

Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Escola de Engenharia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

**INFLUÊNCIA DA POROSIDADE PRESENTE NA INTERFACE  
FIBRA/MATRIZ NAS PROPRIEDADES DE DESEMPENHO  
DE COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS REFORÇADOS COM  
FIBRAS METÁLICAS**

**Thiago dos Santos Henriques**

Porto Alegre  
2023

THIAGO DOS SANTOS HENRIQUES

**INFLUÊNCIA DA POROSIDADE PRESENTE NA INTERFACE  
FIBRA/MATRIZ NAS PROPRIEDADES DE DESEMPENHO  
DE COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS REFORÇADOS COM  
FIBRAS METÁLICAS**

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia na modalidade Acadêmico.

Orientadora: Prof.<sup>a</sup>. Dr.<sup>a</sup> Denise Carpena C. Dal Molin

Porto Alegre  
2023

# **INFLUÊNCIA DA POROSIDADE PRESENTE NA INTERFACE FIBRA/MATRIZ NAS PROPRIEDADES DE DESEMPENHO DE COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS REFORÇADOS COM FIBRAS METÁLICAS**

Esta Tese de Doutorado foi julgada adequada para a obtenção do título de DOUTOR EM ENGENHARIA e aprovada em sua forma final pelo professor orientador e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 23 de agosto de 2023.

Prof. Denise Carpena C. Dal Molin  
Dra. pela Universidade de São Paulo  
Orientadora

Prof. Ana Carolina Badalotti Passuello  
Coordenadora do PPGCI/UFRGS

## **BANCA EXAMINADORA**

**Prof. Antônio Domingues de Figueiredo (USP)**  
Dr. pela Universidade de São Paulo

**Prof. Holmer Savastano Júnior (USP)**  
Dr. pela Universidade de São Paulo

**Prof. Daniel Tregnago Pagnussat (UFRGS)**  
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

“Na vida, não vale tanto o que temos, nem importa tanto o que somos. Vale o que realizamos com aquilo que possuímos e, acima de tudo, importa o que fazemos de nós.”

Francisco Cândido Xavier

Dedico este trabalho de pesquisa à minha família e especialmente à minha avó Eloah Arraché Alves Henriques (*in memorian*), minha tia Anajara M. Alves Henriques (*in memorian*) e à minha eterna amada Ágatha (*in memorian*) as quais partiram durante a jornada deste trabalho, deixando muitas saudades aqui. E também à minha madrinha Thelma M. Alves Henriques pelo amor incondicional e apoio, sempre!

## **METADE**

*Que a força do medo que tenho  
Não me impeça de ver o que anseio;  
Que a morte de tudo em que acredito  
Não me tape os ouvidos e a boca;  
Porque metade de mim é o que eu grito,  
Mas a outra metade é silêncio...*

*Que a música que eu ouço ao longe  
Seja linda, ainda que tristeza;  
Que a mulher que eu amo seja pra sempre amada  
Mesmo que distante;  
Porque metade de mim é partida  
Mas a outra metade é saudade...*

*Que as palavras que eu falo  
Não sejam ouvidas como prece  
E nem repetidas com fervor,  
Apenas respeitadas como a única coisa que resta  
A um homem inundado de sentimentos;  
Porque metade de mim é o que ouço  
Mas a outra metade é o que calo...*

*Que essa minha vontade de ir embora  
Se transforme na calma e na paz que eu mereço;  
E que essa tensão que me corrói por dentro  
Seja um dia recompensada;  
Porque metade de mim é o que penso  
Mas a outra metade é um vulcão...*

*Que o medo da solidão se afaste  
E que o convívio comigo mesmo  
Se torne ao menos suportável;  
Que o espelho reflita em meu rosto  
Um doce sorriso que me lembro ter dado na infância;  
Porque metade de mim é a lembrança do que fui,  
A outra metade eu não sei...*

*Que não seja preciso mais do que uma simples alegria  
para me fazer aquietar o espírito  
E que o teu silêncio me fale cada vez mais;  
Porque metade de mim é abrigo  
Mas a outra metade é cansaço...*

*Que a arte nos aponte uma resposta  
Mesmo que ela não saiba  
E que ninguém a tente complicar  
Porque é preciso simplicidade para fazê-la florescer;  
Porque metade de mim é plateia  
E a outra metade é canção...*

*E que a minha loucura seja perdoada  
Porque metade de mim é amor  
E a outra metade... também.*

(Oswaldo Montenegro)

Em homenagem ao meu grande e eterno amigo Vinícius Vecchi Ângelo (*in memoriam*) - uma das pessoas mais sensacionais que conheci, convivi e aprendi junto, sendo de extrema relevância e influência na minha formação escolar - e a todas as mulheres marcantes da minha vida às quais tive o privilégio de conviver por curto, médio ou longo espaço de tempo e que, mesmo sem saberem, proporcionaram grande aprendizado, inspiração e, conseqüentemente, me trouxeram até aqui.

## RESUMO

HENRIQUES, T. S. **Influência da porosidade presente na interface fibra/matriz nas propriedades de desempenho de compósitos cimentícios reforçados com fibras metálicas.** 2023. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura (PPGCI). Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Porto Alegre.

No mercado nacional é possível encontrar diversos tipos de fibras, sendo que na construção civil as mais utilizadas são, principalmente, as metálicas. Além das características das matrizes e das próprias fibras, um maior aprofundamento técnico-científico sobre a interface fibra/matriz (zona de transição) pode ser considerado uma das principais oportunidades de pesquisa em busca de possíveis avanços tecnológicos. Foram executadas duas tecnologias de concreto (convencional e autoadensável), sendo que cada uma delas contou com quatro teores de fibras de aço: 0 kg/m<sup>3</sup> (testemunho), 10 kg/m<sup>3</sup>, 20 kg/m<sup>3</sup> e 30 kg/m<sup>3</sup>. Ou seja, o programa experimental contou com um total de oito famílias de concretos reforçados com fibras (CRF's). Foram realizados diversos ensaios de caracterização do compósito no estado fresco (massa específica, mesa Graff, *Slump Flow*, *Slump Test*, teor de ar incorporado, exsudação, cone invertido e VeBe) e endurecido (resistência à compressão, tenacidade através de tração na flexão em vigas com entalhe, impacto, módulo de elasticidade, absorção de água, índice de vazios e massa específica). Os resultados foram comparados com os dados de quantificação da porosidade das amostras através de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e tomografia computadorizada (TC). Para cada família de CRF foram obtidas 50 amostras para o ensaio de MEV (sendo o maior universo amostral para este tipo de ensaio em nível nacional) e 3 amostras para TC, sendo estas analisadas em equipamento hospitalar de última geração, com os corpos de prova em formato e tamanho originais (cilíndrico 10 cm x 20 cm), podendo também ser considerado como um método ainda pouco utilizado no país. Como principal diferença, enquanto o MEV avaliou a porosidade diretamente no entorno da fibra (através de método de fracionamento e preparação desenvolvidos exclusivamente nesta pesquisa), a TC quantificou os poros totais dos corpos de prova de maneira não destrutiva. Os resultados obtidos através de microscopia eletrônica e tomografia computadorizada demonstraram que não houve uma diferenciação estatisticamente significativa da porosidade presente tanto na zona de transição fibra/matriz quanto na própria matriz. Já as tecnologias das matrizes adotadas (convencional e autoadensável) antes da inserção das fibras demonstraram ser determinantes no comportamento das amostras. Portanto, esforços para melhorar características da zona de transição fibra/matriz tendem a não ter resultados significativos no desempenho, considerando especificamente as famílias de CRF's desenvolvidas e abordadas nesta pesquisa.

**Palavras-chave:** *Concreto reforçado com fibras; interface fibra/matriz; fibras de aço; MEV; tomografia computadorizada (TC).*

## ABSTRACT

HENRIQUES, T. S. **Influence of the porosity present at the fiber/matrix interface on the performance properties of cementitious composites reinforced with metallic fibers.** 2023. Ph.D. Thesis (Doctorate in Civil Engineering) – School of Engineering, Postgraduate Program in Civil Engineering: Construction and Infrastructure. Federal University of Rio Grande do Sul. Porto Alegre.

In the domestic market it is possible to find several types of fibers, and in civil construction the most used are mainly metallic ones. One of the main research opportunities is the study of the influence of the fiber/matrix interface on the mechanical and durability properties of fibrous cementitious composites. In addition to the characteristics of the matrices and the fibers themselves, a greater technical-scientific study of the fiber/matrix interface (transition zone) can be considered one of the main research opportunities for potential technological advances. Two concrete technologies (conventional and self-compacting) were implemented, each of which had four levels of metallic fibers: 0 kg/m<sup>3</sup> (testimony), 10 kg/m<sup>3</sup>, 20 kg/m<sup>3</sup> and 30 kg/m<sup>3</sup>. In other words, the experimental program had a total of eight fiber reinforced concrete (FRC) families. Several tests were carried out to characterize the composite in its fresh state (specific mass, Graff table, slump flow, slump test, incorporated air content, exudation, inverted cone and VeBe) and hardened (compressive strength, flexural tensile strength, impact, modulus of elasticity, water absorption, void index and specific mass). The results were compared with the sample porosity quantification data through scanning electron microscopy (SEM) and computed tomography (CT). For each family of CRF, 50 samples were obtained for the SEM test (the largest sample universe for this type of test at the national level) and 3 samples for CT, which were analyzed in state-of-the-art hospital equipment, with the specimens in original format and size (10 cm x 20 cm cylindrical), which can also be considered as a method that is still not widely used in the country. As a main difference, while the SEM assessed the porosity directly around the fiber (through fractionation and preparation method developed exclusively in this research), the CT quantified the total pores of the specimens in a non-destructive way. The results obtained through SEM and CT showed that there was no statistically significant difference in porosity present either in the fiber/matrix transition zone or in the matrix itself. On the other hand, the matrix technologies adopted (conventional and self-compacting) before the insertion of the fibers proved to be decisive in the behavior of the samples. Therefore, efforts to improve characteristics of the fiber/matrix transition zone tend not to have significant results in performance, specifically considering the families of FRC developed addressed in this research.

**Keywords:** *Fiber Reinforced concrete; fiber/matrix interface; steel fibers; SEM; computed tomography (CT).*

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1: Etapas de execução de CRF's para células prisionais: (A) Execução de mobiliário de GRC através de método autoadensável; (B) técnica *spray-up* com lançamento de camas sucessivas e compactação por rolo também utilizada para fabricação da mobília; (C) galeria prisional feita integralmente com CRF; (D) execução de acabamentos; (E) aspecto final com monobloco estrutural da galeria em CRF e mobiliário em GRC. ... 31
- Figura 2: Mercado de CRF – Taxa de crescimento por região, 2023-2028 (Fonte: [www.mordorintelligence.com/industry-reports/fiber-reinforced-concrete-frc-market](http://www.mordorintelligence.com/industry-reports/fiber-reinforced-concrete-frc-market), acesso em 30/10/2023). ..... 32
- Figura 3: (A); (B); (C) e (D) evolução do processo de arrancamento de fibra de aço em uma matriz polimérica de resina epóxi; (e) teste de configuração (WEILER e GROSSE, 1996). ..... 38
- Figura 4: Escorregamento das fibras no concreto e na resina epóxi com o aumento de carga (WEILER e GROSSE, 1996). ..... 38
- Figura 5: Detalhes dos arranjos para ensaio de arrancamento: (A) bloco simples; (B) bloco duplo; (C) dimensões utilizadas em ambos os arranjos (CARATIN E MARINUCCI, 2012). ..... 39
- Figura 6: Amostras posicionadas para o teste de arrancamento: (A) bloco único; (B) bloco duplo (CARATIN E MARINUCCI, 2012). ..... 40
- Figura 7: fases de construção de um ninho de João-de-barro: (A) início com auxílio de fibra; (B) fase inicial; (C) fase intermediária; (D) fase final. (HENRIQUES, 2013). ..... 47
- Figura 8: Etapas de uma peça de concreto convencional sob carregamento: (A) sem tensões; (B) sob estado inicial de tensões; (C) geração de fissuras e concentração de tensões nas extremidades (adaptado de NUNES e AGOPYAN, 1998). ..... 51
- Figura 9: Etapas de uma peça de concreto reforçada com fibras sob carregamento: (A) sem tensões; (B) sob estado inicial de tensões; (C) fibras trabalhando nas distribuições de tensões nas fissuras (adaptado de NUNES e AGOPYAN, 1998). ..... 52
- Figura 10: Descrição esquemática da relação de abertura de estresse-fissura para concreto simples e CRF: (A) relação tensão x alongamento; (B) esquema da ligação de estresse de acordo com região da fissura (LÖFGREN, 2005 *apud* AFROUGHSABET, 2016). ..... 52
- Figura 11: Ensaio de abatimento de tronco de cone: (A) sem a presença de fibras; (B) após a adição de fibras Kevlar (BERNARDI, 2003). ..... 53
- Figura 12: Distribuição no mercado brasileiro de fibras por tipo de aplicação no ano de 2009: (A) de aço e (B) macrofibras poliméricas (FIGUEIREDO, 2011 b). ..... 55
- Figura 13: Principais fibras de aço encontradas no mercado nacional: (A) retas; (B) retas com ganchos/ancoragem nas extremidades; (C) onduladas; (D) achatadas-onduladas. .... 58
- Figura 14: Características visuais das fibras de polipropileno: (A) microfibras lisas; (B) macrofibras corrugadas. .... 59
- Figura 15: Adição de fibras de aço em uma matriz cimentícia. .... 61
- Figura 16: diagrama de tensão por deformação elástica de matriz e fibras de alto e baixo módulo de elasticidade trabalhando em conjunto (FIGUEIREDO, 2011b). ..... 63

Figura 17: Resultado da aglomeração de fibras: (A) formação de ouriços; (B) diminuição significativa da trabalhabilidade em ensaio de abatimento (BARMAN, 2018).	66
Figura 18: Diagrama esquemático das interrelações entre fatores influenciadores e propriedades dos CRF's.	72
Figura 19: Esquema dos principais parâmetros influenciadores nas principais propriedades de CRF's.	72
Figura 20: Compósitos reforçados com fibras em teores abaixo (A), acima (B) e igual (C) ao volume crítico de fibras durante o ensaio de tração na flexão (FIGUEIREDO, 2000).	74
Figura 21: Curva tensão x deformação do compósito (Bentur e Mindess, 2007).	75
Figura 22: Modelo utilizado para representar o processo de arrancamento de uma fibra (Bentur e Mindess, 2007).	76
Figura 23: Concreto reforçado com fibras onde há compatibilidade dimensional entre elas e o agregado graúdo (FIGUEIREDO, 2000).	79
Figura 24: Concreto reforçado com fibras onde não há compatibilidade dimensional entre elas e o agregado graúdo (FIGUEIREDO, 2000).	79
Figura 25: MEV por elétrons secundários da aglutinação de FOP com indicação de presença de vazios na interface fibra/matriz. Magnificação: 160 vezes (HENRIQUES, 2013).	83
Figura 26: Análise microestrutural de fibra de vidro: (A) interfaces fracamente ligadas; (B) interfaces fortemente ligadas (SHACKELFORD, 2008).	84
Figura 27: Representação da tensão de tração ao longo de uma fibra: (A) fibra 'curta'; (B) fibra "longa" (SHACKELFORD, 2008).	85
Figura 28: Comportamentos de CRF's à compressão com diferentes teores de fibras (BENTUR E MINDESS, 2007).	86
Figura 29: Anisotropia quanto à tenacidade segundo a direção de compressão no concreto projetado (ARMELIN e HELENE, 1995 <i>apud</i> FIGUEIREDO, 2000).	87
Figura 30: Comportamento carga-deflexão dos concretos simples e reforçado com fibras (MEHTA e MONTEIRO, 2008).	93
Figura 31: Curva 'carga x deslocamento', indicando valores de deslocamento a fim de calcular os índices de tenacidade segundo a ASTM C 1018/97 (QUININO, 2015).	94
Figura 32: Típica curva de deformação ( $\delta$ ) para tensão axial ( $P$ ) para CRF: (A) comportamento pós-fissuração softening; (B) comportamento pós-fissuração hardening. ( <i>fib</i> MODEL CODE, 2010).	97
Figura 33: Principais diferenças entre o concreto convencional e o reforçado com fibras tendo, ambos, normal e alta resistência sob compressão uniaxial ( <i>fib</i> MODEL CODE, 2010).	98
Figura 34: Configuração do ensaio requerido pela EN 14651 (2007) com dimensões em mm.	98
Figura 35: Carga típica F – CMOD curva para CC e para CRF ( <i>fib</i> MODEL CODE, 2010).	99
Figura 36: Representação gráfica do CMOD (abertura de entalhe).	99
Figura 37: (A) Corpo de prova em formato de "osso de cão" ( <i>dog-bone</i> ); (B) Aparato necessário para a fixação do espécime <i>dog-bone</i> para ensaio de tração direta (SUKONTASUKKUL, 2004 <i>apud</i> BORGES, 2017).	103

Figura 38: (A) Composição básica do molde padrão para o corpo de prova em forma de haltere; (B) Fotografia de molde padrão utilizado na produção de espécimes de geometria <i>dog-bone</i> (SUKONTASUKKUL, 2004 <i>apud</i> BORGES, 2017). .....	104
Figura 39: Diagrama esquemático dos principais ensaios de tração indireta para CRF's.....	105
Figura 40: (A) Representação do ensaio de punção de placas (EFNARC, 1996); (B) Proposta de modificação do ensaio EFNARC com a introdução do LVDT (FIGUEIREDO, 2011 b).....	106
Figura 41: Posicionamento de corpo de prova, LVDT e cutelos no ensaio de tração na flexão de prismas com o sistema “yoke” (FIGUEIREDO, 1999). .....	107
Figura 42: Ensaio de módulo de elasticidade, realizado com o auxílio de dois transdutores tipo LVDT (GARCEZ, 2005).....	110
Figura 43: Detalhe da placa de CRF no equipamento (com deflectômetro) de ensaio de queda de esfera maciça (BERNARDI, 2003).....	111
Figura 44: Ensaio com cone invertido, sendo o CRF adensado com vibrador de imersão (ASTM C995-1, 2001).....	114
Figura 45: Equipamento para ensaio VeBe, de acordo com o ACI Committee 211.3R-02 (ACI, 2009).....	114
Figura 46: Características superficiais de fibras de carbono: (A) estriadas; (B) lisas; (C) em forma de rim (MARINUCCI, 2011). .....	116
Figura 47: Binarização, através de imagem eletrônica retroespalhada, da porosidade gerada dentro de um perímetro de 270µm a partir da superfície da fibra de aço (HWANG <i>et al.</i> , 2015).....	118
Figura 48: Porosidade gerada ao redor da fibra de aço e o seu correspondente volume calculado para o corpo de prova (HWANG <i>et al.</i> , 2015). .....	118
Figura 49: Fluxograma resumo do programa experimental. ....	126
Figura 50: Resultado, no estado endurecido, do acúmulo de fibras em CP's com 40 kg/m <sup>3</sup> durante definição do programa experimental. ....	128
Figura 51: Diagrama de matriz experimental. ....	129
Figura 52: Ensaio de tração na fibra de aço: (A) equipamento utilizado; (B) fibra sendo tracionada.....	137
Figura 53: Gráfico médio de rompimento (exemplo da amostra 3). .....	138
Figura 54: Fibras utilizadas na pesquisa: (A) tamanho comparativo com uma caneta esferográfica; (B) medição com um paquímetro digital. ....	139
Figura 55: Fibras utilizadas na pesquisa (Catálogo Dramix). ....	139
Figura 56: Diagrama esquemático das duas famílias de concreto adotadas.....	142
Figura 57: Passo-a-passo para dosagem do CAA (TUTIKIAN, 2004).....	143
Figura 58: “Traço padrão” do concreto utilizado (em massa).....	143
Figura 59: Betoneira de eixo vertical do LAMTAC utilizada para a execução dos concretos em todas as etapas da pesquisa. ....	145

- Figura 60: Execução do ensaio de consistência através da Mesa Graff: (A) nivelamento do aparato; (B) adensamento com soquete de madeira; (C) medição dos dois diâmetros ortogonais entre si e paralelos à mesa; (D) aparência final do ensaio. .... 146
- Figura 61: Execução do ensaio de espalhamento pelo cone de Abrams para o grupo de CRF-AA, segundo a NBR 15823-2 (ABNT, 2017): (A) base composta por chapa de aço galvanizado; (B) espalhamento da mistura; (C) medição dos diâmetros através de régua metálica; (D) observação visual da mistura coesa e sem segregação. .... 146
- Figura 62: Execução do ensaio de teor de ar incorporado segundo a NBR 16887 (ABNT, 2020): (A) rasamento da superfície; (B) fechamento do aparato; (C) pressurização do sistema. .... 148
- Figura 63: Execução do ensaio de exsudação, segundo a NBR 15558 (ABNT, 2008): (A) compactação das misturas de CRF-C; (B) obtenção da água exsudada; (C) pesagem da água de exsudação. .... 149
- Figura 64: Detalhe de ensaio para a família CRF-C - 10 kg/m<sup>3</sup>: (A) início; (B) fim de medição. .... 149
- Figura 65: Método de posicionamento do cone invertido no balde (ASTM C995-1, 2001).. 151
- Figura 66: Execução do ensaio adaptado de consistência pelo cone invertido, tendo como base o método descrito na C 995-1 (ASTM, 2001): (A) montagem do aparato; (B) preenchimento do cone invertido; (C) aparência após a etapa de vibração. .... 152
- Figura 67: Esquema do ensaio VeBe: (A) moldagem do cone; (B) apoio do disco de acrílico sobre o tronco de cone desmoldado e vibração posterior; (C) término do ensaio quando o disco de acrílico fica integralmente em contato com o concreto. .... 153
- Figura 68: Etapas de preparação do ensaio de trabalhabilidade pelo VeBe: (A) aparato completo utilizado; (B) calibração da carga aplicada com o disco de acrílico sobre as amostras durante o período de vibração; (C) especificação do motor utilizado. .... 154
- Figura 69: Execução do ensaio de consistência/fluidez através do VeBe, de acordo com o guia norte-americano ACI Committee 211.3R-02 (ACI, 2009): (A) desmoldagem do cone invertido; (B) posicionamento do disco de acrílico juntamente com peso específico sobre a mistura; (C) aparência final após término do ensaio. .... 155
- Figura 70: Etapas do processo de moldagem do CP's cilíndricos: (A) separação e pesagem dos insumos; (B) preenchimento da 1ª metade dos corpos de prova, já com a presença de desmoldante, e vibração por 10s; (C) preenchimento da 2ª metade e vibração por mais 10s; (D); (E) retirada manual das fibras acumuladas no topo dos moldes; (F) rasamento com colher de pedreiro; (G) disposição inicial dos moldes com lona plástica nas primeiras 24hs a fim de manter um mínimo de microclima de umidade controlados; (H) desmoldagem e identificação com caneta permanente, após 24hs; (I) disposição dos CP's em câmara com umidade ( $\geq 95\%$ ) e temperatura controlada (23 + 2°C) até a data dos ensaios propostos. .... 157
- Figura 71: Diagrama esquemático do ordenamento feito para os ensaios de resistência à compressão e módulo de elasticidade. .... 159
- Figura 72: Execução do ensaio do módulo de elasticidade à compressão segundo a NBR 8522-1 (ABNT, 2021): (A) posicionamento do CP na prensa hidráulica; (B) ciclo de carregamento e descarregamento; (C) rompimento final à compressão. .... 160
- Figura 73: Execução do ensaio, adaptado, de resistência ao impacto: (A) aparato completo montado com empilhadeira mecânica; (B) escala impressa em papel e fixada no

equipamento para determinação da altura de queda da esfera metálica em relação ao CP; (C) dispositivo com imã para fixação e liberação da esfera metálica; (D) apoio de madeira do suporte até o piso com o objetivo de evitar a sua deformação com os sucessivos impactos submetidos.....	162
Figura 74: CP da família CRF-C 0 kg/m <sup>3</sup> após o ensaio de resistência ao impacto.....	163
Figura 75: CP da família CRF-C (com 10 kg/m <sup>3</sup> ) no ensaio de resistência ao impacto: (A) esquema do suporte montado para o rompimento das amostras; (B) face inferior da amostra com grandes trincas causadas pelo predomínio de tensões de tração; (C) face lateral do CP com fissura facilmente visível; (D) face superior do CP a qual recebeu diretamente o impacto da esfera metálica.....	164
Figura 76: Entalhe sendo realizado nos CP's antes do ensaio de rompimento na flexão.....	165
Figura 77: Espessura média dos entalhes executados nos corpos de prova. ....	166
Figura 78: Extensômetro eletrônico EMIC, modelo EE09 – especificações técnicas.....	166
Figura 79: Aparato desenvolvido para medição da abertura de entalhe em vigas de CRF: (A) extensômetro eletrônico utilizado para medição de CMOD; (B) fixação das cantoneiras metálicas nas vigas; (C) fixação do extensômetro através de eletroímã e articulações metálicas; (D) ajuste firme final para medição do CMOD; (E) conjunto total do modelo de ensaio adaptado, inclusive com totem para posicionamento da câmera utilizada. ....	167
Figura 80: Método de aquisição de dados para medição de abertura de entalhe em vigas de CRF: (A) diagrama esquemático do método; (B) simulação numérica para o <i>clip-gage</i> desenvolvido; (C) instalação de leitores do tipo <i>strain gages</i> no artefato; (D) calibração final do <i>clip-gage</i> (QUININO, 2015).....	169
Figura 81: Exemplos executados: (A), (B), (C) evolução progressiva da fissura para CRF-AA com 10 kg/m <sup>3</sup> ; (D), (E), (F) evolução progressiva da fissura para e CRF-C com 30 kg/m <sup>3</sup> .....	170
Figura 82: QR code com vídeos dos rompimentos dos CP's testemunhos para ambas as tecnologias de concreto (CRF-AA e CRF-C).....	171
Figura 83: Ruptura brusca à flexão dos CP's testemunho (famílias CRF-C e CRF-AA). ....	171
Figura 84: Fibras atuando como pontes de transferências de tensões na fissura induzida. ....	172
Figura 85: MEV (por elétrons secundários) de uma amostra de concreto convencional: (A) magnificação de 1000 vezes; (B) magnificação de 5000 vezes. (Fonte: acervo próprio) .....	174
Figura 86: MEV (por elétrons retroespalhados) de uma amostra de concreto convencional: (A) imagem original; (B) ilustração das fases. (Fonte: acervo próprio) .....	175
Figura 87: Fracionamento primário: (A) aparato de suporte para corte desenvolvido; (B) e (C) corte dos CP's cilíndricos; (D) resultado final com 'bolachas/discos' de CRF's.....	178
Figura 88: Fracionamento secundário: (A) demarcação da área; (B) execução do novo corte; (C) resultado da amostra extraída; (D) aparência final das amostras prismáticas com dimensões aproximadas de 30 x 20 x 10 mm. ....	179
Figura 89: Etapa de impregnação das amostras cimentícias em resina epóxi: (A) separação de cada família; (B) imersão em álcool isopropílico; (C) impregnação com resina epóxi com auxílio de vácuo; (D) resultado final. ....	181

Figura 90: Falha de impregnação de resina epóxi em amostras de CRF's.....	182
Figura 91: Equipamentos/aparatos utilizados para o polimento das amostras: (A; B) politriz tipo cinta; (C) politriz tipo circular; (D) 'bandeja' de polimento manual. ....	183
Figura 92: Etapas de preparação das amostras para análise: (A) após endurecimento da resina epóxi; (B) após retirada do molde; (C) após o desbaste na lixa mais grossa (grão 80). ....	184
Figura 93: Comparativo 'antes-depois', considerando todas as etapas de polimento sobre uma mesma amostra: (A) fibra antes do procedimento de abrasão; (B) representação esquemática da fibra em topo, após o corte; (C) fibra após todas etapas de polimento; (D) representação esquemática após processo abrasivo completo. ....	185
Figura 94: Equipamento utilizado para realizar as análises de MEV e EDS pertencente ao LDSM da UFRGS.....	186
Figura 95: detalhe de uma amostra com uma bolha de ar no entorno da fibra metálica. ....	188
Figura 96: Imagem do site do fabricante do modelo de equipamento de TC Discovery PET/CT 600 utilizado nos ensaios. (Fonte: <a href="https://www.gehealthcare.com/courses/discovery-petct-600">https://www.gehealthcare.com/courses/discovery-petct-600</a> , acessado em 05/01/2021) ....	188
Figura 97: Realização de análises por TC nas amostras de CRF's. ....	189
Figura 98: Massa específica aparente. ....	192
Figura 99: Diâmetros médios de espalhamento na <i>Mesa Graff</i> .....	195
Figura 100: Espalhamento – método pelo <i>Slump Flow</i> . ....	197
Figura 101: Abatimento – método pelo <i>Slump Test</i> . ....	200
Figura 102: Teor de ar incorporado aparente. ....	203
Figura 103: Exsudação de água dos CRF-C e CRF-AA. ....	205
Figura 104: Consistência pelo cone invertido. ....	207
Figura 105: Consistência/fluidez pelo VeBe. ....	209
Figura 106: Resistência média à compressão dos corpos de prova aos 28 dias. ....	215
Figura 107: Resistência à compressão - comparação das médias de “Tecnologia do Concreto”. ....	216
Figura 108: Resistência à compressão - comparação das médias de “Teor de Fibras” para CRF-C.....	217
Figura 109: Resistência à compressão - comparação de médias de “Teor de Fibras” para CRF-AA.....	217
Figura 110: Módulo médio de elasticidade dos corpos de prova aos 28 dias. ....	220
Figura 111: Módulo de elasticidade: comparação das médias de “Tecnologia do Concreto”. ....	221
Figura 112: Resistência média ao impacto dos corpos de prova aos 28 dias. ....	226
Figura 113: Resistência ao impacto: comparação de médias de “Teor de Fibras”.....	227
Figura 114: Resistência residual à flexão: gráfico modelo de carga x CMOD (EN 14651/07). ....	229

Figura 115: Diagramas exemplo de carga-CMOD e $F_L$ (EN 14651, 2007). .....	230
Figura 116: CRF-C (0 kg/m <sup>3</sup> ): relação ‘carga x CMOD’ .....	230
Figura 117: CRF-C (10 kg/m <sup>3</sup> ): relação ‘carga x CMOD’ .....	231
Figura 118: CRF-C (20 kg/m <sup>3</sup> ): relação ‘carga x CMOD’ .....	231
Figura 119: CRF-C (30 kg/m <sup>3</sup> ): relação ‘carga x CMOD’ .....	231
Figura 120: CRF-AA (0 kg/m <sup>3</sup> ): relação ‘carga x CMOD’ .....	232
Figura 121: CRF-AA (10 kg/m <sup>3</sup> ): relação ‘carga x CMOD’ .....	232
Figura 122: CRF-AA (20 kg/m <sup>3</sup> ): relação ‘carga x CMOD’ .....	232
Figura 123: CRF-AA (30 kg/m <sup>3</sup> ): relação ‘carga x CMOD’ .....	233
Figura 124: Tenacidade - comparação de médias de “Tecnologia do Concreto”. .....	235
Figura 125: Tenacidade - comparação das médias de “Teor de Fibras” para CRF-C.....	236
Figura 126: Tenacidade: comparação das médias de “Teor de Fibras” para CRF-A.....	236
Figura 127: Tenacidade média dos corpos de prova aos 7 meses. ....	237
Figura 128: Correlação entre a resistência residual em $CMOD_1 = 0,50$ mm e o teor de fibras. .....	244
Figura 129: Correlação entre a resistência residual em $CMOD_4 = 3,50$ mm e o teor de fibras. .....	244
Figura 130: Absorção média de água dos corpos de prova. ....	248
Figura 131: Absorção de água: comparação de médias de “Tecnologia do Concreto”. .....	248
Figura 132: Índice médio de vazios dos corpos de prova. ....	251
Figura 133: Índice de vazios: comparação de médias de “Teor de Fibras” para CRF-C.....	252
Figura 134: Índice de vazios: comparação de médias de “Teor de Fibras” para CRF-AA....	252
Figura 135: Massa média específica real dos corpos de prova.....	255
Figura 136: Massa específica real: comparação de médias de “Teor de Fibras”. .....	256
Figura 137: Diagrama/matriz esquemática dos três tipos de análises estatísticas de dados de porosidade obtidos por MEV.....	259
Figura 138: Porosidade na Z.T. quantificada através de MEV. ....	260
Figura 139: Porosidade na Z.T. quantificada através de MEV - comparação de médias de “Teor de Fibras” para CRF-C. ....	261
Figura 140: Porosidade na Z.T. quantificada através de MEV - comparação de médias de “Teor de Fibras” para CRF-AA. ....	262
Figura 141: Comparação de médias, fixando “Teor de Fibras” em 10 kg/m <sup>3</sup> e “Tecnologia do Concreto” em CRF-C. ....	264
Figura 142: Comparação de médias, fixando “Teor de Fibras” em 20 kg/m <sup>3</sup> e “Tecnologia do Concreto” em CRF-C. ....	264
Figura 143: Comparação de médias, fixando “Teor de Fibras” em 30 kg/m <sup>3</sup> e “Tecnologia do Concreto” em CRF-C. ....	265

Figura 144: Comparação de médias, fixando “Teor de Fibras” em 10 kg/m <sup>3</sup> e “Tecnologia do Concreto” em CRF-AA. ....	266
Figura 145: Comparação de médias, fixando “Teor de Fibras” em 20 kg/m <sup>3</sup> e “Tecnologia do Concreto” em CRF-AA. ....	266
Figura 146: Comparação de médias, fixando “Teor de Fibras” em 30 kg/m <sup>3</sup> e “Tecnologia do Concreto” em CRF-AA. ....	266
Figura 147: Porosidade média dos corpos de prova através de TC.....	270
Figura 148: Porosidade total das amostras através de T.C.: comparação de médias de “Tecnologia do Concreto”. ....	270
Figura 149: Comparativo da porosidade média dos corpos de prova através de MEV e T.C. ....	271
Figura 150: QR Code com vídeo demonstrativo de uma análise de CRF com base nos dados obtidos por TC nesta pesquisa. ....	271

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Síntese de algumas pesquisas, em nível nacional, correlacionando o resultado do ensaio de abatimento por <i>slump-test</i> de CRF's e outras variáveis.....	54
Tabela 2: Caracterização dos diferentes tipos de fibras utilizadas como reforço e das matrizes cimentícias (BENTUR E MINDESS, 2007). .....	60
Tabela 3: Faixa de proporções para concreto reforçado com fibra de aço de peso normal ( <i>adaptado de ACI 544 – 1R, 2002</i> ). .....	71
Tabela 4: Caracterização* física do cimento CP V-ARI.....	131
Tabela 5: Caracterização* química do cimento CP V-ARI.....	131
Tabela 6: Caracterização* mecânica do cimento CP V-ARI. ....	131
Tabela 7: Caracterização física do agregado miúdo.....	132
Tabela 8: Caracterização física da areia fina.....	133
Tabela 9: Composição granulométrica do agregado graúdo de acordo com NBR 17054 (ABNT, 2022). .....	134
Tabela 10: Caracterização de massa específica, absorção de água, índice de forma, resistência ao esmagamento, abrasão Los Angeles e teor de umidade dos agregados graúdos. ..	135
Tabela 11: Caracterização* físico-química do aditivo. ....	136
Tabela 12: Valores médios do Sistema Geral de Distribuição* ( <i>Fonte: <a href="http://www2.portoalegre.rs.gov.br/dmae/default.php?reg=21&amp;p_secao=433">http://www2.portoalegre.rs.gov.br/dmae/default.php?reg=21&amp;p_secao=433</a></i> ). .....	136
Tabela 13: Ensaio individuais de resistência à tração das fibras de aço .....	138
Tabela 14: Resumo das propriedades das fibras de aço utilizadas* .....	140
Tabela 15: Informação técnica do vibrador e motor utilizados. ....	152
Tabela 16: Exemplo fidedigno dos procedimentos de moldagens de todos os CP's do programa. ....	156
Tabela 17: Caracterização* da resina epóxi adotada.....	179
Tabela 18: Especificações utilizadas no tomógrafo para obtenção das imagens/fatias.....	190
Tabela 19: Resultados obtidos para a massa específica aparente no estado fresco.....	192
Tabela 20: Resultados encontrados na literatura para massa específica aparente dos CRF's. ....	194
Tabela 21: Resultados obtidos para consistência na Mesa Graff. ....	195
Tabela 22: Resultados encontrados na literatura para espalhamento na <i>Mesa Graff</i> dos CRF's. ....	196
Tabela 23: Espalhamento pelo cone de Abrams ( <i>Slump Flow</i> ).....	197
Tabela 24: Resultados encontrados na literatura para espalhamento por <i>Slump Flow</i> dos CRF's.....	199
Tabela 25: Abatimento do tronco de cone ( <i>Slump Test</i> ). ....	200

Tabela 26: Resultados encontrados na literatura para abatimento por <i>Slump Test</i> dos CRF's.	202
Tabela 27: Teor de ar incorporado.	203
Tabela 28: Resultados encontrados na literatura para teor de ar incorporado dos CRF's.	204
Tabela 29: Exsudação dos concretos.	205
Tabela 30: Resultados encontrados na literatura para exsudação dos CRF's.	206
Tabela 31: Consistência/fluidez pelo cone invertido.	207
Tabela 32: Resultados encontrados na literatura para a consistência pelo cone invertido dos CRF-C.	208
Tabela 33: Consistência/fluidez pelo método VeBe.	209
Tabela 34: Resultados encontrados na literatura para fluidez pelo método VeBe dos CRF's.	210
Tabela 35: Resultados (ou médias destes) dos ensaios realizados nos CRF's no estado fresco.	212
Tabela 36: Resistência média à compressão dos corpos de prova aos 28 dias.	214
Tabela 37: ANOVA da resistência à compressão dos corpos de prova aos 28 dias.	215
Tabela 38: Resultados encontrados na literatura para resistência à compressão dos CRF's.	218
Tabela 39: Módulo de elasticidade médio dos corpos de prova aos 28 dias.	219
Tabela 40: ANOVA do módulo de elasticidade dos corpos de prova aos 28 dias.	220
Tabela 41: Resultados encontrados na literatura para módulo de elasticidade dos CRF's.	222
Tabela 42: Referência para quantificação de energia necessária para rompimento dos corpos de prova ao impacto.	225
Tabela 43: Resistência média ao impacto dos corpos de prova aos 28 dias.	225
Tabela 44: ANOVA da resistência ao impacto dos corpos de prova aos 28 dias.	226
Tabela 45: Resultados encontrados na literatura para resistência ao impacto dos CRF's.	228
Tabela 46: Tenacidade média dos corpos de prova aos 7 meses.	234
Tabela 47: ANOVA da tenacidade dos corpos de prova aos 7 meses.	234
Tabela 48: Resultados encontrados na literatura para tenacidade (área sob a curva de deformação) dos CRF's.	238
Tabela 49: $f_L$ médio dos corpos de prova aos 7 meses.	240
Tabela 50: Resistência residual média no ponto $CMOD_1$ (0,5 mm de abertura de fissura) dos corpos de prova aos 7 meses.	240
Tabela 51: Resistência residual média no ponto $CMOD_4$ (3,5 mm de abertura de fissura) dos corpos de prova aos 7 meses.	241
Tabela 52: Relações entre os valores característicos de limite de proporcionalidade ( $f_{Lk}$ ), resistência residual em $f_{R,1k}$ e $f_{R,3k}$ , de acordo com <i>fib Model Code</i> (2010).	242
Tabela 53: Classificação de desempenho dos CRF's em um estado 'pós-fissuração', segundo os critérios adotados no <i>fib Model Code</i> (2010).	243

Tabela 54: Resultados encontrados na literatura para tenacidade dos CRF's pelo método da EN 14651/07.....	245
Tabela 55: Absorção média de água dos corpos de prova aos 28 dias.....	247
Tabela 56: ANOVA da absorção de água dos corpos de prova. ....	247
Tabela 57: Resultados encontrados na literatura para absorção de água de concretos (sem fibras) com características majoritariamente convencionais. ....	249
Tabela 58: Índice médio de vazios dos corpos de prova aos 28 dias. ....	250
Tabela 59: ANOVA do índice de vazios dos corpos de prova.....	250
Tabela 60: Resultados encontrados na literatura para índice de vazios de concretos (sem fibras) com características majoritariamente convencionais. ....	253
Tabela 61: Massa específica real média dos corpos de prova aos 28 dias. ....	254
Tabela 62: ANOVA da massa específica real dos corpos de prova. ....	254
Tabela 63: Resultados encontrados na literatura para massa específica de concretos (sem fibras) com características majoritariamente convencionais. ....	256
Tabela 64: Quantificação proporcional média de poros/vazios nas regiões de interesse.....	258
Tabela 65: ANOVA da porosidade na zona de transição fibra/matriz. ....	260
Tabela 66: ANOVA da porosidade na Z.T. e na matriz. ....	263
Tabela 67: Quantidade média de vazios (através de TC) dos corpos de prova. ....	269
Tabela 68: ANOVA da porosidade na zona de transição dos corpos de prova através de TC. ....	269
Tabela 69: Resultados (ou médias destes) dos ensaios realizados nos CRF's no estado endurecido.....	272

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Exemplos de algumas aplicações práticas atuais de CRF's. ....	28
Quadro 2: Síntese cronológica (até o final da década de 90) de algumas das principais pesquisas que abordaram a influência das fibras adicionadas em compósitos cimentícios ( <i>adaptado de SAVASTANO, 1992</i> ). ....	33
Quadro 3: Questionamento sobre lacuna de conhecimento existente (ponto de origem desta pesquisa). ....	35
Quadro 4: Exemplos das principais normas e boletins técnicos específicos para CRF's existentes fora do Brasil. ....	56
Quadro 5: Vantagens e desvantagens no uso do método de cone invertido ( <a href="http://civil-online2010.blogspot.com/2010/09/inverted-slump-cone-test.html">http://civil-online2010.blogspot.com/2010/09/inverted-slump-cone-test.html</a> , <i>acessado em 20/12/2021</i> ). ....	68
Quadro 6: Principais contribuições publicadas sobre as propriedades dos CRF's no estado fresco. ....	69
Quadro 7: Características que influenciam a transferência das tensões entre a matriz e as fibras Gomes (2005). ....	82
Quadro 8: Cronologia de pesquisas mais recentes (desde o ano 2000) que abordaram a influência da zona de transição das fibras no comportamento geral dos CRF's. ....	119
Quadro 9: Resumo dos ensaios mais importantes em CRF's encontrados na literatura e justificativa para adoção no programa experimental. ....	124
Quadro 10: Métodos aplicados para caracterização dos componentes utilizados nos CRF's. ....	130
Quadro 11: Métodos aplicados para caracterização dos CRF's no estado fresco. ....	140
Quadro 12: Ensaios adotados para a avaliação das amostras de CRF's aos 28 dias. ....	158
Quadro 13: Resumo dos ensaios adotados para a avaliação da zona de transição fibra-matriz. ....	177
Quadro 14: "Esquematização" cronológica das etapas de fracionamento e preparação das amostras de CRF's para análise em MEV. ....	187
Quadro 15: Comparativo entre os CRF-C e CRF-AA das propriedades no estado fresco. ....	213
Quadro 16: Exemplo das delimitações das regiões dos CRF's analisadas por MEV. ....	257
Quadro 17: Resumo dos resultados estatísticos comparativos para as interações abordadas. ....	267
Quadro 18: Quantificação da porosidade total, através de dados fornecido por T.C., da amostra CRF-AA 30 kg/m <sup>3</sup> - CP nº 7. ....	268
Quadro 19: Comparativo entre os CRF-C e CRF-AA das melhores propriedades no estado endurecido. ....	274

## LISTA DE ABREVIATURAS

a/c – relação água/cimento

a/agl – relação água/aglomerante

ABECE - Associação Brasileira de Engenharia e Consultoria Estrutural

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ACI - *American Concrete Institute*

ASTM – *American Society for Testing and Materials*

Ca(OH) – Hidróxido de Cálcio

CAA – Concreto Autoadensável

CCV – Concreto Convencional

CRF-AA – Concreto Reforçado com Fibras Autoadensável

CRF-CC – Concreto Reforçado com Fibras Convencional

CMM – Centro de Microscopia e Microanálise

CMOD – *Crack Mouth Opening Displacement* ou Abertura de Boca de Fissura

CP – Corpo de prova

CPRF – Concreto projetado reforçado com fibras

CRF – Concreto reforçado com fibras

DMAE - Departamento Municipal de Água e Esgotos de Porto Alegre

EDS - Espectroscopia de Raios X por Dispersão em Energia

ELS – Estado Limite de Serviço

FOP – Fibra óptica polimérica

GRC – *Glass Reinforced Concrete*

IBRACON - Instituto Brasileiro do Concreto

LAMEF – Laboratório de Metalurgia Física

LAMTAC - Laboratório de Materiais e Tecnologia do Ambiente Construído

LEME - Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais

LDSM – Laboratório de Design e Seleção de Materiais

LiTraCon - *Light Transmitting Concrete*

L/d – Relação de aspecto (comprimento/diâmetro)

LOP – *Limit of Proportionality*

LVDT – *Linear Voltage Differential Transducer*

MBC - Material com base cimentícia

MBCRF – Material com base cimentícia reforçado com fibras

MEV – Microscópio eletrônico de varredura

MO – Microscópio óptico

N/A – Não aplicável

NORIE – Núcleo Orientado de Inovação na Edificação

PP – Polipropileno

PPGCI - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura

PUNDIT – *Portable Ultrasonic Non-destructive Digital Indicating Tester*

SI - Sistema Internacional de Unidades

TC – Tomografia Computadorizada

TTD – Tomografia Tridimensional

ELU – Estado Limite Último

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

USP – Universidade de São Paulo

ZT – Zona de transição

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>27</b>
1.1	JUSTIFICATIVA DO TEMA, CONTEXTUALIZAÇÃO CRONOLÓGICA DE PESQUISAS NA ÁREA E LACUNA DE CONHECIMENTO	32
1.2	ORIGINALIDADE	37
1.3	QUESTÕES DE PESQUISA, OBJETIVOS E DIRETRIZES	41
1.3.1	Objetivo principal	41
1.3.2	Objetivos secundários	42
1.3.3	Diretrizes	42
1.4	ESTRUTURA DA TESE	42
<b>2</b>	<b>A EVOLUÇÃO DOS MATERIAIS CIMENTÍCIOS COM FIBRAS: FUNDAMENTAÇÃO</b>	<b>44</b>
2.1	FIBRAS: BREVE HISTÓRICO E DEFINIÇÕES	46
2.2	CRF: DEFINIÇÕES, APLICAÇÕES E COMPORTAMENTO GERAL	49
2.3	PANORAMA GERAL DO CRF NO BRASIL E NO MUNDO	55
2.4	TIPOS DE FIBRAS	57
2.5	RESISTÊNCIA MECÂNICA E MÓDULO DE ELASTICIDADE DAS FIBRAS	61
<b>3</b>	<b>COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS REFORÇADOS COM FIBRAS: APROFUNDAMENTOS</b>	<b>65</b>
3.1	O CRF NO ESTADO FRESCO	66
3.2	O CRF NO ESTADO ENDURECIDO	71
3.2.1	Parâmetros que influenciam as propriedades (CRF no estado endurecido)	72
3.2.1.1	Matriz cimentícia	73
3.2.1.2	Fibras: teor e volume crítico	73
3.2.1.3	Fibras: geometria	77
3.2.1.4	Fibras: distribuição e orientação	80
3.2.1.5	Zona de transição fibra/matriz	81
3.2.2	Propriedades (CRF no estado endurecido)	85
3.2.2.1	Resistência à compressão	85
3.2.2.2	Resistência à tração	87
3.2.2.3	Resistência ao impacto	88
3.2.2.4	Durabilidade	89
3.2.2.5	Fadiga	91
3.2.2.6	Tenacidade	92
3.3	ABNT NBR 16935/2021	95
3.4	O FIB MODEL CODE PARA CRF's	95
3.4.1	Diferenciação quanto ao comportamento <i>hardening</i> e <i>softening</i>	96

3.4.2	Comportamento à compressão.....	97
3.4.3	Comportamento à tração.....	98
3.4.4	Classificação.....	100
3.5	PRINCIPAIS ENSAIOS PARA CRF's ENCONTRADOS NA LITERATURA.....	102
3.5.1	Tração direta (uniaxial).....	102
3.5.2	Tração indireta/tenacidade.....	104
3.5.2.1	Ensaio de flexão de placas.....	106
3.5.2.2	Ensaio de flexão de prismas (norma japonesa - sem entalhe).....	107
3.5.2.3	Ensaio de flexão de prismas (norma europeia - com entalhe).....	108
3.5.3	Módulo de Elasticidade.....	109
3.5.4	Impacto.....	110
3.5.5	Compressão axial simples.....	112
3.5.6	Absorção de água, índice de vazios, massa específica.....	112
3.5.7	Trabalhabilidade.....	113
3.6	AVALIAÇÃO DA INTERFACE FIBRA/MATRIZ.....	115
3.7	PESQUISAS RECENTES SOBRE A ZONA DE TRANSIÇÃO FIBRA/MATRIZ....	116
3.8	CONTEXTO GERAL DAS DIRETRIZES TOMADAS PARA A ELABORAÇÃO DO PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	121
<b>4</b>	<b>PROGRAMA EXPERIMENTAL.....</b>	<b>123</b>
4.1	ESCOPO DA PESQUISA E FLUXOGRAMA RESUMO DO PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	125
4.2	MÉTODO DE PESQUISA.....	127
4.2.1	Fatores fixos adotados.....	127
4.2.2	Fatores variáveis adotados.....	128
4.3	ETAPA 1: CARACTERIZAÇÃO DOS INSUMOS.....	129
4.3.1	Cimento.....	130
4.3.2	Agregado miúdo (areia média).....	132
4.3.3	Areia fina.....	132
4.3.4	Agregado graúdo.....	133
4.3.5	Aditivo.....	135
4.3.6	Água.....	136
4.3.7	Fibra de aço.....	137
4.4	ETAPA 2: CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO.....	140
4.4.1	Método de dosagem de concreto utilizado.....	141
4.4.1	Massa específica aparente.....	145
4.4.2	Espalhamento na Mesa Graff.....	145
4.4.3	Espalhamento pelo cone de Abrams ( <i>Slump Flow</i> ).....	146
4.4.4	Abatimento do tronco de cone ( <i>Slump Test</i> ).....	147

4.4.5	Teor de ar incorporado.....	147
4.4.6	Exsudação .....	148
4.4.7	Consistência/fluidez pelo cone invertido.....	150
4.4.7.1	Descrição dos aparatos necessários e método, segundo a C995-1 (ASTM, 2001) .....	150
4.4.7.2	Descrição do que foi efetivamente realizado em laboratório com os materiais/equipamentos disponíveis .....	151
4.4.8	Consistência/fluidez pelo VeBe.....	153
4.5	ETAPA 3: MÉTODO DE EXECUÇÃO DOS CORPOS DE PROVA .....	155
4.6	ETAPA 4: CARACTERIZAÇÃO NO ESTADO ENDURECIDO .....	157
4.6.1	Resistência à compressão e módulo de elasticidade .....	158
4.6.2	Resistência ao impacto .....	160
4.6.3	Tenacidade, limite de proporcionalidade (LOP) e resistência à flexão residual através de abertura de fissura (CMOD) – base EN 14651/07 .....	164
4.6.4	Absorção de água, índice de vazios e massa específica .....	172
4.6.5	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) .....	172
4.6.5.1	Elétrons Secundários (“secondary elétron” – SE).....	174
4.6.5.2	Elétrons Retroespalhados (“backscattering electron” – BSE) .....	174
4.6.6	Tomografia computadorizada (TC).....	175
4.7	ETAPA 5: AVALIAÇÃO DA INTERFACE FIBRA/MATRIZ E POROSIDADE.....	177
4.7.1	MEV: método utilizado .....	178
4.7.2	TC: método utilizado.....	188
<b>5</b>	<b>APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS .....</b>	<b>191</b>
5.1	RESULTADOS DOS ENSAIOS NO ESTADO FRESCO.....	191
5.1.1	Massa específica aparente .....	191
5.1.2	Espalhamento na Mesa Graff.....	195
5.1.3	Espalhamento pelo cone de Abrams ( <i>Slump Flow</i> ) .....	197
5.1.4	Abatimento do tronco de cone ( <i>Slump Test</i> ).....	200
5.1.5	Teor de ar incorporado.....	203
5.1.6	Exsudação .....	205
5.1.7	Consistência/fluidez pelo cone invertido.....	207
5.1.8	Consistência/fluidez pelo VeBe.....	209
5.1.9	Resumo dos resultados obtidos dos ensaios no estado fresco .....	211
5.2	RESULTADOS DOS ENSAIOS NO ESTADO ENDURECIDO.....	214
5.2.1	Resistência à compressão.....	214
5.2.2	Módulo de elasticidade .....	219
5.2.3	Resistência ao impacto .....	224
5.2.4	Tenacidade e comportamento mecânico segundo a EN 14651/07.....	229
5.2.4.1	Tenacidade (área sob a curva de deformação: MPa) .....	234

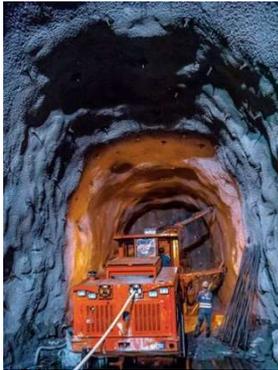
5.2.4.2	Cálculo das Resistências residuais, segundo a EN14651/07.....	239
<b>5.2.5</b>	<b>Absorção de água, índice de vazios e massa específica .....</b>	<b>246</b>
5.2.5.1	Absorção de água .....	247
5.2.5.2	Índice de vazios .....	250
5.2.5.3	Massa específica real.....	253
<b>5.2.6</b>	<b>MEV .....</b>	<b>257</b>
5.2.6.1	MEV: análise comparativa (entre as famílias) da porosidade presente apenas na Z.T. ....	260
5.2.6.2	MEV: análise comparativa (para uma mesma família) da porosidade presente na Z.T. e na matriz .	263
<b>5.2.7</b>	<b>Tomografia Computadorizada (T.C.) .....</b>	<b>267</b>
<b>5.2.8</b>	<b>Resumo dos resultados obtidos dos ensaios no estado endurecido .....</b>	<b>272</b>
<b>6</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>275</b>
6.1	CONSIDERAÇÕES ESPECÍFICAS SOBRE MEV E T.C. ....	277
6.2	CONCLUSÕES .....	279
6.3	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	280
	<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>281</b>

# 1 INTRODUÇÃO

Edifícios unifamiliares, multifamiliares, pontes, viadutos, pavimentos, estradas, aeroportos, barragens hidrelétricas, usinas, sistemas de saneamento básico de água e esgoto, entre outros... são apenas alguns exemplos de modificações do ambiente natural pelo Homem. No início de desenvolvimento das civilizações estas alterações buscavam suprir as necessidades básicas e eram relativamente simples. Com o passar do tempo foram tornando-se mais complexas devido à preocupação crescente de conforto ao ser humano. A partir do século XX, o concreto também passou a ser utilizado para a execução dessas obras. Desde então, sua aplicação vem crescendo em ritmo quase exponencial em função, principalmente, da abundância de suas matérias-primas na maior parte do planeta, simplicidade da cadeia produtiva, baixo custo de produção, flexibilidade de aplicação, entre outros. Hoje, o consumo de concreto no mundo (em grandeza de massa) é superado apenas pelo da água. Conseqüentemente, fica evidente a importância de pesquisas contínuas sobre o tema principalmente sob dois pontos de vista: melhoramento de eficiência de acordo com a sua utilização e, mais recentemente, a preocupação com o seu impacto ambiental do “berço ao túmulo” (*from cradle to grave*). Esta tese aborda o seguinte macro tema: estudo da eficiência de concretos especiais com foco no Concreto Reforçado com Fibras (CRF).

Pode-se dizer que os concretos especiais são uma das conseqüências dos avanços tecnológicos os quais buscam melhorar determinadas carências (geralmente de desempenho mecânico, durabilidade, trabalhabilidade ou estéticas) dos concretos convencionais ou ainda adicionar propriedades não inerentes a estes. A utilização de concretos reforçados com fibras (CRF's) proporciona inúmeras vantagens para os materiais com base cimentícias proporcionando, principalmente, maior durabilidade e vida útil através do aumento da resistência à flexão, à tração, ao impacto, entre outros. Apesar do uso de fibras ser empregado desde a antiguidade com o objetivo de melhorar características mecânicas dos materiais, pode-se dizer que apenas nas últimas décadas houve algumas melhorias na tecnologia empregada. O uso de fibras no concreto pode reduzir o consumo total de energia de um projeto de construção, contribuindo assim para práticas de construções sustentáveis. Devido ao fato de poder conduzir estruturas mais esbeltas, duráveis e também econômicas, o uso de CRF tem sido continuamente crescente, tanto em escala nacional quanto global. No Quadro 1 podem-se observar alguns dos diversos exemplos de aplicações práticas de CRF's.

Quadro 1: Exemplos de algumas aplicações práticas atuais de CRF's.

TIPO DE APLICAÇÃO	EXEMPLOS
 <p><b>Comercial e industrial:</b> pavimentos externos e internos, lajes, áreas de estacionamentos, entre outros.</p>	 <p><b>Descrição:</b> Pista de patinação no gelo, utilizando CRF autoadensável com serpentina incorporada no seu interior (razão do uso das macrofibras de aço).  <b>Localização:</b> Park Shopping Canoas - Canoas/RS  <b>Ano de conclusão:</b> 2017  <b>Fonte:</b> <a href="http://www.ibracon.org.br/eventos/59cbc/">http://www.ibracon.org.br/eventos/59cbc/</a></p>
 <p><b>Rodovias, estradas e pontes:</b> Pontes, viadutos, estradas, dormentes ferroviários, barreiras de atenuação de som, entre outros.</p>	 <p><b>Descrição:</b> Ponte com 33m de comprimento utilizando CRF (com fibras direcionadas) e CAA (concreto autoadensável) pré-fabricados com reduzida utilização de aço.  <b>Localização:</b> Mars Hill Bridge, Wapello County, Iowa – USA.  <b>Ano de conclusão:</b> 2006  <b>Fonte:</b> <a href="http://www.archiexpo.com/prod/lafarge/product-70029-967630.html">http://www.archiexpo.com/prod/lafarge/product-70029-967630.html</a></p>
 <p><b>Mineração e tunelagem:</b> Estruturas de minas, revestimentos de túneis, muros de arrimo, instalações de esgoto, entre outros.</p>	 <p><b>Descrição:</b> Estruturação de túnel com robô projetando 20 m<sup>3</sup>/h de concreto reforçado com fibras.  <b>Localização:</b> Linha 4 do metrô do Rio de Janeiro (Barra da Tijuca – Ipanema), no trecho entre a Barra e a Gávea.  <b>Ano de conclusão:</b> 2016  <b>Fonte:</b> <a href="https://civilizacaoengenhaira.wordpress.com/2013/11/22/concreto-projetado-para-tuneis/">https://civilizacaoengenhaira.wordpress.com/2013/11/22/concreto-projetado-para-tuneis/</a></p>

 <p><b>Agrícola:</b> Estruturas para animais, armazenamento de produtos agrícolas, silos, entre outros.</p>	 <p><b>Descrição:</b> silos utilizando a tecnologia dos CRF'S podem diminuir os casos de rompimento (nem tão incomuns) destas estruturas, além de poder proporcionar maior vida útil. <b>Localização:</b> CESA (Companhia Estadual de Silos e Armazéns) - Passo Fundo e Cruz Alta – RS. <i>Fonte:</i> <a href="http://eplak.com.br/verde/areas-de-atuacao/armazenagem-para-agroindustria/">http://eplak.com.br/verde/areas-de-atuacao/armazenagem-para-agroindustria/</a></p>
 <p><b>Portos e aeroportos:</b> Pistas de portos e aeroportos, áreas de docas, rampas de empacotamento e carregamento, entre outros.</p>	 <p><b>Descrição:</b> Ames Hangar 1006 com pavimento utilizando CRF com fibra de aço. Possui capacidade para aeronaves de maior porte (ex. Boeing 747 e Boeing 777). <b>Localização:</b> Cincinnati, Ohio, USA. <i>Fonte:</i> <a href="http://fiberreinforcedconcrete.org/project/ames-hangar-1006/">http://fiberreinforcedconcrete.org/project/ames-hangar-1006/</a></p>
 <p><b>Reforços estruturais:</b> Reforço de cisalhamento para vigas, paredes, lajes, entre outros.</p>	 <p><b>Descrição:</b> Amplamente conhecidas, as fibras de carbono também estão no grupo dos CRF'S, entretanto seu uso é apenas corretivo devido ao elevado custo. <b>Localização:</b> Estacionamento Leroy Merlin/Atacadão – Porto Alegre/RS. <i>Fonte:</i> <i>Acervo próprio</i></p>

 <p><b>Vias navegáveis:</b> Barragens, estruturas de bloqueio, revestimentos de canais, valas, estruturas de águas pluviais, entre outros.</p>	  <p><b>Descrição:</b> Estabilização de encostas e canais de água. <b>Localização:</b> ACT Works Department, Canberra, Australia. <b>Fonte:</b> <a href="http://www.fibercon.com.au/Shotcrete.html">http://www.fibercon.com.au/Shotcrete.html</a></p>
 <p><b>Concreto pré-fabricado e produtos:</b> Painéis arquitetônicos, paredes, fossas sépticas, cofres funerários, cofres de bancos, esculturas, entre outros.</p>	  <p>Manilhas                      Quebra-mar</p> <p><b>Fonte:</b> <a href="http://blog.arcelormittal.com.br/o-uso-de-fibras-de-aco-no-concreto/">http://blog.arcelormittal.com.br/o-uso-de-fibras-de-aco-no-concreto/</a></p>
 <p><b>Residencial:</b> Calçadas, piscinas, porões, fundações, drenagem, entre outros.</p>	  <p><b>Fonte:</b> <a href="https://barchip.com/paving/">https://barchip.com/paving/</a></p>

Na cidade de Ivoti/RS, uma empresa especializada em execução de peças pré-fabricadas de CRF's voltada principalmente para a construção de presídios vem aprimorando suas técnicas de execução há alguns anos. Visando obter um material com alta resistência à compressão, tração, impacto e maior durabilidade, módulos inteiros de celas e galerias são fabricados utilizando concreto branco de alta resistência reforçado com fibras poliméricas estruturais, com o objetivo principal de dificultar ao máximo a fuga de detentos. Este material, segundo o fabricante, pode chegar a uma resistência média à compressão de aproximadamente 100 MPa, sendo assim utilizado para fabricar

o monobloco estrutural base das celas. Há ainda o GRC (*Glass Reinforced Concrete*), o qual, apesar da denominação, é na verdade uma argamassa reforçada com fibras de vidro. Esta tecnologia é utilizada, principalmente, para a fabricação dos mobiliários das galerias, podendo ser projetada (*spray-up*) ou autoadensável. Na Figura 1 é possível observar algumas das etapas de produção. A demanda por CRF é tão elevada, que o fabricante atende diversos estados do Brasil, inclusive os da região Norte e Nordeste.

Figura 1: Etapas de execução de CRF's para células prisionais: (A) Execução de mobiliário de GRC através de método autoadensável; (B) técnica *spray-up* com lançamento de camas sucessivas e compactação por rolo também utilizada para fabricação da mobília; (C) galeria prisional feita integralmente com CRF; (D) execução de acabamentos; (E) aspecto final com monobloco estrutural da galeria em CRF e mobiliário em GRC.

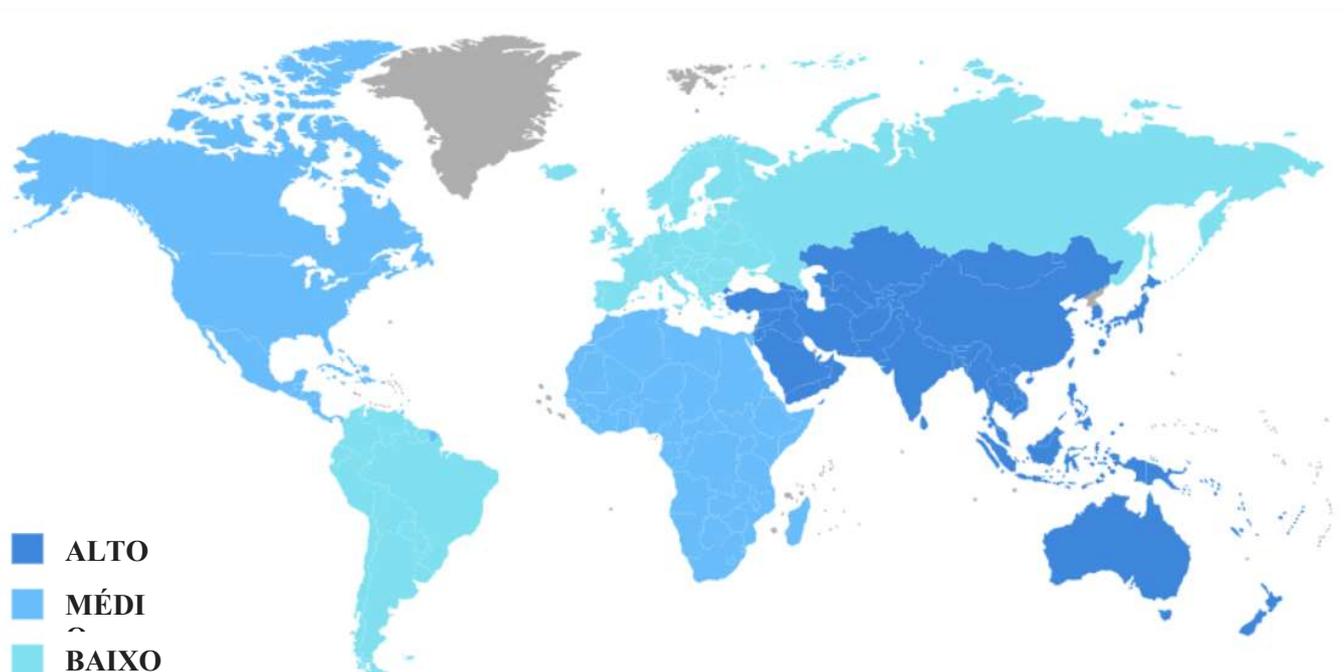


O tamanho do mercado de concreto reforçado com fibra é estimado em US\$ 2,64 bilhões em 2023, e deverá atingir US\$ 3,48 bilhões até 2028, crescendo a taxa aproximada de 5,72% durante o período de previsão (2023-2028). O surto de COVID-19 impactou negativamente o mercado em 2020. Com o início da pandemia de COVID-19, as obras pararam em todo o mundo, especialmente em grandes centros de construção como China e Índia. No entanto, o mercado foi projetado para crescer de forma constante no período de previsão devido ao crescimento global do setor de construção. No curto prazo, espera-se que a crescente procura do sector da construção e a crescente procura de projectos de infra-estruturas de transporte impulsionem o crescimento do mercado. Por outro lado, a disponibilidade de fios de concreto prontos para uso provavelmente prejudicará o crescimento do mercado de concreto reforçado com fibras. Durante o período de previsão, espera-se que a região Ásia-Pacífico domine o mercado global devido ao aumento exponencial das atividades

de construção na região ([www.mordorintelligence.com/industry-reports/fiber-reinforced-concrete-frc-market](http://www.mordorintelligence.com/industry-reports/fiber-reinforced-concrete-frc-market), acesso em 30/10/2023).

Na Figura 2 é possível observar o mapa mundial de mercado de concretos reforçados com fibras para o período 2023-2028.

Figura 2: Mercado de CRF – Taxa de crescimento por região, 2023-2028 (Fonte: [www.mordorintelligence.com/industry-reports/fiber-reinforced-concrete-frc-market](http://www.mordorintelligence.com/industry-reports/fiber-reinforced-concrete-frc-market) , acesso em 30/10/2023).



## 1.1 JUSTIFICATIVA DO TEMA, CONTEXTUALIZAÇÃO CRONOLÓGICA DE PESQUISAS NA ÁREA E LACUNA DE CONHECIMENTO

No mercado nacional é possível encontrar diversos tipos de fibras, sendo que na construção civil as mais utilizadas são, principalmente, as de aço e as de polipropileno. Entretanto, pode-se dizer que ainda é relativamente limitado o conhecimento a fim de se poder obter a máxima eficiência do material. Uma das principais oportunidades de pesquisa sobre CRF 's é o estudo da aderência das suas fibras. No Quadro 2, pode ser encontrada uma síntese cronológica até o final da década de 90 sobre os trabalhos mais relevantes que abordaram o tema de uma forma geral (interface fibra-matriz). Já os principais trabalhos, a partir dos anos 2000, relacionados ao foco desta pesquisa estão sumarizados no Quadro 8 (item 3.7 - *Pesquisas recentes na área de zona de transição fibra/matriz*).

Quadro 2: Síntese cronológica (até o final da década de 90) de algumas das principais pesquisas que abordaram a influência das fibras adicionadas em compósitos cimentícios (*adaptado de SAVASTANO, 1992*).

REFERÊNCIA	CONTRIBUIÇÕES AO ASSUNTO
KRENCHER (1964)	Realizou estudo considerado como o início da pesquisa sobre matrizes frágeis reforçadas com fibras, inclusive com resultados experimentais, no emprego de fibras de vidro comum.
VEKEY e MAJUMDAR (1968)	Já demonstravam grande interesse com relação à interface fibra-matriz e desenvolveram equipamento de arrancamento de fibras para analisar a sua aderência. Nesse estudo, foram empregadas fibras de vidro comum tipo E (vidro alumina boro silicato) e de aço, em matrizes de pasta de cimento, de gesso e de resina poliéster.
GRESZEZUK (1969) <i>apud</i> ASTM STP 452 (1969)	Elaborou o desenvolvimento de teorias que estabelecessem as propriedades da interface fibra/matriz necessárias para obterem-se compósitos eficientes e também o desenvolvimento de técnicas de ensaio para medir essas mesmas propriedades. No mesmo trabalho uma equação foi desenvolvida com o objetivo de relacionar a carga aplicada ao modo de falha, resistência à tração da fibra e força de cisalhamento da interface. Na época a equação buscou estabelecer de forma “embrionária” a resistência de interface solicitada a fim de obter-se um índice de ruptura geral em vez de somente a falha na interface.
AVESTON <i>et al.</i> (1971) e AVESTON e KELLY (1973)	Apresentaram teoria de funcionamento dos compósitos fibrosos com matrizes frágeis (conhecida como teoria ACK: Aveston, Cooper e Kelly), na qual o fundamento é a transferência de tensões entre matriz e fibras, por meio da interface.
MAJUMDAR e RYDER (1970) e MAJUMDAR (1974)	Apresentaram importantes pesquisas sobre pastas de cimento reforçadas com fibras de vidro com dióxido de zircônio (Cem-FIL), mais resistentes aos álcalis do cimento que as fibras do tipo E. Foram realizadas análises por MEV e por espectroscopia de raios X por energia dispersiva (EDS), registrando a evolução dos produtos hidratados ao longo do tempo e o acúmulo de portlandita na superfície das fibras.
OPOCZYK e PENTEK (1975)	Pesquisaram sobre pasta de cimento reforçada com fibras de amianto, com análise do acúmulo de portlandita na interface e sua carbonatação nas idades mais avançadas. Nesse trabalho, foram empregadas microscopia eletrônica de varredura (MEV), difração de raios X (DRX) e análises térmicas.
HANNANT (1978)	Autor do primeiro livro publicado sobre compósitos fibrosos, apresentou abordagem interessante sobre a morfologia da interface entre matriz de cimento e fibras de vidro, aço e polipropileno e observou a sua importância sobre o comportamento da aderência.
BARTOS (1981) <i>apud</i> BRESCANSIN (2003)	Estabeleceu, basicamente, dois tipos de tensões de aderência (por cisalhamento e por tração) que podem ser transferidas através da interface.
LAWS (1982) e LAWS <i>et al.</i> (1986)	Contribuíram para o avanço do modelo ACK, ao apresentarem teorias sobre a evolução da aderência fibra-matriz durante a solicitação mecânica. Afirmaram ser de grande importância a modificação da zona de transição para a melhoria do compósito.
BENTUR e DIAMOND (1985)	Apresentaram estudo sobre fibras de vidro resistente a álcalis em feixes de filamentos e constataram o acúmulo de vazios e/ou de portlandita, com prejuízo para a aderência. Verificaram que o emprego de sílica ativa reduz a porosidade nas proximidades dos feixes de filamentos e ameniza a perda de ductilidade do compósito nas idades mais avançadas, pois o acúmulo de portlandita é menor na interface fibra-matriz.
WEI <i>et al.</i> (1986)	Utilizaram polímero acrílico em argamassa de cimento reforçada com fibras de aço e obtiveram grande melhoria do comportamento mecânico do compósito. Foi observado não só a redução da porosidade da zona de transição, como também a da matriz não junto da fibra.
SUGAMA <i>et al.</i> (1988)	Nos experimentos sobre matriz de cimento reforçada com fibras de carbono, propuseram a oxidação das fibras para promover sua reação com íons-cálcio da zona de transição e, assim, incrementar a aderência fibra-matriz.

BALAGURU e SHAH (1992)	Através de sua pesquisa, separam em dois grupos importantes de serem considerados na avaliação de CRF's no estado endurecido. O primeiro se refere às características das fibras (tipo, volume, geometria, orientação e dispersão). O segundo grupo é definido por fatores externos, como: condições de adensamento, cura, métodos usados, entre outros. Além disso, afirmaram que a ligação ao longo da interface fibra/matriz em compósitos cimentícios é um parâmetro significativo no controle de desempenho geral desses compósitos.
SAVASTANO (1992)	Estudou a zona de transição entre fibras e matriz de pasta de cimento Portland e inter-relacionou suas principais características com as propriedades mecânicas dos compósitos produzidos. Na fase experimental utilizou fibras de vegetais de coco, sisal, malva e as comparou com as fibras de amianto crisotila e polipropileno. Utilizou ensaios mecânicos de resistência à tração e ductilidade, além de MEV e espectroscopia de raios-X, a fim de identificar as principais características da zona de transição. Concluiu que a zona de transição se apresentou diferenciada do restante da matriz devido à sua maior porosidade, concentração de microcristais de portlandita e microfissuras, principalmente nos casos em que foram utilizadas fibras vegetais. Essas características, que podem apresentar-se com diferentes intensidades, estão diretamente ligadas à aderência fibra/matriz e, conseqüentemente, ao desempenho mecânico do compósito. O aumento da aderência faz com que se torne maior a resistência à tração e também sua ductilidade, desde que não haja redução excessiva do comprimento crítico de ancoragem da fibra. A zona de transição constituiu o elo fraco entre as fases, o que impossibilitou a soma de efeitos das propriedades físicas, químicas e mecânicas da matriz e das fibras. Como conclusão principal, comprovou a existência de correlação direta entre o desempenho macroestrutural dos compósitos fibrosos e a zona de transição fibra/matriz, sendo que isso ocorre para diversos tipos de fibras, relações água/cimento e idades de hidratação em estudo.
WEILER E GROSSE (1996)	Analisaram o processo de arrancamento de uma única fibra de aço inserida em uma matriz polimérica de resina epóxi e em uma matriz cimentícia. Concluíram que tanto as características geométricas das fibras quanto o tipo de matriz inserida influem no comportamento geral do compósito.

Concretos com reforços fibrosos têm sido utilizados de forma crescente e em escala mundial, sendo que dentro dos mecanismos de ruptura o tema da aderência dessas fibras torna-se primordial para novos avanços tecnológicos. O comportamento deste tipo de material está condicionado principalmente pelas características mecânicas das fibras, da própria matriz e também da força de ligação entre elas formada posteriormente, ou seja, interface fibra/matriz. Para Savastano (1992), as características de aderência fibra/matriz estão diretamente associadas à sua zona de transição, sendo esta caracterizada por maior porosidade, concentração de microcristais de portlandita e microfissuras, implicando diretamente no desempenho mecânico do compósito. Segundo Bassi (2010), o comportamento de uma matriz cimentícia reforçada com fibras está intimamente ligado à interação fibra/matriz ocorrida na zona de transição, sendo que essa ligação interfacial pode ser química, física ou uma combinação entre elas.

Com inúmeras vantagens potenciais para serem efetivamente implantadas na indústria da construção civil, esta pesquisa busca o estudo da lacuna de conhecimento existente (Quadro 3) a fim

de se obter informações mais aprofundadas que talvez possam, posteriormente, melhorar a eficiência das fibras em matrizes cimentícias.

Quadro 3: Questionamento sobre lacuna de conhecimento existente (ponto de origem desta pesquisa).

<b>LACUNA DE CONHECIMENTO EXISTENTE E PASSÍVEL DE INVESTIGAÇÃO</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Qual é a real influência quantitativa da porosidade intrinsecamente existente na interface fibra/matriz (zona de transição) nas propriedades mecânicas e de durabilidade em materiais cimentícios reforçados com fibras?</li> <li>• Quais métodos podem ser propostos a fim de se obter uma quantificação razoavelmente precisa destes vazios na zona de transição?</li> <li>• Será que um maior aprofundamento e esclarecimento do assunto pode levar a novas técnicas de execução de CRF's com fibras mais eficientes?</li> </ul>

Para o autor desta Tese, é visível a importância de pesquisas que levem a uma maior eficiência no aproveitamento das fibras que atuam como reforço nesses materiais. Pode-se dizer que a evolução tecnológica de CRF's, ainda merece um maior aprofundamento, principalmente no Brasil. Há um grande potencial de otimização na produção de concretos reforçados com fibras.

Apesar da importância, o uso de CRF's pode ser considerado como ainda empírico e pouco eficiente. Em situações práticas de uso, caso seja detectada falta de aderência das fibras, ou seja, diminuição da sua eficiência devido ao escorregamento, a tendência é adicionar mais material fibroso ou elevar a relação de aspecto ( $l/d$ ). Outra opção utilizada quando detectado o mesmo fenômeno é a adoção de fibras com ganchos nas extremidades a fim de aumentar a sua ancoragem. Entretanto, além de ser uma opção com um relativo maior custo, esta ação também dificulta o processo de mistura. A adição de mais fibras ou a substituição destas por elementos com ancoragem têm consequência direta na diminuição da trabalhabilidade de matrizes cimentícias. Sem estudos mais aprofundados é compreensível - mas, não justificável - o incremento de fibras mais longas ou em maior quantidade quando detectados problemas de aderência.

Como melhoria hipotética, a diminuição da porosidade na interface fibra/matriz tende a ter como consequência uma melhor aderência, podendo eliminar a necessidade dos ganchos nas extremidades. Dessa forma, a busca de uma maior eficiência dentro da matriz cimentícia torna-se importante, visto que é crescente a preocupação pelo uso de materiais com maior tecnologia embutida, visando o máximo aproveitamento da sua capacidade, juntamente com um menor

impacto ambiental possível. Mesmo sendo importante, o tema também pode ser considerado controverso com pesquisas recentes, como Mineiro *et al.* (2022).

Apesar da importância do comportamento de ligação com a pasta de cimento, a interface fibra/matriz não possui muitos estudos aprofundados devido às dificuldades técnicas de análise. Para Savastano (1992), o estudo da zona de transição apresenta-se como importante caminho para tornar viável a aplicação de materiais cimentícios reforçados com fibras na construção civil e, desse modo, tende a contribuir para a redução dos custos e para a melhoria da qualidade de vida, principalmente nos países subdesenvolvidos. A mesma pesquisa sugere que a zona de transição pode ser objeto de estudos futuros e fator determinante para tornar os compósitos mais resistentes, dúcteis e duráveis. Segundo Caratin e Marinucci (2012), há um número crescente de estudos sobre aplicações de macro fibras, tecidos ou mantas de fibras para compensar esforços axiais, de flexão e de cisalhamento, contudo identificam-se poucos registros na literatura abordando o estudo da interface fibra-matriz. De acordo com Hwang *et al.* (2015), a distribuição da porosidade e hidratação dos produtos na interface de fibras de aço pode ser informativa na determinação do risco de corrosão que geralmente ocorre nos vazios presentes na zona de transição fibra/matriz.

Atualmente, a maioria das fibras de aço utilizadas como reforço estrutural possui geometria reta, ondulada, achatada-ondulada ou reta com ganchos nas extremidades. A escolha entre esses tipos de fibras depende de como é desejado o comportamento dos materiais com base cimentícia reforçados com fibras a serem executados. A energia requerida para o arrancamento completo de uma fibra com ganchos nas extremidades é, geralmente, maior se comparado com uma fibra reta, sem ancoragem. Para fibras com idênticos comprimentos e diâmetros, a energia é sempre maior nas que apresentam ganchos.

As fibras retas (sem ancoragem nas extremidades) resistem ao arrancamento essencialmente pela adesão. Já as ancoradas necessitam de mais energia para deformarem e conseqüentemente serem arrancadas. Da mesma forma, o comprimento da fibra inserida é igualmente importante, pois, juntamente com o diâmetro, define a área de contato entre a fibra e a matriz (SIMÕES *et al.*, 2017).

De acordo com o fib Model Code (2010), a resistência da matriz cimentícia é um dos fatores mais significantes para o comportamento de interface de ligação fibra/matriz. A máxima tensão de cisalhamento ( $\tau_{\text{máx}}$ ) definida pelo arrancamento, por exemplo, de fibras de aço, segundo o mesmo código, depende da resistência à compressão do concreto ( $f_{ck}$ ).

Sabendo que apesar de existirem publicações internacionais há décadas abordando o assunto interface-fibra matriz em compósitos cimentícios, os estudos disponíveis ainda são limitados, com pouco aprofundamento no tema porosidade e sua influência na zona de transição. Os avanços que já ocorreram, tanto nos trabalhos mais antigos quanto nos mais recentes, podem ser observados respectivamente no Quadro 2 e no item 3.7. O melhor entendimento e consequente otimização da interface fibra/matriz em CRF's tem como objetivo melhorar o desempenho deste material. O presente trabalho busca o estudo desta zona de transição. Algumas variáveis (por exemplo: origem/tipo de fibras, fluidez/abatimento do concreto, comprimento e orientação predominante das fibras, adoção de ganchos (ancoragens), entre outros são analisadas com o objetivo de avaliar a influência dos reforços fibrosos no desempenho geral dos compósitos. Como a diversidade dos parâmetros é relativamente extensa, esta pesquisa busca realizar uma análise selecionada em apenas alguns destes.

## 1.2 ORIGINALIDADE

Geralmente, a tendência de comportamento dos CRF's é que, após o início do processo de microfissuração sob determinada carga, as fibras passem a funcionar de acordo com o seu propósito requerido: proporcionar ao compósito maior reforço de resistência (principalmente ao impacto e à tração) para a carga aplicada. Os reforços fibrosos acabam funcionando como pontes de transferência de tensões nas regiões do material sob maiores tensões para as sob menores tensões, retardando assim a propagação das fissuras. Essas transferências de tensões fibra/matriz ocorrem, principalmente, devido ao efeito de adesão e fricção entre estas.

O comportamento da interface fibra/matriz é de relevante importância a fim de obter uma visão geral do comportamento do material compósito uma vez que isso influencia a resistência e de que forma as forças internas são transferidas na relação fibra/matriz. Esse processo (transferência interna de forças fibra/matriz) pode ter, como consequência, o deslizamento e deformações das fibras sob determinadas cargas e também a ruptura destas nos casos em que a resistência de ligação for superior à resistência de tração da própria fibra.

Nos últimos anos muitos estudos do comportamento de aderência (entre fibras e matrizes cimentícias) têm sido conduzidos, entretanto focando apenas na questão da aderência e, em muitos casos, analisando o comportamento de uma única fibra inserida no material cimentício. Alguns desses estudos podem ser exemplificados a seguir.

Na pesquisa desenvolvida por Weiler e Grosse (1996), podem ser observados os resultados de ensaios de arrancamento realizados em uma única fibra de aço imersa em uma matriz de resina epóxi transparente (Figura 3a;b;c;d) e também o modelo em um bloco de concreto (Figura 3e). Os resultados gráficos constam na Figura 4.

Figura 3: (A); (B); (C) e (D) evolução do processo de arrancamento de fibra de aço em uma matriz polimérica de resina epóxi; (e) teste de configuração (WEILER e GROSSE, 1996).

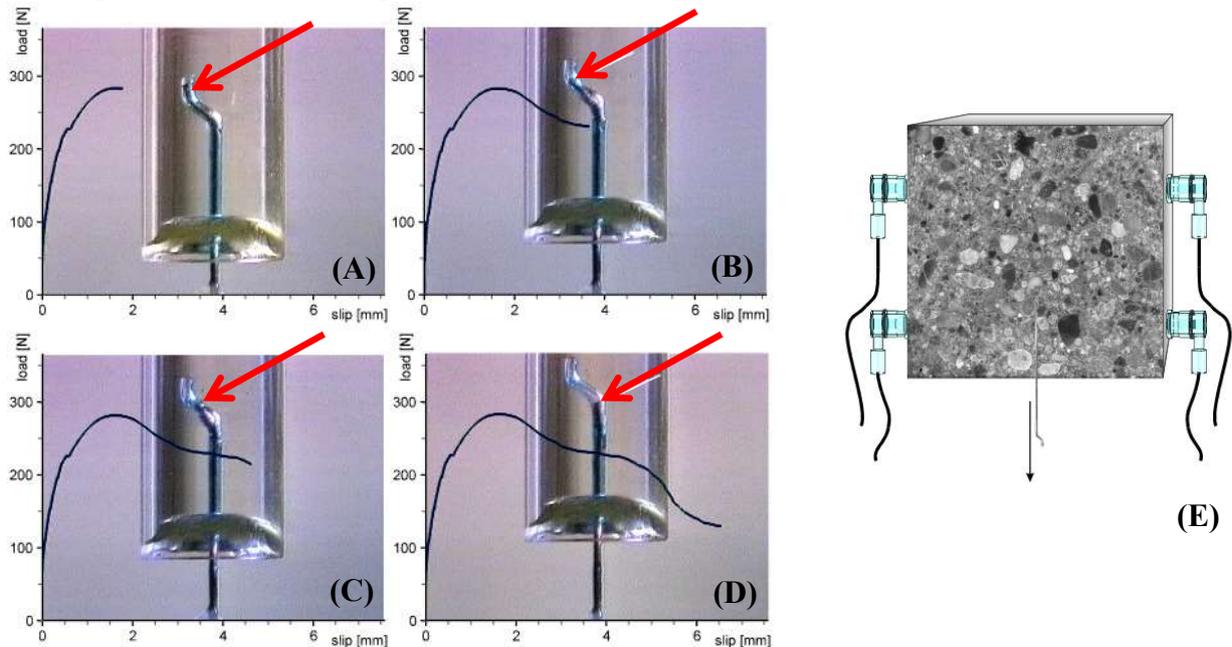
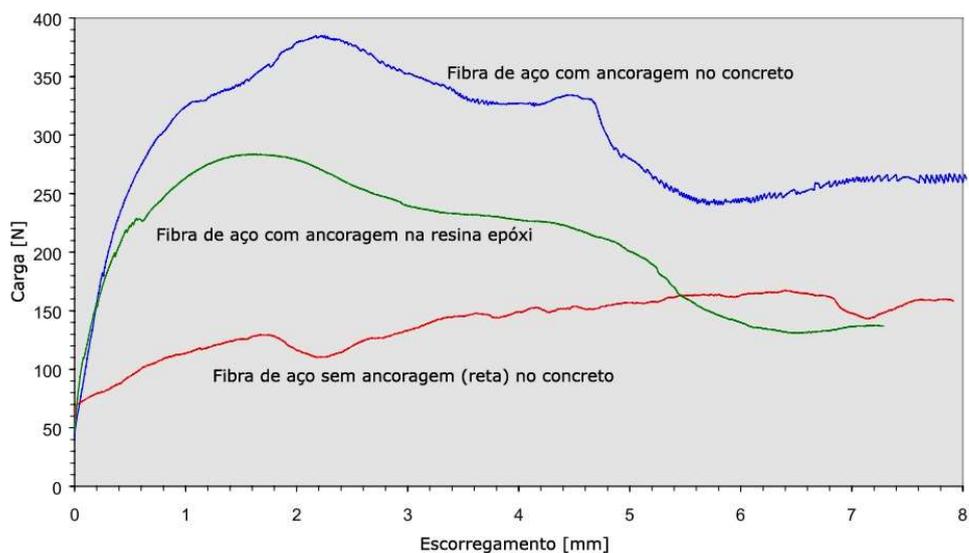


Figura 4: Escorregamento das fibras no concreto e na resina epóxi com o aumento de carga (WEILER e GROSSE, 1996).



Para ambos os testes (matriz de resina epóxi e matriz de concreto), Weiler e Grosse (1996) concluíram que tanto o tipo de matriz onde a fibra está inserida, quanto a presença ou não de ancoragem influem no comportamento de escorregamento destas. Para as fibras com ancoragem inseridas na matriz de concreto, o seguinte comportamento da carga pode ser observado: aumento até um topo máximo seguido de uma diminuição ligeira e em seguida de um novo topo, sendo que após o primeiro topo a tendência do gráfico é descentente. Este comportamento também aparece nas curvas de retirada da fibra inserida na resina epóxi, porém em um gráfico com curvas mais suaves. Por outro lado, para a fibra reta inserida no concreto, pode-se observar que durante todo o processo de arrancamento a carga atuante aumenta ligeiramente, com pequenas mudanças acidentais (adaptado de WEILER E GROSSE, 1994).

Como foi demonstrado durante os testes de retirada de fibras retas, a matriz de concreto absorve apenas uma pequena parte da carga por fricção/escorregamento. Muitos parâmetros aleatórios da matriz têm efeitos sobre esta constante, como: distribuição dos agregados, presença de bolhas de ar, aderência entre o aço e a matriz de concreto, cavidades, entre outros. Os ensaios realizados demonstraram que o efeito da geometria da fibra é de grande importância, principalmente devido às ancoragens (ganchos) nas extremidades. Estas regiões são capazes de absorver a maior parte da carga aplicada ao mesmo tempo em que a própria fibra se alonga em uma deformação plástica e a matriz circundante se desgasta (adaptado de WEILER E GROSSE, 1994).

Já mais recentemente, na pesquisa desenvolvida por Caratin e Marinucci (2012), por exemplo, foram comparadas as tensões de cisalhamento na interface fibra matriz cimentícia apenas por meio do ensaio de arrancamento (*pull-out*) de única fibra de vidro (Figura 5 e Figura 6) e de uma única barra de aço corrugada em CP's de concreto.

Figura 5: Detalhes dos arranjos para ensaio de arrancamento: (A) bloco simples; (B) bloco duplo; (C) dimensões utilizadas em ambos os arranjos (CARATIN E MARINUCCI, 2012).

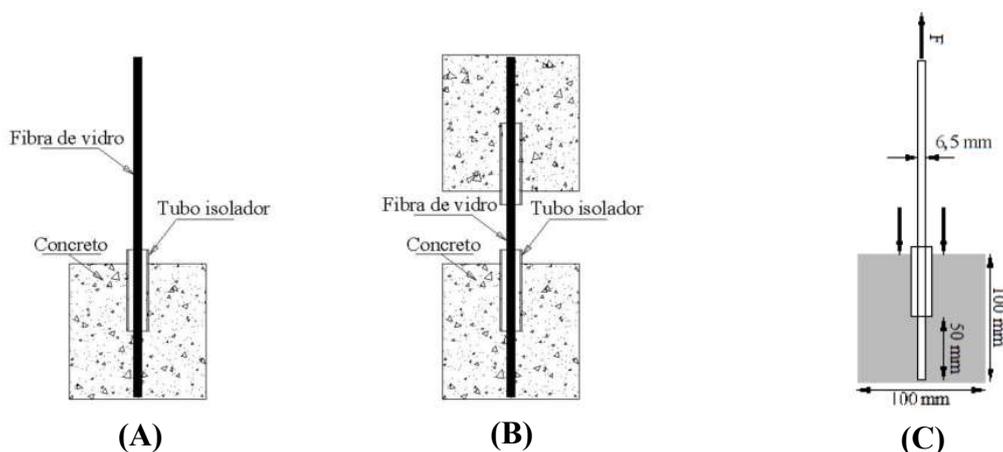
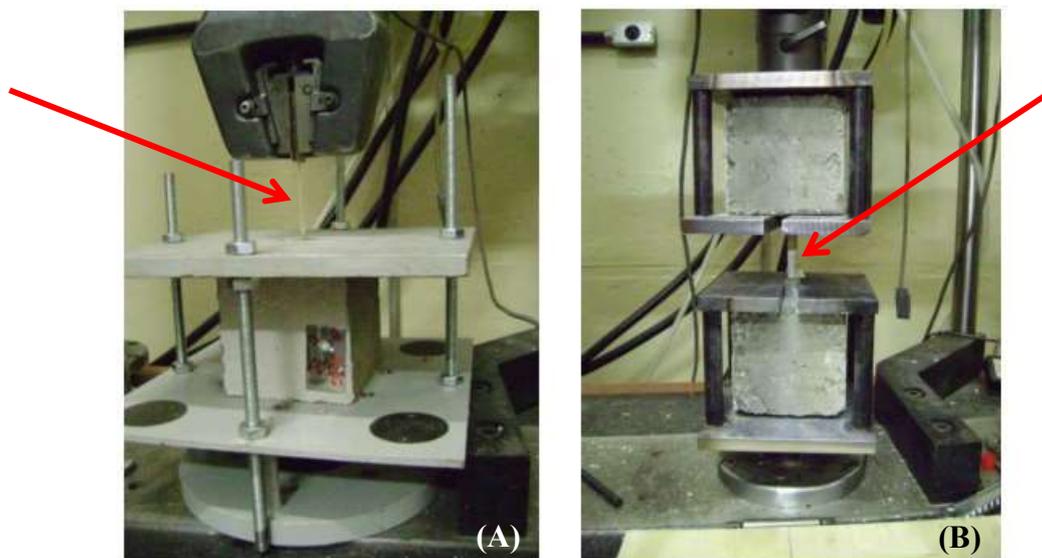


Figura 6: Amostras posicionadas para o teste de arrancamento: (A) bloco único; (B) bloco duplo (CARATIN E MARINUCCI, 2012).



O valor adotado como limite da resistência de aderência na interface fibra-matriz foi o último valor medido antes do início do escorregamento da fibra ou da barra de aço no interior da matriz de concreto enquanto os elementos de reforço ainda estivessem intactos. Segundo Caratin e Marinucci (2012), a partir do início do escorregamento, há uma redução na resistência de aderência até a separação completa da haste/matriz. Os resultados da média dos ensaios mostraram que as tensões de cisalhamento das amostras reforçadas com as fibras de vidro atingiram um valor 43% superior em relação às barras de aço, considerando uma mesma matriz cimentícia com 29 MPa de resistência à compressão aos 28 dias de idade.

Ainda existem pesquisas desenvolvidas por Figueiredo (2011b), Micali (2010), Lameiras (2007), Fico (2007), Bernardi (2003), Santos (2002), entre outros, os quais também abordam o tema de arrancamento das fibras em matrizes cimentícias (em vários casos de forma individual, isolada), entretanto sem abordar especificamente a zona de interface fibra/matriz. Há também alguns trabalhos que se restringiram, por exemplo, a analisar a interface fibra/matriz apenas na escala macrográfica, como é o caso de Campello (2013) e Henriques (2013). A lacuna de conhecimento para o assunto avaliação da porosidade presente na interface de materiais cimentícios reforçados com fibras torna-se mais evidente no cenário nacional. Como já exemplificado anteriormente, a maior parte dos trabalhos limita-se aos ensaios de arrancamento, sem uma análise quantitativa mais minuciosa em nível micro estrutural. Uma das razões para os testes de arrancamento de fibras serem tão amplamente utilizados pode ser atribuída ao fato do ensaio possuir custos relativamente baixos.

Assim sendo, a originalidade da presente pesquisa consiste em uma contribuição para esclarecer e ampliar o acesso ao conhecimento sobre a influência da porosidade presente na interface fibra/matriz no desempenho de materiais com base cimentícia - área de conhecimento ainda obscura no âmbito dos CRF's. Como já descrito anteriormente, esta tecnologia de concreto vem apresentando crescente demanda em nível mundial, entretanto com potencial de maior eficiência ainda a ser explorado.

### 1.3 QUESTÕES DE PESQUISA, OBJETIVOS E DIRETRIZES

É de conhecimento geral que fibras inseridas em matrizes de base cimentícia atuam de forma positiva quanto ao comportamento mecânico, principalmente de resistência à tração e ao impacto dos concretos. Entretanto, a adição destes reforços fibrosos, inevitavelmente, acrescenta algum nível de porosidade à matriz devido à zona de transição fibra/matriz. Preliminarmente, é possível elencar algumas questões de pesquisa sobre os CRF's importantes: é viável estabelecer um método de quantificação em larga escala da porosidade na interface fibra/matriz? É possível estabelecer critérios de definição para o tamanho da zona de transição fibra/matriz? Existe uma relação diretamente proporcional entre a quantidade de porosidade na zona de transição fibra/matriz e o desempenho mecânico e de durabilidade dos compósitos cimentícios fibrosos? Para um mesmo teor de fibras, existe diferença estatística na quantidade de porosidade utilizando-se diferentes tecnologias das matrizes dos concretos como, por exemplo, concreto convencional e autoadensável? Estes questionamentos serviram como ponto de partida no desenvolvimento das atividades de investigação.

Assim sendo, pode-se chegar à seguinte questão de pesquisa central deste trabalho: a quantidade de vazios presentes na interface fibra/matriz atua de forma estatisticamente significativa no macro desempenho (mecânico e de durabilidade) dos concretos reforçados com fibras?

#### 1.3.1 Objetivo principal

Analisar a influência da porosidade presente na interface fibra/matriz nas propriedades de desempenho de compósitos cimentícios reforçados com fibras metálicas.

### 1.3.2 Objetivos secundários

Os objetivos secundários desta pesquisa consistem nos seguintes itens:

- verificar se existe ou não diferença proporcional da quantidade da porosidade presente na zona de transição fibra/matriz e no restante da própria matriz;
- verificar se o incremento de fibras dentro de uma mesma tecnologia da matriz aumenta a porosidade total das amostras;
- verificar quais são as principais influências do acréscimo de fibras no desempenho dos CRF e se estas estão relacionadas com a Z.T. ou apenas pela concentração dos reforços fibrosos.

### 1.3.3 Diretrizes

A fim de viabilizar os objetivos deste trabalho, foram traçadas as seguintes diretrizes preliminares:

- estabelecer, pelo menos, duas tecnologias de matrizes cimentícias às quais receberão adição de fibras posteriormente;
- estabelecer critérios mínimos de trabalhabilidade dos CRF's e quais os ensaios que serão realizados;
- estabelecer os ensaios a serem executados no estado endurecido;
- estabelecer método(s) confiável(is) para quantificar a porosidade no entorno das fibras dos compósitos;
- definir um critério para determinar o tamanho da zona de transição fibra/matriz.

## 1.4 ESTRUTURA DA TESE

No capítulo 1 é apresentado o crescente uso de CRF's de forma generalizada em escala global, exemplificando a sua versatilidade de utilização, assim como o mercado existente e uma estimativa para os próximos anos. São feitas apresentações de justificativa do tema, contextualização

cronológica de pesquisas na área, lacuna de conhecimento, originalidade do trabalho, questões de pesquisa, objetivos e estrutura da tese.

No capítulo 2 é descrito um breve histórico sobre a evolução de materiais aglomerantes, o surgimento do cimento e conseqüente desenvolvimento de seus derivados (com foco em CRF's) até os dias atuais. Procura-se evidenciar a maior diversidade e complexidade das necessidades do Homem com o avanço tecnológico, principalmente na área da construção civil. Também são feitas referências sobre o mercado e consumo dos concretos reforçados com fibras no Brasil, assim como classificações, descrições de comportamentos esperados, discussão sobre os níveis de análises (micro e macroestruturais), entre outros.

No capítulo 3 são apresentados conceitos mais aprofundados sobre as propriedades de CRF's no estado endurecido, como as características da matriz e das próprias fibras (ex.: teor, geometria, distribuição, orientação e interface fibra/matriz). São descritos os principais ensaios para CRF's encontrados na literatura, assim como um breve descritivo sobre as definições de metodologia paramétrica para a execução CRF's segundo o Fib Model Code. É feito também um descritivo sobre a importância da avaliação da interface fibra/matriz em CRF's, assim como as pesquisas mais recentes abordando esta zona de transição.

O capítulo 4 demonstra o programa experimental, com o escopo da pesquisa, fluxograma do programa e método de pesquisa. São realizadas as caracterizações dos insumos utilizados e do CRF no estado fresco e endurecido. Também é descrito como foram confeccionados os corpos de prova e, por último, aprofundado um dos tópicos centrais desta pesquisa: os métodos propostos e utilizados para a avaliação/estudo da interface fibra/matriz.

No capítulo 5 são feitas as apresentações, análises e discussões dos resultados dos ensaios tanto no estado fresco (mesa Graff, massa específica, *slump flow*, *slump test*, teor de ar incorporado, exsudação, consistência/fluidez pelo cone invertido e pelo VeBe), quanto no endurecido (compressão, módulo de elasticidade, impacto, flexão pelo método de 3 pontos, absorção de água, índice de vazios, massa específica, microscopia eletrônica de varredura e tomografia computadorizada).

Já no capítulo 6 são feitas as considerações finais e conclusões, assim como sugestões para pesquisas futuras.