mais conservadores para o CRFA convencional. Além disso, observaram que para baixos volumes de fibra, fibras com menor fator de forma são mais eficientes. As equações são compostas por variáveis que mensuram a geometria e o volume de fibra, com base em parâmetros como volume de fibra, V_f , o fator de forma, λ_f , e o índice de reforço, RI , equações de 10 a 13.

$$f_{R1} = 10,6067 - 3,502 \cdot V_f - 0,1985 \cdot \lambda_f - 0,0667 \cdot V_f^2 + 0,1206 \cdot (IR) + 0,0008 \cdot \lambda_f^2 \quad (10)$$

$$f_{R2} = 8,1726 - 2,6361 \cdot V_f - 0,1572 \cdot \lambda_f - 0,3333 \cdot V_f^2 + 0,1361 \cdot (IR) + 0,0005 \cdot \lambda_f^2 \quad (11)$$

$$f_{R3} = 10,2808 - 3,8078 \cdot V_f - 0,2158 \cdot \lambda_f - 0,4 \cdot V_f^2 + 0,1591 \cdot (IR) + 0,0008 \cdot \lambda_f^2 \quad (12)$$

$$f_{R4} = 11,0995 - 6,2265 \cdot V_f - 0,2111 \cdot \lambda_f - 0,0667 \cdot V_f^2 + 0,1796 \cdot (IR) + 0,0006 \cdot \lambda_f^2 \quad (13)$$

Onde,

V_f é o volume de fibra;

$\lambda_f = l_f/d_f$ representa o fator de forma das fibras;

IR é o índice de reforço proporcionado pelas fibras ($IR = V_f \cdot \lambda_f$).

3.3. VENKATESWARAN *et al.* (2017)

Os autores estabeleceram modelos empíricos com base em resultados experimentais realizados em sua pesquisa, equações 14-17. As equações são formadas por três parâmetros, que incluem a resistência à compressão do concreto (f_c), o índice de reforço (IR) e o número de gancho nas extremidades das fibras (N). Para VENKATESHWARAN *et al.* (2017), esses parâmetros são essenciais para estabelecer as propriedades mecânicas do concreto reforçado com fibra de aço. Em relação as equações, o primeiro termo representa o efeito da força da matriz no CRFA, o segundo termo retrata o efeito do volume e da geometria da fibra, por fim, a última parcela da equação mostra a influência do mecanismo de ancoragem da fibra no desempenho do concreto.

Os autores constataram que a resistência à compressão do concreto interfere mais significativamente no limite de proporcionalidade, f_L , do que nas resistências residuais do CRFA. Por outro lado, o índice IR exerce maior influência sobre as tensões residuais, f_{Ri} , do

que no limite de proporcionalidade. Por fim, a ancoragem nas extremidades das fibras, representado pelo parâmetro N , interfere de forma significativa nos valores das tensões residuais f_{R2} , f_{R3} e f_{R4} , mas não em f_{R1} .

$$f_{R1} = \left(1 + \frac{l_f}{100}\right)^{0,5} \cdot [0,226 \cdot f_c^{0,5} + 5,44 \cdot (IR) - 0,149 \cdot N^2] \quad (14)$$

$$f_{R2} = \left(1 + \frac{l_f}{100}\right)^{0,5} \cdot [0,25 \cdot f_c^{0,5} + 6,506 \cdot (IR) + 0,102 \cdot N^2] \quad (15)$$

$$f_{R3} = \left(1 + \frac{l_f}{100}\right)^{0,5} \cdot [0,201 \cdot f_c^{0,5} + 6,83 \cdot (IR) + 0,182 \cdot N^2] \quad (16)$$

$$f_{R4} = \left(1 + \frac{l_f}{100}\right)^{0,5} \cdot [0,177 \cdot f_c^{0,5} + 6,151 \cdot (IR) + 0,137 \cdot N^2] \quad (17)$$

Onde,

l_f corresponde o comprimento da fibra;

f_c é a resistência à compressão;

IR é o índice de reforço proporcionado pelas fibras ($IR = V_f \cdot \lambda_f$) e;

N é o número de ganchos na extremidade das fibras.

3.4. MORAES NETO (2013)

O estudo desenvolvido por MORAES NETO (2013) relaciona de forma simples, os valores de cálculo das resistências residuais através do índice de reforço, IR , influenciado pelo volume de fibras, V_f , e pelo fator de forma, $\lambda_f = l_f/d_f$ (razão entre o comprimento e diâmetro da fibra de aço).

Contudo, o referido autor alerta em sua pesquisa que as equações, apesar de práticas, precisam ser utilizadas cautelosamente, pois pode conduzir à resultados pouco satisfatórios, uma vez que fornecem resultados conservadores e descrevem apenas o comportamento pós-fissuração com amolecimento (*softening*). As equações 18-20 representam a proposta dada por MORAES NETO (2013).

$$f_{R1} = 7,5 \cdot (IR)^{0,80} \quad (18)$$

$$f_{R3} = 6,0 \cdot (IR)^{0,70} \quad (19)$$

$$f_{R4} = 5,5 \cdot (IR)^{0,65} \quad (20)$$

Onde,

IR é o índice de reforço proporcionado pelas fibras ($IR = V_f \cdot \lambda_f$).

4. PROPOSTA ANALÍTICA PARA ESTIMAR AS RESISTÊNCIAS RESIDUAIS À TRAÇÃO POR FLEXÃO (f_{R1}, f_{R2}, f_{R3} e f_{R4})

A maioria dos modelos analíticos que estimam os valores das resistências residuais fazem análises de regressão do comportamento dos parâmetros geométricos da fibra, como o índice de reforço, $IR = V_f \cdot \lambda_f$, (MORAES NETO, 2013; DOMSKI e KATZER, 2019; TIBERTI *et al.*, 2017), o número de gancho nas extremidades da fibra (VENKATESHWARAN *et al.*, 2017; ABDALLAH *et al.*, 2016; LEE *et al.*, 2019; SILVA *et al.*, 2020) e das propriedades mecânicas da matriz do concreto, como a resistência à compressão (OETTEL *et al.*, 2022). Portanto, a dispersão e a precisão desses modelos dependem diretamente da interpretação do comportamento influenciador desses parâmetros, o que pode tornar os resultados heterogêneos. Neste trabalho, buscou-se obter resultados precisos e uniformes com base nos principais parâmetros que influenciam no desempenho do concreto com fibras de aço, de acordo com a literatura

Para essa finalidade, foi confeccionado um banco de dados composto por ensaios experimentais, com vigas entalhadas submetidas à ensaios de tração na flexão de três pontos, de acordo com as recomendações da RILEM TC 162-TDF (2002), coletados da literatura. Na filtragem dos dados, foram desconsideradas as vigas em CRFA que apresentassem a condição $f_{c,CRFA}/f_{c,ref} < 0,85$, sendo $f_{c,CRFA}$ e $f_{c,ref}$, as resistências à compressão do concreto com fibras e a resistência à compressão do concreto de referência, respectivamente. Dessa forma, evita-se a interferência de espécimes que possam descaracterizar eficiência do concreto com fibras de aço, garantindo assim, a qualidade das análises. Após essa etapa, o banco de dados contabilizou 238 resultados à tração na flexão em vigas com entalhe, retirados de 54 pesquisas, ver Tabela 4.1. Salienta-se que a seleção das vigas permitiu a formação de uma amostragem diversificada, abrangendo intervalo de variáveis significativo,

englobando os modos de ruptura, com amolecimento (*softening*) e endurecimento (*hardening*), volume de fibras $0,1\% \leq V_f \leq 2,0\%$, o fator de forma, $31 < \lambda_f \leq 100$ e a resistência à compressão do concreto $20 \text{ MPa} < f_c < 100 \text{ MPa}$, ressalta-se que as fibras de aço foram exclusivamente do tipo *hooked end*. Na Tabela 4.1 é apresentado o banco de dados resumido com os intervalos mínimos e máximos dos parâmetros citados e das tensões residuais (f_{Ri}) obtidas, a apresentação completa do banco de dados está no ANEXO A.

Tabela 4.1. Banco de dados para elaboração de equações empíricas de tensão residual.

Autor*	Nº de vigas	V_f (%)	λ_f	f_c (MPa)	f_{R1} (MPa)	f_{R2} (MPa)	f_{R3} (MPa)	f_{R4} (MPa)
[1]	4	0,50-2,00	75	35,80-40,80	4,80-8,86	5,12-10,24	5,12-9,28	5,12-7,04
[2]	2	0,38-0,48	60	40,80-53,68	4,81-7,40	4,96-7,84	5,92-7,04	3,86-6,08
[3]	3	0,38-0,50	75	28,21-39,39	3,00-4,00	3,00-3,40	2,40-3,00	2,00-2,70
[4]	4	0,25-1,00	60	37,40-59,70	2,50-7,80	2,00-8,40	1,80-7,90	1,80-7,50
[5]	5	0,75-1,50	55-80	28,70-44,40	3,78-7,38	3,21-6,00	2,41-5,22	2,23-4,79
[6]	1	0,25	50	33,28	2,08	2,05	2,14	2,02
[7]	6	0,25-0,63	80	62,80-63,30	3,10-8,06	2,13-7,61	1,62-6,27	1,37-5,15
[8]	3	0,50-1,50	38	57,59-63,83	3,61-8,09	3,13-7,58	2,60-6,32	1,97-5,09
[9]	10	0,50-1,00	50	45	0,88-2,50	0,75-2,00	0,73-1,60	0,70-1,70
[10]	2	0,32-0,45	63	36,90-38,00	3,01-3,52	3,20-3,22	2,97-2,99	2,69
[11]	2	0,50-1,00	64	56,20-60,10	3,79-6,14	3,68-6,14	3,52-5,44	3,20-4,83
[12]	1	0,25	50	33,90	2,28	2,53	2,61	2,40
[13]	4	0,63-0,94	63	32,10-33,10	5,40-6,00	5,60-6,10	5,00-6,00	4,50-5,55
[14]	2	0,32-0,49	64	41,70-43,00	1,17-1,73	1,26-1,82	1,08-1,47	0,83-1,18
[15]	5	0,50-1,50	55-80	50,50-59,40	5,44-8,96	2,24-8,00	1,60-6,08	1,44-4,80
[16]	4	0,40-1,00	67	51,90-70,02	5,71-12,30	4,55-13,30	2,77-11,55	2,13-10,23
[17]	4	0,40-1,00	64	56,20-63,80	4,66-7,75	4,11-7,32	3,32-6,31	2,73-5,37
[18]	4	0,38-0,63	80	53,40-53,65	6,40-12,00	6,14-11,20	4,86-10,40	4,00-8,80
[19]	5	0,50-1,00	65	39,01-48,72	4,30-10,40	4,65-10,40	3,50-9,00	2,70-8,20
[20]	2	0,50	48	39,70-40,80	4,12-5,00	4,07-4,55	3,35-4,05	2,69-3,46
[21]	3	0,46-1,00	67	34,00-46,00	2,39-6,74	2,52-8,58	2,56-8,07	2,26-7,91
[22]	9	0,25-0,50	95	26,40-47,60	2,46-6,18	2,31-4,99	2,23-4,33	1,60-3,84
[23]	1	0,75	60	36,37	3,52	3,84	4,00	4,48
[24]	1	0,38	64	32,00	3,07	3,53	3,53	3,22
[25]	12	0,25-2,00	67-80	36,00-48,50	2,38-13,58	2,69-16,88	2,76-17,36	2,74-16,63
[26]	1	0,33	64	41,47	1,20	1,22	0,88	0,70
[27]	3	0,50-1,00	65	28,85-42,25	2,12-3,60	1,84-3,93	1,82-3,86	1,81-3,86
[28]	10	0,38-0,75	67	54,40-66,10	4,00-12,60	6,60-13,60	7,90-14,50	8,20-14,50
[29]	6	0,50-2,00	45-80	73	4,19-15,40	2,15-16,86	1,14-16,73	0,74-16,05
[30]	2	0,60-1,20	65	93,40-96,40	12,30-16,80	14,10-19,70	9,00-19,80	7,00-17,50
[31]	5	0,50-1,00	80	43,09-52,93	3,08-4,50	3,12-4,32	3,03-4,59	2,76-4,27
[32]	1	0,25	69	49,90	3,10	2,70	2,10	1,90
[33]	9	0,25-0,94	65	26,80-56,40	2,70-10,70	2,70-12,10	2,60-11,00	2,40-10,00
[34]	8	0,75	65	45,60-82,70	6,62-13,80	6,01-12,60	5,16-11,60	4,13-10,70
[35]	6	0,38-1,25	67	55,70-70,00	5,70-11,00	4,60-13,60	2,80-12,60	2,10-10,80

Tabela 4.1. Banco de dados para elaboração de equações empíricas de tensão residual. (Cont.)

Autor*	Nº de vigas	V_f (%)	λ_f	f_c (MPa)	f_{R1} (MPa)	f_{R2} (MPa)	f_{R3} (MPa)	f_{R4} (MPa)
[36]	6	0,38-0,75	50	64,63-67,43	2,85-7,13	2,70-7,54	2,44-7,12	2,22-6,41
[37]	2	0,31-0,63	86	25,69-34,18	2,11-4,93	1,93-5,01	1,86-4,79	1,66-4,31
[38]	7	0,32-1,00	64-100	20,41-42,25	4,75-9,94	2,09-9,34	2,05-9,87	1,82-9,54
[39]	1	0,25	63	64,40	9,80	9,14	8,06	7,19
[40]	3	0,25-0,75	64	24,51-24,94	3,38-7,83	3,29-7,02	2,75-6,03	2,39-5,63
[41]	6	1,00-2,00	65	78,00-85,60	2,50-8,35	-	-	1,49-7,13
[42]	3	0,63-0,88	48	40,63-68,12	11,00-11,90	7,70-9,10	5,70-6,90	5,00-5,90
[43]	3	1,00-1,50	65	36,86-38,48	8,13-9,22	8,26-9,79	7,94-9,06	6,50-8,16
[44]	15	0,10-0,50	50	20,50-32,40	-	1,14-2,08	1,12-1,90	-
[45]	2	0,50-1,50	37	27,34-28,50	2,74-6,59	2,15-5,25	1,87-4,15	1,68-3,32
[46]	16	1,00	40-80	38,90-83,80	3,04-7,11	0,74-3,85	0,37-2,01	0,30-1,99
[47]	4	0,50-1,00	64-80	80,00	6,50-12,50	8,00-12,50	7,90-16,00	6,90-16,40
[48]	1	1,50	62	38,00	6,70	1,80	0,80	0,85
[49]	3	0,25-0,75	100	56,00-62,00	6,17-7,72	4,20-6,48	3,27-6,30	3,70-4,94
[50]	2	0,50-1,00	50	53,06-55,35	6,17-9,26	6,05-9,81	5,62-9,32	4,94-8,58
[51]	2	1,00-1,50	55	73,20-73,40	2,41-2,53	2,10-2,50	1,91-2,41	1,70-2,16
[52]	3	0,38-0,63	47	61,60-65,00	7,72-12,96	7,41-13,46	5,49-10,86	5,00-10,00
[53]	3	0,50-1,20	63	51,80-64,40	8,64-17,78	9,14-16,98	8,89-15,43	8,46-13,56
[54]	1	0,50	80	62,35	5,09	7,20	7,90	7,79

*[1] Wafa (1990); [2] VANDEWALLE (2006); [3] POH *et al.* (2008); [4] GIACCIO *et al.* (2008); [5] DINH *et al.* (2010); [6] BURATTI *et al.* (2011); [7] LIMA (2012); [8] PAJAK e PONIKIEWSKI (2013); [9] MESKENAS (2013); [10] CONFORTI *et al.* (2013); [11] AMIN *et al.* (2013); [12] TIBERTI *et al.* (2014); [13] MINELLI *et al.* (2014); [14] ALBERTI *et al.* (2014); [15] AOUDE e COHEN (2014); [16] GOMES *et al.* (2015); [17] AMIN e FOSTER (2015); [18] NING *et al.* (2015); [19] GERMANO *et al.* (2016); [20] TIBERTI *et al.* (2015); [21] AMIN e FOSTER (2016); [22] LEE *et al.* (2018); [23] CAGGIANO *et al.* (2016); [24] AMIN e BENTZ (2017); [25] VENKATESHWARAN *et al.* (2017); [26] ALBERTI *et al.* (2017); [27] GOMES *et al.* (2018); [28] MAHMOOD *et al.* (2018); [29] MONTEIRO *et al.* (2018); [30] TENG *et al.* (2018); [31] FU *et al.* (2018); [32] AL-KAMYANI *et al.* (2019); [33] LOURENÇO (2012); [34] LAMEIRAS *et al.* (2015); [35] MORAES NETO *et al.* (2013); [36] LIAO *et al.* (2013); [37] FACCONI *et al.* (2019); [38] MUDADU *et al.* (2018); [39] WIESLAWA e MAREK (2018); [40] DING *et al.* (2019); [41] DING e BAI (2018); [42] BIOLZE e CATTANEO (2017); [43] GOUVEIA *et al.* (2017); [44] GHASEMI *et al.* (2019); [45] ROSSI *et al.* (2020); [46] HAN *et al.* (2019); [47] CHOI *et al.* (2019); [48] HAJFOROUSH *et al.* (2020); [49] MAHAKAVI e CHITHRA (2019); [50] LAKAVATH *et al.* (2019); [51] ABBASS *et al.* (2019); [52] TÓTH *et al.* (2019); [53] LEHMANN e GŁODKOWSKA (2019); [54] MEDA *et al.* (2019).

A partir desse banco de dados, foram elaboradas através de regressão múltiplas as equações 22-25 e, posteriormente, a equação geral, equação 21. Para tal, estabeleceu-se que as principais variáveis independentes que influenciam nos valores de tensões residuais, de acordo com a literatura, são o fator de forma da fibra ($\lambda_f = l_f / d_f$), o volume de fibra (V_f) e as propriedades mecânicas do concreto. Além disso, em conformidade com as equações propostas pelos autores CARRILO *et al.* (2021), DOMSKI e KATZER (2019), VENKATESHWARAN *et al.* (2017) e MORAES NETO (2013), observa-se a importância de considerar o índice de reforço, IR .

Com base nessas informações, foram elaborados conjuntos de equações para diferentes tipos de funções, tais como exponenciais, logarítmicas, trigonométricas, polinomiais e etc, com o auxílio do software Origin Pro versão 2020, como mostra a Figura 4.1. Constatou-se que o melhor ajuste dessas funções, em relação ao banco de dados, foi apresentado por polinômios não lineares, equações 22-25. Os coeficientes e expoentes foram posteriormente calibrados, por um método de tentativas, para melhor ajuste de curva.

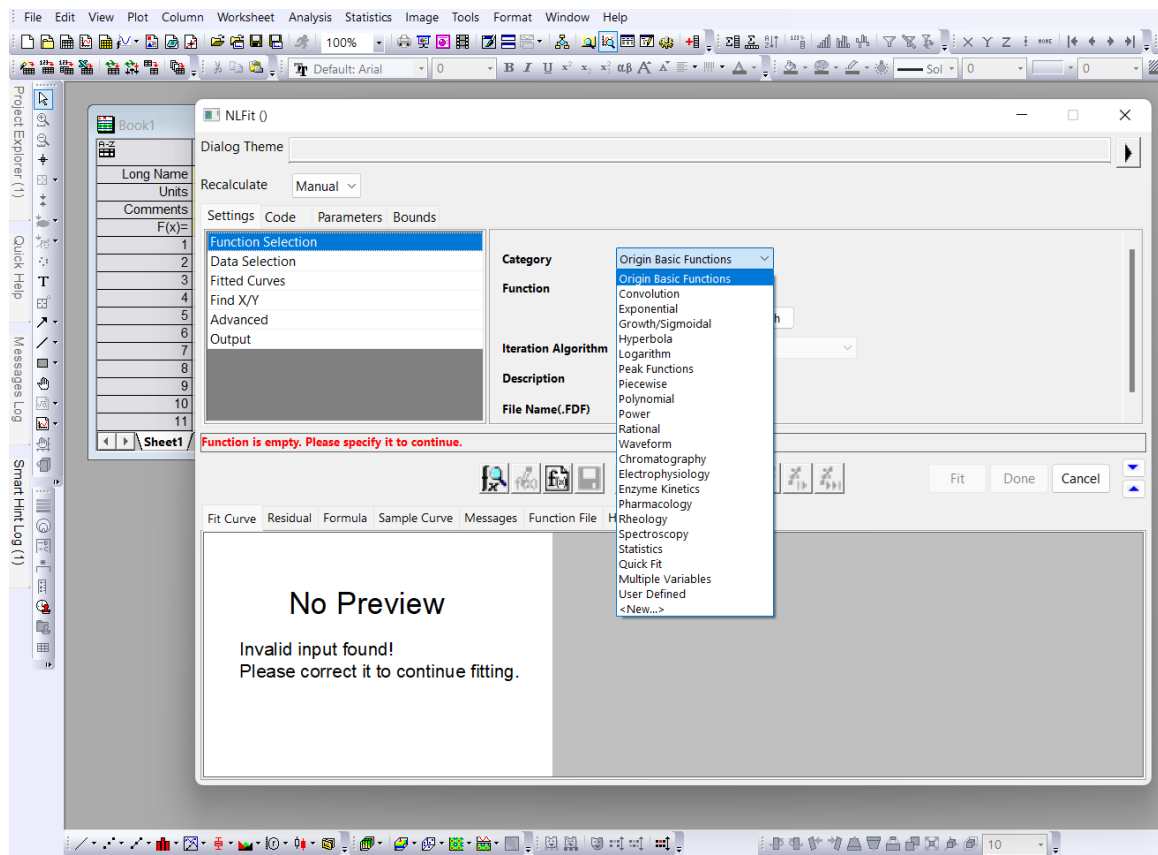


Figura 4.1. Interface do software Origin Pro (2020).

Nesse sentido, a equação 21 descreve a combinação do fator de forma com a resistência à tração do concreto ($\lambda_f + f_i$), do volume de fibra (V_f) e do índice de reforço (IR), onde a primeira parcela da equação é justificada pela considerável influência do comprimento de embutimento da fibra ($l_{b,f}$) e do seu diâmetro em relação a força de arrancamento, gerado pelas tensões de tração da matriz do compósito durante a abertura da fissuração (Figura 4.2b)

e da ativação a fibra com efeito de ponte após a falha de deslizamento na matriz (Figura 4.2a). Portanto, ao saber que resistência à tração da matriz equivale, aproximadamente, à 10% da resistência à compressão, observou-se nas equações 22-25 que o efeito da fibra na resistência à tração do concreto reduz em 50% para f_{R4} , o que pode ser justificado pelo arrancamento de parte considerável das fibras, para esse nível de deformação. Quanto ao índice de reforço, embora já tenha sido citado ao longo do texto, é definido como o produto entre o volume e o fator de forma da fibra ($V_f \cdot \lambda_f$), utilizado amplamente nas equações apresentadas por outros autores, expostos no Capítulo 3, para estimar as tensões residuais.

$$f_{Ri} = -A + \left[(B \cdot \lambda_f + f_t)^\varphi + (C \cdot V_f)^\omega + D \cdot (IR)^\psi \right] \quad (21)$$

Onde,

A - D e φ , ψ , ω são os coeficientes de regressão;

λ_f é o fator de forma;

V_f volume de fibra;

IR ($V_f \cdot \lambda_f$) corresponde ao índice de reforço

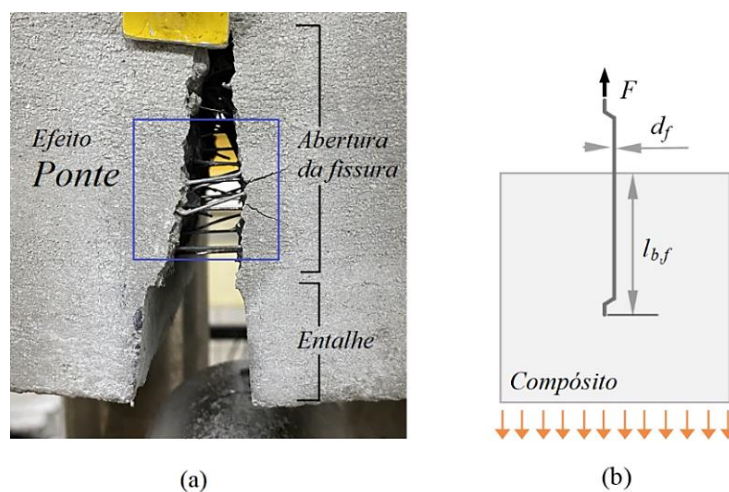


Figura 4.2. (a) Abertura de fissura e (b) Arrancamento da fibra.

$$f_{R1} = -6,6 + (0,01 \cdot \lambda_f + 0,1 \cdot f_c)^{0,45} + (150 \cdot V_f)^{0,30} + (IR)^{0,45} \quad (22)$$

$$f_{R2} = -10 + (0,03 \cdot \lambda_f + 0,1 \cdot f_c)^{0,85} + (190 \cdot V_f)^{0,45} + 0,85 \cdot (IR)^{0,30} \quad (23)$$

$$f_{R3} = -13 + (0,04 \cdot \lambda_f + 0,1 \cdot f_c)^{0,85} + (175 \cdot V_f)^{0,34} + 2,55 \cdot (IR)^{0,28} \quad (24)$$

$$f_{R4} = -11,5 + (0,06 \cdot \lambda_f + 0,05 \cdot f_c)^{0,90} + (181 \cdot V_f)^{0,46} + 1,71 \cdot (IR)^{0,05} \quad (25)$$

Ao analisar os principais parâmetros que influenciam na resposta do comportamento pós-fissuração do CRFA com base nas equações 22-25, observar-se que o aumento da resistência residual à flexão é proporcional ao aumento dos valores de fator de forma da fibra (λ_f) e volume de fibra (V_f), além das propriedades mecânicas do concreto, como mostra a Figura 4.3, ou seja, quanto maior forem esses parâmetros, maiores serão as resistências residuais obtidas. Entretanto, é necessário alertar que elevados valores de λ_f podem gerar a diminuição da trabalhabilidade do concreto (DVORKIN *et al.*, 2021).

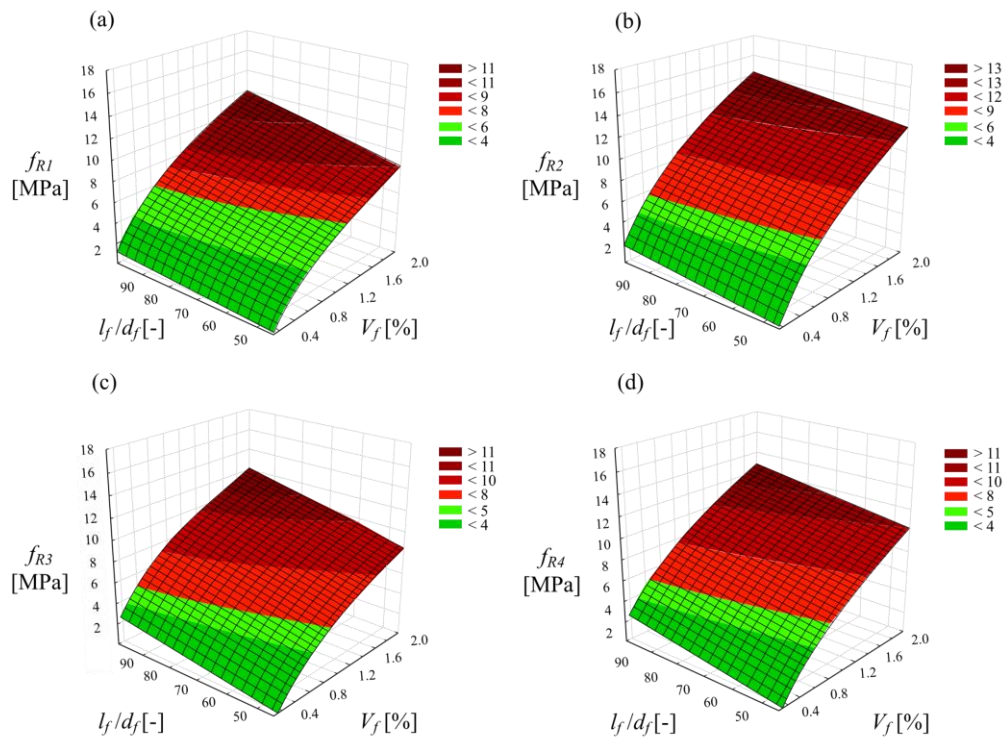


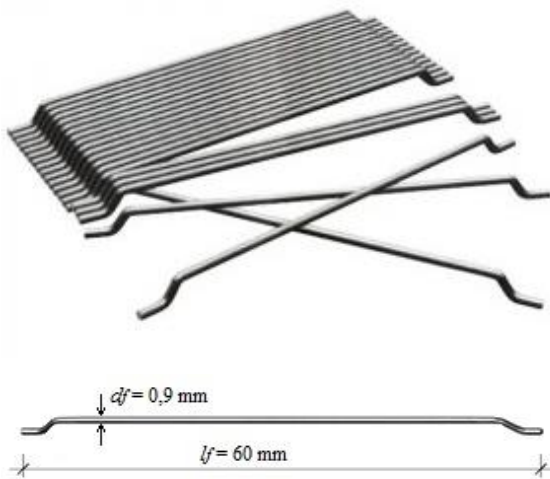
Figura 4.3. Representação gráfica da regressão das equações de resistência à tração à flexão residual.

5. PROGRAMA EXPERIMENTAL

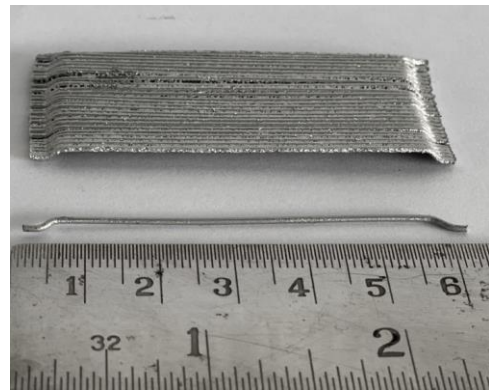
As respostas obtidas pelos experimentos, conduzidos por este estudo, serão utilizadas para avaliar o desempenho das equações empíricas para estimar as tensões residuais, tanto as expostas no capítulo 3 quanto as equações propostas por esta pesquisa e, adicionalmente, investigar a influência da fibra de aço no concreto fresco e endurecido.

5.1. MATERIAIS UTILIZADOS

Foram elaborados cinco tipos de misturas, $Mix_{C0,0}$, $Mix_{C0,5}$, $Mix_{C1,0}$, $Mix_{C1,5}$ e $Mix_{C2,0}$, que correspondem aos volumes de fibra de aço utilizados no concreto (0,0%, 0,5%, 1,0%, 1,5% e 2,0%). Optou-se por fibras de aço do tipo *hooked end*, pois, como visto, as fibras com ganchos na extremidade são mais eficazes em aperfeiçoar o desempenho à tração na flexão (LEE *et al.*, 2019), a resistência à tração direta (WANG *et al.*, 2019) e tenacidade (CHEN *et al.*, 2021) quando comparadas com outros tipos de fibras. A fibra utilizada foi a 3D *Dramix* 65/60 BG, produzidas pela empresa DRAMIX e em conformidade com ASTM A820 (2016), apresentam conformação *hooked end* coladas em pente, 30 fibras por pente, como mostra a Figura 5.1, classificada pela NBR 15530 (2019) como fibra tipo A e classe 1, com comprimento $l_f = 60$ mm e diâmetro $d_f = 0,9$ mm, que corresponde a um fator de forma $\lambda_f = 65$, e, por fim, apresentam resistência à tração de 1,16 MPa e módulo de elasticidade de ≈ 210 GPa, de acordo com o fabricante, informações complementares são apresentadas no ANEXO C.



a) Dimensão das fibras



b) Fibra utilizada no programa experimental

Figura 5.1. Geometria e característica das fibras empregadas no programa experimental.

O agregado graúdo utilizado nesse estudo foi constituído por brita 0, proveniente de rocha granítica, com diâmetro máximo $D_{max} = 9,5$ mm, módulo de finura de 6,71 mm, massa específica igual à $2,63 \text{ kg/m}^3$, NBR MN 53 (2021), e massa unitária com $13,74 \text{ kg/m}^3$, NBR NM 45 (2021). Utilizou-se areia média com 2,7 mm de módulo de finura, com a massa unitária e específica igual à $2,83 \text{ kg/m}^3$ e $2,45 \text{ kg/m}^3$, respectivamente, NBR MN 52 (2009).

As propriedades dos concretos no estado fresco foram praticamente invariáveis, com o abatimento no *slump test* de $140 \text{ mm} \pm 20 \text{ mm}$ (NBR NM 67, 2021). O aditivo empregado foi o superplastificante *Sika ViscoCrete® 3535 CB*, a dosagem utilizada, como mostra a Tabela 5.1, garantiu fluidez e coesão adequada aos concretos manipulados nesse estudo, o ANEXO D contém informações adicionais fornecidas pelo fabricante sobre o aditivo. A Figura 5.2 mostra os materiais utilizados no preparo das misturas e as suas respectivas dosagens são apresentados na Tabela 5.1.



Figura 5.2. Materiais utilizados: (a) Cimento Portland CII-Z-32 RS, (b) Sílica, (c) Areia, (d) Agregado graúdo, (e) Fibras de aço (DRAMIX® 3D 65/60 BG) e (f) Aditivo Superplastificante.

Tabela 5.1. Materiais constituinte da mistura do concreto.

Componentes	Consumo em peso por unidade de volume (kg/m ³)				
	<i>Mix_{C0,0}</i>	<i>Mix_{C0,5}</i>	<i>Mix_{C1,0}</i>	<i>Mix_{C1,5}</i>	<i>Mix_{C2,0}</i>
Cimento Portland CII-Z-32 RS	460,75	464,97	464,97	464,97	464,97
Sílica	19,22	19,38	19,38	19,38	19,38
Areia (média: 2,7 mm)	1013,66	1022,94	1022,94	1022,94	1022,94
Agregado graúdo ($D_{max} = 9,5$ mm)	829,36	836,94	836,94	836,94	836,94
Fibras (DRAMIX® 3D 65/60 BG)	-	40,00	80,00	120,00	160,00
Aditivo superplastificante	0,97	2,01	2,09	2,14	2,18
Água	244,20	246,43	246,43	246,43	246,43
<i>a/c</i>	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53

5.2. VIGAS ENTALHADAS

Foram moldadas 15 vigas entalhadas (150x150x550) mm, Figura 5.3, para o ensaio de tração na flexão de três pontos, conforme as prescrições dadas por RILEM TC 162-TDF (2002), as quais foram divididas em 5 séries referentes aos volumes de fibras utilizados, 0,0%, 0,5%, 1,0%, 1,5% e 2,0%. A cura foi do tipo úmida e iniciou após o endurecimento superficial do concreto, as peças foram cobertas por manta geotêxtil e molhadas constantemente, com intervalo de ≈ 4 horas, por 7 dias consecutivos. Além disso, seguiu-se as recomendações do RILEM TC 162-TDF (2002) que propõe armazenar e manter a temperatura à 20° C com a umidade relativa do ar à 95% após a desforma das vigas até o momento da realização do ensaio. Três dias antes dos ensaios de flexão os entalhes foram confeccionados nas vigas,

através de uma serra via úmida, na região central e ao longo da sua largura, na face à 90° com relação à superfície concretada, todos com 5 mm de largura e 25 mm de profundidade.



Figura 5.3. Vigas moldadas e seus respectivos corpos de prova cilíndricos.

5.3. VOLUME DE FIBRAS DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO

Realizou-se o ensaio para determinação do volume de fibra no concreto fresco, V_{fR} , com base na NBR 16938 (2021), a partir da lavagem e secagem de 2 amostras de 6L (litros) de concreto, retiradas aleatoriamente após a homogeneização de todos os componentes, ver Figura 5.4b e Figura 5.4c. As amostras, no momento da lavagem, foram postas em peneiras com abertura de 4,8 mm e 0,6 mm, para que o material final fosse apenas as fibras e agregado graúdo, em seguida realizou-se o processo de secagem (Figura 5.4c). Por fim, as fibras foram retiradas do material remanescentes e pesadas, como mostra a Figura 5.4d. Os resultados obtidos estão descritos na Tabela 5.2, nota-se que apenas as amostras referentes ao concreto com $V_f=1,5\%$ apresentaram um resultado aquém do esperado.

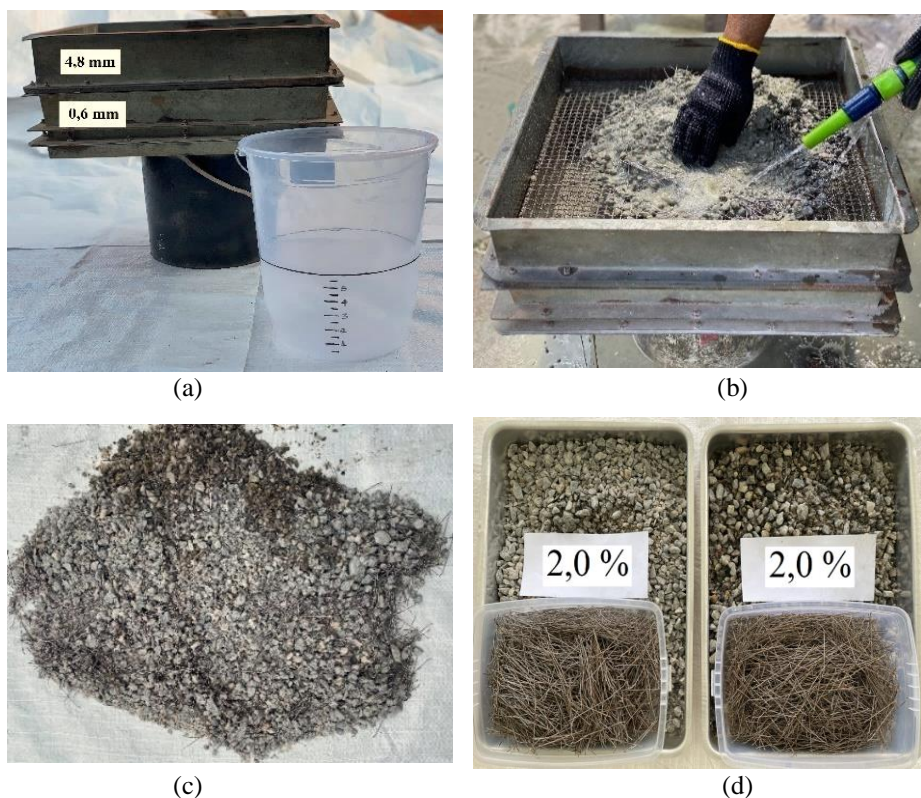


Figura 5.4. Determinação do consumo de fibra no concreto fresco: (a) Amostra com 6L e peneiras; (b) Lavagem da amostra; (c) Secagem do material remanescente; (d) Coleta das fibras para pesagem.

Tabela 5.2. Volume de fibras concreto fresco.

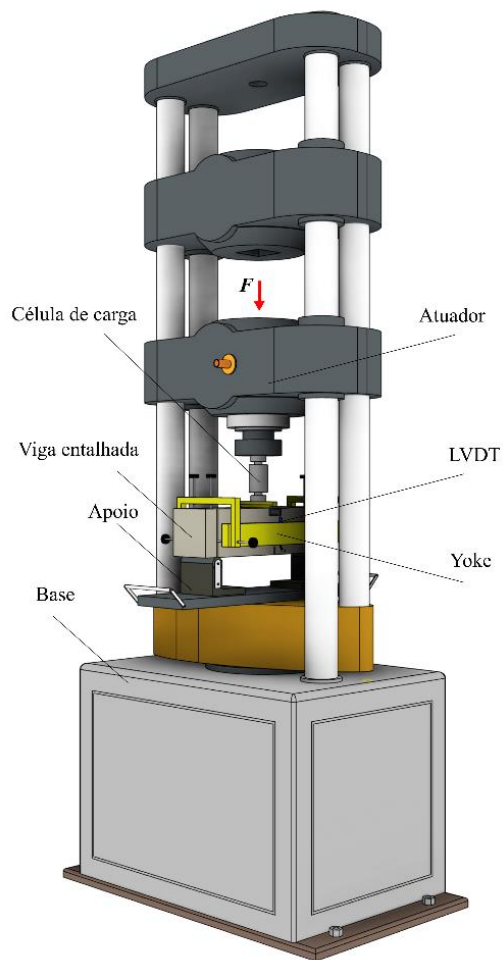
Amostra	M_f^a (kg)	V^b (m ³)	V_{fR} (kg/m ³)	C_{fR} (%)	$C_{fR,m}$ (%)
V0,5-1	0,264	0,006	44,0	0,55	0,54
V0,5-2	0,257	0,006	42,8	0,54	
V1,0-1	0,432	0,006	72,0	0,90	0,93
V1,0-2	0,462	0,006	77,0	0,96	
V1,5-1	0,649	0,006	108,2	1,35	1,33
V1,5-2	0,628	0,006	104,7	1,31	
V2,0-1	0,943	0,006	157,2	1,96	1,90
V2,0-2	0,882	0,006	147,0	1,84	

^a massa de fibras coletada; ^b Volume do recipiente ($V= 6 \text{ L}; = 0,0006\text{m}^3$).

5.4. SISTEMA DE ENSAIO

Os ensaios foram realizados entre 29 e 31 dias após as moldagens dos corpos de prova. A configuração para os ensaios à tração por flexão de três pontos está ilustrada na Figura 5.4a, utilizou-se uma máquina universal de ensaio da marca *Emic*, de servo-controlada (circuito fechado) e com a capacidade de 2000 kN.

A abertura de fissura foi medida através de um LVDT, o qual foi posicionado na face lateral e no meio do vão das vigas com o auxílio do *yoke*, que é uma estrutura rígida fixada nos apoios das vigas, Figuras 5.4b e 5.4c, os ensaios de flexão seguiram as recomendações do RILEM TC 162-TDF (2002). Para complementar a caracterização do concreto reforçado com fibras de aço, o ensaio de compressão foi realizado em corpos de prova com dimensões de (100 × 200) mm aos 28 dias após a moldagem.



(a) Sistema de ensaio



(b) Instrumentação para leitura de dados



(b) Realização do ensaio de flexão em três pontos

Figura 5.4. Sistema de ensaio à tração na flexão de três pontos.

6. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

A Tabela 6.1 apresenta os principais resultados obtidos no ensaio de tração na flexão de três pontos em termos de limite de proporcionalidade, f_L , resistências residuais nominais do comportamento pós-fissuração e seus valores médios, assim como, os valores médios das resistências à compressão ($f_{c,m}$) e o módulo de elasticidade ($E_{c,m}$), ressalta-se que o módulo de elasticidade foi estimado de acordo com a NBR 6118 (2014), equação 26.

$$E_c = \alpha_e \cdot 5600 \cdot \sqrt{f_{ck}} \quad (26)$$

Onde,

α_e é um parâmetro em função da origem do agregado graúdo:

$\alpha_e = 1,2$ (basalto e diabásio);

$\alpha_e = 1,0$ (granito e gnaisse);

$\alpha_e = 0,9$ (calcário);

$\alpha_e = 0,7$ (arenito).

Em relação aos resultados, o limite de proporcionalidade, f_L , apresentou as alterações mais expressivas, principalmente quando é analisada a razão $f_{Lm-f}/f_{Lm-0,0}$, que relaciona os valores obtidos para o concreto com fibra e de referência, com aumento da resistência à tração por flexão de 176% para o concreto com $V_f = 2,0\%$. Entretanto, a resistência à compressão média permaneceu quase inalterado, com a relação $f_{c,m-f}/f_{c,m-0,0}$ evidenciando um aumento máximo de 8% para o concreto com 2,0% de fibras, resultados semelhante aos encontrados por ABDALLAH *et al.* (2016), GOMES *et al.* (2018) e NZAMBI *et al.* (2021c). Ao analisar o coeficiente de variação (valores entre parêntese), é possível concluir que os resultados médios alcançados estão homogêneos.

Tabela 6.1. Resultados de resistência à tração na flexão e propriedades mecânicas do concreto.

Id.	f_L (MPa)	$f_{L,m}^a$ (MPa)	$f_{L,m-f}^b$ $/f_{L,m-0,0}^c$	f_{R1} (MPa)	f_{R2} (MPa)	f_{R3} (MPa)	f_{R4} (MPa)	$f_{c,m}$ (MPa)	$f_{c,m-f}/$ $f_{c,m-0,0}$	$E_{c,m}^d$ (GPa)
V _{0,0-1}	3,65									
V _{0,0-2}	3,95	3,67	-	-	-	-	-	38,55 (4,13%)	-	34,77
V _{0,0-3}	3,42									
V _{0,5-1}	4,43			4,09	4,60	3,70	3,43			
V _{0,5-2}	4,40	4,58	1,25	4,28	4,49	3,65	3,66	40,16 (2,21%)	1,04	35,49
V _{0,5-3}	4,92			4,40	4,50	3,60	3,30			
V _{1,0-1}	6,15			6,90	7,35	6,21	5,17			
V _{1,0-2}	6,20	6,19	1,68	6,13	8,25	6,85	6,70	40,73 (4,94%)	1,06	35,74
V _{1,0-3}	6,21			6,20	7,90	6,70	6,80			
V _{1,5-1}	9,25			9,10	9,85	8,47	8,58			
V _{1,5-2}	9,30	9,15	2,49	9,50	10,10	8,38	9,22	41,36 (2,80%)	1,07	36,01
V _{1,5-3}	8,90			9,00	9,80	8,22	8,80			
V _{2,0-1}	11,20			10,71	10,52	10,20	9,57			
V _{2,0-2}	10,10	10,13	2,76	9,25	9,80	9,70	9,71	41,60 (1,20%)	1,08	36,12
V _{2,0-3}	9,10			9,90	10,49	10,20	9,40			

^a é o limite de proporcionalidade médio; ^b limite de proporcionalidade médio das vigas entalhadas com fibra de aço; ^c limite de proporcionalidade médio das vigas sem fibras de aço que serviram como referência, ^d módulo de elasticidade médio.

6.1. INFLUÊNCIA DO FATOR DE ORIENTAÇÃO E NÚMEROS DE FIBRAS

Com finalidade de aprofundar as análises experimentais, utilizou-se a metodologia apresentada por BARROS e ANTUNES (2003), SOROUSHIAN e LEE (1990) e GOMES *et al.* (2018), que sugerem a contagem do número de fibras, N_f , remanescentes na seção transversal, $A_p = (150 \times 125)$ mm, das vigas entalhadas após a ruptura. Um exemplo de seção transversal utilizada é apresentado na Figura 6.1, nota-se que é desconsiderada a área do entalhe, e o resumo da contagem é apresentado na Figura 6.2, que também demonstra como ocorreu a divisão da seção A_p em nove quadrantes.

É evidente que o acréscimo dos valores das tensões residuais é proporcional ao aumento de N_f . Contudo, a diferença entre as tensões residuais obtidas entre os V_f de 1,5% e 2,0% é pouco representativa em comparação com os demais volumes de fibras, o que pode ser justificado

por uma possível diminuição na homogeneidade do concreto com elevada percentagem de fibras (BARROS *et al.*, 2003).



Figura 6.1. Seção transversal A_p do prisma com volume de fibra igual à 1,5%.

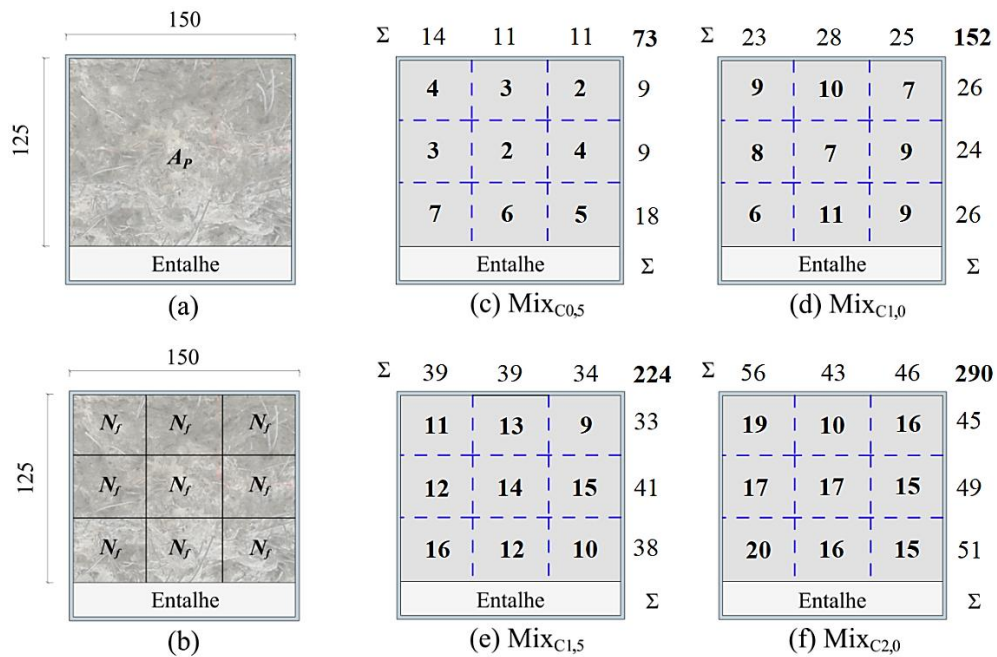


Figura 6.2. Resumo do número de fibras contabilizados em uma das seções transversais das vigas.

Adicionalmente, segundo o estudo desenvolvido por KRENCHER (1964), com o registro do número de fibras é possível estimar o fator de orientação (FO). E, julga-se recomendável

avaliar o fator de orientação visto que o lançamento do concreto nas formas foi do tipo manual, ou seja, um método pouco rigoroso. Pois, de acordo com KRENCHER (1964), condições desfavoráveis de FO comprometem as propriedades mecânicas do CRFA. O resumo do fator de orientação é mostrado na Tabela 6.2, onde se verifica que a estimativa de FO é definida pela equação 27.

$$FO = \frac{N_f \cdot A_f}{A_p \cdot V_f} \quad (27)$$

Onde,

N_f é número de fibras

A_p corresponde à área da seção transversal da viga, desconsiderando o entalhe;

A_f é área da seção transversal da fibra de aço e;

V_f é o volume de fibra.

Tabela 6.2. Estimativa do fator de orientação (valor médio).

Concreto	A_p (mm ²)	A_f (mm ²)	$N_{f,m}^a$	V_f (%)	$N_{f,m}/A_p$ (Fibras/mm ²)	FO
<i>MixC0,5</i>			73	0,5	3,83	0,49
<i>MixC1,0</i>	1,88·10 ⁴	0,64	152	1,0	7,87	0,52
<i>MixC1,5</i>			224	1,5	12,02	0,51
<i>MixC2,0</i>			290	2,0	15,27	0,49

^a $N_{f,m}$ representa a contagem do número de fibras médio.

Ao analisar os resultados obtidos na Tabela 6.2, notou-se que FO variou de $0,50 \pm 0,02$. DUPONT e VANDEWALLE (2005) e ALBERTI *et al.* (2017) revelam que em condições normais de utilização, ou seja, sem que haja a interferência danosa da orientação das fibras, o fator de orientação adequado é de, aproximadamente, $FO \approx 0,50$. Segundo o estudo de LEE e KIM (2010) o fator de orientação deve respeitar o intervalo $FO \in [0,40-0,65]$. Para DI-PRISCO *et al.* (2013) o fator de orientação, para fibras *hooked end* com comprimento de

60 mm, seria de $FO \in [0,42-0,53]$. Com base nessas informações, constata-se que os resultados obtidos estão em conformidade com os limites estabelecidos na literatura, ou seja, o método moldagem e adensamento do CRFA utilizados nessa pesquisa foram adequados.

6.2. RESISTÊNCIA RESIDUAL À FLEXÃO NO COMPORTAMENTO PÓS-FISSURAÇÃO

Ao analisar a fase pós-fissura dos resultados apresentados nas Figuras 6.3 e 6.4, torna-se evidente dois comportamentos distintos entre os concretos simples e os concretos com adição de fibra. O concreto sem fibras de aço, utilizado como referência, após a fase elástica, teve uma resposta frágil, com pouca deformação. Por outro lado, o comportamento dos concretos com fibra foi caracterizado pela manutenção da tensão no pós-ruptura, ou seja, com endurecimento (*hardening*).

Além destas informações, destaca-se que o aumento da tenacidade, área abaixo das curvas dos gráficos, é proporcional ao aumento do consumo de fibras. Ressalta-se que as tensões residuais obtidas respeitaram os limites de $f_{R1} \geq 1.5$ MPa e $f_{R4} \geq 1.0$ MPa (RILEM TC 162-TDF, 2002), assim como, $f_{R1} \geq 0.4 \cdot f_L$ e $f_{R3} \geq 0.5 \cdot f_{R1}$ (CEB-FIP, 2010). De modo geral, as linhas teóricas, obtidas através das equações de tensão residual elaboradas nesta pesquisa, estão próximas dos resultados médios adquiridos experimentalmente.

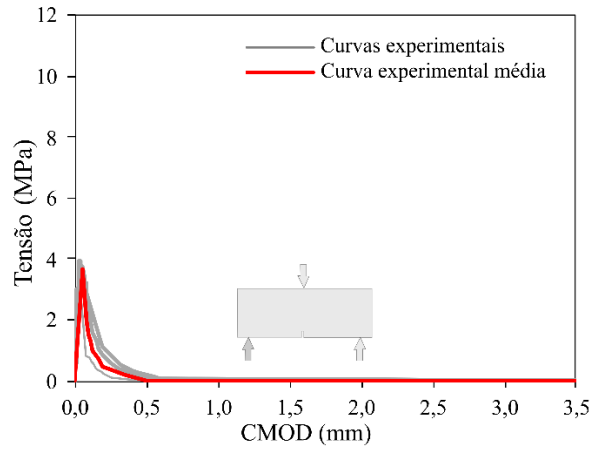


Figura 6.3. Curvas *tensão-CMOD* para o ensaio de flexão 3PBT: $Mix_{C0,0}$ (concreto simples).

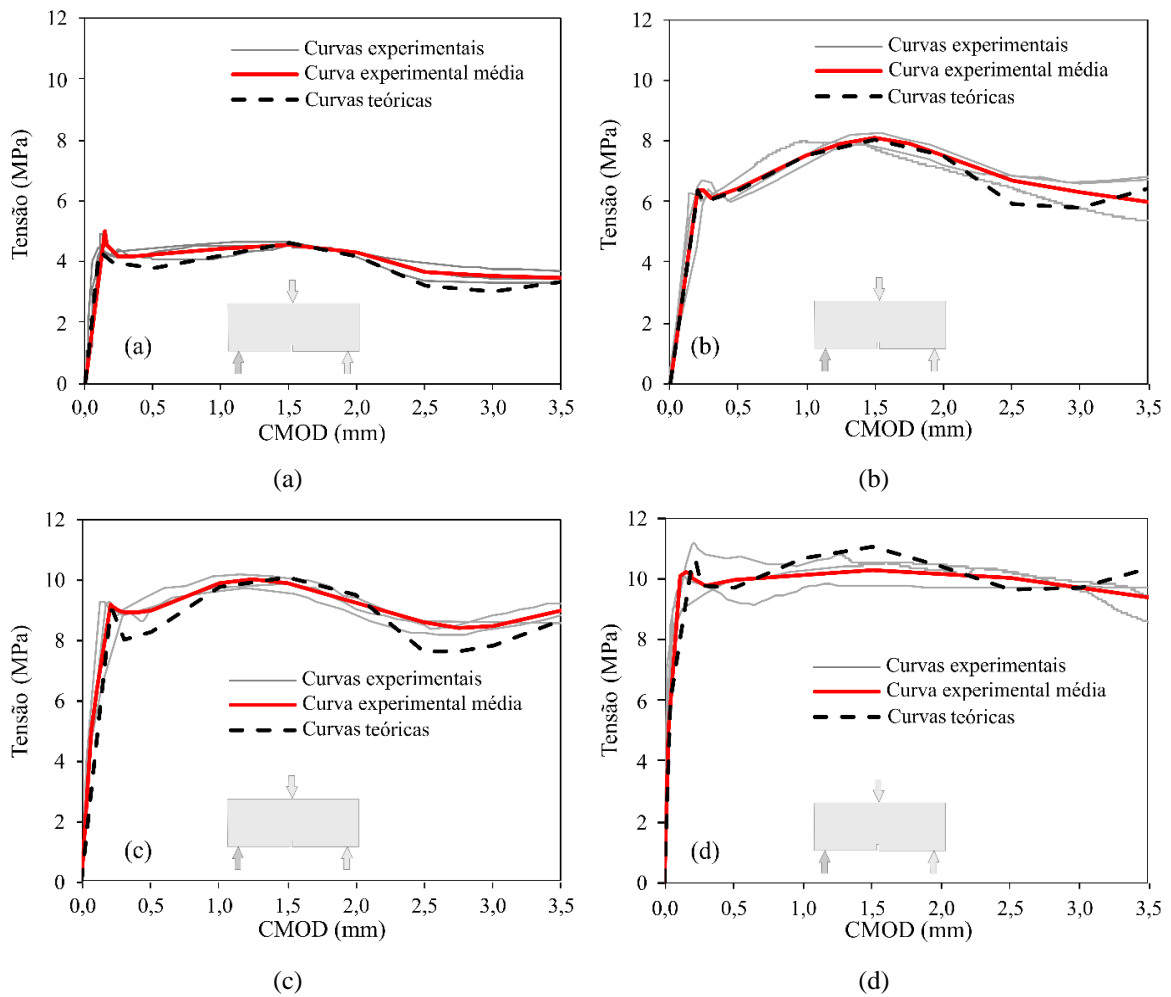


Figura 6.4. Curvas *tensão-CMOD* para o ensaio 3PBT: (a) $Mix_{C0,5}$, (b) $Mix_{C1,0}$, (c) $Mix_{C1,5}$ e (d) $Mix_{C2,0}$.

7. VALIDAÇÃO DO MODELO ANÁLITICO PROPOSTO

A verificação do modelo proposto foi realizada através de um banco de dados formado por 118 vigas com entalhe, coletadas da literatura e as do programa experimental apresentadas no capítulo 6, que foram submetidas ao ensaio à tração por flexão de 3 pontos, Tabela 7.1. As propostas empíricas, desde estudo e dos demais autores, foram avaliadas em função da precisão, da dispersão e da segurança dos resultados, através do parâmetro $f_{Ri,exp}/f_{Ri,teo}$ ($i = 1-4$), que representa a razão entre os resultados experimentais (banco de dados) e teóricos (calculados à partir das equações). Com o objetivo de garantir a qualidade das análises, foram excluídos do banco de dados os primas em CRFA com a condição $f_{c,f}/f_{c,0} < 0.85$, sendo $f_{c,f}$ a resistência à compressão do concreto com fibras e $f_{c,0}$ o concreto simples, sem fibras de aço. Outro critério de corte foi a análise dos limites $f_{R1} \geq 1,5$ MPa e $f_{R4} \geq 1,0$ MPa (RILEM TC 162-TDF, 2002) e $f_{R1} \geq 0,4 \cdot f_L$ e $f_{R3} \geq 0,5 \cdot f_{R1}$ (CEB-FIP, 2010). O banco de dados completo está no ANEXO B.

Tabela 7.1. Banco de dados para validação e análise de equações empíricas de tensão residual.

Autor*	Nº de vigas	V_f (%)	l_f/d_f	f_c (MPa)	f_{R1} (MPa)	f_{R2} (MPa)	f_{R3} (MPa)	f_{R4} (MPa)
[1]	14	0,33-1,00	80-85	18,00-75,00	3,17-10,56	3,20-13,60	2,56-13,28	1,92-9,47
[2]	7	0,25-1,00	80	42,50-56,00	3,50-7,80	3,20-11,40	2,16-7,80	2,15-6,72
[3]	2	0,50-0,75	67	32,57-35,35	3,80-6,95	3,99-7,26	4,07-7,10	3,92-6,64
[4]	3	0,32-0,51	62-86	44,10-45,60	2,90-7,54	2,74-6,86	2,61-6,10	2,47-4,98
[5]	1	0,50	63	46,44	3,00	3,20	2,50	2,40
[6]	2	0,25-0,50	80	47,20	2,26-3,79	2,31-4,46	2,23-4,55	2,04-4,39
[7]	2	0,25-0,50	48	32,90-38,90	1,70-3,50	1,58-3,16	1,45-2,87	1,25-2,68
[8]	7	0,50	67	46,89	3,88-5,44	4,16-6,17	3,44-4,82	3,04-4,45
[9]	4	0,25-1,00	81	45,00	2,40-9,86	2,21-8,86	2,21-8,22	2,24-7,98
[10]	3	0,25-0,75	65	24,50-27,10	2,09-6,79	1,57-6,42	1,41-6,08	1,22-5,39
[11]	4	0,50-1,00	65	46,79-48,52	3,39-5,78	2,80-5,23	2,17-5,05	1,90-4,40
[12]	7	0,50	67	48,40-50,80	3,20-4,20	3,50-5,20	3,40-5,60	3,30-5,50
[13]	6	1,00-2,00	80	60,80-66,16	8,00-14,10	9,70-15,70	7,10-15,40	5,40-12,70
[14]	3	0,25-0,75	85	51,76-58,56	4,10-9,20	5,70-9,20	6,02-9,80	5,73-9,74
[15]	4	0,31-0,88	65	52,80-64,50	3,79-9,95	3,90-9,25	3,20-7,20	3,00-6,83
[16]	3	0,38-0,75	50	66,90-71,90	2,90-7,30	2,80-7,60	2,60-7,30	2,50-6,90
[17]	2	0,37-0,60	65	48,00-51,00	5,18-6,40	5,76-6,94	3,73-5,81	3,10-5,31
[18]	6	0,13-0,56	65-80	31,80	1,50-5,90	1,70-6,20	1,50-5,80	1,40-5,40
[19]	11	0,32-1,00	45-100	32,32-71,76	2,04-12,38	1,89-12,74	1,23-11,78	1,07-10,80
[20]	1	0,63	50	46,80	5,43	5,29	4,94	4,58
[21]	4	0,50	55-63	50,00-56,80	4,33-6,71	4,30-6,52	3,96-6,16	3,48-5,68
[22]	4	0,98-1,95	65	26,10-33,10	6,43-10,26	8,42-17,22	6,38-12,82	3,26-9,28
[23]	6	1,00	40-80	38,90-83,80	3,04-7,11	1,19-3,85	1,19-2,01	1,26-1,99

Tabela 7.1. Banco de dados para validação e análise de equações empíricas de tensão residual. (Cont.)

Autor*	Nº de vigas	V_f (%)	l_f/d_f	f_c (MPa)	f_{R1} (MPa)	f_{R2} (MPa)	f_{R3} (MPa)	f_{R4} (MPa)
[24]	12	0,50-2,00	65	36,77-42,43	4,09-10,71	4,49-10,52	3,60-10,20	3,30-9,71

*[1] SAHIN e KOSAL (2011); [2] ASLANI *et al.* (2020); [3] FOLINO *et al.* (2019); [4] CUENCA *et al.* (2020); [5] AVANAKI *et al.* (2019); [6] SMEDT *et al.* (2020); [7] GOMES *et al.* (2020); [8] SUTA *et al.* (2020); [9] WANG *et al.* (2020); [10] CARRILLO *et al.* (2021); [11] ABDALLAH *et al.* (2016); [12] GRIMALDI *et al.* (2013); [13] BENCARDINO *et al.* (2013); [14] SOETENS e MATTHYS (2014); [15] BARROS *et al.* (2003); [16] GALEOTE *et al.* (2017); [17] LEE *et al.* (2019); [18] BARROS *et al.* (2005); [19] TIBERTI *et al.* (2017); [20] CONFORTI *et al.* (2020); [21] CONFORTI *et al.* (2021); [22] KACHOUH *et al.* (2020); [23] ANDRADE *et al.* (2021); [24] Este estudo.

7.1. PROCEDIMENTO DE AVALIAÇÃO

Com o objetivo de avaliar a confiabilidade e o desempenho das equações propostas por esta pesquisa, assim como, as propostas analíticas retiradas da literatura, um sistema de classificação baseado em penalidades foi aplicado, proposto originalmente por COLLINS (2001) e adaptado por MORAES NETO (2013), denominado como DPC (*Demerit Points Classification*) e exemplificado na Tabela 7.2. Esse critério sugere que uma penalidade seja atribuída à cada intervalo de $f_{Ri,exp}/f_{Ri,teo}$ e a penalidade total define o desempenho das equações de cada autor. Em resumo, quanto maior for o total da soma, menos confiáveis e eficientes são as propostas analíticas.

Tabela 7.2. Versão modificada DPC.

$f_{Ri,exp}/f_{Ri,teo}$	Classe	Penalidade
<0,5	Extremamente perigoso (EP)	10
[0,5-0,85[Perigoso (P)	5
[0,85-1,15[Segurança apropriada (AS)	0
[1,15-2,0[Conservador (C)	1
≥2,0	Extremamente conservador (EC)	2

7.2. COMPARAÇÃO ENTRE O MODELO PROPOSTO E OS MODELOS EMPÍRICOS DA LITERATURA

A Figura 7.1 e Tabela 7.3 exibem a análise de $f_{Ri,exp}/f_{Ri,t}$ quanto à versão DPC modificada, com finalidade de verificar a segurança das propostas para estimar as tensões residuais. Os gráficos da Figura 7.1 mostram que a proposta dada por VENKATESHWARAN *et al.* (2017) e as equações proposta por este estudo, contabilizaram o maior número de vigas

entalhadas na classe de segurança apropriada. Contudo, em relação as penalidades, as equações que estimam as tensões residuais (f_{Ri} , $i = 1-4$), apresentadas por VENKATESHWARAN *et al.* (2017) e DOMSKI e KATZER (2019), são as mais penalizadas, com resultados excessivos nas classes extremamente perigosa ($f_{Ri,exp}/f_{Ri,t} < 0,5$) e perigosa ($f_{Ri,exp}/f_{Ri,t} \in [0,50-0,85]$). Ainda nesta análise, destaca-se o bom desempenho da proposta apresentada por esta pesquisa, por ser o modelo menos penalizado. As equações de MORAES NETO (2013) são conservadoras na maioria dos resultados e CARRILLO *et al.* (2021) apresentaram $f_{Ri,exp}/f_{Ri,t} < 0,5$ (classe extremamente perigosa). Ressalta-se que na Figura 7.1b não são apresentados os resultados referentes ao autor MORAES NETO (2013), pois este não apresenta uma equação que estime os valores de f_{R2} .

A Figura 7.2 mostra a relação entre as tensões residuais experimentais ($f_{Ri,exp}$) e teóricas ($f_{Ri,teo}$). Na Figura 7.2b, observa-se a concentração de resultados obtidos, a partir das equações desta pesquisa, dentro do limite $\pm 15\%$. Ao analisar o coeficiente de determinação, R^2 , que é uma medida estatística que mostra o quão próximos os dados estão da linha de regressão, ou seja, da linha que forma um ângulo de 45° com os vértices, tem-se que o modelo empírico deste estudo se destaca com os melhores resultados para determinar as tensões residuais, com $R^2 \in [0,78-0,89]$. De acordo com MONTGOMERY (2001), que categoriza o coeficiente de determinação, R^2 , através de intervalos $[0,0-0,2]$, $[0,2-0,4]$, $[0,4-0,6]$, $[0,6-0,8]$ e $[0,8-1,0]$, que denotam muito fraca, fraca, moderada, forte e muito forte, respectivamente. As equações propostas por esta pesquisa são consideradas, na maior parte dos resultados, com performance muito forte. Com exceção de DOMSKI e KATZER (2019), que exibiu comportamento predominantemente moderado $R^2 \in [0,4-0,6]$, os demais autores tiveram suas equações classificadas, segundo MONTGOMERY (2001), com desempenho forte.

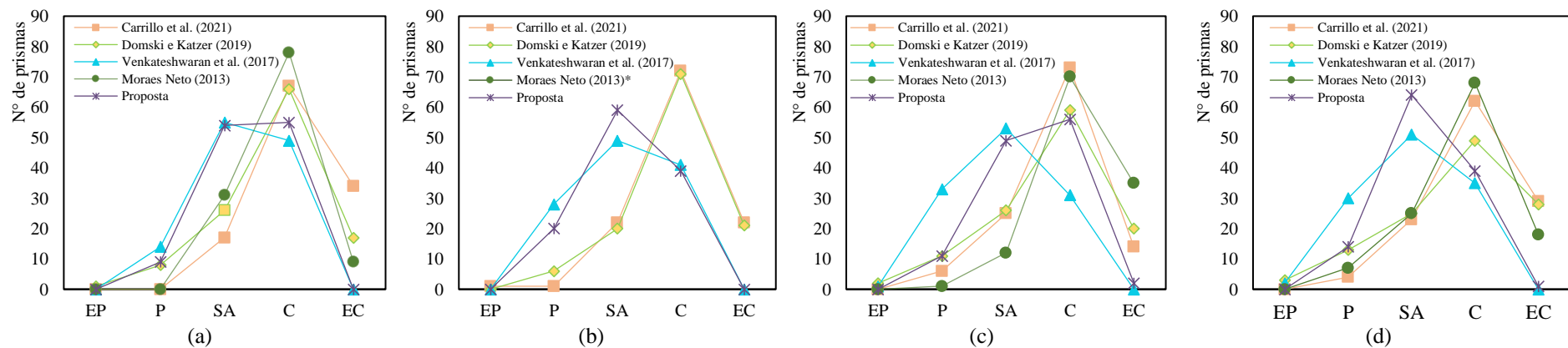


Figura 7.1. Avaliação quanto à segurança: (a) $f_{R1,exp}/f_{R1,teo}$; (b) $f_{R2,exp}/f_{R2,teo}$; (c) $f_{R3,exp}/f_{R3,teo}$; (d) $f_{R4,exp}/f_{R4,teo}$.

Nota: * O autor não apresenta equação que defina f_{R2} .

Tabela 7.3. Avaliação quanto à segurança dos modelos empíricos.

Avaliação dos modelos pelo método DCP modificado.																				
Classe	CARRILLO <i>et al.</i> (2021)				DOMSKI e KATZER (2019)				VENKATESHWARAN <i>et al.</i> (2017)				MORAES NETO (2013)				Proposta			
	f_{R1}	f_{R2}	f_{R3}	f_{R4}	f_{R1}	f_{R2}	f_{R3}	f_{R4}	f_{R1}	f_{R2}	f_{R3}	f_{R4}	f_{R1}	f_{R2}^*	f_{R3}	f_{R4}	f_{R1}	f_{R2}	f_{R3}	f_{R4}
EP	0	20	0	0	10	10	20	30	10	0	10	20	0	-	0	0	0	0	0	0
P	0	5	30	20	40	30	55	65	70	140	165	150	0	-	5	35	45	100	55	70
SA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-	0	0	0	0	0	0
C	67	80	73	62	66	71	59	49	49	41	31	35	82	-	70	68	51	31	56	39
EC	68	44	28	58	34	42	40	56	0	0	0	0	18	-	70	36	0	0	4	2
TOTAL	135	149	131	140	150	153	174	200	119	191	206	205	100	-	145	139	96	131	115	111

NOTA: EP (Extremamente perigoso); P (Perigoso); SA (Segurança apropriada); C (Conservador); EC (Extremamente conservador).

* O autor não apresenta equação que defina f_{R2} .

Por fim, para todas as propostas os valores do coeficiente de determinação para a tensão residual f_{R4} foram os mais baixos, com comportamento mais disperso, em comparação com as demais tensões residuais, o que pode ser justificado pela incerteza do comportamento da curva do gráfico *tensão-CMOD* após a fase elástica, o qual pode assumir duas tendências de curvas, com amolecimento e endurecimento, apesar disso, destaca-se o bom desempenho das equações sugeridas por este estudo.

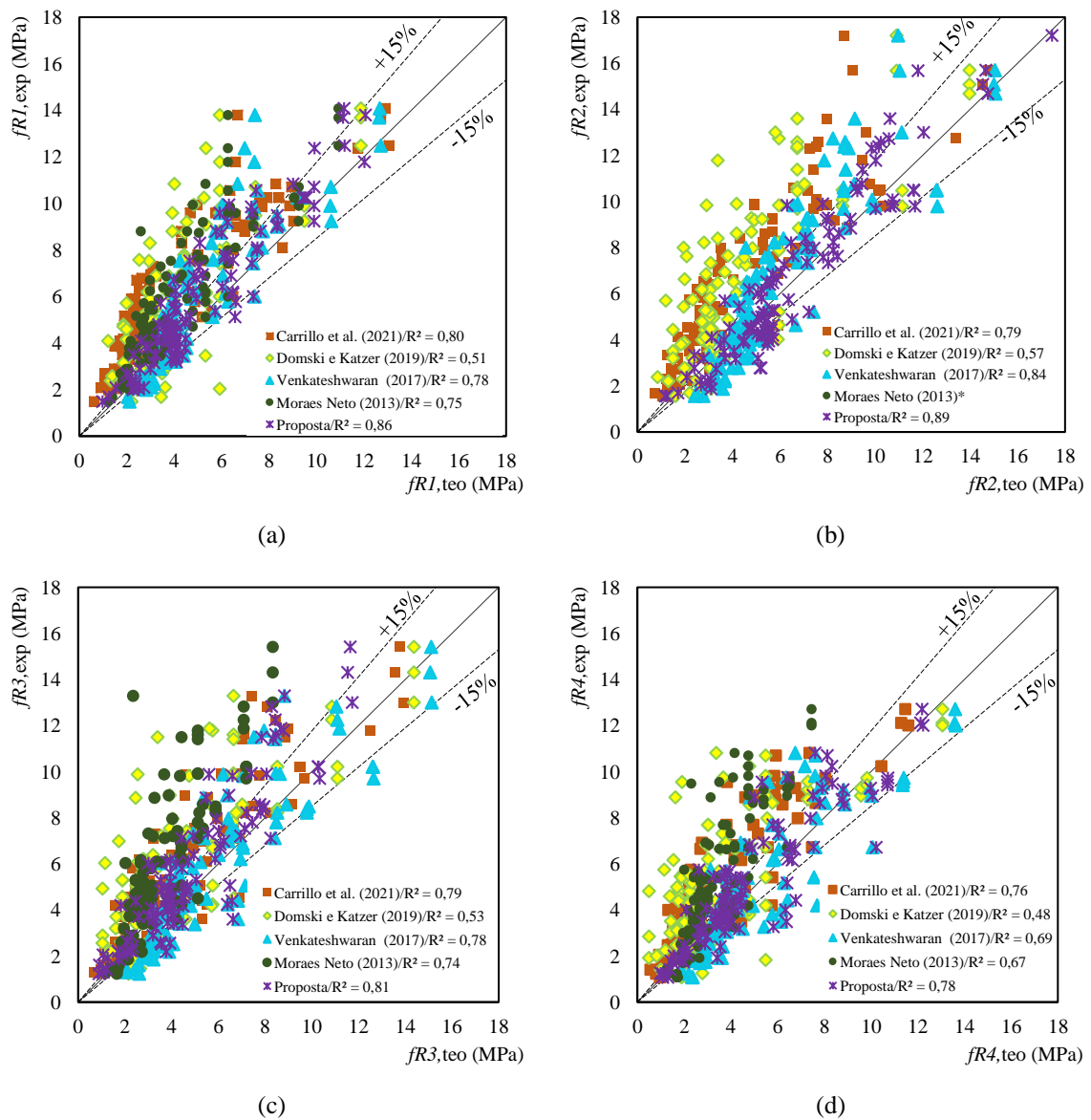


Figura 7.2. Gráfico de dispersão de resultado experimental-teórico, $f_{Ri,exp}/f_{Ri,teo}$: (a) $f_{R1,exp}/f_{R1,teo}$; (b) $f_{R2,exp}/f_{R2,teo}$; (c) $f_{R3,exp}/f_{R3,teo}$; (d) $f_{R4,exp}/f_{R4,teo}$.

* O autor não apresenta equação que defina f_{R2} .

Os gráficos das distribuições normais, Figura 7.3, mostram a frequência, em porcentagem, em que os resultados das vigas entalhadas se dispõem num determinado intervalo de $f_{Ri,exp}/f_{Ri,teo}$. Essa análise sinaliza que as equações propostas por este estudo, seguido pelos modelos de VENKATESHWARAN *et al.* (2017), denotam maior densidade dos resultados dentro do limite apropriado, principalmente na Figura 7.3b, onde aproximadamente 80% dos resultados estão dentro do intervalo [0.85-1.15], classificado com segurança apropriada, segundo o critério de penalidades de COLLINS (2001). Corroborando as análises anteriores, o comportamento do modelo de cálculo de DOMSKI e KATZER (2019) é o mais disperso, pois há um achatamento acentuado da curva do gráfico, mais evidente na Figura 7.3d. Por fim, as curvas dos modelos CARRILLO *et al.* (2021) e MORAES NETO (2013) exibem um deslocamento para além do limite 1,15, o que indica uma tendência conservadora.

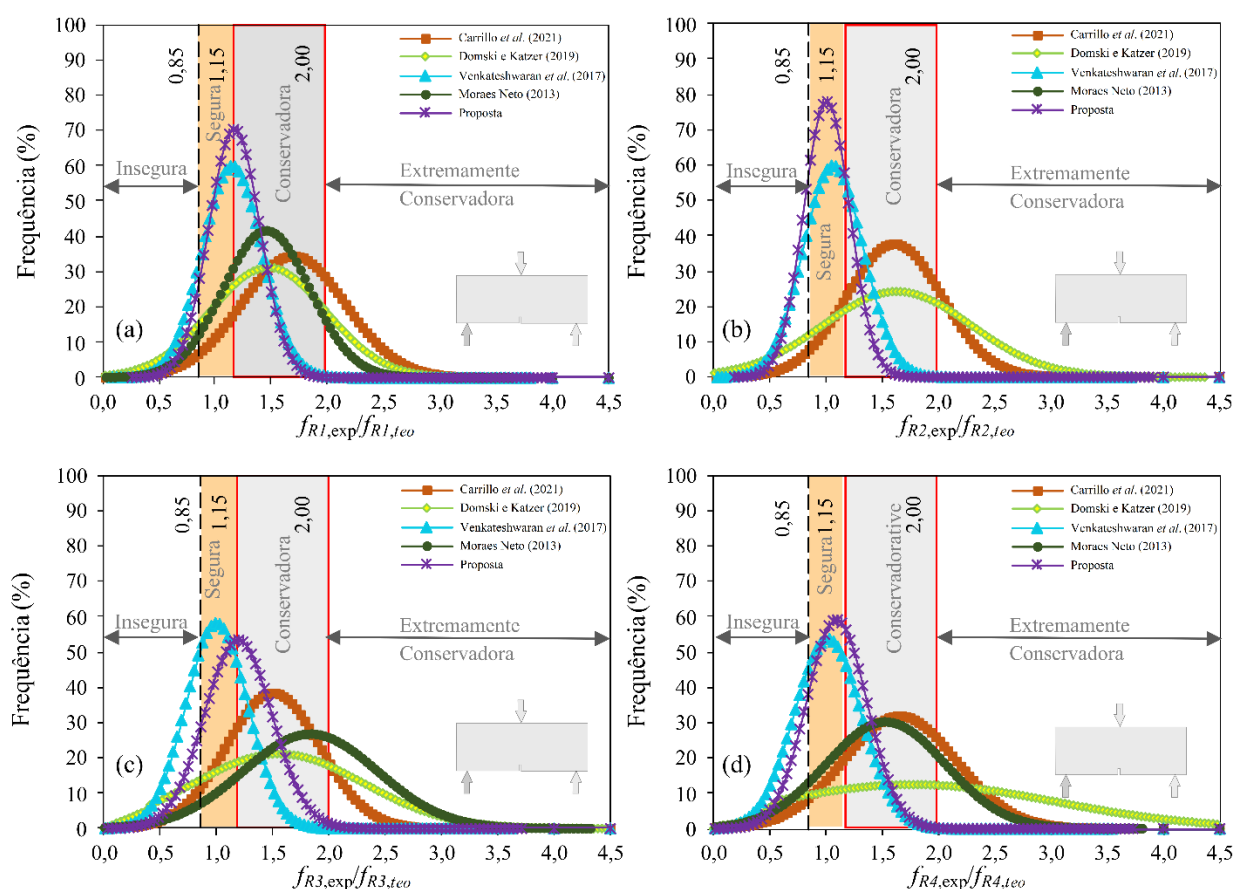


Figura 7.3. Distribuição normal da relação $f_{Ri,exp}/f_{Ri,teo}$: (a) $f_{R1,exp}/f_{R1,teo}$; (b) $f_{R2,exp}/f_{R2,teo}$; (c) $f_{R3,exp}/f_{R3,teo}$; (d) $f_{R4,exp}/f_{R4,teo}$.

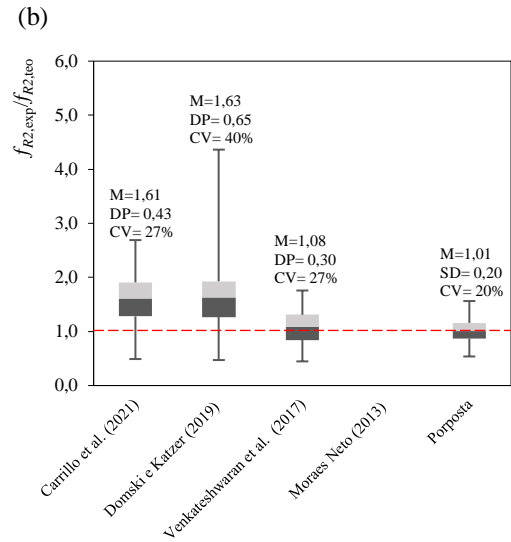
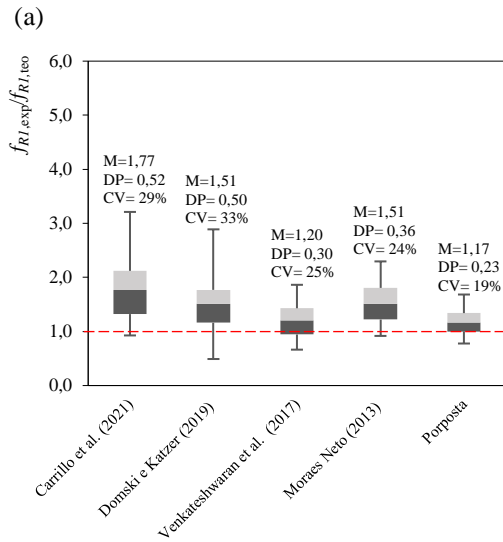
*Moraes Neto (2013) não apresenta equação que defina f_{R2} .

De forma complementar, a Figura 7.4 apresenta gráficos de *box plot* e seus respectivos resumos estatísticos, como valores de média aritmética (M), desvio padrão (DP), coeficiente de variação (CV), valores máximos (Max), mínimos (Min) e o resumo dos quartis, onde o primeiro quartil ($Q1$) e o terceiro quartil ($Q3$) correspondem aos limites inferiores e superiores dos resultados, respectivamente.

Constata-se que CARRILLO *et al.* (2021), DOMSKI e KATZER (2019) e MORAES NETO (2013) possuem resultados demasiadamente dispersos. Adicionalmente, o modelo de DOMSKI e KATZER (2019) apresentam um comportamento classificado como extremamente perigoso, com valores mínimos $Min < 0,5$, como mostra a Figura 7.4. Em termos estatísticos, as médias aritméticas (M), com resultados mais satisfatórios, foram alcançadas pela proposta analítica deste estudo e por VENKATESHWARAN *et al.* (2017).

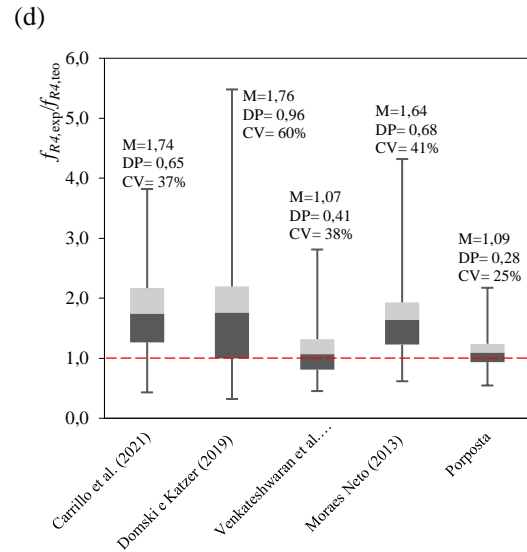
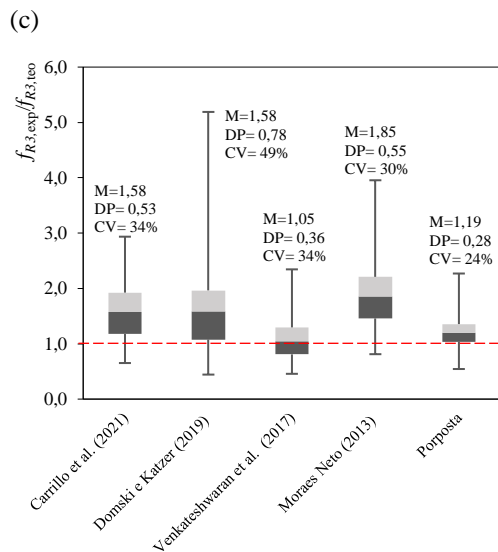
Os resultados menos dispersos pertencem as equações elaboradas por esta pesquisa, com coeficiente de variação, CV , dentro do intervalo $[19 - 25] \%$, ou seja, possui boa precisão, pois é de conhecimento comum que CV menor ou igual à 25% é considerado como baixo, apontando assim, um conjunto de dados homogêneos. Nesse sentido, comenta-se que o desempenho de DOMSKI e KATZER (2019) foi o mais disperso, categorizado como impreciso por apresentar CV entre $[24-50] \%$.

Em relação ao primeiro quartil, $Q1$, DOMSKI e KATZER (2019) e a proposta apresentada por esta pesquisa apresentaram os resultados mais satisfatórios, com $Q1 \in [0,85-1,15]$. Contudo, vale ressaltar que ao analisar os valores mínimos (Min), percebe-se que DOMSKI e KATZER (2019) indicam resultados contra a segurança. Quanto aos valores máximos (Max), todos os modelos de cálculo apontaram respostas acima do esperado.



Modelos	Parâmetros estatísticos				
	f_{R1}				
	Min	Q_1	M	Q_3	Max
Carrillo <i>et al.</i> (2021)	0,93	1,30	1,77	2,05	3,21
Domski e Katzer (2019)	0,49	1,14	1,51	1,74	2,89
Venkateshwaran <i>et al.</i> (2017)	0,66	0,94	1,20	1,32	1,86
Moraes Neto (2013)	0,92	1,17	1,51	1,70	2,30
Proposta	0,78	1,00	1,17	1,34	1,68

Modelos	Parâmetros estatísticos				
	f_{R2}				
	Min	Q_1	M	Q_3	Max
Carrillo <i>et al.</i> (2021)	0,49	1,28	1,74	1,91	2,69
Domski e Katzer (2019)	0,47	1,27	1,76	1,93	5,39
Venkateshwaran <i>et al.</i> (2017)	0,45	0,84	1,07	1,31	1,76
Moraes Neto (2013)	-	-	-	-	-
Proposta	0,54	0,87	1,09	1,16	1,56



Modelos	Parâmetros estatísticos				
	f_{R3}				
	Min	Q_1	M	Q_3	Max
Carrillo <i>et al.</i> (2021)	0,65	1,19	1,58	1,79	2,94
Domski e Katzer (2019)	0,44	1,08	1,58	1,87	5,19
Venkateshwaran <i>et al.</i> (2017)	0,46	0,81	1,05	1,16	2,34
Moraes Neto (2013)	0,79	1,46	1,83	2,09	3,79
Proposta	0,54	1,03	1,19	1,36	2,27

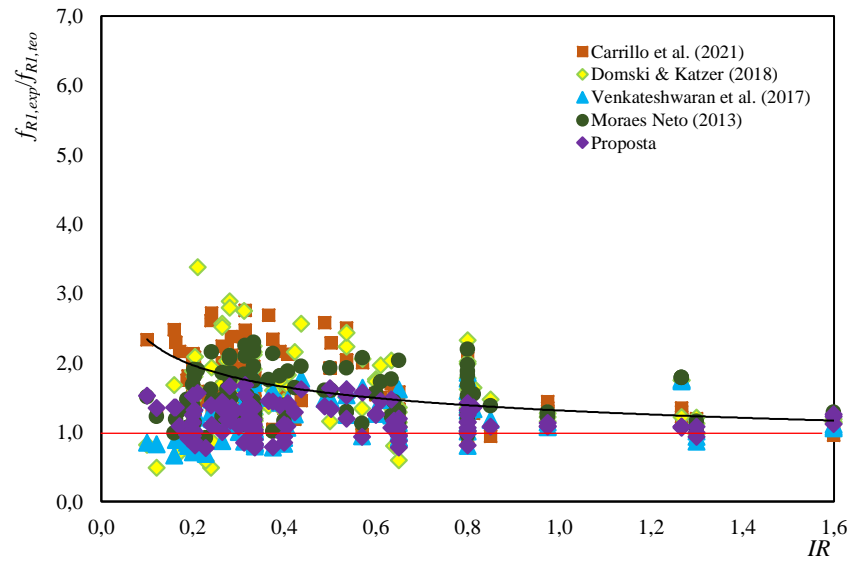
Modelos	Parâmetros estatísticos				
	f_{R4}				
	Min	Q_1	M	Q_3	Max
Carrillo <i>et al.</i> (2021)	0,43	1,27	1,74	2,17	3,82
Domski e Katzer (2019)	0,32	1,00	1,76	2,17	3,82
Venkateshwaran <i>et al.</i> (2017)	0,45	0,81	1,07	1,32	2,81
Moraes Neto (2013)	0,62	1,22	1,64	1,93	4,32
Proposta	0,55	0,94	1,09	1,24	2,17

Figura 7.4. Desempenho e resumo estatístico dos modelos empíricos: (a) $f_{R1,exp}/f_{R1,teo}$; (b) $f_{R2,exp}/f_{R2,teo}$; (c) $f_{R3,exp}/f_{R3,teo}$; (d) $f_{R4,exp}/f_{R4,teo}$. *Moraes Neto (2013) não apresenta equação que defina f_{R2} .

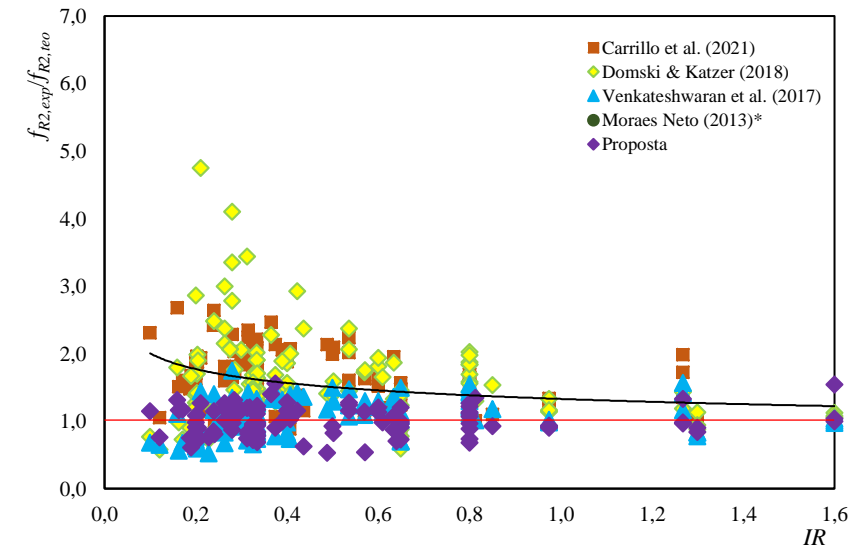
Segundo CARRILLO *et al.* (2021), o aumento do índice de reforço $IR = V_f \cdot l_f/d_f$, que considera a influência do volume e geometria da fibra na resistência mecânica do CRFA, é proporcional ao ganho de resistências à tração por flexão, esse fenômeno foi confirmado nos estudos realizados por VENKATESHWARAN *et al.* (2017) e TIBERTI *et al.* (2017), posto que, o volume de fibras aumenta a resistência a tração do compósito e quanto maior for o fator de forma, λ_f , maior será a ancoragem das fibras no concreto. Fundamentado nessas informações, nota-se a importância de avaliar o parâmetro IR em relação à $f_{Ri,exp}/f_{Ri,teo}$, Figura 7.5.

Através da linha de tendência dos gráficos, é possível constatar que a precisão dos resultados é proporcional aos valores do índice de reforço. Dessa forma, o modelo de DOMSKI e KATZER (2019), seguido do autor MORAES NETO (2013), como visto nas análises anteriores é o mais disperso. Contudo, através da Figura 7.5 fica evidente que essa dispersão é mais acentuada para baixos volumes de fibras, V_f , e fator de forma, λ_f .

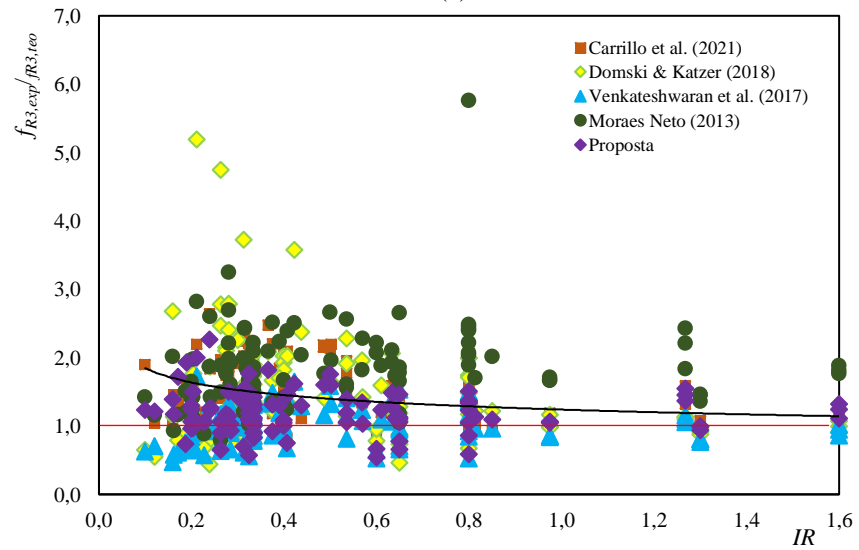
Com base na Figura 7.5a-d, os resultados obtidos pelas equações de VENKATESHWARAN *et al.* (2017) tende à se concentrar abaixo da linha limite ($f_{Ri,exp}/f_{Ri,teo} = 1$), o que torna este modelo desfavorável à segurança. Nota-se também que a dispersão do MORAES NETO (2013) reduz ligeiramente com o acréscimo de IR . Entretanto, de modo geral, observa-se pouca dispersão nos resultados das propostas empírica desde trabalho, mantendo um comportamento quase constante, muito próximo ao resultado ideal, $f_{Ri,exp}/f_{Ri,teo} = 1$, independentemente do volume de fibra ou fator de forma utilizado, ou seja, apresenta um bom desempenho para todos os valores de índice de reforço, $IR = V_f \cdot l_f/d_f$.



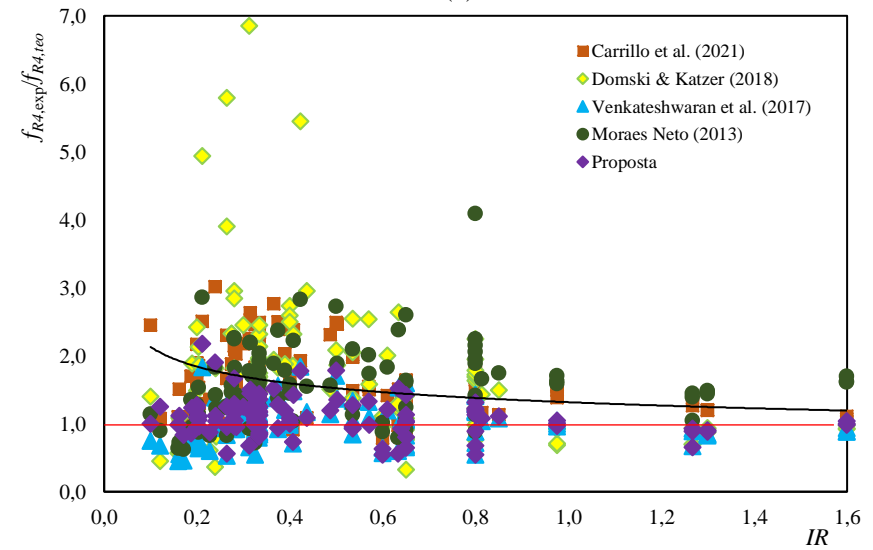
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 7.5. Comparação dos modelos analíticos com base no índice de reforço (IR): (a) $f_{R1,exp}/f_{R1,teo}$; (b) $f_{R2,exp}/f_{R2,teo}$; (c) $f_{R3,exp}/f_{R3,teo}$; (d) $f_{R4,exp}/f_{R4,teo}$. * O autor não apresenta equação que defina f_{R2} .

Por fim, em posse dos valores das tensões residuais obtidas experimentalmente, ver capítulo 6, realizou-se um comparativo com os valores teóricos calculados através das equações empíricas, como mostra a Figura 7.6. Observa-se que, na maior parte dos casos, os valores das tensões residuais se comportam de maneira crescente à medida que há um acréscimo de V_f , volume de fibras.

A Figura 7.6c mostra uma maior precisão de todos os modelos empíricos para determinar a tensão residual f_{R3} . CARRILLO *et al.* (2021), DOMSKI e KATZER (2018) e MORAES NETO (2013) mostram, para esta análise, resultados conservadores, ou seja, valores inferiores aos encontrados experimentalmente. Entretanto, para volume de fibra igual à 2,0%, CARRILLO *et al.* (2021) e DOMSKI e KATZER (2018) tendem a se tornar mais precisos. A proposta de cálculo mais assertivas, com resultado teórico mais próximo do experimental, é verificada para as equações pertencentes à esta pesquisa, independentemente do volume de fibra, como pode ser observado na Figura 7.6. O modelo de cálculo de VENKATESHWARAN *et al.* (2017) também apresenta um bom desempenho, porém, ressalta-se que as pospostas dadas pelos autores requerem precaução para CRFA com elevado volume de fibra, pois a partir de $V_f = 1,5\%$, os resultados destoam dos valores experimentais, apontando um comportamento contra à segurança.

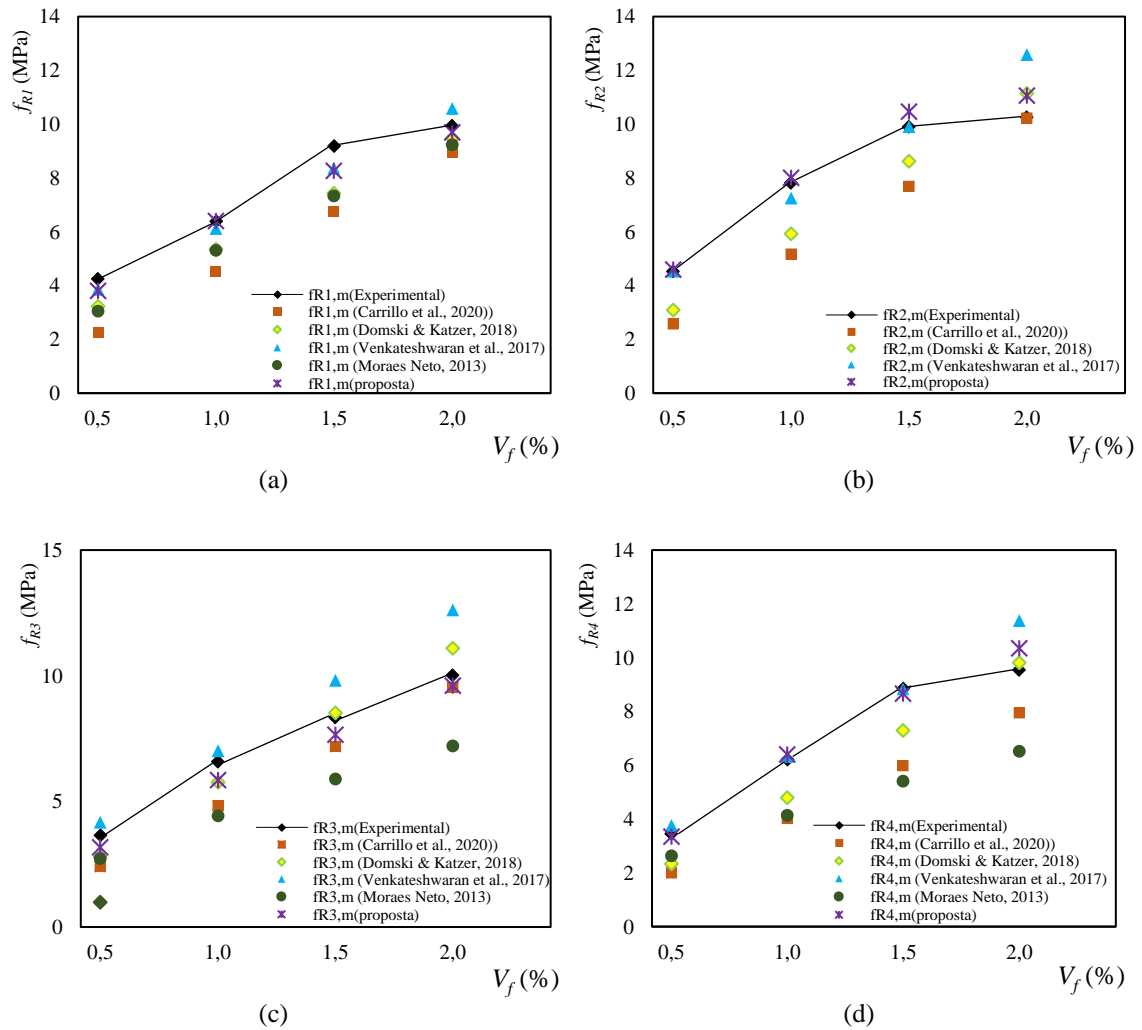


Figura 7.6. Comparação dos modelos analíticos com os resultados experimentais: (a) f_{R1} ; (b) f_{R2} ; (c) f_{R3} ; (d) f_{R4} .

Com base nessas análises, fica evidente o bom desempenho das equações analíticas deste estudo, para estimar as tensões residuais do CRFA, em relação aos demais modelos. Visto que, o modelo desta pesquisa e o modelo de MORAES NETO (2013) foram os únicos a não apresentarem resultados de $f_{Ri,exp}/f_{Ri,teo} < 0,5$, classificado como extremamente perigoso. Contudo, MORAES NETO (2013) não abrange o comportamento com endurecimento (*hardening*), apenas com amolecimento (*softening*), do concreto com fibra aço, além do que, o autor não apresenta uma proposta de cálculo para definir f_{R2} . O modelo empírico desta pesquisa e o apresentado por VENKATESHWARAN *et al.* (2017), exibiram bons coeficientes de determinação, médias aritméticas $\approx 1,0$ e pouca dispersão, entretanto, os

resultados obtidos por VENKATESHWARAN *et al.* (2017) apresentam um número considerável de resultados classificados como extremamente perigosos. Por fim, CARRILLO *et al.* (2021), mostrou-se consideravelmente conservador, embora tenha exibido resultados contra a segurança, e DOMSKI e KATZER (2019) pode ser definido, com base nas análises, como o mais disperso entre os modelos analisados.

8. CONCLUSÕES

Com a intuito de determinar as tensões residuais, f_{Ri} ($i = 1-4$), sem a necessidade de realizar ensaios de tração por flexão de 3 pontos em CRFA, etapa necessária para uso das principais recomendações normativas existentes, foram elaboradas e avaliadas propostas empíricas que descrevessem satisfatoriamente f_{Ri} . Diante das análises realizadas, as principais conclusões são:

- De acordo com os resultados dos ensaios de flexão, o ganho foi mais expressivo foi em relação ao limite de proporcionalidade, com aumento de 176% para vigas com 2,0% de fibras de aço, em comparação com as de referência;
- Notou-se ainda, certa similaridade no desempenho das vigas com $V_f = 1,5\%$ e 2,0%, o que revela, através da etapa de contagem das fibras, uma possível diminuição da homogeneidade do concreto com elevadas porcentagens de fibras;
- As fibras de aço afetaram de forma discreta a resistência média à compressão do concreto com fibra, com aumento máximo de 8% na resistência à compressão do concreto com 2,0% de fibra;
- Analisando os modelos analíticos, tem-se que modelo empírico proposto por este estudo e o apresentado por VENKATESHWARAN *et al.* (2017), contabilizaram o maior número de vigas na classe de segurança apropriada, $f_{Ri,exp}/f_{Ri,teo} \in [0,85-1,15]$. Contudo, as equações de VENKATESHWARAN *et al.* (2017) e DOMSKI e KATZER (2019) foram os mais penalizados pelo critério modificado de COLLINS (2001), com uma quantidade expressiva de vigas nas classes perigosa e extremamente perigosa, o

que compromete a confiabilidade dos modelos. As propostas de MORAES NETO (2013) e CARRILLO *et al.* (2021) foram classificadas como as mais conservadoras;

- Em relação ao coeficiente de determinação, R^2 , o modelo proposto por este estudo apresenta maior parte dos resultados classificados com desempenho muito forte, de acordo com MONTGOMERY (2001). De forma complementar, as equações apresentadas por esta pesquisa são as menos dispersas. Além do mais, ao analisar o índice de reforço, fica evidente a precisão dos resultados, com $f_{Ri,exp}/f_{Ri,teo} \approx 1$, e a sua baixa dispersão independentemente do valor de IR ;
- Por fim, destaca-se o bom desempenho da proposta apresentada por este estudo para definir as tensões residuais, em comparação com os demais modelos empíricos existentes na literatura, uma vez que a proposta desta pesquisa foi a menos penalizada e dispersa, a mais precisa, além de não apresentar resultados de $f_{Ri,exp}/f_{Ri,teo} < 0,5$, ou seja, extremamente perigoso, demonstrando a confiabilidade das equações.

9. REFERÊNCIAS

ABNT NBR NM 3310-1 (2011). Peneiras de ensaio - Requisitos técnicos e verificação - Parte I Peneiras de ensaio com tela de tecido metálico. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.

ABNT NBR NM 3310-2 (2011). Peneiras de ensaio - Requisitos técnicos e verificação - Parte 2: Peneiras de ensaio de chapa metálica perfurada. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.

ABNT NBR 6118 (2014): Procedimentos - Projeto de estruturas de concreto.

ABNT NBR 15823 (2017). Concreto autoadensável Parte 2: Determinação do espalhamento, do tempo de escoamento e do índice de estabilidade visual - Método do cone de Abrams. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.

ABNT NBR 15530 (2019). Fibras de aço para concreto - Especificações. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.

ABNT NBR 16889 (2020). Concreto — Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.

ABNT NBR 14724 (2021). Informação e documentação: Trabalhos acadêmicos - apresentação. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.

ABNT NBR 16935 (2021). Projeto de estruturas de concreto reforçado com fibras - Procedimento. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.

ABNT NBR 16938 (2021). Concreto reforçado com fibras – Controle de qualidade. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.

ABNT NBR NM 67 (2021). Concreto: determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Controle de qualidade. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.

ABNT NBR NM 53 (2021). Agregado graúdo: determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.

ABNT NBR NM 45 (2021). Agregados: determinação da massa unitária e do volume de vazios. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.

ABNT NBR NM 52 (2021). Agregado miúdo: determinação da massa específica e massa específica aparente. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.

ASTM A820 (2016). Especificação padrão para fibras de aço para concreto reforçado com fibra. *American Society for Testing and Materials*.

ABBASS, A.; ABID, S.; OZAKCA, M. (2019). Experimental Investigation on the Effect of Steel Fibers on the Flexural Behavior and Ductility of High-Strength Concrete Hollow Beams. *Advances in Civil Engineering*, v. 2019, p. 13. DOI:[10.1155/2019/8390345](https://doi.org/10.1155/2019/8390345)

ABDALLAH, S.; REES, D. (2019). Analysis of Pull-Out Behaviour of Straight and Hooked End Steel Fibres. *Engineering*, v. 11 (06), p. 332-341. DOI:[10.4236/eng.2019.116025](https://doi.org/10.4236/eng.2019.116025)

ABDALLAH, S.; FAN, M.; ZHOU, X.; LE GEYT, S. (2016). Anchorage Effects of Various Steel Fibre Architectures for Concrete Reinforcement. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, v. 10(03), p. 325-335. DOI:[10.1007/s40069-016-0148-5](https://doi.org/10.1007/s40069-016-0148-5)

ABDALLAH, S.; FAN, M.; ZHOU, X. (2017). Pull-Out Behaviour of Hooked End Steel Fibres Embedded in Ultra-high Performance Mortar with Various W/B Ratios. *Inter. Journal of Concrete Structures and Materials*, v. 12, p. 1-13. DOI:[10.1007/s40069-017-0193-8](https://doi.org/10.1007/s40069-017-0193-8)

ABDALLAH, S.; FAN, M.; REES, D. (2018). Bonding Mechanisms and Strength of Steel Fiber-Reinforced Cementitious Composites: Overview. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 30(03), p. 1-15. DOI:[10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002154](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002154)

ACI 318-14. (2019). Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary. American Concrete Institute, Detroit.

ACI 544.1R. (2002). State-of-the-art report on fiber reinforced concrete. American Concrete Institute.

ACI 544.4R. (2018). Design Considerations for Steel Fiber Reinforced Concrete. American Concrete Institute.

ALBERTI, M.G.; ENFEDAQUE, A.; GÁLVEZ, J.C. (2014). Polyolefin fiber-reinforced concrete enhanced with steel-hooked fibers in low proportions. *Materials and Design*, v. 60, p. 57-65. DOI:[10.1016/j.matdes.2014.03.050](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.03.050)

ALBERTI, M.G.; ENFEDAQUE, A.; GÁLVEZ, J.C.; PINILLOS, L. (2017). Structural Cast-in-Place Application of Polyolefin Fiber-Reinforced Concrete in a Water Pipeline Supporting Elements. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, v. 08 (4), p. 1–16, 2017. DOI:[10.1061/\(ASCE\)PS.1949-1204.0000274](https://doi.org/10.1061/(ASCE)PS.1949-1204.0000274)

AL-KAMYANI, Z.; GUADAGNINI, M.; PILAKOUTAS, K. (2019). Impact of shrinkage on crack width and deflections of reinforced concrete beams with and without steel fibres. *Engineering Structures*, v. 181 (15), p. 387-396. DOI:[10.1016/j.engstruct.2018.12.031](https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.12.031)

AMIN, A.; BENTZ, E. (2017). Strength of steel fiber reinforced concrete beams in pure torsion. *Structural Concrete*, v. 19 (10), p. 1-18. DOI:[10.1002/suco.201700183](https://doi.org/10.1002/suco.201700183)

AMIN, A.; FOSTER, S.J. (2015). Predicting the flexural response of steel fibre reinforced concrete prisms using a sectional model. *Cement and Concrete Composites*, v. 15, p. 1-34. DOI:[10.1016/j.cemconcomp.2015.12.007](https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.12.007)

AMIN, A.; FOSTER, S.J. (2016). Shear strength of steel fibre reinforced concrete beams with stirrups. *Engineering Structures*, v. 111, p. 323-332. DOI:[10.1016/j.engstruct.2015.12.026](https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.12.026)

AMIN, A.; FOSTER, S.J.; MUTTONI, A. (2013). Evaluation of the tensile strength of sfrc as derived from inverse analysis of notched bending tests. VIII International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures, Toledo, Espanha.

ANDRADE, R.G.M.; PFEIL, M.S.; BATTISTA, R.C.; TOLEDO FILHO, R.D.; ARAÚJO, O.M.O.; LOPES, L.T. (2020). Comparison between methods to determine the fibre orientation factor of an HPFRC bridge box girder. *Construction and Building Materials*, S/N, p 1-15. DOI:[10.1016/j.conbuildmat.2020.121291](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121291)

AOUDE, H.; COHEN, M. (2014). Shear Response of SFRC Beams Constructed with SCC and Steel Fibers. *Journal of Structural Engineering*, v. 14, p. 1-13.

ASLANI, F.; HAMIDI, F.; VALIZADEH, A.; DANG, A.T.N. (2019). High-performance fibre-reinforced heavyweight self-compacting concrete: Analysis of fresh and mechanical properties. *Construction and Building Materials*, v. 232, p 1-15. DOI:[10.1016/j.conbuildmat.2019.117230](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117230)

ASTM A 820 M (2016). Specification for Steel Fibers for Fiber Reinforced Concrete. American Society for Testing and Materials.

AVANAKI, M.J.; ABEDI, M.; HOSEINI, A. (2019). Experimental and numerical-based design of hybrid steel fibre-reinforced concrete tunnels. *Magazine of Concrete Research*, p 1-14. DOI:[10.1680/jmacr.18.00279](https://doi.org/10.1680/jmacr.18.00279)

AWOYERA, P.O.; EFFIONG, J.U.; OLALUSI, O.B.; ARUNACHALAM, K.P.; AZEVEDO, A.R.G.; MARTINELLI, F.R.B.; MONTEIRO, S.N. (2022). Experimental Findings and Validation on Torsional Behaviour of Fibre-Reinforced Concrete Beams: A Review. *Polymers*, v. 14, 1-30. DOI:[10.3390/polym14061171](https://doi.org/10.3390/polym14061171) [https](https://doi.org/10.3390/polym14061171)

BABAR, V.T.; JOSHI, P.K.; SHINDE, D.N. (2015). Shear strength of steel fiber reinforced concrete beam without stirrups. *International Journal of Advanced Engineering Technology*. v. 6 (2), p. 15-18.

BARROS, J.A.O. Comportamento de betão reforçado com fibras – Análise experimental e simulação numérica. Dissertação de Doutorado, Universidade do Porto, Faculdade de Engenharia, Portugal, 1995.

BARROS, J. A. O.; ANTUNES, J. A. B. (2003). Experimental Characterization of the Flexural Behaviour of Steel Fibre Reinforced Concrete According to RILEM TC 162-TDF Recommendations. RILEM TC 162 TDF Workshop.

BARROS, J.A.O.; CUNHA, V.M.C.F.; RIBEIRO, A.F.; ANTUNES, J.A.B. (2005). Post-cracking behavior of steel fiber reinforced concrete. *Materials and Structures*, v. 38, p 47-56j. DOI:[10.1617/14058](https://doi.org/10.1617/14058)

BARROS, J.A.O.; LOURENÇO, L.A.P.; SOLTANZADEH, F.; TAHENI, M. (2013). Steel fibre reinforced concrete for elements failing in bending and in shear. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, v. 18(1). DOI:[10.1080/19648189.2013.842937](https://doi.org/10.1080/19648189.2013.842937)

BELLETTI, B.; CERIONI, R.; MEDA, A.; PLIZZARI, G. (2008). Design Aspects on Steel Fiber-Reinforced Concrete Pavements. *Journal of materials in civil engineering*, v. 20. DOI:[10.1061/ASCE0899-1561](https://doi.org/10.1061/ASCE0899-1561)

BENCARDINO, F.; RIZZUTI, L.; SPADEA, G.; SWAMY, R.N. (2013). Implications of test methodology on post-cracking and fracture behaviour of Steel Fibre Reinforced Concrete. *Composites: Part B*, v. 46, p. 31-38. DOI:[10.1016/j.compositesb.2012.09.044](https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.09.044)

BIOLZI, L.; CATTANEO, S. (2017). Response of steel fiber reinforced high strength concrete beams: Experiments and code predictions. *Cement and Concrete Composites*, v. 77, p. 1-13. DOI:[10.1016/j.cemconcomp.2016.12.002](https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.12.002)

BS EN 14889-1 (2006). Fibres for concrete – Part 1: Steel fibres – Definitions, specifications and conformity. British Standards Institution, London, UK.

BURATTI, N.; MAZZOTTI, N.; SAVOIA, M. (2011). Post-cracking behaviour of steel and macro-synthetic fibre-reinforced concretes. *Construction and Building Materials*, v. 25, p. 2713-2722. DOI:[10.1016/j.conbuildmat.2010.12.022](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.12.022)

CAGGIANO, A.; GAMBARELLI, S.; MARTINELLI, E.; NISTICÒ, N.; PEPE, M. (2016). Experimental characterization of the post-cracking response in Hybrid Steel/Polypropylene Fiber-Reinforced Concrete. *Construction and Building Materials*, v. 125, p. 1035-1043.

DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2016.08.068](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.068)

CALLISTER JR, W.; RETHWISCH, D.G. (2020). Fundamentos da Ciência e Engenharia de Materiais - Abordagem Integrada: Uma Abordagem Integrada. Editora LTC, 10ª Edição.

CÁNOVAS, M.F. (1988). Patologia e terapia do concreto armado. Ed Pini, São Paulo.

CARRILLO, J.; VARGAS, J.D.; ALCOCER, S.M. (2021). Model for estimating the flexural performance of concrete reinforced with hooked end steel fibers using three-point bending tests. Structural Concrete CEB FIP. DOI:[10.1002/suco.202000432](https://doi.org/10.1002/suco.202000432)

CASTRO, S.A.Z.; ESTRADA, R.S.; HERAZO, L.C.S.; ARMENTA, R.A.M.; HUERTA, E.M.; CARRILLO, E.Y.; MAY, A.L.H. (2021). Sustainable Development of Concrete through Aggregates and Innovative Materials: A Review. Applied sciences, v. 11, 1-28. DOI:[10.3390/app11020629](https://doi.org/10.3390/app11020629)

CAVERZAN, A.; CADONI, E.; DI PRISCO, M. (2011). Dynamic tensile behavior of self-compacting steel fibre reinforced concrete. Applied Mechanics and Materials, v. 82, pp. 220-225. DOI:[10.4028/www.scientific.net/AMM.82.220](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.82.220)

CEB-FIP (2010). Model Code 2010: Final Draft. Model Code prepared by Special Activity Group 5, Lausanne, September 2011. (This final draft has not been published).

CHALIORIS, C.E.; SFIRI, F. (2011). Shear Performance of Steel Fibrous Concrete Beams. Procedia Engineering, v. 14, p. 2064-2068.

CHEN, G.; GAO, D.; ZHU, H.; YUAN, J.S.; XIAO, X.; WANG, W. (2021). Effect of novel multiple hooked end steel fiber on flexural tensile behavior of notched concrete beams with various strength grades. Structures, v. 33, p. 3644-3654. DOI:[10.1016/j.istruc.2021.06.016](https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.06.016)

CHOI, W.C.; JUNG, K.Y.; JANG, S.J.; YUN, H.D. (2019). The Influence of Steel Fiber Tensile Strengths and Aspect Ratios on the Fracture Properties of High-Strength Concrete. Materials, v. 12, p. 1-11,

CHU, S.A.; KWAN, A.K.H. (2019). A new bond model for reinforcing bars in steel fibre reinforced concrete. *Cement and Concrete Composites*, v. 19.

DOI:[10.1016/j.cemconcomp.2019.103405](https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.103405)

COLLINS, M.P. (2001). Evaluation of shear design procedures for concrete structures. A Report prepared for the CSA technical committee on reinforced concrete design.

CONFORTI, A.; MINELLI, F.; PLIZZARI, G.A. (2013). Wide shallow beams with and without steel fibres: a peculiar behaviour in shear and flexure. *Composites Part B: Engineering*, v. 55, p. 282-290.

CONFORTI, A.; ZERBINO, A.; PLIZZARI, G. (2020). Assessing the influence of fibers on the flexural behavior of reinforced concrete beams with different longitudinal reinforcement ratios. *Structural Concrete*, p 1-14. DOI:[10.1002/suco.201900575](https://doi.org/10.1002/suco.201900575)

CONFORTI, A.; ZERBINO, R.; PLIZZARI, G.A.; CUENCA, E. (2021). Influence of fiber orientation on the behavior of fiber reinforced concrete slabs. *Structural Concrete*, p 1-14. DOI:[10.1002/suco.202000612](https://doi.org/10.1002/suco.202000612)

CUENCA, E.; OVIEDO, J.E.; SERNA, P. (2015). Influence of concrete matrix and type of fiber on the shear behavior of self-compacting fiber reinforced concrete beams. *Composites Part B*, v. 75, p. 135-147. DOI:[10.1016/j.compositesb.2015.01.037](https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.01.037)

CUENCA, E.; CONFORTI, A.; MONFARDINI, L.; MINELLI, F. Shear transfer across a crack in ordinary and álcali activated concrete reinforced by different fibre types. *Materials and Structures*, v. 53, p 1-15, feb 2020. DOI:[10.1617/s11527-020-1455-5](https://doi.org/10.1617/s11527-020-1455-5)

DEGHENHARD, C. C.; SILVA, B. V.; PELISSER, F. (2019). Experimental analysis of load capacity in beams with steel fiber reinforcement on the compression face. *Rev. IBRACON Estrut. Mater*, v. 12(1). DOI:[10.1590/S1983-41952019000100007](https://doi.org/10.1590/S1983-41952019000100007)

DING, Y. (2011). Investigations into the relationship between deflection and crack mouth opening displacement of SFRC beam. *Construction and Building Materials*, v. 25, p. 2432-2440. DOI:[10.1016/j.conbuildmat.2010.11.055](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.11.055)

DING, Y.; BAI, Y.L. (2018). Fracture Properties and Softening Curves of Steel Fiber-Reinforced Slag-Based Geopolymer Mortar and concrete. *Materials*, v. 11. DOI:[10.3390/ma11081445](https://doi.org/10.3390/ma11081445)

DING, Y.; LIU, G.; HUSSAIN, A.; TORGAL, F.P.; ZHANG, Y. (2019). Effect of steel fiber and carbon black on the self-sensing ability of concrete cracks under bending. *Construction and Building Materials*, v. 207, p. 630-639. DOI:[10.1016/j.conbuildmat.2019.02.160](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.160)

DING, X.; GENG, H.; ZHAO, M.; CHEN, Z.; LI, J. (2021). Synergistic Bond Properties of Different Deformed Steel Fibers Embedded in Mortars Wet-Sieved from Self-Compacting SFRC. *Applied sciences*, v. 11. DOI:[10.3390/app112110144](https://doi.org/10.3390/app112110144)

DINH, H.H.; PARRA-MONTESINOS, J.; WIGHT, J.K. (2010). Shear Behavior of Steel Fiber Reinforced Concrete Beams without Stirrup Reinforcement. *ACI Structural Journal*, v 107(5), p. 597-606.

DI PRISCO, M.; PIZZARI, G.; VANDEWALLE, L. (2009). Fibre reinforced concrete: new design perspectives, *Mater. Struct.*, v. 42 (9), p. 1261-1281. DOI:[10.1617/s11527-009-9529-4](https://doi.org/10.1617/s11527-009-9529-4)

DI PRISCO, M.; COLOMBO, M.; DOZIO, D. (2013). Fibre-reinforced concrete in fib Model Code 2010: principles, models and test validation. *Structural Concrete*, v. 14, p. 342-361. DOI:[10.1002/suco.201300021](https://doi.org/10.1002/suco.201300021)

DOMSKI, J.; KATZER, J. (2019). Comprehensive approach to evaluation of mechanical properties of waste aggregate concrete reinforced by steel fiber. *Structural Concrete*. p. 1-9. DOI:[10.1002/suco.201800271](https://doi.org/10.1002/suco.201800271)

DUPONT, D.; VANDEWALLE, L. (2005). Distribution of steel fibres in rectangular sections. *Cement and Concrete Composites*, v. 27(3), p. 391-398.

DVORKIN, L.; BORDIUZHENKO, O.; TEKLE, B.H.; RIBAKOV, Y.A. (2021). Method for the Design of Concrete with Combined Steel and Basalt Fiber. *Applied Sciences*, v. 11, p 1-17. DOI:[10.3390/app11198850](https://doi.org/10.3390/app11198850)

EHE-08. (2010). Code on Structural concrete – articles and annexes.

ENFEDAQUE, A.; ALBERTI, M.G., GÁLVEZ, J.C.; PROAÑO, J.S. (2021). Assessment of the Post-Cracking Fatigue Behavior of Steel and Polyolefin Fiber-Reinforced Concrete. *Materials*, v. 14, p 1-16. DOI:[10.3390/ma14227087](https://doi.org/10.3390/ma14227087)

FOTOUHI, F.; ASHKEZARI, G.D.; RAZMARA, M. (2020). Experimental relationship between steel fiber volume fraction and mechanical properties of ultra-high performance fiber-reinforced concrete. *Journal of Building Engineering*, v. 32. DOI:[10.1016/j.jobbe.2020.101613](https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101613)

ESMAEILI, J., ANDALIBI, K., GENCEL, O., MALEKI, F.K, MALEKID, V.A. (2021). Mechanical characteristics of experimental multi-scale steel fiber reinforced polymer concrete and optimization by Taguchi methods. *Construction and Building Materials*, v. 313, 121531. DOI:[10.1016/j.conbuildmat.2021.125500](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125500)

FACCONI, L.; MINELLI, F.; PLIZZARI, G.; CERESA, P. (2019). Experimental study on steel fiber reinforced concrete beams in pure torsion. *Proceedings of the Symposium: Concrete - Innovations in Materials, Design and Structures*.

FERRARA, L., MEDA, A. (2006). Relationships between fibre distribution, workability and the mechanical properties of SFRC applied to precast roof elements. *Mater Struct*, v. 39(288), p. 411-420.

FIGUEREIDO, A. D. (2011). *Concreto reforçado com fibras*, Texto apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Livre Docente. São Paulo.

FIGUEIREDO, A.D.; CECCATO, M.R. (2015). Workability Analysis of Steel Fiber Reinforced Concrete Using Slump and Ve-Be Test. *Materials Research*, v. 6, p. 1284-1290. DOI:[10.1590/1516-1439.022915](https://doi.org/10.1590/1516-1439.022915)

FOLINO, P.; RIPANI, P.; XARGAY, H.; ROCCA, N. (2019). Comprehensive analysis of Fiber Reinforced Concrete beams with conventional reinforcement. *Engineering Structures*, v. 202, p 1-11. DOI:[10.1016/j.engstruct.2019.109862](https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109862)

FU, C.; YE, H.; WANG, K.; ZHU, K.; HE, C. (2018). Evolution of mechanical properties of steel fiber-reinforced rubberized concrete (FRRC). *Composites Part B*, V 160, p. 158-166.

GALEOTE, E.; BLANCO, A.; CAVALARO, S.H.P.; FUENTE, A. (2017). Correlation between the Barcelona test and the bending test in fibre reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, v. 152, p 529-538. DOI:[10.1016/j.conbuildmat.2017.07.028](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.028)

GARCEZ, E.O. (2005). Análise teórico-experimental do comportamento de concreto reforçado com fibras de aço submetidos a cargas de impacto. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre.

GERMANO, F.; TIBERTI, G.; PLIZZARI, G. (2016). Post-peak fatigue performance of steel fiber reinforced concrete under flexure. *Materials and Structures*, V 49 (10), p. 4229-4245. DOI:[10.1617/s11527-015-0783-3](https://doi.org/10.1617/s11527-015-0783-3)

GHASEMI, M.; GHASEMI, M.R.; MOUSAVI, S.R. (2019). Studying the fracture parameters and size effect of steel fiber-reinforced self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, v. 201, p. 447-460. DOI:[10.1016/j.conbuildmat.2018.12.172](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.172)

GIACCIO, G.; TOBES, J.M.; ZERBINO, R. (2008). Use of small beams to obtain design parameters of fibre reinforced concrete. *Cement and Concrete Composites*, V 30, p. 297-306. DOI:[10.1016/j.cemconcomp.2007.10.004](https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2007.10.004)

GOEL, S.; SINGH, S.P.; SINGH, P. (2012). Flexural fatigue strength and failure probability of Self Compacting Fibre Reinforced Concrete beams. *Engineering Structures*. *Engineering Structures*, v. 40, p. 131–140. DOI:[10.1016/j.engstruct.2012.02.035](https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.02.035)

GOMES, P.F. (2000). *Curso de Estatística Experimental*. 14.ed. Piracicaba: Degaspari.

GOMES, L.D.S.; MOUSSA, Y.H.; MACEDO, A.N.; MELO, G.S.S.A.; BARROS, J.A.O.; MORAES NETO, B.N. (2015). Experimental research to assess the effectiveness of steel fibre for the punching resistance of symmetrically loaded flat slabs. Anais 57º Congresso Brasileiro do Concreto-IBRACON.

GOMES, L.D.S.; OLIVEIRA, D.R.C.; MORAES NETO, B.N.; MEDEIROS, A.; MACEDO, A.N.; SILVA, F.A.C. (2018). Experimental analysis of the efficiency of steel fibers on shear strength of beams. Latin American Journal Solids Struct., v. 15 (7). DOI:[10.1590/1679-78254710](https://doi.org/10.1590/1679-78254710).

GOMES, R.; DIAS, D.; SILVA, F. (2020). Determination of the fracture parameters of steel fiber-reinforced geopolymer concrete. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, v. 107. DOI:[10.1016/j.tafmec.2020.102568](https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2020.102568)

GONG, C.; DING, W.; MOSALAM, K.M.; GÜNAY, S.; SOGA, H. (2017). Comparison of the structural behavior of reinforced concrete and steel fiber reinforced concrete tunnel segmental joints. Tunnelling and Underground Space Technology, v. 68, p. 38-57. DOI:[10.1016/j.tust.2017.05.010](https://doi.org/10.1016/j.tust.2017.05.010)

GOUVEIA, N.D.; LAPI, M.; ORLANDO, M.; FARIA, D.M.V.; RAMOS, A.M.P. (2017). Experimental and theoretical evaluation of punching strength of steel fiber reinforced concrete slabs. Structural Concrete, p. 1-17. DOI:[10.1002/suco.201700136](https://doi.org/10.1002/suco.201700136)

GRIMALDI, A.; MEDA, A.; RINALDI, R. (2013). Experimental behaviour of fibre reinforced concrete bridge decks subjected to punching shear. Composites: Part B, v. 45, p. 811-820. DOI:[10.1016/j.compositesb.2012.09.044](https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.09.044)

HAJFOROUSH, M.; KHEYRODDIN, A.; REZAIFAR, O. (2020). Investigation of engineering properties of steel fiber reinforced concrete exposed to homogeneous magnetic field. Construction and Building Materials, v. 252. DOI:[10.1016/j.conbuildmat.2020.119064](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119064)

HAN, J.; ZHAO, M.; CHEN, J.; LAN, X. (2019). Effects of steel fiber length and coarse aggregate maximum size on mechanical properties of steel fiber reinforced concrete.

Construction and Building Materials, v. 209, p. 577-591.
DOI:[10.1016/j.conbuildmat.2019.03.086](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.086)

HEDEBRATT, J. (2012). Industrial fibre concrete floors – Experiences and tests on pile-supported slab.

HEMMY, O. (2003). Zum Gebrauchs- und Tragverhalten von Tunnelschalen aus Stahlfaserbeton und stahlfaserverstärktem Stahlbeton. Ph.D. thesis, IBMB, Technical University of Braunschweig, Braunschweig, Germany. (Em Alemão).

JSCE (2010). Japanese Society of Civil Engineers - Specification of Steel Fibers for Concrete, Concrete Library, v. 50.

KACHOUH, N.; EL-HASSAN, H.; EL-MAADDAWY, T. (2020). Influence of steel fibers on the flexural performance of concrete incorporating recycled concrete aggregates and dune sand. Journal of Sustainable Cement-Based Materials, p 1-28.
DOI:[10.1080/21650373.2020.1809546](https://doi.org/10.1080/21650373.2020.1809546)

KHALOO, A.R.; KIM, N. (1996). Mechanical properties of normal to high strength steel fibre-reinforced concrete. Cement, concrete and aggregates, V 18 (02), p. 92-97.

KANG, M.C.; YOO, D.Y.; GUPTA, R. (2021). Machine learning-based prediction for compressive and flexural strengths of steel fiber-reinforced concrete. Construction and Building Materials, v. 266. DOI:[10.1016/j.conbuildmat.2020.121117](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121117)

KRENCHER, H. (1964). Fibre reinforcement: theoretical and practical investigations of the elasticity and strength of fibre-reinforced materials. Thesis, Akademisk Forlag, Copenhagen.

KYTINO, V.K.; CHALIORIS, C.E.; KARAYANNIS, C.G. (2020). Analysis of residual flexural stiffness of steel fiber-reinforced concrete beams with steel reinforcement. Materials, v. 13. DOI:[10.3390/ma13122698](https://doi.org/10.3390/ma13122698)

LAKAVATH, C.; JOSHI, S.S.; PRAKASH, S.S. (2019). Investigation of the effect of steel fibers on the shear crack-opening and crack-slip behavior of prestressed concrete beams

using digital image correlation. *Engineering Structures*, v. 193, p. 28-42.
DOI:[10.1016/j.engstruct.2019.05.030](https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.05.030)

LAKAVATH, C.; BHOSALE, A.B.; PRAKASH, S.S.; SHARMA, A. (2022). Effectiveness of Hybrid Fibers on the Fracture and Shear Behavior of Prestressed Concrete Beams. *Fibers*, v. 26, p 1-26. DOI:[10.3390/fib10030026](https://doi.org/10.3390/fib10030026)

LAMEIRAS, R.M.; BARROS, J.A.O.; AZENHA, M.; VALENTE, I. (2015). Development of sandwich panels combining fibre reinforced concrete layers and fibre reinforced polymer connectors: part II: evaluation of mechanical behaviour. *Composite Structures*. V105, p. 460-470. DOI:[10.1016/j.compstruct.2013.06.015](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2013.06.015)

LARANJEIRA, F.; MOLINS, C.; AGUADO, A. (2010). Predicting the pullout response of inclined hooked steel fibers. *Cement and Concrete Research*, v. 40 (10), p. 1471–1487. DOI:[10.1016/j.cemconres.2010.05.005](https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.05.005)

LEE, C.; KIM, H. (2010). Orientation factor and number of fibers at failure plane in ring-type steel fiber reinforced concrete. *Cement and Concrete Research*, v. 40, p. 810-819. DOI:[10.1016/j.cemconres.2009.11.009](https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.11.009)

LEE, S.H.; KIM, S.; YOO, D.Y. (2018). Hybrid effects of steel fiber and carbon nano tube on self-sensing capability of ultra-high-performance concrete. *Construction and Building materials*, v. 185, p. 530-544. DOI:[10.1016/j.conbuildmat.2018.07.071](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.071)

LEE, S.; YOO, D.; MOON, D. (2019). Effects of hooked-end steel fiber geometry and volume fraction on the flexural behavior of concrete pedestrian decks. *Appl Sci*, v. 9(6), p. 1-21.

LEHMANN, M.; GŁODKOWSKA, W. (2019). Shear Capacity and Residual Strengths of Steel Fibre Reinforced Waste Sand Concrete (SFRWSC). *Middle pomeranian scientific society of the environment protection*, v. 21, p. 1405-1426.

LESOVIK, V.; FEDIUK, R.; AMRAN, M.; ALASKHANOV, A.; VOLODCHENKO, A.; MURALI, G.; UVAROV, V.; ELISTRATKIN, M. (2021). 3D-Printed Mortars with Combined Steel and Polypropylene Fibers. *Fibers*, v. 9. DOI:[10.3390/fib9120079](https://doi.org/10.3390/fib9120079)

LI, P.P.; CAO, Y.Y.Y.; SLUJSMANS, M.J.C.; BROUWERS, H.J.H.; YU, Q. (2021). Synergistic effect of steel fibres and coarse aggregates on impact properties of ultra-high performance fibre reinforced concrete. *Cement and concrete composites*, v. 115. DOI:[10.1016/j.cemconcomp.2020.103866](https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103866)

LIAO, L.; CAVALARO, S.H.P.; FUENTE, A.; AGUADO, A. (2013). Analysis of differences in the behaviour of traditional and self-compacting steel fibre reinforced concrete. *Fibre concrete 2013*, Praga.

LIMA, R.P.A.F.P. (2012). Utilização de fibras metálicas com funções estruturais em estruturas de betão. Dissertação de mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal.

LOK, T.; ZHAO, P. (2004). Impact Response of Steel Fiber-Reinforced Concrete Using a Split Hopkinson Pressure Bar. *Journal Materials and Civil Engineering*, v. 16(1), p. 4-9.

LOURENÇO, L.A.P. (2012). Betão Reforçado com Fibras: aplicações e técnicas de inspeção e reforço de elementos estruturais afetados pela ação de um fogo. Tese de Doutoramento, Universidade do Minho, Escola de Engenharia, Portugal.

MAHAKAVI, P.; CHITHRA, R. (2019). Impact resistance, microstructures and digital image processing on self-compacting concrete with hooked end and crimped steel fiber. *Construction and Building Materials*, v. 220, p. 651-666.

MAHMOOD, S.M.F.; AGARWAL, A.; FOSTER, S.J.; VALIPOUR, H. (2018). Flexural performance of steel fibre reinforced concrete beams designed for moment redistribution. *Engineering Structures*, V 177, p. 695-706.

MARKOVICH, I.; VAN MIER, J.; WALRAVEN, J. (2001). Single fiber pullout from hybrid fiber reinforced concrete. *HERON*, v. 46(3), p. 191-200.

MEDA, A.; PLIZZARI, G. (2004). A new design approach for SFRC slabs on grade based on fracture mechanics. *ACI Struct Journal*, v. 101(3), p. 298-303.

MEDA, A.; RINALDI, Z.; SPAGNUOLO, S.; RIVAZ, B.; GIAMUNDO, N. (2019). Hybrid precast tunnel segments in fiber reinforced concrete with glass fiber reinforced bars. *Tunnelling and Underground Space Technology*, v. 86, p. 100-112. DOI:[10.1016/j.tust.2019.01.016](https://doi.org/10.1016/j.tust.2019.01.016)

MESKENAS, A.; KAKLAUSKAS, G.; DANIUNAS, A.; BACINSKAS, D.; JAKUBOVSKIS, D.; GRIBNIAK, S.; GELAZIUS, V. (2013). Determination of the stress–crack opening relationship of sfrc by an inverse analysis. *Mechanics of Composite Materials*, v. 49(6), p. 1021-1028.

MINELLI, F.; CONFORTI, A.; CUENCA, E.A.; PLIZZARI, G. (2014). Are steel fibres able to mitigate or eliminate size effect in shear? *Materials and Structures*, v. 47 (3), p. 459-473.

MOBASHER, B.; SORANAKOM, C.; YAO, Y. (2015). Analytical solutions for flexural design of hybrid steel fiber reinforced concrete beams. *Engineering Structures*, v. 100, p. 164-177.

MONDO, E. (2011). *Shear Capacity of Steel Fibre Reinforced Concrete Beams without Conventional Reinforcement*. Tese de Mestrado, Royal Institute of Technology, Stockolm, Suécia. (em inglês)

MONTEIRO, V.M.A.; LIMA, L.R.; SILVA, F.A. (2018). On the mechanical behavior of polypropylene, steel and hybrid fiber reinforced self-consolidating concrete. *Construction and Building Materials*, v. 188, p. 280-291.

MONTGOMERY, D.C.; RUNGER, G.C.; HUBELE, N.F. (2001). *Estatística Aplicada à Engenharia*, 2º ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos.

MORAES NETO, B.N.; BARROS, J.A.O.; MELO, G.S.S.A. (2013). A model for the prediction of the punching resistance of steel fibre reinforced concrete slabs centrally loaded. *Construction and Building Materials*, v. 46, p. 211-223.

MUDADU, A.; TIBERTI, G.; GERMANO, F.; PLIZZARI, G.; MORBI, A. (2018). The effect of fiber orientation on the post-cracking behavior of steel fiber reinforced concrete under bending and uniaxial tensile tests. *Cement and Concrete Composites*. DOI:[10.1016/j.cemconcomp.2018.07.012](https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.07.012)

NAAMAM, A. E. (2003). Engineered Steel Fibers with Optimal Properties for Reinforcement of Cement Composites. *Journal of Advanced Concrete Technology*, v. 1 (03), p. 241-252.

NAAMAN, A.E.; REINHARDT, H.W. (2003). High performance fiber reinforced cement composites–HPFRCC4, in: A.E. Naaman, H.W. Reinhardt (Eds.), *RILEM Proceedings, PRO 30*, RILEM Publications SARL.

NEHDI, M.L.; ABBAS, S.; SOLIMAN, A.M. (2015). Exploratory study of ultra-high performance fiber reinforced concrete tunnel lining segments with varying steel fiber lengths and dosages. *Engineering Structures*, v. 101, p. 733-742. DOI:[10.1016/j.engstruct.2015.07.012](https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.07.012)

NING, X.; DING, Y.; ZHANG, F.; ZHANG, Y. (2015). Experimental study and prediction model for flexural behavior of reinforced SCC beam containing steel fibers. *Construction and Building Materials*, v. 93, p. 644-653.

NZAMBI, A.K.L.L.; OLIVEIRA, D.R.C.; MONTEIRO, M.V.S.; SILVA, L.F.A. (2021). Experimental analysis of steel fiber reinforced concrete beams in shear. *IBRACON Estrut Mater.*, v. 15(3). DOI:[10.1590/S1983-41952022000300001](https://doi.org/10.1590/S1983-41952022000300001)

NZAMBI, A.K.L.L.; NTUKU, J.B.; OLIVEIRA, D.R.C. (2021). Empirical equations for flexural residual strengths in concrete with low volumetric fractions of hook-end steel fiber. *Engineering Reports*, v. e12490. DOI:[10.1002/eng2.12490](https://doi.org/10.1002/eng2.12490)

NZAMBI, A.K.L.L.; OLIVEIRA, D.R.C.; OLIVEIRA, A.M.; PICANÇO, M.S. (2021). Pull-out tests of ribbed steel reinforcing bars embedded in concrete with steel fibres. *Proc. Inst. Civ. Eng., Struct. Build.*, v. 174(3), p. 181–189. DOI:[10.1680/jstbu.17.00180](https://doi.org/10.1680/jstbu.17.00180)

OETTEL, V.; SCHULZ, M.; HAIST, M. (2022). Empirical approach for the residual flexural tensile strength of steel fiber-reinforced concrete based on notched three-point bending tests. *Structural Concrete*, p. 1-12. DOI:[10.1002/suco.202100565](https://doi.org/10.1002/suco.202100565)

ORIGIN (Pro). (2020) Version Number (e.g. "Version 2020"). OriginLab Corporation, Northampton, MA, USA.

PAJAK, M.; PONIKIEWSKI, T. (2013). Flexural behavior of self-compacting concrete reinforced with different types of steel fibers. *Construction and Building Materials*, v. 47, p. 397-408.

POH, J.; TAN, K.H.; PETERSON, G.L; WEN, D. (2008). Structural testing of steel fibre reinforced concrete (SFRC) tunnel lining segments in Singapore. *Materials and Design*, v. 57.

RILEM TC 162-TDF. (2002). Test and design methods for steel fibre reinforced concrete: Bending test, Final Recommendation. *Materials and Structures*, v. 35, p. 579-582.

ROSSI, C.R.C.; OLIVEIRA, D.R.C.; PICANÇO, M.S.; POMPEU NETO, B.B.; OLIVEIRA, A.M. (2020). Development Length and Bond Behavior of Steel Bars in Steel Fiber-Reinforced Concrete in Flexural Test. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 32(1). DOI:[10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002979](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002979)

SAHIN, Y., KOKSAL, F. (2011). The influences of matrix and steel fibre tensile strengths on the fracture energy of high-strength concrete. *Construction and Building Materials*, v. 25(04), 1801-1806.

SHI, X.; PARK, P.; REW, Y.; HUANG, K.; SIM, C. (2020). Constitutive behaviors of steel fiber reinforced concrete under uniaxial compression and tension. *Construction and Building Materials*, v. 233. DOI:[10.1016/j.conbuildmat.2019.117316](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117316)

SILVA, C.A.N.; CIAMBELLA, J.; BARROS, J.A.O.; COSTA, I.G. (2020). A model for optimizing hooked end steel fibre reinforcements in cracked cement composites. *Applications in Engineering Science*, v. 3, p 1-8. DOI:[10.1016/j.apples.2020.100011](https://doi.org/10.1016/j.apples.2020.100011)

SMEDT, M.; VRIJDAGHS, R.; STEEN, S.V.; VERSTRYNGE, E.; VANDEWALLE, L. (2020). Damage analysis in steel fibre reinforced concrete under monotonic and cyclic bending by means of acoustic emission monitoring. *Cement and Concrete Composites*, v. 114, p 0958-0965. DOI:[10.1016/j.cemconcomp.2020.103765](https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103765)

SOETENS, T.; MATTHYS, S. (2014). Different methods to model the post-cracking behaviour of hooked-end steel fibre reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, v. 73, p 458-471. DOI:[10.1016/j.conbuildmat.2014.09.093](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.093)

SONG, P.S.; HWANG, S. (2004). Mechanical properties of high-strength steel fiber-reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, v. 18 (9), p. 669-673.

SONG, F. (2017). Steel Fiber Reinforced Concrete Under Concentrated Load. Ph.D. thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, Ruhr University Bochum, Germany. (Em inglês).

SOROUSHIAN, P.; LEE, C.D. (1990). Distribution and orientation of fibers in steel fiber reinforced concrete. *ACI Mater Journal*, v. 87, p. 433-439.

SUNAGA, D.; NAMIKI, K.; KANAKUBO, T. (2020). Crack width evaluation of fiber-reinforced cementitious composite considering interaction between deformed steel rebar. *Construction and Building Materials*, v. 261, p 1-10. DOI:[10.1016/j.conbuildmat.2020.119968](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119968)

SURIANINOV, M.; ANDRONOV, V.; OTROSH, Y.; MAKOVKINA, T.; VASIUKOV, S. (2020). Concrete and Fiber Concrete Impact Strength. *Materials Science Forum*, v. 1006, p. 101-106. DOI:[10.4028/www.scientific.net/MSF.1006.101](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.1006.101)

SUTA, M.; LUKASENOKS, A.; CEPURITIS, R. (2020). Determination of Material Design Values for steel fibre reinforced self-stressing concrete (SFRSSC) structures. *Engineering For Rural Development*, v. 20, p 1-7. DOI:[10.22616/ERDev.2020.19.TF142](https://doi.org/10.22616/ERDev.2020.19.TF142)

TENG, J.G.; ZHANG, B.; ZHANG, S.; FU, B. (2018). Steel-free hybrid reinforcing bars for concrete structures. *Advances in Structural Engineering*, v. 21, p. 2617-2622.

TIBERTI, G.; MINELLI, F.; PLIZZARI, G. (2014). Reinforcement optimization of fiber reinforced concrete linings for conventional tunnels. *Composites Part B Engineering*, v. 58, p. 199-207.

TIBERTI, G.; MINELLI, F.; PLIZZARI, G. (2015). Cracking behavior in reinforced concrete members with steel fibers: A comprehensive experimental study. *Cement and Concrete Research*, v. 68, p. 24-34.

TIBERTI, G.; GERMANO, F.; MUDADU, A.; PLIZZARI, G.A. (2017). An overview of the flexural post-cracking behavior of steel fiber reinforced concrete. *Structural Concrete*. P. 1-24. DOI:[10.1002/suco.201700068](https://doi.org/10.1002/suco.201700068)

TÓTH, M.; BOKOR, B.; SHARMA, A. (2019). Anchorage in steel fiber reinforced concrete – concept, experimental evidence and design recommendations for concrete cone and concrete edge breakout failure modes. *Engineering Structures*, v. 181, p. 60-75. DOI:[10.1016/j.engstruct.2018.12.007](https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.12.007)

USMAN, M.; FAROOQ, S.H.; UMAIR, M.; HANIF, A. (2020). Axial compressive behavior of confined steel fiber reinforced high strength concrete. *Construction and Building Materials*, v. 230. DOI:[10.1016/j.conbuildmat.2019.117043](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117043)

VANDEWALLE, L. (2006). Hybrid fiber reinforced concrete. *Measuring, Monitoring and Modeling Concrete Properties*, p. 77-82.

VENKATESHWARAN, A.; TAN, K.; LI, Y. (2017). Residual flexural strengths of steel fiber reinforced concrete with multiple hooked-end fibers. *Int Federation Struct Concr. fib.*, v. 19(2), p. 1-14. DOI:[10.1002/suco.201700030](https://doi.org/10.1002/suco.201700030)

WAFI, F. (1990). Properties and applications of fiber reinforced concrete. *JKAU: Eng. Sci.*, v. 2, p. 49-60.

WALRAVEN, J. (2007). Fibre reinforced concrete: a material in development, *Conference in Structural Applications of Fiber Reinforced Concretes*, Barcelona, Spain, p. 199-213.

WANG, X.; ZHANG, S.; WANG, C.; CAO, K.; WEI, P.; WANG, J. (2019). Effect of steel fibers on the compressive and splitting-tensile behaviors of cellular concrete with millimeter size pores. *Constr Build Mater*, v. 221, p 60-73.

WANG, J.; XIE, J.; HE, J.; SUN, M.; YANG, J.; LI, L. (2020). Combined use of silica fume and steel fibre to improve fracture properties of recycled aggregate concrete exposed to elevated temperature. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, p 1-7. DOI:[10.1007/s10163-020-00990-y](https://doi.org/10.1007/s10163-020-00990-y)

WIEŚŁAWA, G.; MAREK, z. (2018). Cracking behavior of steel fiber reinforced waste sand concrete beams in flexure – Experimental investigation and theoretical analysis. *Engineering Structures*, v. 176, p. 1-10. DOI:[10.1016/j.engstruct.2018.08.097](https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.08.097)

XARGAY, H.; RIPANI, M.; FOLINO, P.; NÚÑEZ, N.; CAGGIANO, A. (2020). Acoustic emission and damage evolution in steel fiber-reinforced concrete beams under cyclic loading. *Construction and Building Materials*. DOI:[10.1016/j.conbuildmat.2020.121831](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121831)

ZHANG, Y.; DIAS-DA-COSTA, D. (2017). Seismic vulnerability of multi-span continuous girder bridges with steel fibre reinforced concrete columns. *Engineering Structures*, v. 150, p. 451-464. DOI:[10.1016/j.engstruct.2017.07.053](https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.07.053)

ZHANG, J.; ZHANG, D.; LI, X.; SHEN, Z. (2021). Experimental study on seismic performance of partially precast steel fiber high-strength concrete columns with high-strength steel bars. *Advances in Structural Engineering*, p. 1-13. DOI:[10.1177/13694332211011551](https://doi.org/10.1177/13694332211011551)

ZEYAD, A.M.; SABA, A. M.; SHATHLY, A. B. (2018). Influence of steel fiber content on fresh and hardened properties of self-compacting concrete. *Conference Proceedings*, 020033. DOI:[10.1063/1.5062659](https://doi.org/10.1063/1.5062659)

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

ANEXO A – BANCO DE DADOS UTILIZADO PARA ELABORAR AS EQUAÇÕES ANALÍTICAS PARA ESTIMAR f_{Ri} ($i = 1, 2, 3$ e 4)

Tabela A.1. Banco de dados utilizado para elabora as equações analíticas para estimar f_{Ri} .

Autor	Vigas com entalhe	V_f (%)	λ_f	f_c (MPa)	f_{R1} (MPa)	f_{R2} (MPa)	f_{R3} (MPa)	f_{R4} (MPa)
Wafa, F.F. (1990)	S1 - 0,5	0,50	75	35,80	4,80	5,12	5,12	5,12
	S2 - 1,0	1,00	75	37,90	8,32	8,96	7,68	7,04
	S3 - 1,5	1,50	75	39,20	8,96	10,24	9,28	6,72
	S4 - 2,0	2,00	75	40,80	7,04	7,68	7,36	7,04
VANDEWALLE <i>et al.</i> (2005)	SCFRC F25	0,38	60	48,80	7,40	7,84	7,04	6,08
	TFRC F25	0,38	60	53,68	4,81	4,96	5,92	3,86
POH <i>et al.</i> (2008)	A	0,38	80	37,31	4,00	3,40	2,60	2,10
	B	0,44	80	28,21	3,00	3,30	3,00	2,70
	C	0,50	80	39,39	3,30	3,00	2,40	2,00
GIACCIO <i>et al.</i> (2008)	C1-20 (MED)	0,25	60	37,40	2,50	2,00	1,80	1,80
	C1-40 (MED)	0,50	60	56,00	4,90	5,20	4,60	4,60
	C1-80 (MED)	1,00	60	59,70	7,80	8,40	7,90	7,50
	C2-40 (MED)	0,50	60	53,60	5,50	5,90	6,10	5,90
DINH <i>et al.</i> (2010)	B27-3	0,75	55	42,30	3,78	3,21	2,41	2,23
	B27-5	1,50	55	44,40	5,25	4,60	3,62	3,20
	B18-7	0,75	80	43,30	7,38	6,00	4,42	3,81
	B27-2	0,75	80	28,70	4,82	5,20	4,78	4,45
	B27-6	1,50	80	42,80	6,40	5,90	5,22	4,79
BURATTI <i>et al.</i> (2011)	SF_20 (MED)	0,25	50	33,28	2,08	2,05	2,14	2,02
LIMA (2012)	20	0,25	80	63,30	3,10	2,13	1,62	1,37
	21	0,25	80	63,30	3,17	2,91	1,97	1,56
	15	0,50	80	62,80	7,33	7,13	6,27	5,15
	16	0,50	80	62,80	7,68	6,74	6,00	5,05
	26	0,63	80	63,00	5,94	5,84	4,71	3,99
	27	0,63	80	63,00	8,06	7,61	5,82	4,72
PAJAK e PONIKIEWSKI (2013)	0.5_HE	0,50	38	63,83	3,61	3,13	2,60	1,97
	1.0_HE	1,00	38	62,73	5,81	5,65	4,46	3,55
	1.5_HE	1,50	38	57,59	8,09	7,58	6,32	5,09
CONFORTI <i>et al.</i> (2013)	FRC25	0,32	63	38,00	3,01	3,20	2,99	2,69
	FRC35	0,45	63	36,90	3,52	3,20	2,99	2,69
AMIN <i>et al.</i> (2013)	DA-0.5-EH-1	0,50	64	56,20	3,79	3,68	3,52	3,20
	DA-1.0-EH-1	1,00	64	60,10	6,40	6,14	5,44	4,83
TIBERTI <i>et al.</i> (2014)	SFRC 0.25M 1	0,25	50	33,90	2,28	2,53	2,61	2,40
MINELLI <i>et al.</i> (2014)	FRC50	0,63	63	32,10	5,40	5,60	5,00	4,50
	FRC75	0,94	63	33,10	6,00	6,10	6,00	5,50

Tabela A.2. Banco de dados utilizado para elabora as equações analíticas para estimar f_{Ri} . (Cont.)

Autor	Vigas com entalhe	V_f (%)	λ_f	f_c (MPa)	f_{R1} (MPa)	f_{R2} (MPa)	f_{R3} (MPa)	f_{R4} (MPa)
ALBERTI <i>et al.</i> (2014)	S33	0,32	64	41,70	1,17	1,26	1,08	0,83
	S49	0,49	64	43,00	1,73	1,82	1,47	1,18
AOUDE e COHEN (2014)	SSC0.5%	0,50	55	59,40	5,44	2,24	1,60	1,44
	SSC1.0%	1,00	55	51,50	5,44	3,84	3,20	2,56
	SSC1.5%	1,50	55	55,80	7,68	5,76	4,80	4,00
	SSC1.0A%	1,00	80	54,50	7,68	7,36	6,08	4,80
	SSC1.5A%	1,50	80	50,50	8,96	8,00	5,76	4,48
BARROS <i>et al.</i> (2015)	Cf60fc50	0,40	67	51,90	5,71	4,55	2,77	2,13
	Cf75fc50	0,40	67	55,68	6,32	5,42	3,25	2,19
	Cf60fc70	0,80	67	63,77	9,06	9,58	8,08	6,96
	Cf75fc70	1,00	67	70,02	12,30	13,30	11,55	10,23
AMIN e FOSTER (2015)	DA-0.5-EH1	0,50	64	56,20	4,66	4,62	4,31	3,89
	DA-1.0-EH1	1,00	64	60,10	7,75	7,32	6,31	5,37
	AM-0.4-EH1	0,40	64	61,30	4,99	4,11	3,32	2,73
	AM-0.8-EH1	0,80	64	63,80	7,44	7,08	5,68	4,63
NING <i>et al.</i> (2015)	SF30	0,38	80	53,60	6,40	6,14	4,86	4,00
	SF50	0,63	80	53,40	12,00	11,20	10,40	8,80
GERMANO <i>et al.</i> (2015)	SFRC-15-0.5%	0,50	65	48,72	6,40	4,65	3,50	2,70
	SFRC-15-0.5%	0,50	65	45,82	7,20	6,70	5,80	5,00
	SFRC-10-0.5%	0,50	65	40,84	5,00	5,50	5,20	4,30
	SFRC-10-1.0%	1,00	65	46,15	10,40	10,40	9,00	8,20
	SFRC-10-0.5%	0,50	65	39,01	4,30	4,80	5,00	4,60
TIBERTI <i>et al.</i> (2015)	1.ST-0.5M	0,50	48	39,70	5,00	4,55	4,05	3,46
	2.ST-0.5M	0,50	48	40,80	4,12	4,07	3,35	2,69
AMIN e FOSTER (2016)	dosagem 01	0,50	67	34,00	2,39	2,52	2,56	2,26
	dosagem 02	0,46	67	46,00	5,16	6,95	6,37	6,07
	dosagem 03	1,00	67	36,00	6,74	8,58	8,07	7,91
LEE (2016)	C25V250	0,25	95	26,40	2,67	2,66	2,60	2,41
	C25V375	0,38	95	26,40	3,14	3,27	3,19	2,86
	C25V500	0,50	95	26,40	4,34	4,56	4,33	3,84
	C35V250	0,25	95	36,30	2,46	2,31	2,24	1,97
	C35V375	0,38	95	36,30	3,71	3,73	3,46	2,97
	C35V500	0,50	95	36,30	3,83	4,16	4,04	3,56
	C45V250	0,25	95	47,60	4,33	3,00	2,23	1,61
	C45V375	0,38	95	47,60	4,65	3,52	2,69	2,39
C45V500	0,50	95	47,60	6,18	5,00	3,40	2,72	
CAGGIANO <i>et al.</i> (2016)	HYSP-FRC-0.75-0	0,75	60	36,37	3,52	3,84	4,00	4,48
AMIN e BENTZ (2017)	Média	0,38	64	32,00	3,07	3,53	3,53	3,22

Tabela A.3. Banco de dados utilizado para elabora as equações analíticas para estimar f_{Ri} . (Cont.)

Autor	Vigas com entalhe	V_f (%)	λ_f	f_c (MPa)	f_{R1} (MPa)	f_{R2} (MPa)	f_{R3} (MPa)	f_{R4} (MPa)
VENKATESHWARAN <i>et al.</i> (2017)	M32	0,25	67	38,60	2,38	2,69	2,76	2,74
	M34	0,50	67	37,30	5,29	6,56	7,00	6,98
	M36	0,75	67	36,00	7,29	8,25	8,04	7,82
	M38	1,00	67	41,10	6,82	9,39	9,51	9,17
	H32	0,25	67	46,10	3,31	3,91	3,78	3,55
	H34	0,50	67	46,70	6,21	7,55	7,54	7,24
	H36	0,75	67	48,00	6,61	8,15	8,22	7,85
	H38	1,00	67	48,50	8,29	9,71	9,76	9,10
	H34A	0,50	80	47,60	6,23	8,11	7,88	7,24
	H34S	0,50	64	45,40	6,06	6,26	5,16	4,34
	H3-12A	1,50	67	48,30	12,72	15,18	15,35	14,57
H3-16A	2,00	67	46,00	13,58	16,88	17,36	15,63	
ALBERTI <i>et al.</i> (2017)	S26	0,33	64	41,47	1,20	1,22	0,88	0,70
GOMES <i>et al.</i> (2018)	C0.5	0,50	65	28,85	2,12	1,84	1,82	1,81
	C0.8	0,80	65	42,24	3,60	3,93	3,86	3,86
	C1.0	1,00	65	32,03	3,25	3,47	3,46	3,45
MAHMOOD <i>et al.</i> (2018)	30,1	0,38	67	66,10	9,20	10,30	11,10	11,50
	30,2	0,38	67	66,10	6,30	9,30	8,40	8,30
	30,3	0,38	67	66,10	4,00	6,60	7,90	8,20
	30,4	0,38	67	66,10	6,10	9,70	11,10	11,10
	30,5	0,38	67	66,10	5,30	8,30	10,00	8,80
	60,1	0,75	67	57,40	7,50	10,00	10,50	8,60
	60,2	0,75	67	57,40	6,50	10,60	11,80	12,20
	60,3	0,75	67	57,40	12,60	13,60	14,50	14,50
	60,4	0,75	67	57,40	6,50	9,70	10,50	10,50
	60,5	0,75	67	57,40	9,60	12,40	13,00	11,50
MONTEIRO <i>et al.</i> (2018)	C0.5%SF1	0,50	45	73,00	4,19	2,15	1,14	0,74
	C1.0%SF1	1,00	45	73,00	9,16	6,25	4,40	3,34
	C2.0%SF1	2,00	45	73,00	13,06	12,37	10,68	9,05
	C0.5%SF2	0,50	80	73,00	7,68	5,06	2,85	1,89
	C1.0%SF2	1,00	80	73,00	11,53	8,90	6,09	4,47
	C2.0%SF2	2,00	80	73,00	15,40	16,86	16,73	16,05
TENG <i>et al.</i> (2018)	0.6DHE	0,60	65	93,40	12,30	14,10	9,00	7,00
	1.2DHE	1,20	65	96,40	16,80	19,70	19,80	17,50
FU <i>et al.</i> (2019)	FR-RC10-0.5	0,50	80	45,72	4,50	3,21	3,20	3,03
	FR-RC10-0.75	0,75	80	48,94	4,13	4,32	4,59	4,27
	FR-RC10-1.0	1,00	80	43,09	3,67	4,09	4,16	4,04

Tabela A.4. Banco de dados utilizado para elabora as equações analíticas para estimar f_{Ri} . (Cont.)

Autor	Vigas com entalhe	V_f (%)	λ_f	f_c (MPa)	f_{R1} (MPa)	f_{R2} (MPa)	f_{R3} (MPa)	f_{R4} (MPa)
FU <i>et al.</i> (2019)	FR-RC5-0.75	0,75	80	52,93	4,04	4,09	3,95	3,67
	FR-RC15-0.75	0,75	80	49,70	3,08	3,12	3,03	2,76
AL-KAMYANI <i>et al.</i> (2019)	P2000	0,25	69	49,90	3,10	2,70	2,10	1,90
LOURENÇO (2012)	P1	0,25	65	26,80	2,70	2,70	2,60	2,40
	P2	0,38	65	28,00	3,00	3,00	3,00	2,80
	P3	0,56	65	27,30	4,60	4,50	4,40	4,10
	P4	0,25	65	38,20	3,60	3,60	3,50	3,30
	P5	0,56	65	27,30	4,90	5,20	5,20	5,10
	P6	0,94	65	42,50	8,70	9,80	9,30	8,50
	P7	0,38	65	43,20	3,60	3,80	3,70	3,40
	P8	0,75	65	53,00	7,80	9,70	9,10	8,50
	P9	0,94	65	56,40	10,70	12,10	11,00	10,00
SAHIN e KOKSAL (2011)	1	0,32	80	71,50	3,18	1,96	0,83	0,56
	2	0,66	80	71,90	5,97	6,26	2,81	1,73
	3	0,98	80	72,30	7,84	13,75	13,92	11,11
	4	0,32	85	74,90	5,33	8,38	9,26	10,13
	5	0,66	85	71,30	5,35	11,06	14,07	15,82
	6	0,98	85	73,00	6,60	15,51	18,01	18,41
	7	0,32	80	59,60	4,97	5,00	3,08	2,36
	8	0,66	80	60,50	8,17	10,19	9,45	8,35
	9	0,98	80	59,90	9,54	12,37	10,56	9,61
	10	0,32	85	56,90	5,05	7,87	9,77	10,20
	11	0,66	85	59,40	6,81	14,15	15,75	14,14
	12	0,98	85	61,10	7,97	15,71	16,81	16,32
	13	0,32	80	47,90	4,03	5,13	5,28	5,41
	14	0,66	80	48,30	5,03	7,01	7,67	8,07
	15	0,98	80	49,20	8,04	14,02	15,14	12,70
	16	0,32	85	49,40	3,31	3,50	3,59	3,04
	17	0,66	85	47,50	5,94	6,49	4,98	4,05
	18	0,98	85	50,90	8,77	11,20	10,53	9,26
LAMEIRAS <i>et al.</i> (2015)	10	0,75	65	45,60	9,21	8,11	6,82	5,70
	11	0,75	65	56,39	8,22	7,13	5,42	4,13
	12	0,75	65	61,23	7,44	6,77	5,52	4,61
	13	0,75	65	61,94	6,82	6,25	5,38	4,69
	16	0,75	65	60,66	6,67	5,97	5,26	4,54
	17	0,75	65	63,46	8,39	7,59	6,52	5,66
	18	0,75	65	54,81	8,36	7,47	6,40	5,59

Tabela A.5. Banco de dados utilizado para elabora as equações analíticas para estimar f_{Ri} . (Cont.)

Autor	Vigas com entalhe	V_f (%)	λ_f	f_c (MPa)	f_{R1} (MPa)	f_{R2} (MPa)	f_{R3} (MPa)	f_{R4} (MPa)
LAMEIRAS <i>et al.</i> (2015)	19	0,75	65	64,83	6,62	6,01	5,16	4,55
BENCARDINO (2013)	DS1%-1	0,94	80	82,70	13,80	12,60	11,60	10,70
	DS1%-2	0,94	80	80,70	11,80	12,40	11,40	9,80
	DS1%-3	0,94	80	78,20	8,00	9,70	7,10	5,40
	DS2%-1	1,88	80	78,40	14,10	15,70	15,40	14,70
	DS2%-2	1,88	80	76,00	13,70	15,10	14,30	13,10
	DS2%-3	1,88	80	80,20	13,50	14,70	13,00	11,00
MORAES NETO <i>et al.</i> (2013)	Vf60fc50	0,38	67	55,70	5,70	4,60	2,80	2,10
	Vf60fc70	0,75	67	56,40	9,10	9,60	8,10	7,00
	Vf75fc50	0,41	67	62,60	6,30	5,40	3,30	2,20
	Vf75fc70	0,94	67	63,80	12,30	13,30	11,60	10,20
	Vf90fc50	1,13	67	70,00	11,00	13,60	12,60	10,80
	Vf90fc70	1,13	67	57,60	10,50	13,40	12,00	11,00
LIAO <i>et al.</i> (2013)	SFRC-30	0,38	50	64,63	3,15	2,70	2,44	2,22
	SFRC-45	0,56	50	64,63	5,06	4,54	3,89	3,60
	SFRC-60	0,75	50	64,63	4,81	4,71	4,26	4,00
	SFRSCC-30	0,38	50	67,43	2,85	2,79	2,61	2,47
	SFRSCC-45	0,56	50	67,43	4,72	4,86	4,67	4,33
	SFRSCC-60	0,75	50	67,43	7,13	7,54	7,12	6,41
FACCONI <i>et al.</i> (2019)	SFRC25	0,31	86	34,18	2,11	1,93	1,86	1,66
	SFRC50	0,63	86	25,69	4,93	5,01	4,79	4,31
MUDADU <i>et al.</i> (2018)	C30-1.0-64-1345	1,00	64	20,41	9,94	8,59	7,22	6,25
	C50-0.32-64-1345	0,32	64	32,50	4,75	2,09	2,05	1,82
	C55-0.50-64-1345	0,50	64	35,75	7,27	6,82	5,91	5,25
	C60-0.50-64-1345	0,50	64	39,00	6,61	4,49	3,50	2,88
	C55-1.0-64-1345	1,00	64	35,75	7,58	7,63	6,97	6,16
	C65-0.50-75-1500	0,50	75	42,25	7,75	9,06	8,37	7,68
	C60-0.50-100-1500	0,50	100	39,00	8,31	9,34	9,87	9,54
WIESLAWA e MAREK (2018)	SFRWSC	0,25	63	64,40	9,80	9,14	8,06	7,19
DING <i>et al.</i> (2019)	SF20	0,25	64	24,90	3,38	3,29	2,75	2,39
	SF40	0,50	64	25,94	6,35	6,44	5,27	4,01
	SF60	0,75	64	24,51	7,83	7,02	6,03	5,63
DING e BAI (2018)	SGM-SF1.0	1,00	65	78,00	6,88	-	-	5,00
	SGM-SF1.5	1,50	65	78,20	8,35	-	-	7,13
	SGM-SF2.0	2,00	65	84,60	7,51	-	-	6,64
	SGC-SF1.0	1,00	65	81,10	2,50	-	-	1,49
	SGC-SF1.5	1,50	65	85,60	4,79	-	-	3,04

Tabela A.6. Banco de dados utilizado para elabora as equações analíticas para estimar f_{Ri} . (Cont.)

Autor	Vigas com entalhe	V_f (%)	λ_f	f_c (MPa)	f_{R1} (MPa)	f_{R2} (MPa)	f_{R3} (MPa)	f_{R4} (MPa)
DING e BAI (2018)	SGC-SF2.0	2,00	65	78,90	6,29	-	-	4,83
BIOLZE e CATTANEO (2017)	T40F	0,63	48	40,63	11,00	7,70	5,70	5,90
	T75F	0,63	48	68,12	11,90	9,10	6,90	5,10
	T90F	0,88	48	59,67	11,60	8,60	6,80	5,00
GOUVEIA <i>et al.</i> (2017)	F1_R0.75	1,00	65	38,48	8,83	8,86	7,94	6,50
	F1_R1.5	1,00	65	36,86	8,13	8,26	7,94	7,17
	F1.5_R1.5	1,50	65	37,44	9,22	9,79	9,06	8,16
GHASEMI <i>et al.</i> (2019)	SCCSF1	0,30	50	23,00	-	0,54	0,26	-
	SCCSF2	0,30	50	21,50	-	1,25	1,16	-
	SCCSF3	0,30	50	30,53	-	1,86	1,71	-
	SCCSF4	0,30	50	26,15	-	0,47	0,64	-
	SCCSF5	0,30	50	27,55	-	1,37	1,28	-
	SCCSF6	0,30	50	27,41	-	1,24	0,86	-
	SCCSF7	0,30	50	21,00	-	0,19	0,18	-
	SCCSF8	0,30	50	20,50	-	0,38	0,37	-
	SCCSF9	0,30	50	23,00	-	0,37	0,37	-
	SCCSF10	0,50	50	23,75	-	0,86	0,69	-
	SCCSF11	0,50	50	22,25	-	2,08	1,64	-
	SCCSF12	0,50	50	30,15	-	1,41	1,18	-
	SCCSF13	0,10	50	32,40	-	0,15	0,12	-
	SCCSF14	0,10	50	24,55	-	0,79	0,79	-
	SCCSF15	0,10	50	25,49	-	0,26	0,90	-
ROSSI <i>et al.</i> (2020)	CP-F0.5	0,50	37	27,34	2,74	2,15	1,87	1,68
	CP-F1.5	1,50	37	28,50	6,59	5,25	4,15	3,32
HAN <i>et al.</i> (2029)	D20-0.58-LF30	1,00	40	41,0	3,33	1,33	0,74	0,74
	D20-0.58-LF40	1,00	53	40,0	4,74	2,78	2,00	1,93
	D20-0.58-LF50	1,00	67	42,0	3,85	1,48	0,96	0,89
	D20-0.58-LF60	1,00	80	41,6	6,00	3,56	2,01	1,99
	D30-0.58-LF30	1,00	40	39,5	3,56	0,74	0,71	0,67
	D30-0.58-LF40	1,00	53	43,6	3,04	0,81	0,74	0,81
	D30-0.58-LF50	1,00	67	42,5	3,93	1,41	1,19	0,59
	D30-0.58-LF60	1,00	80	38,9	7,11	3,85	1,70	1,48
	D20-0.33-LF30	1,00	40	78,8	5,19	1,70	0,44	0,37
	D20-0.33-LF40	1,00	53	82,2	4,15	1,41	0,59	0,30
	D20-0.33-LF50	1,00	67	80,1	5,78	2,37	1,33	0,67
	D20-0.33-LF60	1,00	80	81,4	6,22	2,81	1,26	0,74
	D30-0.33-LF30	1,00	40	83,8	4,44	1,19	0,37	0,30

Tabela A.7. Banco de dados utilizado para elabora as equações analíticas para estimar f_{Ri} . (Cont.)

Autor	Vigas com entalhe	V_f (%)	λ_f	f_c (MPa)	f_{R1} (MPa)	f_{R2} (MPa)	f_{R3} (MPa)	f_{R4} (MPa)
HAN <i>et al.</i> (2029)	D30-0.33-LF40	1,00	53	80,2	5,26	1,56	0,44	0,37
	D30-0.33-LF50	1,00	67	81,3	5,04	2,22	1,33	0,81
	D30-0.33-LF60	1,00	80	76,9	6,67	2,74	1,63	1,26
CHOI <i>et al.</i> (2019)	64-HTS-0.5	0,50	64	80	6,50	8,00	7,90	6,90
	64-HTS-1.0	1,00	64	80	11,10	12,50	12,00	11,00
	80-HTS-0.5	0,50	80	80	7,10	10,50	11,50	11,80
	80-HTS-1.0	1,00	80	80	12,50	16,00	16,40	16,40
HAJFOROUSH <i>et al.</i> (2020)	NM	1,50	62,5	38	6,70	1,80	0,80	0,85
MAHAKAVI e CHITHRA (2019)	0.25% HF – 0% CF	0,25	100	56	7,72	6,48	6,30	4,94
	0.5% HF – 0% CF	0,50	100	60	6,79	5,93	6,14	4,38
	0.75% HF – 0% CF	0,75	100	62	6,17	4,20	3,27	3,70
LAKAVATH <i>et al.</i> (2019)	SF50	0,50	50	53,06	6,17	6,05	5,62	4,94
	SF100	1,00	50	55,35	9,26	9,81	9,32	8,58
ABBASS <i>et al.</i> (2019)	B1.0	1,00	55	73,3	2,41	2,10	1,91	1,70
	B1.5	1,50	55	73,4	2,53	2,50	2,41	2,16
TÓTH <i>et al.</i> (2019)	Cb01-30	0,38	47	61,6	7,72	7,41	5,49	5,00
	Cb01-50	0,63	47	61,6	12,96	13,46	10,86	10,00
	Cb02-50	0,63	47	65	8,46	8,27	7,28	6,85
FOLINO <i>et al.</i> (2020)	FRC40	0,40	67	35,35	6,17	6,36	6,48	6,23
	FRC60	0,75	67	32,57	11,23	11,6	11,23	10,8
LEHMANN (2019)	1	0,50	63	51,8	8,64	9,14	8,89	8,46
	2	0,90	63	61,4	13,89	13,58	12,38	11,11
	3	1,20	63	64,4	17,78	16,98	15,43	13,58
MEDA <i>et al.</i> (2019)	B01	0,50	80	62,35	5,09	7,20	7,90	7,79

ANEXO B – BANCO DE DADOS UTILIZADO PARA AVALIAR O DESEMPENHO DAS EQUAÇÕES ANALÍTICAS PARA ESTIMAR f_{Ri} ($i = 1, 2, 3$ e 4):

Tabela B.8. Banco de dados utilizado para avaliar as equações analíticas para estimar f_{Ri} .

Autor	Vigas com entalhe	V_f (%)	λ_f	f_c (MPa)	f_{R1} (MPa)	f_{R2} (MPa)	f_{R3} (MPa)	f_{R4} (MPa)
SAHIN e KORSAL (2011)	14	0,33	80	47,90	3,17	3,52	2,88	2,85
	H-1050-0.55-2	0,67	80	18,30	5,92	6,05	4,48	4,16
	H-1050-0.55-3	1,00	80	49,20	9,60	10,62	9,92	8,96
	H-2000-0.55-1	0,33	85	49,40	4,16	5,44	5,28	5,44
	H-2000-0.55-2	0,67	85	47,50	5,38	7,36	7,94	7,68
	H-2000-0.55-3	1,00	85	50,90	8,12	10,78	8,56	8,64
	H-1050-0.45-1	0,33	80	59,60	4,80	4,45	2,56	1,92
	H-1050-0.45-2	0,67	80	60,50	8,80	9,92	8,96	7,68
	H-1050-0.45-3	1,00	80	59,90	10,56	12,32	9,89	9,28
	H-2000-0.45-1	0,33	85	56,90	5,72	8,00	4,57	3,40
	H-1050-0.35-1	0,33	80	71,50	4,71	3,20	4,92	4,80
	H-1050-0.35-2	0,67	80	71,90	9,60	8,64	7,52	6,20
	H-1050-0.35-3	1,00	80	72,30	8,80	13,60	13,28	9,47
	H-2000-0.35-1	0,33	85	74,90	4,60	6,64	5,30	5,40
ASLANI <i>et al.</i> (2020)	M75ST0.25	0,25	80	42,50	3,50	3,20	2,16	2,15
	M75ST0.50	0,50	80	49,20	5,00	5,28	5,06	4,80
	M75ST0.75	0,75	80	56,00	7,80	8,70	3,60	3,48
	M75ST1.00	1,00	80	53,40	6,00	11,40	4,50	4,20
	M100ST0.50	0,50	80	48,30	4,20	4,20	4,82	4,55
	M100ST0.75	0,75	80	55,30	7,68	9,30	4,38	4,00
	M100ST1.00	1,00	80	50,00	7,44	10,47	7,80	6,72
FOLINO <i>et al.</i> (2020)	FRC40	0,50	67	35,35	3,80	3,99	4,07	3,92
	FRC60	0,75	67	32,57	6,95	7,26	7,10	6,64
CUENCA <i>et al.</i> (2020)	S1-25	0,32	63	45,60	2,90	2,74	2,61	2,47
	S1-40	0,51	62,5	44,90	4,59	4,98	4,81	4,46
	S2-40	0,51	86	44,10	7,54	6,86	6,10	4,98
AVANAKI <i>et al.</i> (2019)	1	0,50	63	46,44	3,30	3,20	2,50	2,40
SMEDT <i>et al.</i> (2020)	3D20	0,25	80	47,20	2,26	2,31	2,23	2,04
	3D40	0,50	80	47,20	3,79	4,46	4,55	4,39
GOMES <i>et al.</i> (2020)	0,25	0,25	48	32,90	1,70	1,58	1,45	1,25
	0,50	0,50	48	38,90	3,50	3,16	2,87	2,68
SUTA <i>et al.</i> (2020)	1	0,50	67	46,89	4,42	4,22	4,13	3,84
	2	0,50	67	46,89	4,75	5,01	4,82	4,40
	3	0,50	67	46,89	4,08	5,82	3,44	3,04

Tabela B.9. Banco de dados utilizado para avaliar as equações analíticas para estimar f_{Ri} . (Cont.)

Autor	Vigas com entalhe	V_f (%)	λ_f	f_c (MPa)	f_{R1} (MPa)	f_{R2} (MPa)	f_{R3} (MPa)	f_{R4} (MPa)
SUTA <i>et al.</i> (2020)	4	0,50	67	46,89	4,51	4,16	3,94	3,84
	5	0,50	67	46,89	4,15	6,17	4,75	4,45
	6	0,50	67	46,89	5,44	4,32	3,98	3,62
	7	0,50	67	46,89	3,88	5,82	4,14	3,73
WANG <i>et al.</i> (2020)	FRSC25	0,25	81	45,00	2,40	2,21	2,21	2,24
	FRSC50	0,50	81	45,00	4,86	3,97	3,36	3,18
	FRSC75	0,75	81	45,00	8,74	7,99	7,42	7,30
	FRSC100	1,00	81	45,00	9,86	8,86	8,22	7,98
CARRILLO <i>et al.</i> (2021)	SFRC- 1N-20	0,25	65	24,50	2,09	1,57	1,41	1,22
	SFRC- 1N-40	0,50	65	27,10	4,19	4,53	4,36	4,06
	SFRC- 1N-60	0,75	65	24,60	6,79	6,42	6,08	5,39
ABDALLAH <i>et al.</i> (2016)	3D-30-40	0,50	65	47,45	3,39	2,80	2,17	1,90
	3D-30-80	1,00	65	46,79	5,14	4,64	4,23	3,80
	3D-60-40	0,50	65	48,52	5,62	5,21	4,56	4,05
	3D-60-80	1,00	65	48,24	5,78	5,23	5,05	4,40
GRIMALDI <i>et al.</i> (2013)	CC	0,50	67	50,80	3,70	4,00	4,10	3,80
	CC	0,50	67	50,80	3,40	3,80	3,70	3,40
	CC	0,50	67	50,80	3,20	3,50	3,40	3,30
	CC	0,50	67	48,40	3,30	4,20	4,40	4,30
	CC	0,50	67	48,40	3,40	4,50	4,90	4,80
	CC	0,50	67	48,40	4,00	5,00	5,20	5,20
	CC	0,50	67	48,40	4,20	5,20	5,60	5,50
BENCARDINO <i>et al.</i> (2013)	DS1%_1	1,00	80	66,16	13,80	12,60	11,60	10,70
	DS1%_2	1,00	80	64,56	11,80	12,40	11,40	9,80
	DS1%_3	1,00	80	62,56	8,00	9,70	7,10	5,40
	DS2%_1	2,00	80	62,72	14,10	15,70	15,40	12,70
	DS2%_2	2,00	80	60,80	13,70	15,10	14,30	12,10
	DS2%_3	2,00	80	64,16	12,50	14,70	13,00	12,00
SOETENS e MATTHYS (2014)	3P-LH-20	0,25	85	55,04	4,10	5,70	6,02	5,73
	3P-LH-40	0,50	85	58,56	6,20	8,23	8,85	8,89
	3P-LH-60	0,75	85	51,76	9,20	9,20	9,80	9,74
BARROS <i>et al.</i> (2003)	S2_3	0,31	65	64,00	3,79	3,90	3,20	3,00
	S2_4	0,44	65	58,80	5,10	4,80	3,78	3,46
	S2_5	0,63	65	52,80	6,88	7,65	7,20	6,83
	S2_6	0,88	65	64,50	9,95	9,25	7,20	6,63
GALEOTE <i>et al.</i> (2017)	SCC_H60_SF_30	0,38	50	71,90	2,90	2,80	2,60	2,50
	SCC_H60_SF_45	0,56	50	67,60	4,80	4,90	4,70	4,40

Tabela B.10. Banco de dados utilizado para avaliar as equações analíticas para estimar f_{Ri} . (Cont.)

Autor	Vigas com entalhe	V_f (%)	λ_f	f_c (MPa)	f_{R1} (MPa)	f_{R2} (MPa)	f_{R3} (MPa)	f_{R4} (MPa)
GALEOTE <i>et al.</i> (2017)	SCC_H60_SF_60	0,75	50	66,90	7,30	7,60	7,30	6,90
LEE <i>et al.</i> (2019)	3D fiber-0.37	0,37	65	51,00	5,18	5,76	3,73	3,10
	3D fiber-0.60	0,60	65	48,00	6,40	6,94	5,81	5,31
BARROS <i>et al.</i> (2005)	F80/60-10	0,13	80	31,80	1,50	1,70	1,30	1,40
	F80/60-20	0,25	80	31,80	2,60	2,40	2,20	2,00
	F80/60-30	0,38	80	31,80	3,50	3,80	3,70	3,50
	F65/60-25	0,31	65	31,80	2,00	2,80	1,90	1,70
	F65/60-35	0,44	65	31,80	4,10	4,00	2,40	3,10
	F65/60-45	0,56	65	31,80	5,90	6,20	5,80	5,40
TIBERTI <i>et al.</i> (2017)	C45-0.32-50-1130	0,32	50	37,36	2,71	3,35	1,23	1,07
	C40-0.38-63-1100	0,38	63	33,04	3,88	4,12	4,18	3,98
	C40-0.38-50-1100	0,38	50	32,32	2,14	2,26	2,05	1,78
	C45-0.38-60-1100	0,38	60	34,08	2,11	1,89	1,85	1,74
	C45-0.38-45-1100	0,38	45	34,80	2,40	2,03	1,59	1,08
	C90-1.0-65-2300	1,00	65	70,32	10,84	11,79	11,49	10,80
	C90-1.0-80-3000	1,00	80	71,76	12,38	12,74	11,78	10,23
	C50-0.32-64-1345	0,32	64	40,96	2,04	2,09	2,05	1,82
	C55-1.0-64-1345	1,00	64	45,12	7,58	7,63	6,97	6,16
	C65-0.50-75-1500	0,50	75	50,40	3,46	4,04	4,16	4,00
C60-0.50-100-1500	0,50	100	48,88	8,31	9,84	9,87	9,54	
CONFORTI <i>et al.</i> (2019)	S-50	0,63	50	46,80	5,43	5,29	4,94	4,58
CONFORTI <i>et al.</i> (2021)	VS1	0,50	63	52,00	6,71	6,52	6,16	5,68
	VS2	0,50	55	50,00	4,33	4,30	3,96	3,48
	SCS1	0,50	63	56,20	6,25	6,49	6,03	5,68
	SCS2	0,50	55	56,80	4,95	4,50	4,13	3,72
KACHOUH <i>et al.</i> (2020)	R100SF1	0,98	65	26,10	6,43	8,42	6,38	3,26
	R30SF2	1,95	65	33,10	10,26	13,02	11,86	6,72
	R70SF2	1,95	65	29,30	10,26	15,68	12,24	8,94
	R100SF2	1,95	65	26,90	10,26	17,22	12,82	9,28
Este estudo	V0.5-1	0,50	65	40,55	4,09	4,60	3,70	3,43
	V0.5-2	0,50	65	40,79	4,28	4,49	3,65	3,66
	V0.5-3	0,50	65	39,15	4,40	4,50	3,60	3,30
	V1.0-1	1,00	65	38,41	6,90	7,35	6,21	5,17
	V1.0-2	1,00	65	41,95	6,13	8,25	6,85	6,70
	V1.0-3	1,00	65	41,84	6,20	7,90	6,70	6,80
	V1.5-1	1,50	65	42,43	9,10	9,85	8,47	8,58
	V1.5-2	1,50	65	41,51	9,50	10,10	8,38	9,22
	V1.5-3	1,50	65	40,13	9,00	9,80	8,22	8,80
	V2.0-1	2,00	65	41,16	10,71	10,52	10,20	9,57
	V2.0-2	2,00	65	42,14	9,25	9,80	9,70	9,71
	V2.0-3	2,00	65	41,49	9,90	10,49	10,20	9,40

ANEXO C - INFORMAÇÕES ADICIONAIS SOBRE AS FIBRAS DE AÇO: FABRICANTE

Dramix®

BEKAERT

better together

Ficha Técnica

DRAMIX® 3D



Dramix® 3D é referência em reforços com fibra de aço. Graças à sua combinação de alta performance, durabilidade e fácil manuseio, 3D é uma solução eficiente para um grande número de aplicações e lhe permite economizar tempo e dinheiro.

- > ancoragem original
- > resistência à tração

Dramix® 3D é uma solução rentável para

- > pisos
- > túneis
- > pré-fabricados
- > aplicações residenciais

Bekaert lhe oferece todo o suporte necessário para seu projeto. Nós ajudamos você a escolher o tipo de fibra mais adequada, calcular a dosagem ideal e escolher o tipo de concreto. Entre em contato com seu suporte local.

Acesse www.bekaert.com/dosingdramix para conhecer nossas recomendações sobre manuseio, dosificação e mistura.

Reservado o direito de modificação. Todos os dados descrevem nossos produtos em caráter geral. Para informação detalhada, solicite as especificações técnicas do produto.

DESEMPENHO

Propriedades do material

Resistência à tração:
 $R_{m,ave}$: 1.160 N/mm²
 Tolerâncias: média de \pm 7,5%
 Módulo de Young: \pm 210.000 N/mm²

Geometria

Família

3D



Comprimento (l) 60 mm



Dímetro (d) 0,90 mm



Fator de Forma (l/d) 65



Rede de Fibras

3,0 km por m² (para 15 kg/m²)
 3.163 fibras/kg
Dosagem mínima:
 15 kg por m² (de acordo com a CE)

Família Dramix®

5R 4R 3D

Resistência à Tração	=====
Ductilidade do arame	=====
Resistência de ancoragem	=====

CERTIFICAÇÕES DO PRODUTO



Dramix® dispõe do certificado para uso estrutural conforme a EN 14889-1 (sistema '1'). Informação detalhada está disponível para consulta.

CERTIFICAÇÕES DO SISTEMA



Todas as plantas industriais Dramix® são certificadas pela ISO 9001 e ISO 14001.

EMBALAGEM



SACOS 20 kg BIG BAG 1100 kg

ARMAZENAMENTO



FABRICADO POR

Belgo Bekaert Arames



Escolha qualidade.

ANEXO B.1. Propriedades das fibras de aço.

ANEXO D - INFORMAÇÕES ADICIONAIS SOBRE O ADITIVO UTILIZADO: FABRICANTE



FICHA TÉCNICA DE PRODUTO

Sika® ViscoCrete® Precast

ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE DE ALTO DESEMPENHO

DESCRIÇÃO DO PRODUTO

Sika® ViscoCrete® Precast é um aditivo líquido superplastificante de pega acelerada de terceira geração, para indústria de pré-fabricados, concretos de alta resistência inicial, concreto de alto desempenho (CAD) e concreto auto-adensável (CAA), com manutenção adequada para pré-fabricados.

USOS

CARACTERÍSTICAS / VANTAGENS

Sika® ViscoCrete® Precast é utilizado como um poderoso superplastificante atuando por diferentes mecanismos, através da adsorção superficial, do efeito estérico promovendo a separação das partículas de aglomerante e produzindo as seguintes propriedades ao concreto:

- Aumento intenso no desenvolvimento dos ganhos de resistências iniciais, resultando numa desforma antecipada para pré-moldados e concretos moldados em loco;
- Efeito redutor de água extremamente poderoso, resultando em altas densidades e resistências, e reduzindo a permeabilidade à água;
- Excelente efeito plastificante resultando na melhoria do comportamento na fluidez, no lançamento e na compactação;
- Redução dos custos de energia na cura a vapor de elementos pré-moldados;
- Especialmente utilizado na produção de concretos auto-adensáveis;
- Melhoria no comportamento da retração;
- Reduz o tempo de fechamento das rodovias e avenidas no reparo do pavimento
- Não contém adição de cloretos.

Sika® ViscoCrete® Precast não contém cloretos ou outros ingredientes que causam corrosão do aço. Portanto é adequado para concreto armado ou protendido.

CERTIFICADOS / NORMAS

Atende aos requisitos da norma ABNT NBR 11768/2011

Ficha Técnica de Produto
Sika® ViscoCrete® Precast
Março 2019, Versão 01.01
021301011000000218

1 / 3

DADOS DO PRODUTO

Base química	Solução de policarboxilato em meio aquoso
Embalagem	Tambor de 200L Container de 1000L Granel
Aspecto / Cor	Líquido castanho
Prazo de validade	12 meses a partir da data de produção se estocado apropriadamente, nas embalagens originais e intactas.
Condições de estocagem	Armazenar em local seco em temperaturas entre +5°C e +35°C. Protegido da luz direta do sol e do gelo.
Densidade	1,09 ± 0,02 kg/ L
Valor do pH	4,5 ± 1,0

INFORMAÇÃO SOBRE A APLICAÇÃO

Dosagem recomendada	0,2% à 2,0% sobre o peso de aglomerantes (cimento e adições, se houver); A dosagem ótima deverá ser determinada através de ensaios experimentais com o traço e os materiais da obra.
Compatibilidade	Este aditivo é compatível com outros aditivos da linha Sika, para tanto, sugere-se entrar em contato com o Departamento Técnico Sika Brasil.
Dispensador	Sika® ViscoCrete® Precast é adicionado na água de amassamento ou diretamente a mistura de concreto fresco. Nunca adicionar Sika® ViscoCrete® Precast com os componentes secos do concreto (cimento e agregados).

INSTRUÇÕES DE APLICAÇÃO

DISPENSADOR

Sika® ViscoCrete® Precast is added to the gauging water or added with it into the concrete mixer.

To take advantage of the high water reduction, a wet mixing time, which is depending on the mixing conditions and mixer performance, of at least 60 seconds is recommended.

To avoid excess water in the concrete, the final dosage must begin only after 2/3 of the wet mixing time.

LIMITAÇÕES

Em casos de superdosagem o concreto poderá ter: forte exsudação, segregação e retardo excessivo, podendo levar ao não endurecimento do concreto ou a perda de resistência do mesmo.

VALOR BASE DO PRODUTO

Todos os dados técnicos aqui contidos são baseados

em testes de laboratórios. Medidas de valores em condições reais podem variar devido a condições fora de nosso controle.

Ficha Técnica do Produto
Sika® ViscoCrete® Precast
Março 2019, Versão 01.01
0213010111000000218

2 / 3



RESTRIÇÕES LOCAIS

Para maiores informações sobre manuseio, estocagem e disposição dos resíduos consulte a versão mais recente da FISPQ do produto que contém os dados disponíveis, das propriedades físicas, de ecologia, de toxicidade, e outros dados de segurança pertinentes. Para acessá-las consulte nosso site www.sika.com.br

ECOLOGIA, SAÚDE E SEGURANÇA

SEGURANÇA: Recomendamos o uso de equipamento de proteção individual adequado (óculos de segurança, luvas de borracha sintética e roupa de proteção) durante o tempo de manuseio do produto. Mantenha o produto fora do alcance de crianças e animais domésticos.

PRIMEIROS SOCORROS: Para mais informações, consulte a Ficha de Informações sobre Segurança de Produtos Químicos (FISPQ). Em caso de ingestão, não induza o vômito e procure imediatamente um médico, levando consigo a embalagem original do produto ou a FISPQ. Em caso de emergência, contate PRÓ-QUÍMICA* 24 Horas Brasil: 0800-118270. Não reutilize as embalagens contaminadas com produtos. Descarte em local adequado, incluindo os resíduos gerados após o consumo, conforme regulamentação local vigente. Recomendamos que sejam recicladas somente embalagens não contaminadas pelo produto.

NOTA LEGAL

As informações e, em particular, as recomendações relacionadas à aplicação e à utilização final dos produtos Sika® são fornecidas de boa-fé e baseadas no conhecimento e na experiência de uso desses produtos, desde que devidamente armazenados, manuseados e aplicados em condições normais. Na prática, as variações no estado do material, nas superfícies e nas condições de aplicação em campo são de tal forma imprevisíveis que nenhuma garantia a respeito da comercialização ou aptidão de um determinado produto para um determinado fim, nem quaisquer responsabilidades decorrentes de qualquer relacionamento legal entre as partes poderão ser inferidas dessas informações ou de quaisquer recomendações dadas por escrito ou por qualquer outro meio. Os direitos de propriedade de terceiros deverão ser observados. Todas as encomendas aceitas estão sujeitas às condições de venda e de entrega vigentes. Os usuários deverão sempre consultar as versões mais recentes das fichas técnicas de cada produto (disponíveis mediante solicitação).

Sika S.A.

Av. Doutor Alberto Jackson Bygdon,
1525
Vila Merck, CEP-06276-000 - Osasco - SP
Fone: 0800 703 7340
bra.sika.com



Ficha Técnica de Produto

Sika® ViscoCrete® Precast
Março 2019, Versão 01.01
021301011000000218

3 / 3

SikaViscoCretePrecast-pt-BR-[03-2019]-1-1.pdf



ANEXO E – PRODUÇÕES CIENTÍFICAS COM CRFA

ANEXO E.1. *Proposal to estimate the residual flexural tensile strength for SFRC* – Revista *Materials and Structure*, Qualis A1.

Este artigo refere-se à pesquisa apresentada nesta tese.

Materials and Structures Proposal to estimate the residual flexural tensile strength for SFRC --Manuscript Draft--

Manuscript Number:	
Full Title:	Proposal to estimate the residual flexural tensile strength for SFRC
Article Type:	Original Research
Keywords:	3-point bending tests; notched beams; residual stresses; steel fiber; empirical equations
Corresponding Author:	Aaron Kadima Lukanu Lwa Nzambi, M.D. Universidade Federal do Pará Belem, PA BRAZIL
Corresponding Author Secondary Information:	
Corresponding Author's Institution:	Universidade Federal do Pará
Corresponding Author's Secondary Institution:	
First Author:	Lana Daniele dos Santos Gomes Castro
First Author Secondary Information:	
Order of Authors:	Lana Daniele dos Santos Gomes Castro Aaron Kadima Lukanu Lwa Nzambi, M.D. Dênio Ramam Carvalho de Oliveira
Order of Authors Secondary Information:	
Funding Information:	
Abstract:	This paper presents the experimental results of 3-point bending tests, 3PBT, on 15 prismatic notched beams (150x150x550 mm ³) of steel-fiber-reinforced concrete, tested according to the prescriptions of RILEM TC 162-TDF to obtain the stress versus crack-mouth-opening displacement curves. 3D hooked-end steel fibers were used, with a form factor of 65 and the volume fractions were varied from 0.0% (plain concrete), 0.5%, 1.0%, 1.5% and 2.0%. Empirical equations for the bending residual stresses were proposed based on the multiple regression analyses of the experimental results. Subsequently, the model was validated with a database; constituted of the experimental results of 118 notched beams found in the literature. Thus, it was possible to see that the higher the reinforcement index was, the more accurate the results of the analytical models from the literature analyzed tended to be, in other words, a more accentuated dispersion for low steel fiber consumption and aspect ratio. However, little dispersion was noted in the proposed model regardless of the increase of the reinforcement index, with better accuracy in comparison with the performances of other empirical models, covering both the hardening and softening behavior of concrete with steel fiber.
Additional Information:	
Question	Response
Provide the total number of words in the manuscript (excluding figure caption and table caption)?	8,269
Provide total number of FIGURES?	14
Provide total number of TABLES?	7

Este trabalho foi desenvolvido paralelamente a proposta de tese de doutorado.

scientific reports



OPEN

Pile caps with inclined shear reinforcement and steel fibers

Aaron Nzambi^{1,2}, Lana Gomes¹, Cleidinei Amanajás¹, Francisco Silva² & Dênio Oliveira¹

This experimental investigation presents results and a discussion on a series of four reinforced concrete pile caps with and without steel fibers, measuring $400 \times 400 \times 1000 \text{ mm}^3$, which were tested under concentric loading. The study set the steel fiber and the inclined shear reinforcement as variables. The fiber volume fraction was 1.5%, and the concrete compressive strength was 25 MPa. The results showed a tendency to increase ductility and ultimate strength with the use of inclined shear reinforcement; the same behavior was observed with the addition of steel fibers, improving the performance of the tested pile caps. This study opens the possibility of designing slender pile caps, especially when associated with both analyzed parameters.

Foundations are among the most important structural elements used for load transfer from a building to piles or caissons. Pile caps can be classified as rigid or flexible based on criteria similar to those used for shallow foundations. Therefore, the larger and more rigid the structure is, the more complex its design becomes. According to NBR 6118¹, rigid pile caps are not prone to diagonal tension failure; most often, failure occurs in compression struts². However, some doubt remains as to whether this behavior can be modified with strut strengthening. In the literature, studies^{3–5} have suggested limiting the height of the block as a function of the angle of inclination of the strut, ranging from 45° to 55°; this may result in an overdesign of the structure. Fighting the shear cracks through reinforcement mechanisms that can improve the performance of the blocks is an ideal way to optimize the design and safety of such structural elements. This can be achieved by using shear reinforcement and/or steel fibers to improve the mechanical properties of concrete in terms of shear, compression, and flexure; in addition, steel fiber reinforced concrete (SFRC) enhances performance in energy absorption, cracking control, and ductility^{6,7}. The use of SFRC is being expanded, and its applications range from floor pavements to special structural elements or those subjected to an aggressive or corrosive environment without affecting their durability⁸.

Thus, this experimental study explores the effectiveness of inclined reinforcement and the contribution of steel fibers in improving the performance of concrete pile caps subjected to shear forces since, economically, a considerable gain in strength increase can make this approach feasible and decrease the volume of concrete in pile caps.

Calculation model

In the present study, the pile caps were designed using the strut-and-tie method (STM), which is the most widespread calculation model for the design of rigid pile caps. This design is based on the experimental works previously developed by Blévet and Frémy⁴. The model consists of designing a spatial truss inside a pile cap using tension and compression bars that are connected through nodes, as shown in Fig. 1.

The effective depth (d) of the pile cap is given by Eq. 1. To ensure adequate structural behavior of the pile cap, Blévet and Frémy⁴ recommended that θ should be within a 45° ≤ θ ≤ 55° range. For the minimum spacing between the piles adopted in the work, the distance L was equal to three times the edge distance of the pile (D), according to the recommendations of Moraes⁹, ($L \geq 3 \cdot D$).

$$d = \tan \theta \cdot (0.5 \cdot L - 0.25 \cdot a_c) \quad (1)$$

where L is the spacing between piles; a_c is the larger side of the column.

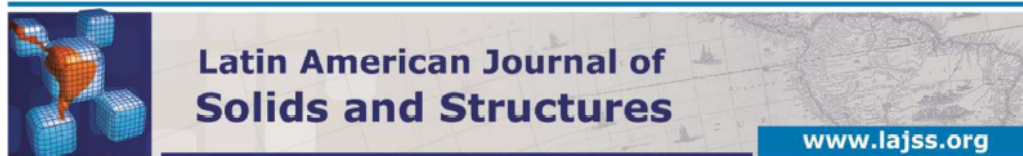
The determinations of the acting stresses near the column and the pile are calculated through Eqs. (2) and (3), respectively. The equations also define the normative verification limits for the design.

$$\sigma_{s,fc} = \frac{F_d}{A_c \cdot \sin^2 \theta} \leq 1.4 \cdot f_c \quad (2)$$

¹Department of Civil Engineering, Federal University of Pará, Belém, PA 66075-110, Brazil. ²Department of Civil Engineering, University of Amazônia, Belém, PA 66065-205, Brazil. ✉email: aaronkadima@gmail.com

Este artigo refere-se à primeira parte apresentada na proposta desta tese, na etapa de qualificação, contudo, foi sugerido pela banca a redução do programa experimental

Original Article



Experimental analysis of the efficiency of steel fibers on shear strength of beams

Abstract

The efficiency of steel fibers for shear strength of reinforced concrete beams is assessed. Four beams were evaluated: control consisted of one beam without any steel fibers and three beams with reinforced concrete with steel fibers. All beams were reinforced for shear strength by a minimum reinforcement rate. The influence of fiber content added to concrete, at 0.5%, 0.8% and 1.0%, and the possibility of partial or total replacement of conventional shear reinforcement (stirrups) by steel fibers were evaluated. Results showed a significant increase in ductility and stiffness of the beams with steel fibers and, consequently, changes in the failure mode were observed, of shear (control beam) to flexure behavior (beams with steel fibers).

Keywords

Shear, steel fibers, beams, experimental analysis.

Lana Daniele dos Santos Gomes^{a*}
 Dênio Ramam Carvalho de Oliveira^b
 Bernardo Nunes de Moraes Neto^b
 Adelson Bezerra de Medeiros^b
 Alcebiades Negrão Macedo^b
 Francisco André Castro e Silva^c

^a Instituto Federal do Pará - IFPA, Santarém, Pará, Brasil. E-mail: lana.gomes@ifpa.edu.br

^b Universidade Federal do Pará - UFPA, Belém, Pará, Brasil. E-mail: denio@ufpa.br, bnmn@hotmail.com, medeiros@ufpa.br, nmacedo@ufpa.br

^c Universidade da Amazônia - UNAMA, Belém, Pará, Brasil. E-mail: fandrecastro@gmail.com

*Corresponding author

<http://dx.doi.org/10.1590/1679-78254710>

Received: November 29, 2017
 In Revised Form: March 23, 2018
 Accepted: April 17, 2018
 Available Online: April 20, 2018

Nomenclature

k = scale factor
 ρ_l = longitudinal reinforcement
 ρ_w = Transversal reinforcement
 f_{Rnk} = residual resistance characteristic to last limit state
 f_{ctk} = resistance characteristic to tensile strength
 f_c = resistance to concrete strain
 f_{Rts} = residual resistance to service limit state
 b = beam width
 d = effective depth of the beam
 A_{sw} = area of two legged stirrup
 s_w = uniform spacing of the stirrups
 f_{ywd} = yield strength of the steel stirrups

f_{Rts} = residual resistance to service limit state
 f_{Rl} = residual tensions to flexure strain CMOD1 = 0.5 mm
 f_{R3} = residual tensions to flexure strain CMOD1 = 2.5 mm
 C_f = fiber content
 l_f = fiber length
 d_f = fiber diameter
 l_f/d_f = fibre aspect ratio
 V_{flex} = flexural resistance
 m_R = resisting moment of the beam
 a = shear span
 a/d = shear span-effective depth ratio

1 INTRODUCTION

Yoo et al. (2016), Khan et al. (2016) and other authors insist that plain concrete is a fragile material with low flexure capacity and with restricted resistance and tenacity to strain (Satpute et al., 2016). New technologies have been introduced to supplement several mechanical restrictions, such as reinforced concrete where reinforcement is provided by ductile material bars (steel, carbon or glass fiber) or, more recently, by discrete fibers placed in the concrete. Mobasher et al. (2015) highlights the great viability of steel-fiber-reinforced concrete (SFRC), since the reinforcement mechanism provided by the fibers improves strain, flexure, shearing, fatigue, energy absorbing capacity, cracking control and ductility. It should be enhanced that several research works have also demonstrated the contribution of steel fibers, either as sole