CÉSAR LUIZ SILVA

Proposta de metodologia alternativa para controle de qualidade da aplicação estrutural do concreto projetado reforçado com fibras de aço

São Paulo (2017) CÉSAR LUIZ SILVA

Proposta de metodologia alternativa para controle de qualidade da aplicação estrutural do concreto projetado reforçado com fibras de aço

> Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências no Programa Mestrado Profissional em Inovação na Construção Civil

São Paulo (2017)

CÉSAR LUIZ SILVA

Proposta de metodologia alternativa para controle de qualidade da aplicação estrutural do concreto projetado reforçado com fibras de aço

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências no Programa Mestrado Profissional em Inovação na Construção Civil

Área de Concentração: Engenharia da Construção Civil e Urbana

Orientador: Prof. Dr. Antonio Domingues de Figueiredo.

São Paulo (2017)

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

São Paulo, 04 de janeiro de 2017

Assinatura do autor

Assinatura do orientador

Catalogação-na-publicação

Silva, César Luiz

Proposta de metodologia alternativa para controle de qualidade da aplicação estrutural do concreto projetado reforçado com fibras de aço / C. L. Silva -- versão corr. -- São Paulo, 2017.

89 p.

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

1.Concreto projetado 2.Concreto reforçado com fibras 3.Controle da qualidade 4.Ensaios mecânicos 5.Ensaios magnéticos I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Construção Civil II.t.

Dedico este trabalho à minha amada família, em especial à Giséli e à Lavínia

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais e demais familiares que depositaram confiança em mim, acreditaram em minha capacidade e que, sem dúvida, me preparam para a sociedade e para superar todos obstáculos em minha caminhada. Da mesma forma, deixo agradecimentos a meus professores e amigos, que complementaram minha formação com trocas de conhecimento e que permitiram que eu aprimorasse minhas relações sociais.

À minha esposa e filhinha, por sua compreensão, por sempre me ampararem em momentos de dificuldades, por me darem forças e me inspirarem na busca por melhores resultados.

Ao professor Antonio Domingues de Figueiredo, por sua generosidade, por sua atenção a qualquer questão levantada, por sua orientação precisa e por sua postura profissional aliada ao relacionamento amistoso.

Aos amigos Renata Monte e Isaac Galobardes, por sempre estarem dispostos a colaborar com o desenvolvimento deste trabalho.

Aos profissionais dos laboratórios da Escola Politécnica da USP, por terem atuado e disponibilizado recursos para a condução dos ensaios realizados neste estudo.

Aos amigos Augusto Bevilaqua e Adriano Spiguel, por terem respondido a demandas de trabalho na empresa enquanto me ausentava para o cumprimento do programa do curso e por contribuírem durante a preparação de corpos de prova, essenciais para a conclusão da pesquisa.

Aos membros da banca de defesa, Prof. Dr. Luiz Roberto Prudêncio Júnior (UFSC) e Dr. Hugo Sogayar Armelin (Votorantim Cimentos), por sua cuidadosa avaliação e por suas contribuições ao trabalho.

À Petróleo Brasileiro S.A., por ter permitido minha participação neste programa de Mestrado e por ter viabilizado a pesquisa.

A todos que em qualquer momento ofereceram ao menos uma palavra de incentivo e suporte.

Agradeço sobretudo a Deus, por nos oferecer a todo momento provas de sua existência e permitir que possamos passar através das portas das oportunidades que se abrem toda vez que um novo desafio surge.

O Aprendizado é o significado mais límpido da vida, pois jamais se termina uma existência sem que se aprenda algo.

(Maria Clara Fraga Lopes)

RESUMO

O concreto é o material de construção mais utilizado no mundo apesar do seu comportamento frágil e sua baixa capacidade de resistir a esforços de tração. As fibras de aço podem ser adicionadas ao concreto para aumentar sua tenacidade resultando no concreto reforçado com fibras (CRF) que pode ser utilizado em muitas aplicações, incluindo o concreto projetado. Desta forma, os parâmetros de tenacidade e de resistência residual são fundamentais para a caracterização do concreto projetado reforçado com fibras de aço (CPRFA) e para seu controle de qualidade quando utilizado com função estrutural.

Atualmente, o controle do comportamento pós-fissuração do CPRFA é realizado, fundamentalmente, através do ensaio de flexão de prismas. Isto demanda atividades bastante trabalhosas, desde a moldagem de placas extras e a extração de testemunhos prismáticos como a realização de ensaios que requerem muitos cuidados e, também, gera um volume maior de resíduos. A variabilidade dos resultados também é elevada, reduzindo o grau de confiabilidade do processo.

Como as fibras são o material com menor nível de incorporação ao concreto devido ao efeito da reflexão, o controle do teor efetivamente incorporado ao CPRFA é um aspecto fundamental desta tecnologia. Atualmente, a estimativa deste teor de fibras é realizada por medições de massa do conteúdo de fibra obtido por esmagamento de corpos de prova endurecidos ou por lavagem de amostra de CPRFA em estado fresco, métodos considerados dispendiosos ou que consomem muita água.

A fim de resolver alguns dos inconvenientes atuais, o presente estudo experimental foi realizado com o objetivo de se avaliar a utilização do ensaio Barcelona para classificar a resistência residual do CPRFA e compará-lo com o ensaio de flexão de prismas. Para a determinação do teor de fibras o método indutivo foi realizado nos mesmos corpos de prova. Nesse sentido, concretos projetados com diferentes teores de fibra foram analisados através dos métodos de ensaio referidos. Os resultados do ensaio Barcelona foram analisados estatisticamente e demostraram boa correlação com os resultados do ensaio de prismas e capacidade de caracterização do comportamento pós-fissuração do CPRFA. O ensaio indutivo permitiu a determinação do teor de fibras efetivamente incorporado ao concreto a partir dos mesmos corpos de prova usados no ensaio Barcelona, sem que houvesse a necessidade de extração de novas amostras.

Este estudo apresentou, então, contribuições ao estabelecimento de programas de controle de qualidade do CPRFA, demonstrando a viabilidade da utilização conjunta do ensaio Barcelona e do método indutivo como ferramentas de caracterização e controle do CPRFA. A aplicação conjunta dos dois ensaios proporciona redução significativa em termos de tempo de trabalho e de resíduos gerados durante todo o processo de controle do material.

Palavras-Chave: Concreto projetado. Concreto reforçado com fibras. Controle da qualidade. Ensaios mecânicos. Ensaios magnéticos.

ABSTRACT

Concrete is the most used construction material in the world despite its fragility and low capacity to bear tensile stresses. Steel fibres may be added to the material in order to increase its toughness providing conditions to fibre reinforced concrete (FRC) to be used in many applications, such as sprayed concrete. Thus, the toughness and residual strength are key parameters for the characterization of the steel fiber reinforced sprayed concrete (SFRSC). So, both parameters are frequently used in the quality control program of SFRSC when applied as a structural material.

Currently, the control of post-cracking behavior of SFRSC is carried out primarily through the bending test of prismatic specimens. This test procedure is quite laborious involving time demanding activities such as the molding of extra panels and the extraction of prismatic specimens, as well as, the test requires great care, generating a larger volume of waste. The variability of the results is also high, reducing the degree of process reliability.

As the fibers are the material with lower incorporation into the concrete due to the effect of rebound, the determination of the fiber content incorporated into the SFRSC is a key aspect of this technological control. Currently, the estimation of the actual content of the fibers in SFRSC is carried out by mass measurements of the fibers extracted from crushing the hardened specimens or by washing fresh SFRSC samples. Both teste methods are considered expensive and consume high volumes of water.

In order to solve some of the current drawbacks, the present experimental study was carried out to promote the assessment of the use of the Barcelona test to classify the residual strength of the SFRSC and to compare it with the prismatic specimens flexural test. To determine the fibre content the inductive test method was performed in the same specimens. In that sense, SFRSC was used to produce series of test panels varying the fibre content. Prismatic and cylindrical specimens were extracted from these test panels and submitted to the referred test methods. The results were statistically analysed and demonstrate a good correlation between flexural and Barcelona test results. The results confirm the ability of the Barcelona test to characterize the SFRSC post-cracking behavior. The inductive test, carried out in the same specimen of Barcelona test allowed the determination of actual fiber content to the concrete without the need of extra samples.

This study presents, then, contributions to the quality control program for SFRSC and demonstrates the feasibility of using the Barcelona test and inductive method as tools for characterization and control for SFRSC. The combined application of the two tests provides a significant reduction in terms of labour time and waste generated during the quality control process.

Keywords: Sprayed concrete. Fibre reinforced concrete. Quality control. Mechanical tests. Magnetic tests.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Fibras de aço soltas curtas (a) e longas (b) e longas coladas (c)7
Figura 2 – Esquema de concentração de tensões para um concreto simples (a) e com
reforço de fibras (b)8
Figura 3 - Concreto reforçado com fibras em que há compatibilidade dimensional
entre estas e o agregado (A) e onde não há (B)9
Figura 4 – Máquina de projeção de concreto via seca a rotor
Figura 5 – Equipamento de projeção via úmida fluxo denso-bomba a pistão e detalhe
do bico de projeção10
Figura 6 – Posicionamento de corpo de prova, LVDT e cutelos no ensaio de tração na
flexão com o sistema "yoke"11
Figura 7 – Esquema do ensaio de puncionamento de placas quadradas segundo
EFNARC (1996)
Figura 8 – Ensaio de puncionamento de placas circulares segundo ASTM C1550
(2005)
Figura 9 – Fibras Wirand FSN3, tipo A-I20
Figura 10 - a) Processo de moldagem; b) determinação do índice de reflexão da
aplicação; c) agulha de proctor para determinação da consistência do concreto22
Figura 11 - a) Extração dos corpos de prova b) Máquina de corte de disco radial.23
Figura 12 – Execução do EB25
Figura 13 – Aspecto do gráfico Carga x deslocamento vertical da prensa25
Figura 14 – Exemplo de determinação das cargas características de cada CP27
Figura $15 - Gráficos CV \times F_i$ para cada teor de fibra: a) $C_{f,i} = 20 \text{ kg/m}^3$; b) $C_{f,i} = 35 \text{ kg/m}^3$;
c) $C_{f,i} = 55 \text{kg/m}^3$
Figura 16 - Processo de projeção
Figura 17- Corpos de prova obtidos de cada placa (medidas em mm)
Figura 18 - Ensaio de viga EFNARC
Figura 19 - Classes de resistência residual para CPRFA definidas pela EFNARC38
Figura 20 - Corpo de prova sob Ensaio Barcelona a) e corpos de prova fissurados b)
Figura 21 - Curvas F- δ obtidas dos concretos C20 a) e C55 b) pela execução do
ensaio EFNARC41

Figura 22 - Curvas F x δ e E x δ obtidas dos concretos C20 a) e C55 b) pela execução
do Ensaio Barcelona43
Figura 23 - Correlação entre os coeficientes A a) e B b) para δ 46
Figura 24 - Relação entre Vexp e Vest obtida pelo método proposto47
Figura 25 - Classificação dos concretos C20 e C55 por meio dos resultados dos
ensaios EFNARC e Barcelona47
Figura 26 - Nova correlação entre os coeficientes A a) e B b) para δ 49
Figura 27 - Nova classificação dos concretos C20 e C55 por meio dos resultados dos
ensaios EFNARC e Barcelona49
Figura 28 - Estimativa da carga para um deslocamento vertical de 0,5 mm para os
concretos C20 a) e C55 b) usando os resultados do ensaio EFNARC50
Figura 29 - Fibra utilizada no estudo55
Figura 30 - Equipamento do método indutivo a) e amostra sendo testada b)
Figura 31 - Cilindro de isopor utilizado na calibração do método indutivo a) e gráfico
com a equação de calibração b)60
Figura 32 - Método tradicional a) e comparação entre C _{f,i} e C <i>f,r</i> b)60
Figura 33 - Relação entre C _{f,p} e C _{f,i} 63
Figura 34 - Metodologia proposta para o controle do teor de fibras do CPRFA baseado
no método indutivo64
Figura 35 - Equipamento do método indutivo a) e corpo de prova durante ensaio b)
70
Figura 36 - Corpo de prova cilíndrico de poliestireno expandido usado na calibração
do método a) e equação de calibração b)72
Figura 37 – Correlação entre $C_{f,p}$ e $C_{f,i}$
Figura 38 - Resultados do ensaio Barcelona para traços com $C_{f,p}$ igual a 20 a), 35 b)
e 55 kg/m³ c)75
Figura 39 - Relação entre C _{f,i} e tenacidade (E)76
Figura 40 - Diagramas σ - ϵ para traços com C _{f,p} igual a 20 a), 35 b) e 55 kg/m ³ c) .77
Figura 41 - Metodologia proposta para caracterizar e controlar o CPRFA79

LISTA DE TABELAS

Tabela 2. 1 – Caracterização dos agregados20
Tabela 2. 2 – Ensaio mecânico das fibras de aço21
Tabela 2. 3 – Consumos (kg/m ³) e traço do concreto21
Tabela 2. 4 – Identificação dos corpos de prova24
Tabela 2. 5 - Consistência, Índice de reflexão, resistência à compressão e teor de
absorção dos concretos26
Tabela 2. 6 – Cargas características das diferentes placas moldadas e teores de fibra
Tabela 2. 7 – Valores-p para os testes da análise de variância (ANOVA)28
Tabela 2. 8 – Coeficientes de variação das cargas F_{cr} e F_i em relação aos teores de
fibra C _{f,i}
Tabela 3. 1 - Traço da matriz de referência 35
Tabela 3. 2 - Resultados obtidos de resistência residual - <i>f</i> _{Rim} (MPa)42
Tabela 3. 3 - Cargas ($F_{BCN,\delta}$) e energias ($E_{BCN,\delta}$) para diferentes deslocamentos
verticais(δ) obtidos (em kN e J, respectivamente)44
Tabela 3. 4 – Coeficientes de variação de resistências residuais do ensaio EFNARC
45
Tabela 3. 5 – Coeficientes de variação de cargas residuais do ensaio Barcelona45
Tabela 4. 1 - Traço de referência do concreto56
Tabela 4. 2 - Resultados da comparação entre os métodos61
Tabela 4. 3 - Resumo dos resultados do estudo62
Tabela 5. 1 - Traço experimental de concreto projetado 69
Tabela 5. 2 - Resultados globais do método indutivo

SUMÁRIO

1. IN	ITRO	DUÇÃO	7
1.1.	CIF	RCUNSTANCIAÇÃO E JUSTIFICATIVA	7
1.2.	OB	JETIVOS	14
1.3.	ES	TRUTURAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	15
2. A	VALI	AÇÃO DA DISPERSÃO DE RESULTADOS DO ENSAIO BARCE	ELONA
17	7		
2.1.	INT	FRODUÇÃO	17
2.2.	PR	OGRAMA EXPERIMENTAL	19
2.	2.1.	Materiais	19
2.	2.2.	Processo de projeção	21
2.	.2.3.	Obtenção dos corpos de prova	23
2.	.2.4.	Ensaio Barcelona	24
2.3.	RE	SULTADOS E ANÁLISES	26
2.4.	CC	NCLUSÕES DO CAPÍTULO	30
3. A	VALI	AÇÃO COMPARATIVA DO ENSAIO BARCELONA E DE FLEX	ÃO DE
PRISM	IAS.		32
3.1.	INT	FRODUÇÃO	32
3.2.	ME	TODOLOGIA	33
3.	.2.1.	Materiais	34
3.	.2.2.	Dosagem do concreto	34
3.	2.3.	Processo de projeção e preparação de amostras	35
3.	2.4.	Métodos de ensaio	36
3.3.	RE	SULTADOS EXPERIMENTAIS	40
3.	.3.1.	Ensaio de flexão de viga EFNARC	40
3.	3.2.	Ensaio Barcelona	42
3.4.	AN	ÁLISE DOS RESULTADOS	45
3.	4.1.	Correlação entre os ensaios	45
3.	4.2.	Classificação e verificação	47
3.	4.3.	Aprimoramento da metodologia	48
3.5.	CC	NCLUSÕES DO CAPÍTULO	50
4. D	ETEF	RMINAÇÃO DO TEOR DE FIBRAS EM CPRFA ATRAVÉS DO MÉ	TODO
	ΓΙνο		53

4.1. INT	ſRODUÇÃO	53
4.2. ME	TODOLOGIA	54
4.2.1.	Materiais	55
4.2.2.	Traço do concreto	56
4.2.3.	Processo de projeção e extração de testemunhos	56
4.2.4.	Métodos de ensaios	57
4.3. RE	SULTADOS E ANÁLISES	59
4.3.1.	Calibração do método indutivo	59
4.3.2.	Comparação entre os métodos indutivo e tradicional	60
4.3.3.	Estimação do teor de fibra no CPRFA	61
4.3.4.	Metodologia para o controle do teor de fibras do CPRFA	63
4.4. CC	NCLUSÕES DO CAPÍTULO	65
5. APLIC	AÇÃO DE METODOLOGIA ALTERNATIVA DE CONTROLE	DO CPFRA
66		
5.1. INT	ſRODUÇÃO	66
5.1. INT 5.2. ME	TRODUÇÃO TODOLOGIA	66 68
5.1. INT 5.2. ME 5.2.1.	TRODUÇÃO TODOLOGIA Materiais	66 68 68
5.1. INT 5.2. ME 5.2.1. 5.2.2.	TRODUÇÃO TODOLOGIA Materiais Traço de concreto	66 68 68 69
5.1. INT 5.2. ME 5.2.1. 5.2.2. 5.2.3.	TRODUÇÃO TODOLOGIA Materiais Traço de concreto Processo de projeção e preparação de corpos de prova	
5.1. INT 5.2. ME 5.2.1. 5.2.2. 5.2.3. 5.2.4.	TRODUÇÃO TODOLOGIA Materiais Traço de concreto Processo de projeção e preparação de corpos de prova Procedimentos de ensaio	
5.1. INT 5.2. ME 5.2.1. 5.2.2. 5.2.3. 5.2.4. 5.3. RE	TRODUÇÃO TODOLOGIA Materiais Traço de concreto Processo de projeção e preparação de corpos de prova Procedimentos de ensaio SULTADOS E ANÁLISES	
5.1. INT 5.2. ME 5.2.1. 5.2.2. 5.2.3. 5.2.4. 5.3. RE 5.3.1.	TRODUÇÃO TODOLOGIA Materiais Traço de concreto. Processo de projeção e preparação de corpos de prova Procedimentos de ensaio SULTADOS E ANÁLISES. Método Indutivo	
5.1. INT 5.2. ME 5.2.1. 5.2.2. 5.2.3. 5.2.4. 5.3. RE 5.3.1. 5.3.2.	TRODUÇÃO TODOLOGIA Materiais Traço de concreto. Processo de projeção e preparação de corpos de prova Procedimentos de ensaio SULTADOS E ANÁLISES Método Indutivo Ensaio Barcelona.	
5.1. INT 5.2. ME 5.2.1. 5.2.2. 5.2.3. 5.2.4. 5.3. RE 5.3.1. 5.3.2. 5.4. PR	TRODUÇÃO TODOLOGIA Materiais Traço de concreto. Processo de projeção e preparação de corpos de prova Procedimentos de ensaio SULTADOS E ANÁLISES Método Indutivo Ensaio Barcelona. OPOSTA DE MÉTODO PARA CONTROLAR O COMPOR	
5.1. INT 5.2. ME 5.2.1. 5.2.2. 5.2.3. 5.2.4. 5.3. RE 5.3.1. 5.3.2. 5.4. PR PÓS-FIS	TRODUÇÃO TODOLOGIA Materiais Traço de concreto Processo de projeção e preparação de corpos de prova Procedimentos de ensaio SULTADOS E ANÁLISES Método Indutivo Ensaio Barcelona OPOSTA DE MÉTODO PARA CONTROLAR O COMPOR SURAÇÃO DO CPFRA	
5.1. INT 5.2. ME 5.2.1. 5.2.2. 5.2.3. 5.2.4. 5.3. RE 5.3.1. 5.3.2. 5.4. PR PÓS-FIS 5.5. CO	TRODUÇÃO TODOLOGIA Materiais Traço de concreto Processo de projeção e preparação de corpos de prova Procedimentos de ensaio SULTADOS E ANÁLISES Método Indutivo Ensaio Barcelona OPOSTA DE MÉTODO PARA CONTROLAR O COMPOR SURAÇÃO DO CPFRA DNCLUSÕES DO CAPÍTULO	
5.1. INT 5.2. ME 5.2.1. 5.2.2. 5.2.3. 5.2.4. 5.3. RE 5.3.1. 5.3.2. 5.4. PR PÓS-FIS 5.5. CC 6. CONC	TRODUÇÃO TODOLOGIA Materiais Traço de concreto Processo de projeção e preparação de corpos de prova Procedimentos de ensaio SULTADOS E ANÁLISES Método Indutivo Ensaio Barcelona OPOSTA DE MÉTODO PARA CONTROLAR O COMPOR SURAÇÃO DO CPFRA NCLUSÕES DO CAPÍTULO LUSÃO	

1. INTRODUÇÃO

1.1. CIRCUNSTANCIAÇÃO E JUSTIFICATIVA

Os materiais para construção vêm evoluindo consideravelmente nos últimos anos e concretos especiais são cada vez mais estudados. Destaca-se neste cenário a produção de compósitos através da adição de fibras ao concreto, no intuito de que estas reduzam algumas limitações do concreto como sua fragilidade e sua baixa capacidade de deformação quando tracionado.

Um dos tipos de fibras utilizados para produção de concretos reforçados com fibra (CRF) é a metálica, predominantemente as de aço, cuja especificação é normatizada segundo a ABNT NBR 15530 (2007). A **Figura 1** apresenta exemplos de fibras de aço curtas e longas, soltas ou coladas em pentes.



Figura 1 – Fibras de aço soltas curtas (a) e longas (b) e longas coladas (c)

Fonte: Figueiredo (2011)

Segundo Figueiredo (2011a), o concreto quando recebe a adição de fibras de resistência e módulo adequados e em teor apropriado deixa de ter o caráter marcadamente frágil, devido a estas servirem como ponte de transferência de tensões pelas fissuras, diminuindo sua concentração nas extremidades da fissura que diminuem, por sua vez, a velocidade de sua propagação. A Figura 2 ilustra o comportamento de concretos, sem fibras e com fibras, submetidos a esforços de tração.



Figura 2 – Esquema de concentração de tensões para um concreto simples (a) e com reforço de fibras (b)

Fonte: Nunes; Tanesi; Figueiredo (1997).

Figueiredo (2011) afirma que se faz necessário vencer várias dificuldades tecnológicas para a confirmação da aplicação do CRF como uma técnica amadurecida do ponto de vista de engenharia nas condições nacionais. O autor comenta sobre a falta de embasamento técnico de muitos especificadores e aplicadores brasileiros, o que é agravado pela carência de referências normativas a respeito do assunto, havendo uma grande dificuldade de transferência dos resultados de pesquisa para o meio produtivo.

Figueiredo (2011) comenta também que, além do fator forma, definido como a relação entre o comprimento da fibra e o diâmetro do círculo com área equivalente à de sua seção transversal, o comprimento da fibra sempre merece atenção. O autor salienta a recomendação de se utilizar fibras cujo comprimento seja igual ou superior ao dobro da dimensão máxima característica do agregado utilizado no concreto, promovendo a compatibilidade dimensional entre agregados e fibras de modo que estas interceptem com maior frequência a fissura que ocorre no compósito e possibilitando a atuação da fibra com o reforço do concreto e não como mero reforço da argamassa do concreto. A Figura 3 (A) representa um concreto com compatibilidade dimensional entre agregado e fibra, e a Figura 3 (B), outro onde isso não corre. Neste último observa-se a maior inclinação das fibras induzida pelo agregado em relação à superfície de fratura acarretando sua menor eficácia como ponte de transferência de tensões.

Figura 3 – Concreto reforçado com fibras em que há compatibilidade dimensional entre estas e o agregado (A) e onde não há (B).



Fonte: Figueiredo (2000).

Para se alcançar esta compatibilidade entre as dimensões da fibra e do agregado, no sentido de maximizar a tenacidade, reduz-se a dimensão máxima característica do agregado ou aumenta-se o comprimento da fibra. Para a aplicação de concreto projetado, pode-se utilizar fibras curtas para facilitar sua passagem e dos agregados, geralmente com dimensão máxima característica igual ou inferior a 9,5 mm, por um mangote de dimensões reduzidas.

Com relação à quantidade de fibras a ser empregada, Miguel (2001) relata que a eficiência do reforço proporcionado pelas fibras cresce à medida que o espaço entre elas diminui, o que se infere dar preferência às fibras mais finas, permitindo uma concentração volumétrica maior para uma mesma quantidade em peso.

Uma das possibilidades de aplicação do concreto, seja ele simples ou reforçado com fibras, é a projeção sob pressão. O concreto projetado é constituído de agregado com dimensão máxima superior a 4,8 mm, geralmente limitada a 19 mm, transportado por uma tubulação e projetado, sob pressão, à elevada velocidade, sobre uma superfície, sendo autocompactado simultaneamente. Para Prudêncio Jr. (2011) seu uso principal é no revestimento de obras subterrâneas e taludes, além de reparo de estruturas, por dispensar o uso de formas e proporcionar grande velocidade nas operações de lançamento e adensamento do concreto.

O concreto pode ser projetado por via seca, no qual os equipamentos normalmente utilizados são máquinas a rotor conforme a Figura 4, ou por via úmida, no qual podese utilizar o mesmo equipamento da Figura 4 ou equipamentos de fluxo denso onde são empregadas bombas a pistão ou dotadas de parafuso com rosca sem fim conforme Figura 5.



Figura 4 – Máquina de projeção de concreto via seca a rotor

Fonte: Prudêncio Jr. (2011)

Figura 5 – Equipamento de projeção via úmida fluxo denso-bomba a pistão e detalhe do bico de projeção



Fonte: Prudêncio Jr. (2011)

Miguel (2001) afirma que a adição de fibras de aço ao concreto projetado busca propiciar ao concreto uma maior capacidade de absorção de energia, uma maior resistência à fissuração, possibilitar maior resistência ao impacto e conferir ductilidade ao concreto. Correia (2012) também ressalta que o uso de fibras no concreto visa o aumento da ductilidade e da tenacidade, melhor controle da fissuração das peças e não o aumento da resistência do compósito, o que demandaria altos teores de fibras e poderia piorar a trabalhabilidade.

Figueiredo e Helene (1997) ressaltam que a utilização de fibras de aço na aplicação como reforço do concreto projetado se destaca frente à utilização de outros tipos de fibra, por apresentar uma série de vantagens. Para o controle do concreto projetado simples, os autores esclarecem que é necessário estudar o desenvolvimento de

métodos de avaliação do material em laboratório, sem utilização do equipamento de projeção, desenvolver um ensaio de tração na flexão com deformação controlada, de modo a minimizar ou mesmo eliminar o fenômeno da instabilidade pós-pico e estabelecer critérios de medição do comportamento pós-fissuração, com aceitação a nível internacional, de modo a possibilitar a uniformização da modelagem e procedimentos para o dimensionamento do material.

Figueiredo e Helene (1993) afirmam que, nas obras executadas através de concreto projetado, deve-se descrever o equipamento e o suporte utilizado para a projeção do concreto assim como os detalhes completos sobre o ambiente e a forma de execução para que não se credite a culpa ao material caso não sejam satisfeitos requisitos e critérios de desempenho exigidos. O controle sobre o material concreto projetado também deve ser abrangente, considerando-se aspectos desde a dosagem até o uso e controlando-se suas propriedades específicas dependentes do processo de projeção como a reflexão, desplacamento, produção de poeira e névoa, homogeneidade e aderência.

Para o controle específico do concreto com fibras, Figueiredo (2011b) relata uma série de ensaios tecnológicos para caracterização deste concreto, mencionados a seguir:

 Ensaio de determinação da tenacidade em prismas segundo critérios da JSCE SF-4 (1984) e da EFNARC (1996), ilustrados pela Figura 6, e segundo critérios da ASTM C 1399-10 e RILEM TC162 (2002).









 Ensaio de determinação da tenacidade em placas segundo critérios da EFNARC (1996), ilustrado pela Figura 7 e segundo a norma americana ASTM C1550 (2005) ilustrada na Figura 8.

Figura 7 – Esquema do ensaio de puncionamento de placas quadradas segundo EFNARC (1996)



Fonte: Figueiredo e Helene (1997)



Figura 8 – Ensaio de puncionamento de placas circulares segundo ASTM C1550 (2005)

Fonte: ASTM C1550 (2005)

- Ensaio de verificação da trabalhabilidade segundo critérios da ASTM C995-94 e pelo método VeBe.
- Ensaio de determinação do ganho quanto à tenacidade na compressão segundo critérios da JSCE-SF5 (1984).

Salvador (2013) comparou métodos de ensaio utilizados para caracterização do desempenho mecânico de concreto reforçado com fibras, utilizando-se de quatro procedimentos de ensaio: ASTM C1609 (2010a), ASTM C1399 (2010b), JSCE-SF4 (1984) e EN 14651 (2007). Uma de suas conclusões trata-se de que cada método de ensaio proporciona um resultado distinto e sua escolha deve estar de acordo com o solicitado para a especificação de projetos de dimensionamento ou de controle de qualidade. O autor concluiu também que seus resultados não podem ser extrapolados para toda e qualquer aplicação, devendo-se realizar estudos específicos com diferentes elementos estruturais para a obtenção da resposta do material para determinadas aplicações.

Para o controle do concreto projetado, Prudêncio Jr. (2011) relata, além de diversos ensaios ainda não normalizados, uma série de testes e ensaios tecnológicos para caracterização deste concreto, mencionados a seguir:

- Ensaio de reconstituição da mistura recém-projetada, segundo critérios da ABNT NBR 13044 (1993);
- Ensaio de determinação dos tempos de pega em pasta de cimento portland, com ou sem a utilização de aditivo acelerador de pega, segundo critérios da ABNT NBR 13069 (1994);
- Moldagem de placas para ensaio de argamassa e concreto projetados, segundo critérios da ABNT NBR 13070 (1994);
- Ensaio de determinação do índice de reflexão por medida direta, segundo critérios da ABNT NBR 13354 (1995);
- Ensaio de determinação da consistência através da agulha de Proctor, segundo critérios da ABNT NBR 14278 (1999).

Além dos diversos ensaios tecnológicos mencionados, Figueiredo (2011c) afirma que, para a aplicação de concretos projetados, é fundamental realizar o controle da velocidade de projeção através da calibração da pressão de ar adequada para cada equipamento e da parametrização para o controle do processo de projeção nas condições de campo. O autor ressalta a importância do controle da pressão para garantia do atendimento aos requisitos de desempenho estabelecidos para o material. Isto indica que o controle do concreto projetado também se trata de um controle de produção. Dessa forma, todos os métodos de ensaio acabam sendo baseados em corpos de prova preparados a partir de testemunhos extraídos de placas, normalmente moldadas segundo norma específica (ABNT NBR 13070: 2012). Dessa forma, os ensaios de avaliação da tenacidade do concreto projetado reforçado com fibras acabam por demandar um processo trabalhoso de corte de placas para a produção de prismas ou, no caso dos ensaios em placas, a necessidade de trabalhar com corpos de prova muito pesados que exigem pórticos com grandes vãos. Tudo isso torna o processo de controle de qualidade trabalhoso e uma fonte importante de geração de resíduos dada a necessidade de moldagem de placas específicas para a realização deste tipo de controle.

Blanco et al. (2012) apresentam dois métodos de ensaio alternativos para a caracterização das propriedades de CRF. O primeiro refere-se ao ensaio Barcelona, utilizado para se determinar o comportamento pós- fissuração à tração do concreto reforçado com fibras, e o segundo refere-se ao método indutivo para avaliação do conteúdo e orientação das fibras no concreto reforçado com fibras de aço. A autora conclui que os métodos apresentados podem ser considerados como ferramentas para o controle de qualidade de CRF. Como podem ser realizados em corpos de prova cilíndricos de pequenas dimensões (10 cm de diâmetro por 10 cm de altura) são mais facilmente obtidos a partir de testemunhos cilíndricos extraídos de placas que tenham sido moldadas também para o controle regular de resistência à compressão do concreto projetado.

Neste cenário, este trabalho experimental de pesquisa busca fornecer uma contribuição para o desenvolvimento de uma metodologia de controle do comportamento mecânico para concretos projetados reforçados com fibra de aço que possibilite fácil realização do processo. Em paralelo, pode-se obter um ganho de confiabilidade no controle de qualidade do produto e de seu processo de aplicação com redução de custos de implantação.

1.2. OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho é propor uma nova metodologia de controle do concreto projetado reforçado com fibras de aço. Neste sentido, também serão buscados os seguintes objetivos específicos:

- Verificar a confiabilidade do ensaio Barcelona para o controle do comportamento pós-fissuração do concreto projetado reforçado com fibras de aço através da parametrização de seu nível de dispersão.
- Verificar a possibilidade de substituição dos ensaios de flexão pela realização do ensaio Barcelona de puncionamento de corpos de prova cilíndricos.
- Avaliar a aplicabilidade do ensaio indutivo para a determinação do teor de fibra incorporado em corpos de prova destinados ao ensaio Barcelona.

1.3. ESTRUTURAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

A metodologia a ser contemplada neste trabalho está baseada em uma pesquisa quantitativa, obtida por meio da análise e comparação dos resultados de ensaios de desempenho mecânico em corpos de prova de concreto projetado reforçado com fibras de aço utilizado na execução de uma obra de estabilização de talude na refinaria Presidente Bernardes em Cubatão. Da moldagem in loco de placas de CPRFA, elaborado em cinco teores distintos de fibra de aço, foram cortados corpos de prova prismáticos para submissão a ensaios de flexão de vigas e extraídos corpos de prova cilíndricos para submissão a ensaios Barcelona de puncionamento e a medições de variação de indutância em função do teor de fibras de aço.

A presente pesquisa está estruturada em capítulos que apresentam artigos tecnocientíficos submetidos ou aptos à submissão em congressos ou periódicos relevantes na área de materiais da construção civil. Os artigos foram elaborados em uma sequência lógica para validação dos ensaios citados e para a consolidação de uma metodologia alternativa para controle de qualidade da aplicação estrutural do CPRFA.

O capítulo 2 apresenta o ensaio Barcelona e seus resultados para o programa experimental realizado, traz análises da dispersão dos dados de saída do ensaio e discorre sobre constatações obtidas da aplicação para CPRFA.

O capítulo 3 apresenta correlações entre o ensaio Barcelona e o ensaio de flexão de vigas segundo recomendações da EFNARC e demonstra a viabilidade de se

classificar o CPRFA segundo parâmetros de resistência residual já preconizados na EFNARC.

O capítulo 4 apresenta o método indutivo para determinação do teor de fibras de aço efetivamente incorporado ao concreto projetado, compara seus resultados ao método tradicional de obtenção deste teor e apresenta a sistemática de definição de equação para estimativa da reflexão de fibras em relação às condições de aplicação do CPRFA.

O capítulo 5 apresenta uma metodologia para controlar o comportamento pósfissuração do CPRFA baseada na aplicação combinada do ensaio Barcelona e do método indutivo nos mesmos corpos de prova. Esta metodologia associada aos ensaios e controles já consolidados em normas técnicas e práticas do mercado compõe a proposta de um programa de controle de qualidade da aplicação estrutural do CPRFA.

O capítulo 6 apresenta as conclusões do trabalho e as propostas para futuros estudos.

2. AVALIAÇÃO DA DISPERSÃO DE RESULTADOS DO ENSAIO BARCELONA

Como comentado anteriormente, um dos pontos críticos do CPRFA é a variabilidade dos ensaios de caracterização de seu comportamento mecânico realizado por ensaios prismáticos (MORGAN et al., 1995). Neste sentido, seria interessante analisar o potencial de uso do ensaio Barcelona e especialmente no que se refere à sua variabilidade. Assim, em uma abordagem inicial, no intuito de analisar as características do ensaio Barcelona aplicado ao CPRFA, buscou-se avaliar a qualidade de seus dados quanto à dispersão de cargas de fissuração e residuais pósfissuração e compará-las com a dispersão característica deste material. Este capítulo está baseado em artigo publicado anteriormente pelo autor (Silva et al., 2015).

2.1. INTRODUÇÃO

A função mais importante das fibras no concreto é o aumento de sua tenacidade através do aumento da resistência residual pós-fissuração. Estes parâmetros são fundamentais para a caracterização de concretos reforçados com fibras (CRF) e para seu controle de qualidade. Para as condições em que o CRF se destina a aplicações estruturais, as condições de variabilidade do comportamento pós-fissuração são também importantes. O problema é que este aspecto é historicamente apontado (MORGAN et al., 1995) como um dos problemas associados ao concreto projetado reforçado com fibras de aço (CPRFA) especialmente no que ser refere ao comportamento pós-fissuração. Morgan et al. (1995) afirmaram que o coeficiente de variação do ensaio de tenacidade pode facilmente superar os 20%, o que dificultaria ou mesmo inviabilizaria o uso de valores característicos do resultado para aplicações estruturais do CPRFA. Isto ocorre devido a vários fatores. Um deles é o fenômeno da reflexão, que pode alterar o teor de fibra efetivamente incorporado ao concreto projetado, conforme já discutido em trabalhos anteriores de Figueiredo e Helene (1997) e Armelin (1997). Assim, há o risco de uma menor homogeneidade do teor de fibras presente em cada corpo de prova. Por outro lado, os próprios ensaios de tração por flexão para o CRF convencional também costumam apresentar grande variabilidade. Assim, alguns autores costumam calcular valores característicos de resistência residual considerando, de maneira simplificada, como este valor igual a 70% do valor médio (JANSSON et al., 2008) ou como 90% do menor valor encontrado (SILFWERBRAND, 2001). Isto evitaria o uso de estimadores estatísticos que podem gerar valores negativos para a resistência residual característica pós-fissuração. Com a publicação do novo código modelo da *fib* (fib, 2013) e a introdução de valores característicos para a resistência residual, isto passa a ser ainda mais crítico para a viabilização do uso de fibras como reforço. Por outro lado, para estruturas redundantes e com grande capacidade de reforço, di Prisco et al. (2009) sugeriu a possibilidade de utilização de valores médios, o que é muito positivo para o caso de túneis e revestimentos de taludes onde o CPRFA é usado com grande frequência. De qualquer maneira, a redução da variabilidade do ensaio do material iria aumentar o grau de confiança nas determinações realizadas num programa de controle de qualidade do CPRFA.

No intuito de analisar métodos de controle da tenacidade de CRF, Salvador (2013) comparou vários métodos de ensaio (ASTM C1609, 2010; ASTM C1399, 2010; JSCE-SF4, 1984; EN 14651, 2007) utilizados para caracterização do desempenho mecânico de concreto reforçado com fibras. Uma de suas conclusões afirma que cada método de ensaio proporciona um resultado distinto e sua escolha deve estar de acordo com o solicitado pela especificação oriunda do projeto de dimensionamento da estrutura e, também, com o exigido no programa estabelecido de controle de qualidade. O autor concluiu também que seus resultados não podem ser extrapolados para toda e qualquer aplicação, devendo-se realizar estudos específicos com diferentes elementos estruturais para a obtenção da resposta do material para determinadas aplicações. Ressalte-se que, para o caso específico do concreto projetado, há uma expectativa de elevada variabilidade na resposta de ensaio quando este consiste na flexão de prismas como os estudados por Salvador (2013), conforme já comentado.

Outros métodos de caracterização mecânica do CRF vêm sendo estudados recentemente (BLANCO et al., 2012). Ressalta-se o ensaio Barcelona, proposto como uma adaptação do ensaio Barcelona de duplo puncionamento de corpos de prova cilíndricos e monitoramento do aumento de seu perímetro (TCOD), que possibilita a determinação da resistência à fissuração, tenacidade e resistência residual à tração do concreto reforçado com fibras a partir de um ensaio de duplo puncionamento sobre

um corpo de prova cilíndrico e monitoramento do deslocamento vertical da prensa durante o ensaio. A correlação entre esses dois ensaios pode apresentar erro inferior a 6,7% (PUJADAS, 2013). Estudos recentes, como o Toaldo et al.(2013) e Carvalho et al.(2014), demonstram que este ensaio apresenta bons resultados e com reduzida variabilidade para avaliação do comportamento pós-fissuração de concretos reforçados com fibras.

Este capítulo apresenta então um estudo experimental com foco principal na análise de variabilidade da carga de fissuração e de cargas residuais pós-fissuração obtidas pelo EB em corpos de prova cilíndricos extraídos de placas moldadas de CPRFA dosados em três teores de fibras. Busca-se, através deste capítulo, contribuir para o desenvolvimento de uma metodologia de controle do comportamento mecânico para CPRFA que possibilite fácil realização com ganho de confiabilidade no controle de qualidade do produto.

2.2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Esta seção apresenta o programa experimental desenvolvido para este estudo. Primeiramente, os materiais utilizados, a dosagem do concreto de referência e os procedimentos de projeção são explicados. Subsequentemente, o processo de obtenção das amostras e os ensaios realizados são detalhados.

2.2.1. Materiais

2.2.1.1. Constituintes do concreto

Os componentes do concreto utilizados são oriundos de jazidas disponíveis na região de Cubatão – SP e foram obtidos da obra de revestimento de um talude da Refinaria Presidente Bernardes (RPBC) da Petrobras S.A.

A Tabela 2.1 apresenta informações de caracterização dos agregados. Apesar de distorções pontuais quanto à granulometria, os agregados atendem às especificações da norma ABNT NBR 7211 (2009). Estas frações foram selecionadas para assegurar uma boa trabalhabilidade das misturas, bem como para evitar problemas durante o

bombeamento, para reduzir o índice de reflexão de materiais na projeção e para gerar uma compactação ótima do concreto.

A água utilizada para amassamento do concreto foi avaliada quanto a parâmetros preliminares e submetida à análise química, atendendo às especificações da norma ABNT NBR 15900 (2009).

DETERMINAÇÕES	RESULTADOS POR AMOSTRA		
DETERMINAÇÕES	Areia Média rubão	Brita 0 rubão	
MÓDULO DE FINURA (NBR NM 248)	2,502	5,649	
DIMENSÃO MÁXIMA (NBR NM 248) (mm)	4,8	12,5	
MASSA ESPECÍFICA (NBR NM 52) (kg/dm ³)	2,607	2,698	
Fonte: Próprio	autor		

Tabela 2. 1 – Caracterização dos agregados

A fibra de aço utilizada foi a Wirand FSN3 (Figura 9), fornecidada pela Maccaferri. Esta fibra é do tipo A-I, recomendado para concreto projetado, com fator de forma e comprimento iguais a 44 e 33 mm, respectivamente. Foram avaliadas as características e propriedades da fibra de aço que estavam de acordo com a norma ABNT NBR 15530 (2007). As propriedades mecânicas determinadas seguem apresentadas na Tabela 2.2.



Figura 9 – Fibras Wirand FSN3, tipo A-I

Fonte: Próprio autor

	Limite de Resistência (MPa)	Alongamento (%)
Amostra 1	1157,65	1,682
Amostra 2	1150,64	1,390
Amostra 3	1136,60	1,234
	Fonte: Próprio autor	

Tabela 2. 2 – Ensaio mecânico das fibras de aço

O cimento utilizado foi o CP III 40 RS da Holcim, definido em função de sua disponibilidade na região da aplicação e de exigências ambientais e técnicas do projeto de revestimento do talude.

2.2.1.2. Traço do concreto

Os consumos de materiais constituintes, fornecido pela central dosadora, bem como o traço do concreto utilizado no estudo segue descrito na Tabela 2.3. A partir desta matriz única, foram elaborados concretos com teores estimados de fibra de 20 kg/m³, 35 kg/m³ e 55 kg/m³ para se estudar a influência do teor de fibra nos resultados.

	Cimento	Areia Média	Brita O	Água
Consumo	435	925	809	175
Traço	1	2,13	1,86	0,40
Fonte: Próprio autor				

Tabela 2. 3 – Consumos (kg/m³) e traço do concreto

2.2.2. Processo de projeção

A aplicação do CPRFA foi considerada via seca com pré-umidificação em face da adição acidental de água durante o processo de dosagem do concreto, além da umidade natural dos agregados. Ou seja, a máquina de projeção não foi alimentada com uma mistura seca, mas com uma mistura pré-umidificada, o que é distinto da via seca tradicional (Prudêncio Jr., 2011). O equipamento utilizado para projeção foi uma máquina CP- 3 fornecida pela Geotecmaq. Em complemento, foram utilizados uma bomba pneumática para pressurização de água adicionada no bico de projeção e um compressor de ar modelo ATF 398 fornecido pela Engebras. Os ajustes de pressão de ar e de água, monitorados por manômetros posicionados antes de suas válvulas de controle, foram respectivamente 14 kgf/cm² e 10,5 kgf/cm². Finalmente, o concreto

foi projetado por um mangoteiro qualificado segundo ABNT NBR 13597, auxiliado por um ajudante para garantir a estabilidade, além de posição e ângulos de projeção adequados.

As misturas foram projetadas sobre formas de madeira de 500x500 mm² de área útil (fundo) e uma altura de 125 mm. As placas foram moldadas conforme norma ABNT NBR 13070 (2012), exceto suas dimensões que foram modificadas para facilitar a preparação dos corpos de prova para o EB (Figura 10.a). Foram projetadas 6 placas no total, correspondendo a duas placas de ensaio para cada teor de fibra considerado no estudo.

Foram determinados, para cada teor de fibras, a consistência do concreto C e seu índice de reflexão IR na aplicação, conforme as normas ABNT NBR 14278 (2012) e ABNT NBR 13317 (2012) (Figuras 10.b e 10.c), visto que estes fatores podem influenciar de forma significativa a parte do CPRFA que efetivamente permanece aderida à superfície de aplicação, suas características e propriedades.

Figura 10 – a) Processo de moldagem; b) determinação do índice de reflexão da aplicação; c) agulha de proctor para determinação da consistência do concreto







Fonte: Próprio autor

2.2.3. Obtenção dos corpos de prova

Depois da projeção das placas de ensaio, o primeiro passo foi a desmoldagem das peças com uma idade mínima de 3 dias, a fim de que uma resistência mínima fosse assegurada e, com isso, nenhum dano fosse causado ao material durante o processo de desmoldagem. O procedimento foi simples, já que as placas eram robustas o suficiente para suportar ligeiros golpes. Usando um martelo os pregos que fixavam as peças de madeira dos moldes foram removidos. A madeira usada para construir o molde foi então descartada. Depois disso, as peças de concreto foram transportadas do local da obra para as instalações do laboratório da Universidade de São Paulo. As peças desmoldadas não foram submetidas a processo de cura, sendo armazenadas em condições ao ar livre e cobertas por lonas plásticas. Isto foi considerado no intuito de que as placas fossem mantidas em condições semelhantes às da obra e que geralmente corresponde com a prática de controle de qualidade das obras que utilizam CPRFA.

O segundo passo foi a extração de testemunhos cilíndricos a partir das placas de concreto projetado. Estes cilindros foram obtidos usando uma máquina de extração com uma broca de 100 mm de diâmetro (Figura 11.a). Três testemunhos foram extraídos dos painéis de teste de acordo com a norma ABNT NBR 7680 (2015). Em seguida, a face mais áspera dos testemunhos foi cortada para a obtenção de corpos de prova cilíndricos de 100 mm de comprimento, utilizando-se uma máquina de corte de disco (Figura 11.b).



Figura 11 - a) Extração dos corpos de prova b) Máquina de corte de disco radial

Fonte: Próprio autor

Os corpos de prova CP obtidos foram identificados conforme apresentado na Tabela 2.4.

Teor de fibras (kg/m³)	placas moldadas	Corpos de prova extraídos
20	А	AA, AB, AC
20	В	BA, BB, BC
25	Е	EA, EB, EC
55	F	FA, FB, FC
FF		IA, IB, IC
	J	JA , JB, JC

Tabela 2. 4 - Identificação dos corpos de prova

Fonte: Próprio autor

2.2.4. Ensaio Barcelona

O Ensaio Barcelona (EB) consiste em ensaio de duplo puncionamento de corpos de prova cilíndricos (SALUDES, 2006), normalizado pela norma espanhola UNE 83515 (2010). O EB aqui utilizado se diferenciou do normalizado pela substituição do monitoramento do aumento do perímetro dos corpos de prova pelo monitoramento do deslocamento vertical da prensa. Desta forma, o ensaio possibilita a determinação da resistência à fissuração, tenacidade e resistência residual à tração do concreto reforçado com fibras de maneira simples sem exigir sofisticação do equipamento de ensaio. Há uma boa correlação entre os resultados experimentais dos dois modelos, apresentando erros médios de apenas 6,7% (PUJADAS, 2013).

O puncionamento duplo sobre o corpo de prova é feito a partir de discos de carga com diâmetro em torno de ¼ do diâmetro do corpo de prova (no caso, 2,5 cm) dispostos nas faces deste e centralizados com o auxílio de uma cartolina da dimensão do corpo de prova e com um furo de 2,5 cm de diâmetro no centro (Figura 12).





Fonte: Próprio autor

Todos os corpos de prova foram ensaiados à mesma idade de 150 dias, gerando os dados de carga aplicada para deslocamentos verticais da prensa limitados a 6 mm de avanço. Como o ensaio proporciona o conhecimento do comportamento pósfissuração do compósito, foram identificados, a partir da carga de pico (F_{cr}), pontos característicos de carga nas curvas obtidos em intervalos de deslocamento uniformes F₁, F₂ e F₃ correspondentes respectivamente a 1 mm, 2 mm e 3 mm de deslocamento vertical da prensa. Para melhor visualização e comparação das curvas adotou-se o deslocamento referente à carga de pico como deslocamento inicial para todas as curvas. O aspecto dos gráficos está demonstrado na Figura 13.



Figura 13 – Aspecto do gráfico Carga x deslocamento vertical da prensa

Fonte: Próprio autor

2.3. RESULTADOS E ANÁLISES

A primeira análise que cabe a este estudo é a de variação da consistência do concreto projetado, conforme os resultados apresentados na Tabela 2.5. Nota-se que não houve variação significativa no índice de reflexão, o que pode ter gerado condições homogêneas de incorporação de fibras. Por outro lado, nota-se que há um aumento da consistência com o aumento do teor de fibras. Normalmente, isto não deveria ocorrer, uma vez que é perfeitamente possível realizar a projeção do concreto variando-se o teor de fibras e com manutenção do nível de consistência (ARMELIN, 1997 e FIGUEIREDO, 1997). Isto acaba afetando as condições de compactação da matriz, o que pode gerar distintos níveis de resistência de pico. Como o concreto projetado via seca ou semi-úmida tem consistência seca, sua resistência máxima é obtida quando o material está próximo da umidade ótima de compactação (PRUDÊNCIO Jr., 1993). Com isto, aumentar a consistência do concreto projetado via seca irá implicar em maior dificuldade de compactação proporcionada pelo jato e, consequentemente, maior porosidade e menor resistência do material. Assim, observa-se a diferença de resistência entre os concretos e de porosidade, mas não influenciada pela fibra utilizada como reforço para o material.

C _{f,i} (kg/m³)	IR (%)	C (MPa)	σ (Mpa)	Teor de absorção
20	13,2	2,2	60	5,5%
35	14,4	2,8	50	6,2%
55	15,2	4,4	41	8,2%
		_ / .		

Tabela 2. 5 – Consistência, Índice de reflexão, resistência à compressão e teor de absorção dos concretos

Fonte: Próprio autor

Após a determinação dos dados individuais de cada CP, como pode ser observado pelo exemplo tomado do CP EB (Figura 14), estes foram agrupados segundo cada placa moldada e cada teor de fibras adotado. A Tabela 2.6 apresenta, para cada carga característica determinada F_i, os valores da média $\chi_{p,i}$ e do desvio-padrão s_{p,i} dos CP de cada placa e também os valores da média $\chi_{f,i}$ e do desvio-padrão s_{f,i} dos CP de cada teor de fibras C_f.


Figura 14 – Exemplo de determinação das cargas características de cada CP

Com base nos valores obtidos, foram analisadas as dispersões dos dados de cada ponto característico por meio de análise de variância (ANOVA) pelo Método Linear Generalizado e de Teste de Igualdade de Variâncias pelo método Levene. Estes métodos buscam identificar se a dispersão dos dados configura mudanças importantes de média e variância de cada ponto característico entre os diferentes fatores analisados, o que pode definir a consistência dos dados obtidos e a coerência em relação ao comportamento esperado para os fenômenos observados. Todos os testes foram executados via Software Minitab versão 17 com um intervalo de confiança de 90 % ou nível de significância α de 10 %, satisfatório para análise de processos de projeção de concreto, influenciado por muitas variáveis de difícil controle. A Tabela 2.7 apresenta os valores-p dos testes realizados para os parâmetros teor de fibras Cr_i e placas para cada carga característica F_i.

Fonte: Próprio autor

C.,		Fcr(N)	F _{R1}	N)	F _{R2}	(N)	F _{R3} (N)
(kg/m ³)	Placa	$\chi_{p,cr} \pm s_{p,cr}$	$\chi_{\rm f,cr} \pm s_{\rm f,cr}$	χ _{p,1} ± s _{p,1}	$\chi_{\rm f,1}\pm s_{\rm f,1}$	χ _{p,2} ± s _{p,2}	$\chi_{\rm f,2}\pm s_{\rm f,2}$	χ _{p,3} ± s _{p,3}	$\chi_{\rm f,3}\pm s_{\rm f,3}$
20	A	79067,7 ± 6997,1	73062,3	5323,9 ± 1390,5	6531,6	2516,9 ± 252,2	3690,6	1276,3 ± 426,5	2556,2
20	В	67057,0 ± 13544,5	± 11672,2	7739,3 ± 740,3	± 1656,1	± 232,2 3690,6 ± 426,5 4864,3 ± 1715 3836,1 ± 1776,9 ± 2033,7 10062,6 7788,3	± 1921,7		
25	E	49610,0 ± 8262,4	54305,7	16663,3 ± 4399,7	14184,2	10062,6 ± 1568,6	8913,5	7788,3 ± 2821,6	6736,7
55	F	59001,3 ± 7012,7	± 8569,5	11705,1 ± 2603,1	± 4222,4	7764,4 ± 1074,3	± 1740,8	5685,1 ± 1004,4	± 2217
	I	51978,3 ± 4820,3	51978,3 22081,0 15758,0 12295 ± 4820,3 51807,7 ± 5473,4 20835,0 ± 5449,7 14964,5 ± 547	12295,8 ± 5471	11263,0				
55	J	51637,0 ± 5006,8	± 4399,6	19589,0 ± 1117,3	± 3787,6	14171,0 ± 2806,9	± 3973,3	10230,2 ± 1888	± 3831,3

Tabela 2. 6 - Cargas características das diferentes placas moldadas e teores de fibra

Fonte: Próprio autor

Tabela 2. 7 – Valores-p para os testes da análise de variância (ANOVA)

	F	cr	F _{R1}		F _{R2}		F _{R3}	
	MLG	Levene	MLG	Levene	MLG	Levene	MLG	Levene
C _{f,i}	0,002	0.962	0,000	0 5 2 6	0,000	0.204	0	0.414
Placas	0,820	0,803	0,313	0,530	0,701	0,384	0,698	0,414

Fonte: Próprio autor

Considerando-se a variação da carga de pico F_{cr}, os valores-p obtidos pelo Modelo Linear Generalizado foram 0,002 e 0,82 em relação aos parâmetros teores de fibra C_{f,i} e distintas placas, respectivamente. Isto equivale dizer que não há diferenças significativas entre as médias desta carga acarretadas pelas mudanças de placas e que estas médias foram influenciadas significativamente por pelo menos um dos teores de fibra analisados. Submetendo-se os dados a uma comparação pareada de Tukey para os diversos teores de fibra, observou-se que a diferença constatada se deu para o teor de fibras de 20 kg/m³. De um modo geral, esperava-se que não houvesse discrepâncias relevantes para a carga de pico, determinada por características da matriz única utilizada para todas as alterações dos demais parâmetros, no entanto, estas estão associadas às variações são induzidas pelo próprio mangoteiro que, apesar de qualificado, pode sentir dificuldades para o controle

da consistência com a alteração do teor de fibra e, consequentemente, da velocidade de projeção devido à maior perda de carga do material no transporte pelo mangote.

Para o Teste de Igualdade de Variâncias, o valor-p obtido foi de 0,863 para o método de Levene. Isto equivale dizer que não há diferenças significativas entre as variâncias verificadas para a carga de pico independentemente do parâmetro analisado, configurando baixa dispersão dos resultados em questão no intervalo de confiança considerado.

Considerando-se todas as variações das cargas residuais F_i, os valores-p obtidos pelo Modelo Linear Generalizado foram menores que α em relação aos parâmetros teores de fibra C_{f,i} e maiores que α para as distintas placas. Isto equivale dizer que não há diferenças significativas entre as médias destas cargas acarretadas pelas mudanças de placas e que estas médias foram influenciadas significativamente por pelo menos um dos teores de fibra analisados. Submetendo-se os dados a uma comparação pareada de Tukey para os diversos teores de fibra, observou-se que a diferença constatada se deu entre todos eles, conforme esperado para o comportamento mecânico do compósito sob estudo, cuja carga residual é intensificada com o aumento do teor de fibras.

Para o Teste de Igualdade de Variâncias, os valores-p obtidos foram maiores que α para o método de Levene. Isto equivale dizer que não há diferenças significativas entre as variâncias verificadas para estas cargas residuais independentemente do parâmetro analisado, configurando baixa dispersão dos resultados em questão no intervalo de confiança considerado.

Ainda em relação aos valores apresentados na Tabela 2.6, foram determinados os coeficientes de variação CV das cargas de fissuração F_{cr} e residuais F_i para cada teor de fibra C_{f,i}. A Tabela 2.8 apresenta estes resultados que podem ser melhor visualizados através de gráficos e correspondentes linhas de tendência linear (Figura 15).

C _{f,i}	CV							
(kg/m³)	Fcr	F1	F ₂	F ₃				
20	16%	25%	46%	75%				
35	16%	30%	20%	33%				
55	8%	18%	27%	34%				
	Fonte: P	róprio auto	or					

Tabela 2. 8 – Coeficientes de variação das cargas F_{cr} e F_i em relação aos teores de fibra C_{f,i}

Figura 15 – Gráficos CV x F_i para cada teor de fibra: a) $C_{f,i} = 20 \text{ kg/m}^3$; b) $C_{f,i} = 35 \text{kg/m}^3$; c) $C_{f,i} = 55 \text{kg/m}^3$



Fonte: Próprio autor

Observa-se pela Tabela 2.8 e a Figura 15, que os CV das cargas residuais são influenciados pelos níveis de abertura de fissura, inferidos pelos níveis de deslocamento vertical da prensa. Verifica-se que a capacidade resistente média do CPRFA vai diminuindo com o aumento da abertura de fissura, mas a variância permanece a mesma, ou seja, tem-se um aumento do CV por efeito de *softening*, onde a resistência mecânica à abertura de fissuras proporcionada pelo teor de fibra incorporado ao concreto é inferior à resistência mecânica da matriz. Além disso, consumos menores de fibras, que geram menores valores de cargas residuais pósfissuração e mesmo nível de dispersão de resultados, acabam por proporcionar maior coeficiente de variação.

2.4. CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

Observa-se, por meio da análise de variabilidade realizada no estudo proposto, que o Ensaio Barcelona possibilitou correlacionar o aumento dos coeficientes de variação das cargas residuais de concretos projetados reforçados com fibras de aço (CPRFA) e o aumento dos níveis de abertura de fissura dos corpos de prova no decorrer do ensaio, dado o efeito de *softening* identificado. Observou-se também que não houve diferença significativa dos resultados, tanto em termos de média como de dispersão de valores, quando os corpos de prova foram obtidos de placas diferentes. Isto é um indicativo de boas condições de reprodutibilidade do ensaio.

O ensaio sugerido também permitiu a detecção de alterações das características do CPRFA frente às influências de parâmetros que determinam o desempenho mecânico deste compósito, como o teor de fibras adicionado que acarretou mudanças nas cargas residuais, e de parâmetros definidos durante sua aplicação, como a consistência do compósito no estado fresco que acarretou mudanças nas cargas de fissuração quando em estado endurecido.

O Ensaio Barcelona constitui uma ferramenta de caracterização do comportamento mecânico pós-fissuração de CPRFA, possuindo fácil execução e baixa variabilidade de resultados.

3. AVALIAÇÃO COMPARATIVA DO ENSAIO BARCELONA E DE FLEXÃO DE PRISMAS

Em uma abordagem inicial, no intuito de analisar as características do ensaio Barcelona aplicado a CPRFA, buscou-se avaliar comparativamente os resultados obtidos com este ensaio e os obtidos com os ensaios tradicionais de flexão de prismas, como o recomendado pela EFNARC (1996). Como estes últimos ensaios são mais tradicionalmente aplicados no controle do CPRFA, procurou-se estabelecer correlações entre os resultados típicos obtidos com cada ensaio, especialmente no que se refere às resistências residuais determinadas a distintos níveis de deflexão ou abertura de fissura.

3.1.INTRODUÇÃO

Estudos e projetos realizados recentemente demonstram a eficácia do uso de concreto projetado reforçado com fibras de aço (CPRFA) como material estrutural (FIGUEIREDO, 1997; AUSTIN, 1996). Exemplos de aplicações do CPRFA a produção de túneis e revestimentos para estabilização de taludes entre outros (FIGUEIREDO, 1997; AUSTIN, 1996; SEGURA, 2013; GALOBARDES, 2013).

Para controlar o CPRFA, os engenheiros precisam classificar a CPRFA de acordo com o seu comportamento pós-pico (resistência residual). Nesse sentido, as recomendações EFNARC descrevem que a tenacidade do CPRFA é especificada por classes de resistência residual ou energia absorvida, dependendo do teste considerado para caracterizar o material. Em relação ao primeiro caso, quando a tenacidade do CPRFA é especificada por resistência residual, as recomendações EFNARC apresentam cinco classes diferentes (Classes 0 a 4), dependendo dos resultados obtidos por meio de ensaios de flexão em vigas (EFNARC, 1996).

O referido ensaio requer um trabalho demorado especialmente em relação à preparação de corpos de prova. Nesse sentido, as amostras com dimensões padronizadas 75x125x500 mm têm de ser cortadas a partir de placas de teste, que pesam cerca de 90 kg, projetadas sobre formas em condições semelhantes à aplicação final. Além disso, no Brasil e em outros países emergentes com um pequeno

número de laboratórios qualificados, o controle de qualidade CPRFA é realizado utilizando sistemas de circuito aberto. Este fato ocorre devido ao custo mais elevado dos sistemas de circuito fechado. Nessa situação, foi demonstrado que existe uma maior dificuldade de controlar a resistência residual a um baixo nível de abertura de fissuras (GOLAPARATNAM, 1995). Estas desvantagens complicam 0 estabelecimento de um programa de controle de qualidade amplo em relação à resistência residual do concreto projetado. Portanto, a utilização de outros métodos, tais como o Ensaio Barcelona (UNE 83515, 2010), que também avalia a tenacidade do CPRFA utilizando equipamento mais simples e menores corpos de prova (PUJADAS, 2013; BLANCO, 2013), poderia minimizar os problemas atuais. A possibilidade de correlação entre o Ensaio Barcelona e o ensaio de flexão em vigas com sistemas de circuito aberto já foi demonstrada para concretos convencionais (MONTE et al., 2014; GALOBARDES e FIGUEIREDO, 2015; GALEOTE et al., 2015).

Nesse contexto, o objetivo do presente estudo é correlacionar os resultados obtidos do procedimento EFNARC e do Ensaio Barcelona. Em função disso, a classificação da classe de resistência residual do CPRFA pode ser feita por meio do Ensaio Barcelona e a equação de correlação. Nesse sentido, um programa experimental foi seguido considerando cinco dosagens de concreto com diferentes teores de fibra, projetadas por um sistema de via seca. O sistema de via seca fornece uma maior variabilidade para CPRFA, que configura a pior condição possível para a análise. Finalmente, uma análise estatística dos resultados permitiu identificar a melhor equação para se obter os parâmetros necessários para a classificação da resistência residual do CPRFA (f_{R1m} , f_{R2m} , f_{R3m} e f_{R4m}) usando os valores de carga e de energia absorvida obtidos na realização do Ensaio Barcelona.

3.2. METODOLOGIA

O programa experimental é apresentado nesta seção, começando com uma descrição dos materiais usados. A matriz do concreto de referência e os procedimentos de projeção também são explicados. Subsequentemente, o processo para a obtenção das amostras e os procedimentos de ensaio considerados neste estudo são detalhados.

3.2.1. Materiais

3.2.1.1. Cimento, água e agregados

O tipo de cimento utilizado foi o CP III 40 RS (ABNT NBR 5735). Isto foi estabelecido tendo em conta as especificações do projeto. O cimento CP III 40 RS apresenta um elevado teor de escória de alto forno (35-70%) e é resistente aos sulfatos. A adição melhora a funcionalidade e capacidade de bombeamento do concreto. A baixa densidade de escória fornece um volume maior, em peso, de pasta para a mesma quantidade em peso de materiais cimentíceos, promovendo uma melhoria da capacidade de projeção do concreto (FIGUEIREDO, 1997; GALOBARDES, 2013; EFNARC, 1996).

Água potável, seguindo todos os requisitos definidos pela norma brasileira NBR 15900 (2009), foi usada na mistura. Foram utilizados agregados graúdo (4-12 mm) e miúdo (0-4 mm) em conformidade com a norma brasileira NBR 7211 (2009). As frações foram selecionadas para assegurar uma boa trabalhabilidade para as misturas, a fim de que fossem evitados problemas de golpes durante o bombeamento e para proporcionar um empacotamento ótimo do concreto (SEGURA et al., 2013; GALOBARDES, 2013).

3.2.1.2. Fibras

O tipo de fibra de aço utilizado foi o tipo Wirand FSN3, fornecido pela Maccaferri. Esta é uma fibra recomendada para a projeção do concreto, que apresenta um comprimento (L) de 33 mm e um fator de forma (C / D) igual a 44. Estas características geométricas foram avaliadas com base na norma brasileira NBR 15530 (2007), atendendo suas tolerâncias.

3.2.2. Dosagem do concreto

A dosagem da matriz de referência utilizada neste estudo está detalhada na Tabela 3.1. Ressalta-se que a quantidade de cimento utilizada está entre 350 e 450 kg/m3, que é uma faixa habitual definida para concreto típico (GALOBARDES, 2013;

EFNARC, 1999). Finalmente, os diferentes conteúdos de fibra foram adicionados à matriz de referência.

Material	Dosagem (kg/m³)
Cimento	435
Agregado miúdo (0-4 mm)	925
Agregado graúdo (4-12 mm)	810
Fonte: Próprio autor	

l abela 3. 1 - Traço da matriz de referenci	Fabela 3.	1 -	Traço	da	matriz	de	referência
---	-----------	-----	-------	----	--------	----	------------

A matriz de concreto de referência foi projetada com cinco conteúdos diferentes de fibras: 20, 30, 35, 45 e 55 kg/m3. Estes são valores típicos usados para a projeção de concreto (FIGUEIREDO, 1997; ARMELIN, 1997; LEUNG, 2005). Os cinco traços de concreto projetados seguiram a nomenclatura CX, onde X = 20, 30, 35, 45 e 55 referindo-se aos diferentes conteúdos de fibra considerados neste estudo.

3.2.3. Processo de projeção e preparação de amostras

Todos os concretos foram projetados usando-se um sistema via seca seguindo as recomendações (EFNARC, 1999). A fim de fazer isso, foi utilizada uma máquina de projeção CP3 da Geotecmaq. As misturas foram projetadas sob uma pressão de ar igual a 2,8 kPa sobre formas de madeira, de acordo com a norma ABNT NBR 13070 (2012), cujas dimensões eram uma base de 500x500 mm, altura de 120 mm e área de 600x600 mm em sua face superior. As formas foram posicionadas no chão em um ângulo de aproximadamente 20° com a vertical, conforme recomendado na norma europeia EN 14488-2 (2007), como mostrado na Figura 16. Duas placas de concreto foram projetadas para cada teor de fibra adicionado à matriz de referência, totalizando dez placas para este estudo.

Figura 16 - Processo de projeção



Fonte: Próprio autor

Primeiramente, três testemunhos cilíndricos foram extraídos a partir de cada uma das placas de ensaio, utilizando uma máquina de extração com uma broca de 100 mm de diâmetro segundo requisitos da norma europeia EN 14488-2 (2007) (Figura 2). Em sequência, a face mais áspera dos testemunhos foi cortada por meio de uma máquina de corte de disco radial, a fim de se obter amostras cilíndricas com altura e diâmetro iguais a 100 mm. Por outro lado, duas amostras prismáticas foram cortadas a partir de cada placa como mostrado na Figura 17. Deste modo, conforme as recomendações EFNARC, vinte vigas com dimensões de 75x125x500 mm foram obtidas.



Fonte: Próprio autor

3.2.4. Métodos de ensaio

3.2.4.1. Ensaio de vigas EFNARC

As recomendações (EFNARC, 1999) descreve um dos testes mais aceitos na Europa para caracterização da resistência residual de CPRFA: o ensaio de flexão de vigas

em quatro pontos. Durante o ensaio, a carga (F) é controlada e o deslocamento vertical (δ) é medido. Neste estudo, o δ foi obtido por meio de dois LVDT colocados em cada lado da viga, a fim de minimizar a variação dos resultados (Figura 18).



Figura 18 - Ensaio de viga EFNARC

Fonte: Próprio autor

Utilizando a Equação 1 apresentada nas recomendações EFNARC, a resistência residual do CPRFA (f_{Rim}) pode ser obtida com os resultados do teste para cada ponto *i* referente a distintos deslocamentos verticais (δ). Esta equação considera parâmetros geométricos do teste, tais como o comprimento (L) e a largura (b) e a profundidade (d) da viga, e a carga, relacionada com diferentes deslocamentos verticais (F_{δ}). Nesse sentido, as recomendações EFNARC respeitam quatro deslocamentos verticais e os resultados de resistência residual (f_{R1m} , f_{R2m} , f_{R3m} e f_{R4m} para δ = 0,5; 1,0; 2,0 e 4,0 mm, respectivamente) são utilizados para classificar a resistência residual CPRFA em cinco classes diferentes (a partir de classes de 0 a classe 4), utilizando o ábaco apresentado na Figura 19.

$$f_{Rim} = \frac{F_{\delta} \cdot L}{b \cdot d^2} \tag{1}$$



Figura 19 - Classes de resistência residual para CPRFA definidas pela EFNARC

Neste estudo, 20 amostras (quatro corpos de prova para cada mistura de concreto) foram testadas utilizando uma máquina de ensaio Shimadzu. Os testes foram realizados considerando as exigências recomendações EFNARC.

3.2.4.2. Ensaio Barcelona

O Ensaio Barcelona é um método alternativo para avaliar a força residual de concretos reforçados com fibras CRF. Ele foi apresentado por pesquisadores da Universidade Politécnica da Catalunha com base no ensaio de duplo puncionamento desenvolvido por Chen (1970). Atualmente, o ensaio Barcelona é um método normalizado de acordo com a norma UNE 83515: 2010 e pode ser utilizado para CPRFA como demonstrado pelos bons resultados de Silva et al. 2015.

Durante o teste, o corpo de prova (diâmetro e altura iguais a 100 mm), é posicionado entre dois cilindros de aço mantendo-os no centro das faces superior e inferior do CP, tal como apresentado na Figura 20.a). Neste caso, os cilindros de aço têm uma altura de 25 mm e um diâmetro de 20 mm.



Figura 20 - Corpo de prova sob Ensaio Barcelona a) e corpos de prova fissurados b)

Fonte: Próprio autor

O ensaio Barcelona, em geral, proporciona o aparecimento de fissuras radiais (de duas a quatro), como mostrado na Figura 20.b. Em sua origem, o ensaio foi monitorado através da medição do deslocamento de abertura total da fissura (TCOD) por meio de um extensômetro circunferencial colocado a meia altura da amostra, tal como descrito na norma. Dificuldades de obtenção de extensômetros circunferenciais para medir a TCOD, por não serem encontrados de forma corriqueira em laboratórios convencionais, restringiram a difusão e o uso generalizado deste ensaio. No intuito de superar tais desvantagens, uma correlação analítica entre o deslocamento vertical e a TCOD foi proposta na realização do ensaio considerando-se apenas o primeiro e eliminando o extensômetro circunferencial (PUJADAS, 2013). Esta mudança simplifica o processo de execução do ensaio, aumentando seu potencial de ser utilizado num programa de controle de qualidade regular para CRF em geral, e especificamente para CPRFA.

Então, considerando esta última configuração, seis corpos de prova obtidos dos concretos de cada teor de fibra foram testados utilizando uma máquina de ensaio Emic. A curva de carga (F) em função do deslocamento vertical (δ) foi obtida para cada amostra.

3.2.4.3. Comparação entre o ensaio de flexão de viga EFNARC e o Ensaio Barcelona

O ensaio de flexão de viga EFNARC é um método de ensaio relativamente simples, embora a caracterização do CPRFA por meio dele seja um processo que exige esforços importantes de tempo e material. O método envolve espécimes prismáticos (75x125x500 mm) que implicam 5 litros de concreto e um peso de cerca de 10 kg por amostra. Considerando-se que no mínimo três amostras são necessárias para a obtenção de resultados confiáveis, 15 litros de concreto são necessários para realizar uma única avaliação de CPRFA. Além disso, a obtenção dos prismas possui complicações como o manuseio da placa de ensaio de aproximadamente 90 kg de peso que deve ser transportada e cortada, a fim de se preparar as vigas. O procedimento pode levar até 120 min.

Por outro lado, para o ensaio Barcelona, as amostras cilíndricas usadas na execução do ensaio com dimensões ¢100x100 mm implicam apenas 2,35 litros de concreto e um peso de 4,70 kg. Assim, se três amostras cilíndricas foram usadas para executar o teste, o resíduo produzido no processo será reduzida em 60%. Outra constatação é que a utilização do ensaio Barcelona permite que amostras necessárias à realização de demais testes e ensaios do programa de controle de processo e de produto possam ser extraídas a partir da mesma placa, evitando-se a produção de um maior número de placas de ensaio. Finalmente, o ensaio Barcelona possibilita a análise de testemunhos extraídos a partir de elementos estruturais reais como revestimentos de túnel, que pode ser necessária em algumas avaliações ou outras aplicações, como é o caso do concreto projetado (SILVA et al., 2015).

3.3. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

3.3.1. Ensaio de flexão de viga EFNARC

Os resultados obtidos da realização do ensaio EFNARC são curvas de carga (F) x deslocamento vertical (δ). Um exemplo das curvas obtidas, observando os concretos de menor e maior teores de fibra (C20 e C55, respectivamente), é apresentado na Figura 21. Observe que estes resultados são as médias de 4 curvas diferentes oriundas dos 4 CP pertencentes ao mesmo teor de fibra, as quais foram obtidas usando os dados no software de tratamento Origin 6.0.



Figura 21 - Curvas F- δ obtidas dos concretos C20 a) e C55 b) pela execução do ensaio EFNARC

As curvas experimentais apresentam três zonas diferentes: uma zona elástica, desde o início da aplicação de carga ao instante de fissuração (pico da curva), uma zona de pós-pico instável e a zona de pós-fissuração estável. Referente à carga de pico, os resultados mostram uma tendência em relação à quantidade de fibra no concreto, quanto maior é o teor, mais baixa é a carga de pico. Isto ocorre devido ao processo de compactação da matriz de concreto durante a projeção via seca da mistura, que é mais elevada quando o teor de fibras é menor (FIGUEIREDO, 1997; ARMELIN, 1997; PFEUFFER e KUSTERLE, 2001). Seguindo a mesma tendência, a instabilidade póspico é maior para um menor teor de fibra, ocorrência muito bem conhecida (BANTHIA e TROTTIER, 1995). Por outro lado, como era esperado, o comportamento pósfissuração melhora diretamente com aumento do teor de fibras (FIGUEIREDO, 2008).

A Tabela 3.2 mostra os valores de resistência residual (f_{Rim}), considerando as curvas *F* x δ obtidas, para os deslocamentos verticais (δ) definidos pelas recomendações EFNARC (0,5; 1; 2 e 4 mm). Ressalta-se que estes resultados também são médios de 4 valores experimentais. Além disso, o quadro apresenta os desvios-padrão (σ) dos resultados entre parênteses.

Danâmatras	Concretos								
rarametros	C20	C30	C35	C45	C55				
frei	4,15	3,99	3,35	2,25	2,55				
JRIm	(0,81)	(0,52)	(0,51)	(0,39)	(0,27)				
fra	1,08	1,17	1,63	2,32	2,20				
JR2m	(0,47)	(0,41)	(0,30)	(0,50)	(0,33)				
f	1,00	0,87	1,33	2,22	2,10				
JR3m	(0,51)	(0,40)	(0,26)	(0,53)	(0,36)				
f	0,64	0,43	0,93	1,97	1,63				
JR4m	(0,60)	(0,18)	(0,36)	(0,44)	(0,43)				

Tabela 3. 2 - Resultados obtidos de resistência residual - f_{Rim} (MPa)

Fonte: Próprio autor

Em relação à f_{R1m} , os resultados mostram uma tendência considerando-se a quantidade de fibras no concreto, quanto maior é o teor, mais baixa é a resistência residual. Isto ocorre devido à instabilidade apresentada durante o ensaio, que é mais elevada quando o teor de fibras diminui. Esta instabilidade, como pode ser observada na Figura 6 em relação à linha cinza, implica uma sobreavaliação da força residual para níveis baixos de abertura de fissuras. Ressalta-se que este é um problema crucial do ensaio EFNARC, porque f_{R1m} está relacionado com o Estado Limite de Serviço (ELS).

Ao contrário, para a tendência seguida pelas resistências residuais nos demais pontos observa-se justamente o oposto. A resistência residual aumenta para maiores teores de fibra. Nesse caso, para maiores deslocamentos verticais, as fibras formam pontes entre as fissuras do concreto e, por conseguinte, quanto maior é a quantidade de fibras no concreto, mais elevada será a força de ligação (FIGUEIREDO, 2008). Além disso, uma dispersão dos resultados entre 18 e 81% pode ser observada, devida, basicamente, às singularidades do concreto projetado (FIGUEIREDO, 1997; AUSTIN, 1996; SEGURA et al., 2013).

3.3.2. Ensaio Barcelona

Os resultados obtidos da realização do ensaio Barcelona são curvas de carga (*F*) x deslocamento vertical (δ) e tenacidade (E) x δ . Um exemplo das curvas obtidas, observando os concretos de menor e maior teores de fibra (C20 e C55, respectivamente), é apresentado na Figura 22. Note que estes resultados são médias

de 6 curvas diferentes oriundas dos 6 CP pertencentes ao mesmo teor de fibra, as quais foram obtidas usando os dados no software de tratamento Origin 6.0.



Os resultados apresentados mostram apenas a zona pós-pico da curva. Tal como observado para os resultados do ensaio EFNARC, a carga de pico é mais elevada quando o teor de fibras diminui. Além disso, é importante observar que a instabilidade obtida realizando-se o ensaio nas vigas não é observada nos resultados do ensaio Barcelona.

A Tabela 3.3 mostra os valores de cargas (F_{BCN}), considerando as curvas $F \ge \delta$ obtidas, eos valores de energia (E_{BCN}), considerando as curvas $E \ge \delta$ obtidas, para os deslocamentos verticais (δ) oriundos do Ensaio Barcelona (0,5; 1; 1,5; 2; 2,5; 3 e 3,5 mm). Além disso, o quadro apresenta os desvios-padrão (σ) dos resultados entre parênteses.

			Concretos		
Parametros	C20	C30	C35	C45	C55
F	8,51	8,53	20,74	24,59	27,43
F BCN, 0.5	(0,31)	(0,36)	(0,32)	(0,19)	(0,10)
$m{F}_{-}$	6,53	6,90	14,18	16,72	20,84
I ' BCN, 1.0	(0,25)	(0,43)	(0,30)	(0,22)	(0,18)
$m{F}_{-}$	4,84	5,48	10,60	12,96	17,22
I BCN, 1.5	(0,40)	(0,41)	(0,18)	(0,31)	(0,24)
France	3,69	4,49	8,91	11,31	14,96
I BCN,2.0	(0,46)	(0,55)	(0,20)	(0,35)	(0,27)
France	3,15	3,87	7,51	10,13	12,90
I BCN,2.5	(0,53)	(0,55)	(0,29)	(0,37)	(0,29)
Frence	2,56	3,46	6,74	8,99	11,26
1 BCN, 5.0	(0,75)	(0,57)	(0,33)	(0,33)	(0,34)
E	2,48	3,23	6,31	8,02	10,04
1' BCN,3.5	(0,80)	(0,57)	(0,35)	(0,33)	(0,38)
Frances	6,51	5,46	12,10	13,49	15,79
LBCN,0.5	(0,40)	(0,56)	(0,55)	(0,35)	(0,17)
Francis	10,26	9,27	20,66	23,94	27,79
L BCN,1.0	(0,16)	(0,32)	(0,20)	(0,15)	(0,14)
Francis	13,16	12,33	26,89	31,25	37,16
LBCN,1.5	(0,15)	(0,18)	(0,07)	(0,13)	(0,11)
FRENZO	15,26	14,85	31,80	37,24	45,28
L BCN,2.0	(0,11)	(0,16)	(0,05)	(0,11)	(0,09)
FRENDS	16,94	16,91	35,88	42,59	52,22
L BCN,2.5	(0,10)	(0,13)	(0,06)	(0,09)	(0,07)
ERCN 20	18,35	18,74	39,45	47,34	58,29
L BCN,5.0	(0,10)	(0,10)	(0,06)	(0,06)	(0,07)
EPCN 25	19,61	20,42	42,70	51,52	63,56
LDUN, 3.3	(0,10)	(0,09)	(0,05)	(0,05)	(0,06)

Tabela 3. 3 - Cargas $(F_{BCN,\delta})$ e energias $(E_{BCN,\delta})$ para diferentes deslocamentos verticais (δ) obtidos (em kN e J, respectivamente)

Fonte: Próprio autor

No caso de os resultados do teste de Barcelona, estes apresentam uma tendência única: a resistência residual é mais elevada quando o teor de fibras aumenta. Além disso, os resultados obtidos com o ensaio Barcelona, apresentam variação inferior (18-55%) do que os obtidos na realização do ensaio EFNARC. Isto também é observado em outros estudos recentes (GALOBARDES e FIGUEIREDO, 2015; GALEOTE et al., 2015; PFEUFFER e KUSTERLE, 2001).

3.4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

3.4.1. Correlação entre os ensaios

Uma primeira análise pode ser feita a partir dos coeficientes de variação obtidos dos parâmetros do comportamento pós-fissuração dos concretos ensaiados pela EFNARC e pelo ensaio Barcelona, apresentados na Tabela 3.4 e Tabela 3.5, respectivamente. Observa-se que os resultados do ensaio Barcelona apresentam coeficientes de variação menores que os provenientes do ensaio de flexão de prismas.

C _{f,i}	CV						
(kg/m³)	f _{R1m}	f _{R2m}	f _{R3m}	f _{R4m}			
20	20%	44%	51%	94%			
30	13%	35%	46%	42%			
35	15%	18%	20%	39%			
45	17%	22%	34%	22%			
55	11%	15%	17%	26%			
	Fonte: P	róprio auto	r				

Tabela 3. 4 - Coeficientes de variação de resistências residuais do ensaio EFNARC

	(CV	
F 1	F 2	F 3	F 4
4%	4%	12%	32%
4%	6%	12%	18%
2%	2%	2%	6%
1%	1%	3%	4%
0,5%	1%	2%	4%
	F 1 4% 4% 2% 1% 0,5%	F1 F2 4% 4% 4% 6% 2% 2% 1% 1% 0,5% 1%	CV F1 F2 F3 4% 4% 12% 4% 6% 12% 2% 2% 2% 1% 1% 3% 0,5% 1% 2%

Tabela 3.5 – Coeficientes de variação de cargas residuais do ensaio Barcelona

Fonte: Próprio autor

Para correlacionar as cargas ($F_{BCN,\delta}$) e as energias ($E_{BCN,\delta}$) obtidas pelo Ensaio Barcelona e os parâmetros de resistência residual do ensaio de viga EFNARC (f_{Rim}), uma análise multi-paramétrica foi realizada (GALOBARDES, 2013; GALOBARDES e FIGUEIREDO, 2015; GALEOTE, 2015). Nesse sentido, os dados do ensaio Barcelona que mostraram melhor correlação com os parâmetros do ensaio de viga foram: a carga $F_{BCN,2.5}$, e a energia $E_{BCN,2.5}$. Os coeficientes de correlação apresentados por estes parâmetros foram 0,925 e 0,918, respectivamente. Os valores dos parâmetros foram usados para obter uma equação que os relacionou por meio de uma regressão não linear utilizando um software de ajuste de curva de dados experimentais (LAB Fit). O melhor ajuste foi obtido com a Equação 2. Observase que a equação obtida com os resultados experimentais é a mesma encontrada em outros estudos recentes que correlacionam o Ensaio Barcelona com o ensaio de flexão de vigas por três pontos (GALEOTE, 2015). Desse modo, a utilização da equação dada é viável.

$$f_{Rim} = A \cdot E_{BCN;2,5} {\binom{B}{F_{BCN;2,5}}}$$
2)

A equação proposta considera dois coeficientes: A e B. Eles ajustam os resultados, considerando o deslocamento vertical (δ). Para calibrar esses parâmetros foi utilizado um algoritmo de Levenberg-Marquardt. Para estimar seus valores, foram utilizadas leis hiperbólicas, considerando o δ da resistência à tração residual que precisa ser avaliada, por meio das Equações 3 e 4, respectivamente (Figura 23).





Figura 23 - Correlação entre os coeficientes A a) e B b) para δ



Figura 24 - Relação entre Vexp e Vest obtida pelo método proposto

3.4.2. Classificação e verificação

Para se verificar a utilização da equação que correlaciona o Ensaio Barcelona e o ensaio de vigas EFNARC, são usados os resultados obtidos a partir dos concretos projetados C20 e C55, com menor (20 kg/m³) e maior (55 kg/m³) teores de fibra, respectivamente. Assim, a Figura 10 apresenta os resultados obtidos da realização do ensaio EFNARC (CX_E) e aqueles obtidos da realização do Ensaio Barcelona por meio da aplicação da Equação 2 (CX_B). Estes resultados foram comparados com as classes de resistência residual definidas nas recomendações EFNARC (Figura 25).





Os resultados reunidos na Figura 25 apresentam as mesmas tendências para os dois tipos de dados, independentemente do teor em fibras. No entanto, algumas diferenças

são observadas. Observa-se que para o concreto C20, os erros relativos entre os resultados do ensaio EFNARC e as estimativas são 6,45, 16,54, 41,52 e 18,29% para f_{R1m} , f_{R2m} , f_{R3m} e f_{R4m} , respectivamente. Os erros para o concreto C55 são 0,16, 0,76, 4,26 e 20,61% para as mesmas resistências residuais, respectivamente.

Quanto a estes erros relatados, a Equação 2 apresenta melhores resultados para CPRFA com alto teor de fibras, como pode ser observado devido aos erros médios de 20,70 e 6,45% para o C20 e o C55, respectivamente. Além disso, considerando os aspectos singulares do CPRFA e sua dispersão intrínseca, essas diferenças são aceitáveis.

Finalmente, em relação às recomendações EFNARC e seu modo de classificação a partir das forças residuais do CPRFA, os resultados obtidos implicam em Classe 0 e classe 1 para os concretos projetados C20 e C55, respectivamente. Assim, tendo em conta que a dispersão dos resultados não é significativa e as classificações dos CPRFA foram coincidentes, a combinação do ensaio Barcelona e da Equação 2, pode ser utilizada para definir a classe de resistência residual do CPRFA.

3.4.3. Aprimoramento da metodologia

O método apresentado permite alcançar os resultados que seriam obtidos na realização o ensaio de vigas EFNARC utilizando os resultados do ensaio Barcelona. No entanto, aplicando as equações apresentadas, o problema da instabilidade póspico não estaria resolvido. Em outras palavras, mesmo realizando um ensaio mais estável, assim como o Barcelona, as instabilidades apresentadas nos resultados EFNARC também ocorreriam na correlação.

Nesse contexto, a metodologia apresentada na seção 3.4.1 foi aplicada novamente considerando todos os resultados experimentais, com exceção das que apresentaram instabilidade (f_{R1m}), independentemente da mistura de concreto. Assim, considerando a mesma Equação 2 e parâmetros do Ensaio Barcelona ($F_{BCN,2.5}$, e $E_{BCN,2.5}$), os coeficientes A e B foram ajustados para obtenção de suas novas equações usando o software LAB Fit (Equação 5 e Equação 6, respectivamente), obtidas por regressão linear de seus gráficos conforme Figura 26.



$$A_i = 0,142 \cdot \delta + 3,416$$

$$B_i = -(0,376 \cdot \delta + 1,037)$$
6)

Aplicando-se estas novas equações, os coeficientes A e B foram calculados para um deslocamento vertical igual a 0,5 mm: 3,49 e -1,23, respectivamente. Em seguida, usando a Equação 2 e os novos valores de A e B as resistências residuais (f_{R1m} , f_{R2m} , f_{R3m} e f_{R4m}) foram calculadas. Nesse sentido, a Figura 27 compara, por exemplo, os resultados obtidos na realização do ensaio EFNARC (CX_E) e os obtidos aplicando a nova metodologia (CX_NB) para misturas C20 e C55.

Figura 27 - Nova classificação dos concretos C20 e C55 por meio dos resultados dos ensaios EFNARC e Barcelona



Fonte: Próprio autor

A melhoria da metodologia permitiu eliminar os efeitos da instabilidade observada anteriormente. Em outras palavras, a sobreavaliação da resistência à tração residual para um deslocamento vertical igual a 0,5 mm (f_{R1m}) desapareceu. Portanto, a f_{R1m} não só pode ser utilizada para classificar o concreto, mas também para avaliar o Estado Limite de Serviço (ELS) de uma estrutura de CPRFA uma vez que o método é validado.

Assim, os valores de f_{R1m} para os concretos C20 e C55, estimados com a nova metodologia são iguais a 1,16 e 2,39 MPa, respectivamente. A fim de validar estes valores, as curvas $F x \delta$ obtidas realizando o ensaio EFNARC foram analisadas. Nesse sentido, uma aproximação da carga (*F*) foi considerada para o deslocamento vertical de 0,5 mm (Figura 13). Estes valores *F* são 2,2 e 4,0 kN para os concretos C20 e C55, respectivamente. Subsequentemente, as resistências à tração residuais a δ igual a 0,5 mm (f_{R1m}) foram calculadas utilizando a Equação 1. Estes valores foram 1,41 e 2,56 MPa, respectivamente. Assim, considerando-se que as mesmas classes foram obtidas para os concretos C20 e C55 utilizando as recomendações EFNARC e a metodologia proposta (classe 0 e Classe 1, respectivamente) e as diferenças entre os valores de f_{R1m} , ora estimados com as equações propostas ora estimados pela ánalise da Figura 28 e Equação 1, não são significativas (17,73 e 6,64% para os concretos C20 e C55, respectivamente), o método é validado. Ressalta-se que este processo de validação foi anteriormente utilizado com sucesso por MONTE (2015).





3.5. CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

A equação de correlação apresentada neste estudo permite a utilização dos resultados do ensaio Barcelona para determinar a classe de resistência residual do

CPRFA. Seu uso tem vantagens em relação ao ensaio de vigas EFNARC: melhoria da sustentabilidade do processo de controle de qualidade, no qual menos material é requisitado e menos resíduo é gerado além de facilitar o procedimento de preparação de amostras que podem ser menores e mais leves. Com este estudo pode-se concluir também que:

 Os resultados do ensaio de vigas EFNARC apresentam instabilidades. Desse modo, sua realização requer equipamento mais sofisticado e caro para controlar a CPRFA.
 Além disso, este equipamento não é geralmente disponível em laboratórios nos canteiros de obras;

- Uma primeira equação de correlação foi obtida com um R² igual a 0,965 (Equação 2). Esta equação se ajusta às quatro forças residuais (f_{R1m} , f_{R2m} , f_{R3m} e f_{R4m}) relevantes à especificação do CPRFA e depende de dois parâmetros A e B. Estes estão relacionados aos deslocamentos verticais do ensaio em uma lei hiperbólica;

- O estudo validou a equação de correlação, considerando as dosagens de CPRFA estudadas, visto que as mesmas classes de resistência residual foram obtidas por meio de ambos os resultados dos ensaios EFNARC e Barcelona através da Equação 2. Entretanto, as instabilidades apresentadas nos resultados EFNARC, devido ao baixo teor de fibras, também ocorrem pelo uso da Equação 2. Estas instabilidades surgem de uma superestimação da força residual para níveis baixos de aberta de fissuras (f_{R1m}) que devem ser evitadas;

- Foi promovida uma melhoria da primeira correlação. Nesse sentido, foram obtidas novas equações para estimar os parâmetros A e B, evitando que os resultados experimentais apresentassem instabilidade. Em seguida, esses parâmetros foram finalmente relacionados com o deslocamento vertical da prensa, utilizando-se equações lineares;

- Mesmo com o uso de sistema de projeção via seca, o que implica uma maior variabilidade dos resultados, foi obtida uma excelente correlação. Assim, a metodologia é robusta e confiável, e permite concluir que o Ensaio Barcelona é apropriado para o processo de controle de qualidade do CPRFA além de este ensaio produzir parâmetros do comportamento pós-fissuração do CPRFA com menores coeficientes de variação do que os obtidos por ensaio de flexão de prismas e

 No intuito de considerar o Ensaio Barcelona e a metodologia apresentada para controle de concretos projetados reforçados com fibra em um âmbito mais geral, resultados experimentais quanto a diferentes concretos, tipos de fibra e dimensões de amostra para o ensaio devem ser gerados e analisados.

4. DETERMINAÇÃO DO TEOR DE FIBRAS EM CPRFA ATRAVÉS DO MÉTODO INDUTIVO

O presente capítulo apresenta resultados de um programa experimental que contempla a aplicação do método indutivo como ensaio não destrutivo para determinação do teor de fibras efetivamente incorporado ao CPRFA. Este capítulo traz também uma proposição de metodologia de controle do teor de fibras a ser adicionado ao concreto no intuito de se obter um teor determinado após a projeção levando-se em conta o fenômeno da reflexão de fibras.

4.1. INTRODUÇÃO

O concreto é o material de construção mais utilizado no mundo apesar do seu comportamento frágil e sua baixa capacidade de resistir a esforços de tração (MEHTA e MONTEIRO, 2013). Esse material evoluiu consideravelmente nos últimos anos e concretos especiais surgiram para solucionar as desvantagens do concreto convencional. Neste sentido, as fibras de aço são adicionadas nas misturas de concreto para aumentar a ductilidade do material e resultando um compósito denominado concreto reforçado com fibras (MEHTA e MONTEIRO, 2013; PUJADAS, 2013).

O fato das fibras serem discretas e estarem distribuídas aleatoriamente na mistura do concreto leva a um reforço tridimensional diferente do que ocorre com o concreto armado (BLANCO, 2013). Apesar disso, como ocorre no comportamento mecânico do concreto armado que é dependente da quantidade de armadura empregada, o comportamento mecânico do CRF é dependente do teor de fibras considerado na mistura (MEHTA e MONTEIRO, 2013; FIGUEIREDO, 2008). Assim, é importante estabelecer uma metodologia de controle para medir a quantidade de fibras do CRF.

No caso particular do uso do CPRFA, o controle do teor de fibras é especialmente importante. Quando o concreto é projetado, parte dos componentes é refletida (GALOBARDES, 2013; PFEUFFER e KUSTERLE, 2001). Durante o processo de reflexão, as fibras são, em relação aos outros materiais constituintes, aquelas que tem o maior nível de perdas, especialmente se o concreto é projetado pelo sistema de via

seca (ARMELIN e BANTHIA, 1998). Isso afeta também o comportamento das fibras, dado que reduz o teor de fibras incorporado na camada projetada e afetando negativamente o comportamento mecânico do material (FIGUEIREDO, 1997). Considerando uma análise estatística da diferença entre a quantidade de fibras dosada na mistura e a mesma após a projeção, os engenheiros podem ser capazes de otimizar o teor de fibras por razões estruturais ou econômicas.

Para avaliar o teor de fibras do CPRFA, o método tradicional pode ser utilizado. Com esse método, a estimação do teor de fibras é lenta e de difícil execução no material projetado (LOPEZ, 2013). De acordo com o procedimento existente, as amostras devem ser trituradas e as fibras separadas e pesadas. Um fator humano pode influenciar no resultado pois todo o processo depende do operador (mangoteiro). Além disso, o método tradicional é destrutivo o que elimina a possibilidade de repetição. Por isso, um ensaio não destrutivo, o método indutivo, foi desenvolvido por Cavalaro et al. (2015) para avaliar a quantidade de fibras no CRF.

Os objetivos principais do presente estudo são então dois: comparar os métodos tradicional e indutivo, e propor uma metodologia de controle do teor de fibras do CPRFA baseado no método indutivo. Para tal, a metodologia para a calibração do ensaio indutivo considerando o tipo de fibra utilizada e o procedimento que pode ser utilizado para o controle do concreto projetado são apresentados. Os testemunhos foram extraídos de placas de CPRFA via seca produzidas durante a estabilização de um talude em uma obra localizada em São Paulo. Esses testemunhos foram ensaiados e os resultados analisados.

4.2. METODOLOGIA

Essa seção apresenta o programa experimental. Primeiramente, os materiais, o traço de referência do concreto e os procedimentos de projeção são descritos devido suas relações com a reflexão (ARMELIN, 1997; PFEUFFER e KUSTERLE, 2001). Na sequência, o processo para obtenção dos testemunhos e os métodos de ensaio são detalhados.

4.2.1. Materiais

4.2.1.1. Cimento, água e agregados

O cimento utilizado foi do tipo CP III 40 RS, conforme especificação do projetista. A água potável utilizada segue todos os requisites definidos pela ABNT NBR 15900 (2009). Os agregados graúdo e miúdo empregados atendem a especificação da ABNT NBR 7211 (2009). Esses agregados possuem grãos entre 0 e 4 mm para a areia e 4 a 12 mm para a brita. Essas frações foram selecionadas para assegurar uma adequada trabalhabilidade das misturas bem como evitar problemas de entupimento durante o bombeamento, reduzir a reflexão e garantir um empacotamento ótimo do concreto (GALOBARDES, 2013, EFNARC, 1999).

4.2.1.2. Fibras

A fibra utilizada foi do tipo A-I (Figura 29), segundo a classificação da ABNT NBR 15530 (2007). Essa é uma das fibras recomendadas para concreto projetado e possui comprimento (L) e fator de forma (L/D) iguais a 33 mm e 44, respectivamente. Para avaliar a influência da quantidade de fibras foram empregados cinco teores distintos: 20, 30, 35, 45 e 55 kg/m³. Esses teores são usuais na aplicação em concreto projetado (FIGUEIREDO, 1997).





Fonte: Próprio autor

4.2.2. Traço do concreto

O traço de referência utilizado no estudo está detalhado na Tabela 4.1. Percebe-se que a quantidade de cimento utilizada encontra-se entre 350 e 450 kg/m³, que é uma faixa usualmente definida para concreto projetado (EFNARC, 1999). A relação água cimento adotada na mistura ainda na concreteira foi de 0,33. A umidade dos agregados foi considerada para a correção da quantidade de água da mistura. Finalmente, os diferentes teores de fibras foram introduzidos nessa mistura de referência compondo cinco diferentes CPRFA.

Material	Quantidade (kg/m ³)
Cimento	435,2
Areia 0-4 mm	924,8
Brita 4-12 mm	809,4
Água	175,2

Tabela 4. 1 - Traço de referência do concreto

Fonte: Próprio autor

4.2.3. Processo de projeção e extração de testemunhos

Todas as misturas foram projetadas em um canteiro de obra utilizando uma única matriz de referência. O sistema de projeção foi via seca, seguindo as recomendações da EFNARC (1999). Um equipamento de projeção via seca tipicamente empregado para estabilização de talude (AUSTIN, 1996) foi empregado. Os concretos foram projetados com pressão de 2,8 kPa sobre formas de madeira conforme ABNT NBR 13070 (2012). As formas, com área de 500x500 mm² e altura de 125 mm, foram colocadas no piso com um ângulo de 20° em relação à vertical (EFNARC, 1999). Um total de 10 placas foram projetadas, sendo duas para cada teor de fibra empregado.

Após a projeção das placas, as peças de concreto projetado foram desmoldadas com idade mínima de 3 dias, de modo a garantir uma resistência mínima. Em seguida, as peças foram transportadas do canteiro para o laboratório na Universidade de São Paulo, sendo mantidos às condições do ambiente. No laboratório, as extrações de cinco testemunhos de cada placa foram realizadas utilizando uma extratora com coroa de 100 mm de diâmetro. As extrações seguiram as diretrizes da norma UNE EN

14488-2 (2007). Na sequência, a superfície rugosa dos testemunhos foi cortada com serra diamantada. Os testemunhos foram então medidos para o cálculo do volume (V), sendo medidos dois diâmetros (ϕ) e duas alturas (h). O volume do testemunho V foi calculado utilizando os valores de diâmetro e altura médios (h_m e ϕ_m , respectivamente).

4.2.4. Métodos de ensaios

Os dois métodos de ensaio considerados para avaliação do teor de fibras do CPRF foram: o método tradicional e o método indutivo. Esses métodos serão detalhados na sequência.

4.2.4.1. Método tradicional

A forma mais simples para se determinar o teor de fibras de uma amostra de concreto é a contagem manual das fibras extraídas do material após lavagem no estado fresco (ARMELIN, 1992). Isto também pode ser feito no estado endurecido, mas com maior dificuldade uma vez que, para isso é necessário esmagar a amostra de modo a separar as fibras e quantificar seu teor. Essa metodologia específica segue os requisitos da norma europeia UNE EN 14721 (2006).

A principal desvantagem dessa metodologia é a necessidade de esmagar a amostra e, por isso, a repetição do ensaio não é possível. Além disso, o procedimento é afetado por um fator humano, pois depende da experiência do técnico que realiza o ensaio. Assim, é frequente encontrar um erro no valor determinado no ensaio (KALIL et al., 2010). Contudo, o custo relacionado ao método é relativamente baixo, pois os equipamentos necessários são encontrados em todos os laboratórios: uma prensa para esmagar o corpo de prova, um ímã para coletar as fibras e uma balança para pesá-las. No entanto, há sempre a geração de resíduos e um tempo considerável de trabalho associado a esta determinação que é muito trabalhosa.

Nesse estudo, 10 testemunhos, um de cada placa, foram esmagados para determinar o real teor de fibras neles contido. Pelo menos 15 minutos foram necessários para cada testemunho.

4.2.4.2. Método indutivo

O método indutivo (Figura 30a) procura eliminar as desvantagens encontradas no método tradicional. Isto, pois se trata de um método não destrutivo que utiliza uma bobina elétrica e suas propriedades eletromagnéticas para estimar a quantidade de fibras de aço presentes no concreto. A metodologia foi desenvolvida por pesquisadores da Universidade Politécnica da Catalunha (LOPEZ, 2013). O conceito básico é que posicionando uma amostra de CRF no meio de um campo eletromagnético uma variação na indutância (ΔL) é observada. Quando a amostra é colocada em diferentes posições dentro da bobina diferentes ΔL são observadas, dependendo da orientação das fibras no seu interior. Analisando a soma dessas variações de indutância (ΔL_T) o teor de fibras é estimado e a partir da proporção das variações em cada posição é possível estimar a orientação destas fibras. Para isso, uma calibração prévia com a mesma fibra utilizada e em quantidade conhecida é necessária.



Figura 30 - Equipamento do método indutivo a) e amostra sendo testada b)

Fonte: Próprio autor

O procedimento do ensaio indutivo depende do formato da amostra (LOPEZ, 2013). No caso da amostra cilíndrica, ΔL_T é obtido considerando quatro medidas ΔL em diferentes posições: a posição vertical (ΔL_z) e três posições horizontais nos ângulos 0, 45 e 90° (ΔL_0 , $\Delta L_{45} e \Delta L_{90}$, respectivamente) (Figura 30.b). As 50 amostras obtidas (10 placas x 5 testemunhos de cada) foram avaliadas, totalizando 200 ΔL medidas. O método, uma vez calibrado, necessita de 2 minutos para o ensaio de cada amostra o que resulta uma significante redução no tempo de ensaio comparado ao método tradicional. Uma explicação mais detalhada do método foi apresentada em outros trabalhos (LOPEZ, 2013).

4.3. RESULTADOS E ANÁLISES

Os resultados e análises serão apresentados nessa seção. Primeiramente, a calibração do método indutivo. Então, os resultados são comparados com aqueles obtidos através do método tradicional. Na sequência, o método indutivo é utilizado para estimar o teor de fibras dos CPRFA e os resultados analisados e comparados com os teores de fibras adicionados no concreto antes da projeção. Finalmente, uma metodologia para controlar a reflexão das fibras no CPRFA é proposta com base no método indutivo.

4.3.1. Calibração do método indutivo

Para calibração do método indutivo, três cilindros de isopor foram utilizados. Os cilindros tinham dimensões de 100 mm, para a altura e diâmetro, resultando volume (*V*) igual a 785,40 cm³. A Figura 31.a apresenta o cilindro de isopor ao lado do testemunho extraído da placa. Na Figura 31.b a curva de calibração para a fibra utilizada é apresentada, utilizando três isopores com diferentes massas de fibra (10,02; 20,08 e 30,17 g), aleatoriamente dispostas, e medidas as respectivas variações de indutância ΔL_T . Pode ser observado que a relação é linear e apresenta bom ajuste ($\mathbb{R}^2 = 0,997$). Dessa forma, a Equação 7 foi utilizada para estimar o teor de fibra dos testemunhos usando o método indutivo ($C_{f,i}$).

Figura 31 - Cilindro de isopor utilizado na calibração do método indutivo a) e gráfico com a equação de calibração b)



$$C_{f,i}(kg/m^3) = 0,007 \cdot \frac{\Delta L_T(mH)}{V(m^3)}$$
(7)

4.3.2. Comparação entre os métodos indutivo e tradicional

Para comparar os métodos de ensaio uma amostra de cada placa foi utilizada. Os valores de ΔL_T foram obtidos utilizando o método indutivo e estimados os teores de fibra ($C_{f,i}$). Após isso, os testemunhos foram esmagados para obter a massa de fibras e os teores reais de fibras ($C_{f,r}$) foram calculados considerando os volumes (V). A Figura 32a mostra o testemunho esmagado e o ímã coletando as fibras.





Fonte: Próprio autor

A Tabela 4.2 apresenta os parâmetros geométricos dos testemunhos (h_m , $\phi_m \in V$), a massa de fibras obtidas através do método tradicional (w_f), os valores de ΔL_T obtidos através do método indutivo e os teores de fibra estimados e reais ($C_{f,i} \in C_{f,r}$,

respectivamente). Os valores de $C_{f,i}$ foram calculados através da Equação 1 e $C_{f,r}$, é o resultado da divisão entre w_f e V dos testemunhos.

Decogom	Dlaga	h_m	ϕ_m	V	W _f	$C_{f,r}$	ΔL_T	$C_{f,i}$
Dosagem	Placa	(mm)	(mm)	(cm ³)	(g)	(kg/m ³)	(mH)	(kg/m ³)
1	1	106,89	99,71	834,53	7,54	9,04	0,85	7,13
1	2	103,69	100,03	814,83	11,95	14,67	1,60	13,75
2	3	101,00	99,69	788,26	8,22	10,43	1,05	9,32
2	4	102,07	99,99	801,50	15,32	19,11	1,90	16,59
2	5	107,38	99,74	838,94	31,25	37,25	4,00	33,38
3	6	107,76	99,75	842,12	16,61	19,72	2,05	17,04
4	7	105,18	100,02	826,41	28,75	34,79	4,05	34,30
4	8	94,76	99,85	741,94	21,44	28,90	2,75	25,95
5	9	106,46	99,76	832,09	33,18	39,88	4,30	36,17
3	10	107,31	99,75	838,48	38,02	45,34	4,50	37,57

Tabela 4. 2 - Resultados da comparação entre os métodos

Fonte: Próprio autor

Considerando os resultados obtidos entre os métodos tradicional e indutivo, uma diferença média de 11,32% é observada entre $C_{f,r}$ e $C_{f,i}$, porém com alto coeficiente de determinação da correlação (Figura 32.b). Essa diferença deve-se provavelmente a dois fatores: erros durante a coleta de fibras no método tradicional ou precisão do equipamento de medida da indutância. Contudo, a diferença entre os métodos é pequena e considerando as vantagens e desvantagens já apontadas o método indutivo é mais adequado para o controle do material.

4.3.3. Estimação do teor de fibra no CPRFA

O método indutivo foi utilizado para quantificar o teor de fibras ($C_{f,i}$) de 50 testemunhos utilizando a Equação 7. A Tabela 4.3 apresenta os resultados obtidos por placa e dosagem de fibras, em termos de resultados médios e coeficientes de variação (entre parênteses) de cinco testemunhos. Além disso, esta tabela apresenta na última coluna os teores de fibra teóricos que foram adicionados ao material ($C_{f,p}$).

Dosagem	Placa	h_m (mm)	ϕ_m (mm)	V (cm ³)	ΔL_{TOT} (mH)	$C_{f,i}$ (kg/m ³)	$C_{f,p}$ (kg/m ³)
1 -	1	105,06	99,72	820,54	1,20	10,27	20,00
	1	(1,92%)	(0,07%)	(2,02%)	(20,20%)	(21,63%)	-
1	2	101,12	99,85	791,82	1,36	12,03	20,00
	2	(3,58%)	(0,14%)	(3,70%)	(13,61%)	(13,41%)	-
	2	103,95	99,74	812,17	1,30	11,18	30,00
2	3	(1,88%)	(0,05%)	(1,94%)	(22,43%)	(21,41%)	-
Δ	4	100,65	99,98	790,16	1,52	13,41	30,00
	4	(5,92%)	(0,09%)	(5,97%)	(23,45%)	(21,01%)	-
	5	106,17	99,86	831,56	2,93	24,65	35,00
2		(2,27%)	(0,11%)	(2,29%)	(26,43%)	(25,82%)	-
5	6	107,75	99,91	844,72	2,09	17,32	35,00
		(1,46%)	(0,28%)	(1,85%)	(4,60%)	(4,80%)	-
	7	97,37	99,87	762,74	2,83	25,78	45,00
4	1	(6,32%)	(0,14%)	(6,36%)	(25,50%)	(19,80%)	-
4	0	96,58	99,94	757,62	2,86	26,35	45,00
	0	(5,02%)	(0,12%)	(4,99%)	(18,60%)	(14,88%)	-
5	0	104,34	99,90	817,91	3,71	31,75	55,00
	9	(1,82%)	(0,15%)	(1,65%)	(18,34%)	(18,45%)	-
5	10	99,81	99,83	781,24	3,99	35,81	55,00
	10	(5,66%)	(0,06%)	(5,64%)	(12,29%)	(12,70%)	-
			Fonte: F	róprio autor			

Tabela 4.3 - Resumo dos resultados do estudo

A Tabela 4.3 apresenta a variabilidade dos resultados considerando as mesmas dosagens e placas testadas. Essa variação é aceitável para CPRFA (GALOBARDES, 2013; FIGUEIREDO, 1997). Por outro lado, considerando os valores de $C_{f,i}$ e $C_{f,p}$, uma tendência, também apresentada na Figura 33, é observada. A relação entre $C_{f,i}$ e $C_{f,p}$ é linear (Equação 8) e apresenta bom ajuste ($R^2 = 0,869$). A diferença entre esses dois parâmetros deve ser controlada, pois a redução no teor de fibras incorporado leva à redução no comportamento pós-fissuração do CPRF (PUJADAS, 2013; BLANCO, 2013; FIGUEIREDO, 2008).


 $C_{f,i} = 0,60 \cdot C_{f,p}$

Nesse caso, a inclinação da Equação 8 (m = 0,60) representa a taxa de incorporação efetiva das fibras durante o processo de projeção em relação ao que foi dosado e pode ser utilizada para a determinação de um fator (r) que representa o percentual do teor de fibras que não foi incorporado, seja devido à reflexão do concreto durante sua aplicação ou de outros motivos como uma eventual heterogeneidade na mistura antes da projeção (Equação 9). Para o CPRF estudado, o parâmetro r é igual a 40%. Considerando que o valor de r encontra-se entre 30 e 50% indicados na literatura (GALOBARDES, 2013; ARMELIN, 1997; PFEUFFER e KUSTERLE, 2001; EFNARC, 1999), r é admissível. Ainda, considerando m e a Equação 8 uma expressão analítica (Equação 10) é apresentada para calcular o teor de fibra que deve ser projetado ($C_{f,0}$) para que se obtenha determinado teor de fibra incorporado ($C_{f,i}$) igual ao teor de fibra considerado pelo projeto ($C_{f,p}$). Com isso, o objetivo dessa equação é evitar a perda de comportamento pós-fissuração do CPRF devido ao efeito da reflexão.

$$r(\%) = 100 \cdot (1 - m) \tag{9}$$

$$C_{f,0} = \frac{C_{f,p}}{m} \tag{10}$$

4.3.4. Metodologia para o controle do teor de fibras do CPRFA

Para controlar o teor de fibras do CPRF aplicado e, além disso, verificar se a quantidade de fibras ($C_{f,i}$) é no mínimo a estabelecida em projeto ($C_{f,p}$), uma avaliação

(8)

preliminar e *in-situ* deve ser realizada, como ilustra a Figura 34. A avaliação preliminar consiste em estimar a taxa de incorporação efetiva das fibras (*m*) utilizando o método indutivo. Para isso, placas teste são projetadas considerando diversos teores de fibra teóricos e testemunhos são extraídos de acordo com a norma europeia UNE-EN 14488-2 (2007). Em seguida, o método indutivo deve ser calibrado considerando o tipo de fibra utilizado. Os testemunhos são ensaiados com o método indutivo e os teores de fibras $C_{f,i}$ são obtidos para cada placa. Esses teores são correlacionados com os teores de fibra teóricos para cálculo do parâmetro *m* usando a Equação 8, ou seja determinação do coeficiente angular da linha de tendência observada na correlação.



Figura 34 - Metodologia proposta para o controle do teor de fibras do CPRFA baseado no método indutivo

Na sequência, o teor de fibras que deve ser projetado ($C_{f,0}$) para que se obtenha o teor de fibras final ($C_{f,i}$) igual ao teor de projeto ($C_{f,p}$) é calculado através da Equação 10 e o valor *m* obtido anteriormente. Finalmente, o método indutivo é utilizado para obter o controle de qualidade do CPRFA da estrutura permitindo aos engenheiros a verificação do atendimento aos requisitos de comportamento pós-fissuração especificados no projeto em função do teor de fibras.

4.4. CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

Com base nos resultados obtidos e análises conduzidas, fica evidente que o método indutivo é uma excelente ferramenta para obtenção do teor de fibras do CPRFA. Além disso, uma metodologia para o controle da taxa de incorporação efetiva das fibras no CPRFA baseado no método indutivo é proposta. Adicionalmente, as seguintes conclusões são delineadas a partir dos resultados desse estudo:

- O método indutivo elimina a desvantagem do método tradicional, pois trata-se de um método não destrutivo e elimina erros experimentais (fator humano). Ademais, o método indutivo reduz em 87% o tempo para a determinação do teor de fibra da amostra facilitando a realização de um controle de qualidade mais amplo do material.
- A calibração do método indutivo é simples: fazendo a correlação entre um teor conhecido por volume de determinada fibra e o incremento total de indutância medida. Nesse estudo o método tradicional foi utilizado para verificar a calibração do método indutivo. Os resultados mostram uma diferença de 11,32% entre o teor real de fibra (*C_{f,r}*) obtidos por meio do método tradicional e a estimação do teor (*C_{f,i}*) através do método indutivo.
- Utilizando o método indutivo pode ser estimada a reflexão das fibras no CPRF. Assim, a taxa de incorporação efetiva das fibras estimada no CPRFA do estudo foi de 60%. Considerando isso e o tipo de fibras utilizada, o teor de fibras que deve ser projetado (*C_{f,0}*) de modo a se obter um teor de fibras incorporado (*C_{f,i}*) igual ao teor estabelecido no projeto (*C_{f,p}*) pode ser determinado.

5. APLICAÇÃO DE METODOLOGIA ALTERNATIVA DE CONTROLE DO CPFRA

O presente capítulo apresenta resultados de um programa experimental que contempla a aplicação conjunta do ensaio Barcelona e indutivo para o controle do CPRFA. Dessa forma, é possível realizar, em um mesmo corpo de prova, ensaios de avaliação de desempenho mecânico do CPRFA por meio do ensaio Barcelona e de determinação do teor de fibras de aço efetivamente incorporado ao concreto pelo método indutivo. Este capítulo traz também uma proposição de programa de controle de qualidade para a aplicação estrutural do CPRFA.

5.1. INTRODUÇÃO

Estudos e projetos recentes demonstram a eficácia do uso do concreto projetado reforçado com fibra de aço (CPRFA) como material estrutural (AUSTIN, 1996; FIGUEIREDO, 1997). A aplicação do CPRFA para revestimento de túneis e estabilização de encostas confirma isso. O uso da fibra de aço pode diminuir ou até mesmo eliminar os gastos com armaduras convencionais, trazendo assim vantagens logísticas e econômicas (SEGURA et al., 2013).

O CPRFA é usualmente aplicado em projetos onde o material consumido chega à ordem de grandeza de milhares de metros cúbicos. Assim, um bom programa de controle de qualidade deve ser estabelecido para evitar danos ou falhas estruturais e, além disso, para otimizar o consumo de material e produção de resíduos. Então, considerando aspectos próprios do concreto projetado, como a reflexão, e como esses aspectos influenciam o conteúdo final de fibra, o programa de controle de qualidade deve avaliar o desempenho mecânico do concreto e identificar o teor real de fibras no concreto projetado. Isto porque essa concentração tem relação direta com o comportamento pós-fissuração do concreto, ou seja, a sua resistência residual (ARMELIN, 1997; PFEUFFER e KUSTERLE, 2001; GALOBARDES, 2013).

Para a análise do comportamento pós-fissuração do CPRFA e para a comprovação de seu desempenho mecânico suas resistências residuais à tração devem ser estimadas e comparadas com os requisitos de projeto. Atualmente, as determinações da EFNARC para concreto projetado (EFNARC, 1999) apresentam o ensaio de flexão

de vigas padrão para essa finalidade. Esse ensaio requer muito tempo de trabalho em laboratório, em especial na preparação dos corpos de prova prismáticos com dimensões 75x125x600 mm, que devem ser obtidos a partir de placas de teste definidas conforme ABNT NBR 13070 (2012). Este procedimento, somado a geração de grandes volumes de resíduos, atua como um complicador para o estabelecimento de um programa de controle de qualidade amplo que vise à avaliação do CPRFA. Portanto, o uso de métodos alternativos, como o ensaio Barcelona (UNE 83515, 2010), que também avalia o comportamento pós-fissuração do CPRFA usando equipamentos simples e corpos de prova menores, podem minimizar os problemas existentes.

No que se refere à incorporação de fibras, a diferença entre a quantidade inicial de fibra definida em projeto e aquela existente no concreto após sua projeção deve ser estimada, pois esta influencia negativamente o comportamento mecânico do concreto (FIGUEIREDO, 1997). Para essa estimativa, atualmente, determina-se a massa das fibras manualmente coletadas de amostras no estado fresco (EFNARC, 1996) ou de corpos de prova de CPRFA endurecidos após serem esmagados. Estes procedimentos são mais demorados que o ensaio indutivo, considerando-se que a extração do testemunho será uma necessidade para a realização dos ensaios de caracterização do comportamento mecânico. Além disso, principalmente no que se refere à determinação do teor de fibras no CPRFA endurecido, a execução é difícil e gera um volume extra de resíduos. No caso do estado fresco, além dos resíduos, aumenta o consumo de água na operação. Além disso, o fator humano pode influenciar os resultados, já que todo o procedimento depende do técnico que o executa. Devido a isso, métodos não destrutivos alternativos, como o método indutivo (TORRENTS et al., 2012; CAVALARO et al., 2015), devem ser considerados.

Nesse contexto o objetivo do presente estudo é propor uma metodologia para controlar o comportamento pós-fissuração do CPRFA baseado na aplicação combinada do ensaio Barcelona e do método indutivo no mesmo corpo de prova. Para isso, foram moldadas placas de CPRFA por via seca, variando-se a quantidade de fibra em cada placa. Dessas placas foram extraídos e preparados os corpos de prova cilíndricos para a realização dos ensaios.

5.2. METODOLOGIA

Nessa seção é apresentado o programa experimental, começando com a descrição dos materiais, passando para o traço experimental de concreto e o método de projeção. A seguir são detalhados o processo de obtenção dos corpos de prova e os procedimentos do ensaio.

5.2.1. Materiais

5.2.1.1. Cimento, água, agregados e aditivos

Foi utilizado apenas o cimento CP III 40 RS. Este tipo foi definido considerando as especificações de projeto. O CP III 40 RS contém alta concentração de escória de alto-forno (35-70%) e é resistente a sulfatos (RS), promove melhor trabalhabilidade e maior capacidade de ser bombeado e projetado, já que a baixa densidade da escória fornece um volume maior de pasta, mantendo o peso, para a mesma quantidade de materiais cimentícios (MEHTA e MONTEIRO, 2013).

Para amassamento do concreto foi utilizada água potável em atendimento a todas as definições da norma brasileira NBR 15900 (2009), assim como agregados graúdo (4-12 mm) e miúdo (0-4 mm) que atendem à norma brasileira NBR 7211 (2009). A dosagem experimental foi definida de modo a garantir a boa trabalhabilidade do traço, evitando assim problemas durante seu bombeamento e para melhorar a compactação do concreto (GALOBARDES, 2013; EFNARC, 1999).

5.2.1.2. Fibras

A fibra usada foi a Wirand tipo FSN3, fabricada pela Maccaferri. A geometria da fibra era comprimento (L) de 33 mm e fator de forma (L/D) igual a 44, recomendados para concreto projetado. Essas características geométricas foram avaliadas com base na norma brasileira NBR 15530 (2007), mostrando-se dentro das tolerâncias determinadas. Finalmente, a fim de estudar o modo como a quantidade de fibras nos traços afeta os resultados, foram considerados três conteúdos de fibras: 20, 35, e 55 kg/m³. Estes são valores típicos para concreto projetado (FIGUEIREDO, 1997).

5.2.2. Traço de concreto

O traço experimental usado neste estudo está detalhado na Tabela 5.1. Importante notar que a quantidade de cimento usada está entre 350 e 450 kg/m³, que abrange as quantidades usuais para concreto projetado (EFNARC,1999). O fator água/cimento adotado na composição do concreto antes da projeção foi de 0,33. Finalmente, as quantidades diferentes de fibra foram aplicadas ao traço experimental.

Material	Dosagem (kg/m ³)		
Cimento	435,2		
Agregado miúdo (0-4 mm)	924,8		
Agregado graúdo (4-12	809,4		
Água	175,2		
Fonte: Próprio	autor		

Tabela 5. 1 - Traço experimental de concreto projetado

5.2.3. Processo de projeção e preparação de corpos de prova

Todos os traços foram projetados por via seca, seguindo as recomendações da EFNARC (1999). Para isso, foi usada uma máquina de projeção de concreto por via seca. O concreto foi projetado com uma pressão de ar constante igual a 14 kgf/cm² em placas de madeira com uma área igual a 500x500 mm² e altura de 125 mm. As placas foram posicionadas com uma inclinação de 20º em relação ao solo, conforme recomendado pelas normas europeias UNE-EN 14488-2 (2007). No total foram preparadas seis placas, resultando em duas placas para cada volume de fibra considerado no estudo.

Três testemunhos cilíndricos foram extraídos de cada placa, usando uma extratora com uma serra-copo diamantada de 100 mm de diâmetro, conforme determina a norma europeia UNE-EN 14488-2 (2007). Após isso a face mais áspera foi cortada e regularizada por meio de uma serra circular. Finalmente, as dimensões dos corpos de prova foram medidas para cálculo de seu volume (*V*). Para isso, seu diâmetro (ϕ) e sua altura (*h*) foram medidos duas vezes e seu volume foi calculado pela média desses valores (*h*_m e ϕ_m , respectivamente).

5.2.4. Procedimentos de ensaio

5.2.4.1. Método indutivo

O método indutivo (Figure 35.a) é um ensaio não-destrutivo que usa uma bobina eletromagnética para estimar a quantidade de fibras existentes no concreto (TORRENTS et al., 2012; CAVALARO et al., 2015). Seu conceito básico tem relação com a variação da indutância (ΔL) que é observada quando um corpo de prova contendo fibras de aço é colocado dentro de um campo eletromagnético. Se o corpo de prova for colocado em diferentes posições dentro do campo eletromagnético, diferentes valores de indutância ΔL serão encontrados. O teor de fibras e sua orientação podem ser estimados por meio da análise da somatória desses valores (ΔL_T) e da proporção das variações em cada posição. Para isso, deve-se executar uma calibração do método, observando-se o tipo específico de fibra utilizada.

Figura 35 - Equipamento do método indutivo a) e corpo de prova durante ensaio b)



Fonte: Próprio autor

O desempenho do método indutivo depende da forma do corpo de prova (CAVALARO et al., 2015). No caso de serem cilíndricos a ΔL_T é obtida considerando a leitura de 4 ΔL em diferentes posições: uma vertical (ΔL_z) e três horizontais em três ângulos diferentes: 0°, 45° e 90° (ΔL_0 , ΔL_{45} e ΔL_{90} , respectivamente) (Figure 35.b). Foram feitas 72 leituras de ΔL , 4 para cada um dos 18 corpos de prova confeccionados para este experimento.

5.2.4.2. Ensaio Barcelona

O ensaio Barcelona avalia a resistência à tração residual e o comportamento pósfissuração do CPRFA. Além disso, permite estimar a tenacidade do material. Ele foi apresentado por pesquisadores da Universidade Politécnica da Catalunha com base no ensaio de duplo puncionamento desenvolvido por Chen (1970). Atualmente, o Ensaio Barcelona é um método normalizado de acordo com a norma UNE 83515 (2010) e pode ser utilizado para CPRFA como demonstrado pelos bons resultados de Silva et al. (2015).

Desta forma, seis corpos de prova obtidos dos concretos de cada teor de fibra foram testados utilizando uma máquina de ensaio Emic. A curva de carga (*F*) em função do deslocamento vertical (δ) foi obtida para cada amostra.

5.3. RESULTADOS E ANÁLISES

Em primeiro lugar, o método indutivo foi calibrado e usado para estimar o teor de fibras do CPRFA. Os resultados foram analisados e comparados com o conteúdo de fibra do traço experimental. A seguir, os resultados do ensaio Barcelona são apresentados e analisados.

Note-se que este programa experimental foi realizado utilizando um concreto projetado via seca. Como o concreto projetado via seca apresenta uma variação de teor de fibra efetivamente incorporado mais elevada que aquele projetado via úmida, a metodologia de análise é testada em uma pior condição.

5.3.1. Método Indutivo

5.3.1.1. Calibração do método indutivo

A fim de calibrar o método, foram utilizados três corpos de prova de poliestireno expandido. Suas dimensões eram 100 mm, tanto para o diâmetro quanto para a altura, resultando num volume (*V*) igual 785,40 cm³. Esta foi a mesma geometria dos espécimes de CPRFA que foram ensaiados no estudo. Um exemplo destes corpos de prova de CPRFA é apresentado na Figura 36.a. A seguir, diferentes quantidades de fibras (10,02, 20,08 e 30,17 g) foram colocadas aleatoriamente nas amostras de

poliestireno no intuito de obter a sua ΔL_T usando o método indutivo. A Figura 36.b apresenta a relação entre a quantidade de fibras colocadas nas amostras e sua ΔL_T considerando o volume específico (*V*). Como pode ser observado, a relação é linear e mostra bom ajuste com a equação de correlação (R² = 0,997). Portanto, a equação 11 foi utilizada para estimar o teor de fibra dos corpos de prova utilizando o método indutivo (*C*_{*f*,*i*}).

Figura 36 - Corpo de prova cilíndrico de poliestireno expandido usado na calibração do método a) e equação de calibração b)



Fonte: Próprio autor

$$C_{f,i}(kg/m^3) = 0,007 \cdot \frac{\Delta L_T(mH)}{V(m^3)}$$
 11)

5.3.1.2. Determinação do teor de fibra no CPRFA

O método indutivo foi utilizado para avaliar o teor de fibra ($C_{f,i}$) dos 18 corpos de prova usando a equação 11. A Tabela 5.2 apresenta estes resultados por placa de ensaio e dosagem da fibra. Portanto, os valores apresentados são médios que foram obtidos dos resultados dos ensaios de três corpos de prova diferentes. A variação também é apresentada entre parênteses. Além disso, os valores médios de h_m , ϕ_m , $V \in \Delta L_T$ também são mostrados com suas respectivas variações entre parênteses. Finalmente, a Tabela 5.2 apresenta os teores iniciais de fibra indicada no projeto ($C_{f,p}$).

$C_{f,p}$	Placa de	h_m	ϕ_m	<i>V</i>	ΔL_{TOT}	$C_{f,i}$ (kg/m ³)	
(kg/m^3)	ensalo	(mm)	(mm)	(cm ³)	(mH)		
20	1	105,06	99,72	820,54	1,20	9,72	
		(1,92%)	(0,07%)	(2,02%)	(20,20%)	(23,41%)	11,19
	2	101,12	99,85	791,82	1,36	12,65	(20,01%)
		(3,58%)	(0,14%)	(3,70%)	(13,61%)	(7,51%)	
35	1	106,17	99,86	831,56	2,93	27,04	
		(2,27%)	(0,11%)	(2,29%)	(26,43%)	(26,89%)	22,29
	2	107,75	99,91	844,72	2,09	17,55	(31,19%)
		(1,46%)	(0,28%)	(1,85%)	(4,60%)	(4,24%)	
55	1	104,34	99,90	817,91	3,71	35,39	
		(1,82%)	(0,15%)	(1,65%)	(18,34%)	(12,27%)	37,01
	2	99,81	99,83	781,24	3,99	38,62	(10,52%)
		(5,66%)	(0,06%)	(5,64%)	(12,29%)	(8,67%)	

Tabela 5. 2 - Resultados globais do método indutivo

Fonte: Próprio autor

Considerando-se as estimativas do teor de fibra ($C_{f,i}$), os desvios médios de 13,8 e 20,6% foram obtidos tomando em consideração aos resultados de placas de ensaio e aos teores de fibra, respectivamente. Estas variações são aceitáveis e intrínsecas ao CPRFA (GALOBARDES, 2013; FIGUEIREDO, 1997). Por outro lado, considerando os valores de $C_{f,i}$ e $C_{f,p}$, obtém-se uma correlação, que é apresentada na Figura 37 (Equação 12). A razão entre $C_{f,p}$ e $C_{f,i}$ é linear e apresenta um bom ajuste ($R^2 = 0,911$). A diferença entre estes dois parâmetros deve ser controlada de modo a garantir o teor de fibra que contribua para cumprimento dos requisitos de resistência residual de pósfissuração do CPRFA (PUJADAS, 2013; BLANCO, 2013; FIGUEIREDO, 2008).



Figura 37 – Correlação entre C_{f,p} e C_{f,i}

73

12)

A reflexão é um aspecto singular do concreto projetado que acarreta diferenças entre os traços projetado e incorporado e entre $C_{f,p}$ e $C_{f,i}$ (ARMELIN, 1997). Nesse sentido, o coeficiente angular da equação 12 (m = 0,65) representa a taxa de incorporação efetiva das fibras durante o processo de projeção em relação ao que foi dosado e pode ser utilizado para a determinação de um fator (r) que representa o percentual do teor de fibras que não foi incorporado, seja devido à reflexão do concreto durante sua aplicação ou de outros motivos como uma eventual heterogeneidade na mistura antes da projeção (Equação 13). Neste estudo, r é igual a 35%. Levando-se em conta que os valores de r estão, normalmente, entre 30 e 50% para os sistemas de projeção viaseca (GALOBARDES, 2013; ARMELIN, 1997; PFEUFFER e KUSTERLE, 2001), é possível afirmar que este resultado está de acordo com o esperado. Ainda, considerando m e a Equação 12 uma expressão analítica (Equação 14) é apresentada para calcular o teor de fibra que deve ser projetado ($C_{f,0}$) para que se obtenha determinado teor de fibra incorporado ($C_{t,i}$) igual ao teor de fibra considerado pelo projeto ($C_{f,p}$). Com isso, o objetivo dessa equação é evitar a perda de comportamento pós-fissuração do CPRF devido a efeitos como a reflexão.

$$r(\%) = 100 \cdot (1 - m) \tag{13}$$

$$C_{f,0} = \frac{C_{f,p}}{m} \tag{14}$$

Para exemplificar sua aplicação, observa-se pela Tabela 5.2 que a dosagem de 35 kg/m³ resultou em um teor incorporado de 22,29 kg/m³ em média e, por meio da Equação 14, tem-se que $C_{f,0}$ seria calculado em 53,8 kg/m³ caso fosse necessária a incorporação de 35 kg/m³ segundo projeto. Ainda pela mesma tabela, observa-se que o teor dosado de 55 kg/m³, próximo ao valor de $C_{f,0}$ neste exercício ora exemplificado, resultou em uma incorporação de 37,01 kg/m³ em média, ratificando a utilização do modelo.

5.3.2. Ensaio Barcelona

A Figura 38 apresenta os resultados do ensaio Barcelona considerando o teor de fibras inicial do traço experimental ($C_{f,p}$): 20, 35 e 55 kg/m³. Essas curvas se referem

à relação entre a carga (*F*) e a tenacidade (*E*) com o deslocamento vertical (δ), onde a tenacidade é calculada pela integral da curva *F* x δ .

Sobre a relação $F \ge \delta$, as cargas de pico diminuem com o aumento da *C_f*. Nesse sentido, o traço com teor de fibra igual a 20 kg/m³ apresenta um pico de carga (73,06 kN) que é 25,67 e 29,09% maior que as cargas de pico apresentadas pelos traços com teor de fibra entre 35 e 55 kg/m³, respectivamente. Isso ocorre, provavelmente, devido às dificuldades impostas pela fibra metálica ao processo de projeção. Nesse sentido, as fibras metálicas podem reduzir a velocidade da projeção do concreto e, com isso, a compactação do concreto. Isso pode levar a um aumento da porosidade do concreto projetado e a uma diminuição de suas propriedades mecânicas (CHRISTOPHER et al., 2005; BLANCO, 2013; PUJADAS, 2013). Em compensação, a tenacidade (*E*), presente no traço, aumenta linearmente com o incremento do teor de fibra metálica. Essa tendência (Figura 39) é esperada devido à relação entre a tenacidade do CPRFA com a *C_f*. Atentar que essa tendência reforça a importância de controlar o *C_f do CPRFA*.



Figura 38 - Resultados do ensaio Barcelona para traços com $C_{f,p}$ igual a 20 a), 35 b) e 55 kg/m³ c)



Os resultados do ensaio Barcelona foram usados na obtenção do diagrama tensão (σ) x deformação (ε) do CPRFA estudado (Figura 40) no intuito de caracterizar seu comportamento pós-fissuração. Esses diagramas foram obtidos usando as Equações 15 a 19, propostas por Blanco et al. (2014). Atentar que essas equações visam avaliar a razão entre tensão e deformação considerando os seguintes parâmetros: aspectos geométricos dos componentes do ensaio; o módulo de Young da matriz; e o coeficiente de fricção (μ_k) na área fissurada (Blanco et al., 2014). O último é um parâmetro restritivo devido a sua variação durante o teste e carece de estudos aprofundados para sua determinação. Contudo, Blanco et al. (2014) define a primeira aproximação μ_k igual a 0,70, os autores consideraram $\mu_k = 0,35$, devido ao baixo teor de agregado graúdo do concreto projetado. Esta suposição também foi adotada levando em consideração a resistência à flexão do concreto ($f_{ctm,fl} = 4,53$ MPa) calculada através das equações do *fib Model Code* 2010 (FIB, 2013) e sabendo que f_{ck} é igual a 40 MPa. Em compensação, a equação apresentada por Galobardes et al. (2014) foi usada para estimar o módulo de elasticidade do CPRFA.

$$A = \frac{d \cdot h}{4} - \frac{d^{\prime 2}}{4 \cdot \tan \beta}$$
 15)

Onde *d* e *h* são diâmetro e altura do corpo de prova, respectivamente, *d*' o diâmetro do cilindro de punção no ensaio e β o ângulo de falha do material.

$$\sigma_1 = \frac{F_{max} \cdot (\cos\beta - \mu_k \cdot \sin\beta)}{2 \cdot \pi \cdot A \cdot (\sin\beta + \mu_k \cdot \cos\beta)}$$

$$16)$$

$$\sigma_2 = \frac{F_{0,1\%} \cdot (\cos\beta - \mu_k \cdot \sin\beta)}{2 \cdot \pi \cdot A \cdot (\sin\beta + \mu_k \cdot \cos\beta)}$$

$$17)$$

$$\sigma_{3} = \frac{F_{0,4\%} \cdot (\cos\beta - \mu_{k} \cdot \sin\beta)}{2 \cdot \pi \cdot A \cdot (\sin\beta + \mu_{k} \cdot \cos\beta)}$$

$$18)$$

$$\sigma_4 = \frac{F_{2\%} \cdot (\cos\beta - \mu_k \cdot \sin\beta)}{2 \cdot \pi \cdot A \cdot (\sin\beta + \mu_k \cdot \cos\beta)}$$
¹⁹



Os diagramas $\sigma \ge \varepsilon$ seguem as mesmas tendências observadas nos resultados do ensaio Barcelona. A resistência à flexão (σ_1) dos traços diminui com o incremento do teor das fibras, enquanto que a resistência residual à tensão (σ_2 , $\sigma_3 \ge \sigma_4$) tende a aumentar com o incremento do C_f . Considerando que o $C_{f,i}$ de todos os traços é menor que o valores de $C_{f,p}$, os diagramas $\sigma \ge \varepsilon$ e o comportamento pós-fissuração dos traços devem ser diferentes. Isso deve ser considerado para assegurar que o concreto projetado atenda aos requisitos determinados pelo projeto.

77

5.4. PROPOSTA DE MÉTODO PARA CONTROLAR O COMPORTAMENTO PÓS-FISSURAÇÃO DO CPFRA

A metodologia proposta nesse capítulo para controle do comportamento pósfissuração do CPRFA é baseada tanto no ensaio Barcelona quanto no método indutivo. Obviamente, ela considera as especificações do projeto executivo: teor de fibra metálica ($C_{f,p}$) e resistência residual do CPRFA. Uma das principais vantagens desta metodologia é que os dois ensaios podem ser feitos utilizando os mesmos corpos de prova, reduzindo a quantidade de material para teste quando comparado com as vigas usadas no ensaio de flexão. Além disso, com a redução do volume das amostras, promove-se a otimização da moldagem de placas devido à possibilidade de obtenção de corpos de prova para demais controles a partir das mesmas placas, reduzindo também o volume de resíduos, o que implica uma vantagem ambiental e quantidade de recursos durante todo o processo.

O método proposto é composto por três frentes de análise, como mostrado na Figura 41: monitoramento de parâmetros de aplicação do concreto, caracterização e qualificação dos constituintes do CPRFA e determinação de seu desempenho mecânico. Em primeiro lugar, o estudo que compreende, além de ensaios que subsidiam a avaliação do comportamento mecânico do material, a grande parte dos ensaios de caracterização e qualificação dos constituintes do concreto reforçado com fibras de aço e o monitoramento de parâmetros de sua projeção, englobando moldagem de placas, reconstituição de traço, determinação da consistência e do índice de reflexão do concreto, são normalizados pela ABNT e já consolidados no cenário brasileiro para as atividades de projeção de concreto. Complementando a caracterização do CPRFA, apresenta-se neste trabalho a determinação do teor de fibras metálicas efetivamente incorporado ao CPRFA por meio do método indutivo, parâmetro este bastante relevante à contribuição das fibras ao comportamento pósfissuração do concreto. Como análise definitiva do desempenho mecânico do CPRFA, propõe-se a utilização do ensaio Barcelona, capaz de fornecer informações acerca da resistência à fissuração da matriz do concreto e determinar parâmetros de seu comportamento pós-fissuração, possibilitando a comparação com requisitos do projeto. Deste modo, o controle proposto permite a aceitação ou rejeição do lote do CPRFA sob análise e caso seu desempenho não seja satisfatório tem-se, por meio da caracterização promovida, a possibilidade de intervenção seja nos insumos ou em parâmetros do processo de produção e projeção do concreto.



Figura 41 - Metodologia proposta para caracterizar e controlar o CPRFA

Fonte: Próprio autor

Em termos quantitativos, no intuito de se manter a representatividade das amostras preconizada na EFNARC, recomenda-se a utilização de três corpos de prova a serem utilizados para avaliação de cada lote de CPRFA, para a realização dos ensaios Barcelona e de determinação do teor de fibras pelo método indutivo. Os demais ensaios deveriam seguir o que já se encontra consolidado nas normas técnicas pertinentes. A periodicidade da coleta de amostras e a determinação dos lotes para análise deveriam seguir as especificações do projetista, do responsável técnico pelo controle de qualidade do produto e do processo e por normas técnicas pertinentes que regem o controle estatístico da aplicação de concretos em geral.

5.5. CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

Baseado nos resultados e na análise efetuada, fica evidente que o ensaio Barcelona e o método indutivo são excelentes ferramentas para controlar o CPRFA quando utilizadas em conjunto. Isto torna a realização dos ensaios mais econômica e ágil e, simultaneamente, proporciona um controle mais apurado do material uma vez que potencializa gerar um número maior de parâmetros a partir de um único corpo de prova. Além disso, o presente trabalho apresenta uma metodologia para essa finalidade. Em adição, as seguintes conclusões são retiradas dos resultados deste estudo:

- Tanto o ensaio Barcelona quanto o método indutivo são adequados para a tarefa de controlar o comportamento pós-fissuração do CPRFA. O primeiro apresenta vantagens sobre ensaios tradicionais por reduzir a necessidade de recursos durante a projeção do concreto e a preparação dos corpos de prova, por simplificar o equipamento utilizado em sua realização e por reduzir a quantidade de resíduos após o controle. O método indutivo elimina os inconvenientes do método manual e facilita a estimativa do teor de fibras do concreto;
- Pode-se determinar a taxa de incorporação efetiva das fibras por meio do método indutivo. Neste sentido, este trabalho estimou que 65% das fibras adicionadas à dosagem do CPRFA sob análise foram incorporadas após a aplicação, o que é aceitável para concreto projetado via seca. Considerando a análise estatística desta taxa, engenheiros podem otimizar o teor de fibras

adicionado ao concreto necessário à incorporação do teor correspondente ao desempenho mecânico esperado, atendendo razões técnicas e econômicas;

- Usando as equações propostas por Blanco et al. (2014), o diagrama tensão x deformação do CPRFA é definido por meio dos resultados do ensaio Barcelona. Então, ele permite a determinação do comportamento pósfissuração do CPRFA, e
- O Ensaio Barcelona confirmou a tendência de que tanto a resistência à fissuração quanto a resistência residual são indireta e diretamente relacionadas com o teor de fibra, respectivamente. O diagrama tensão x deformação obtido mostra essas mesmas tendências.

6. CONCLUSÃO

Os estudos experimentais apresentados nesta dissertação comprovaram a viabilidade técnica da aplicação conjunta do ensaio Barcelona e indutivo para o controle simultâneo do comportamento mecânico e do teor de fibras no compósito, respectivamente. A partir destes ensaios, foi feita a proposta de uma nova metodologia de controle do CPRFA que, além de viável tecnicamente, acaba por proporcionar uma redução de tempo de execução e de material gasto nos procedimentos de controle quando comparados aos ensaios tradicionais onde estas determinações são feitas em corpos de prova mais volumosos e distintos. Além disso, o ensaio Barcelona pode ser realizado da mesma maneira em testemunhos cilíndricos extraídos de placas como de estruturas (túneis e taludes). Isto permite a comparação dos resultados de controle corriqueiro com aqueles obtidos a partir da verificação das condições da estrutura no caso de dúvida quanto à sua conformidade, o que é inexequível com os métodos tradicionais existentes.

Constatou-se também que ensaios alternativos aos normalizados atualmente, que tem por objetivo avaliar a adequação do CPRFA aos seus requisitos, podem contribuir satisfatoriamente à melhoria da representatividade das amostras, além de atender às expectativas de sustentabilidade de seu programa de controle de qualidade. Nesse sentido, no que se refere ao ensaio Barcelona, percebeu-se que este não apresentou diferença significativa de resultados, tanto em termos de média como de dispersão de valores. Além disso, o ensaio Barcelona não está tão sujeito à instabilidade pós-pico como os ensaios de flexão e apresenta coeficientes de variação menores quanto aos parâmetros do comportamento pós-fissuração do CPRFA, o que aumenta a confiabilidade da análise da capacidade resistente residual para baixos níveis de abertura de fissura.

Dada a simplificação do ensaio de comprovação de desempenho mecânico, promovida pelo ensaio Barcelona, a metodologia permite a utilização de equipamentos menos complexos para sua execução, não necessitando utilizar LVDTs e outros aparatos como o yoke (FIGUEIREDO, 1997). Isto, facilita a implementação deste controle nas frentes de aplicação do CPRFA em condições de campo em termos de equipamento. Além disso, acarretaria também maiores economias quanto a transporte e armazenamento de placas moldadas e corpos de prova.

Sugere-se, como propostas para futuras pesquisas, a realização de estudos experimentais utilizando-se diferentes concretos, tipos e teores de fibra e dimensões das amostras para o ensaio Barcelona. Propõe-se também a análise de resultados oriundos de testemunhos extraídos de placas moldadas e da estrutura real e a sua comparação com os resultados obtidos nos ensaios de punção de placas.

Para a padronização de representatividade amostral e frequência de realização dos ensaios propostos como controle do CPFRA, observa-se a necessidade de estudos do impacto da utilização de diversas quantidades de corpos de prova de um mesmo lote em busca de um número ideal, além de estudos de controle estatístico durante todo o controle da aplicação do CPRFA.

Acredita-se que, devido à menor variabilidade dos parâmetros da utilização de concreto projetado via úmida, a aplicação desta metodologia para estes sistemas de aplicação proporcionaria resultados melhores do que os apresentados neste trabalho. De qualquer forma, recomenda-se a análise de aplicabilidade desta metodologia de controle voltada para a projeção de CPRFA via úmida.

Sugere-se também, a realização de estudos da aplicação do Ensaio Barcelona em corpos de prova com entalhes ou indentação produzidos previamente no intuito de se induzir a propagação das fissuras de forma previsível para que sejam aprimoradas as análises da mecânica da fratura do material.

Ainda, no intuito de ampliar a utilização desta metodologia, mantendo-se os ganhos oriundos da combinação do ensaio Barcelona para comprovação de desempenho mecânico e ensaios de caracterização, como o método indutivo, sugere-se que sejam elaborados estudos de determinação do teor de fibras poliméricas do CPRF alternativamente à medição manual após esmagamento de corpos de prova, já que para este tipo de fibra os ensaios baseados em efeito magnético seriam impossibilitados.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7211: agregados para concreto - especificação. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR 7680**: concreto – extração, preparo, ensaio e análise de testemunhos de estruturas de concreto. procedimento. Rio de Janeiro, 2015.

_____. **NBR 13044**: concreto projetado – reconstituição da mistura recém-projetada: Procedimento. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR 13069**: concreto projetado – determinação dos tempos de pega em pasta de cimento Portland, com ou sem a utilização de aditivo acelerador de pega. procedimento. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR 13070**: concreto projetado – moldagem de placas para ensaio de argamassa e concreto projetado. procedimento. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR 13317**: concreto projetado – determinação do índice de reflexão por medida direta: procedimento. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR 13354**: concreto projetado – determinação do índice de reflexão em placas: procedimento. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR 14278**: concreto projetado – determinação da consistência através da agulha de Proctor: procedimento. Rio de Janeiro, 2012.

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

_____. NBR 15900: água para amassamento do concreto. Rio de Janeiro, 2009.

AENOR. **UNE 83515**: hormigones con fibras. determinación de la resistencia a fisuración, tenacidad y resistencia residual a tracción. método Barcelona. Spain, 2010

_____. **UNE-EN 14488-2**: testing sprayed concrete - Part 2: compressive strength of young sprayed concrete. Spain, 2007.

_____. **UNE-EN 14721**: test method for metallic fibre concrete - measuring the fibre content in fresh and hardened concrete. Spain, 2008

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **ASTM C1609**: standard test method for flexural performance of fiber-reinforce concrete (using beam with third-point loading). Philadelphia, 2010. 8 p.

_____. **ASTM C1399**: standard test method for obtaining average residual-strength of fiber-reinforced concrete. Philadelphia, 2010. 6 p.

_____. **ASTM C1550**: standard test method for flexural toughness of fiber reinforced concrete (using centrally loaded round panel). Philadelphia, 2005. 13 p.

ARMELIN, H.S. Contribuição ao estudo do concreto projetado por via seca com fibras de aço destinado ao revestimento de túneis NATM. 1992. 145p. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 1992.

ARMELIN, H. Rebound and thoughening mechanisms in steel fibre reinforced dry-mix shotcrete. 1997. Thesis (PhD) – Canada, 1997

ARMELIN, H.; BANTHIA, N. Steel fiber rebound in shotcrete. Concrete International. American Concrete Institute. September 1998. pp. 78-83.

AUSTIN, S. Sprayed concrete technology. United Kingdom: Chapman & Hall, 1996.

BANTHIA, N.; TROTTIER, J-F. Test methods for flexural toughness characterization of fiber reinforced concrete: Some concerns and a proposition. **ACI Materials Journal**, Detroit, USA, v.92, n.1, p.48-57, Jan-Febr., 1995.

BLANCO, A. et al. Constitutive model for fibre reinforced concrete based on the Barcelona test. **Cement and concrete Composites**, v. 53, 327-340, 2014.

BLANCO, A. **Characterization and modelling of SFRC elements**. 2013. Thesis (PhD) - ETSECCP. Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona, Spain, 2013.

BLANCO, A. et al. Métodos recientes para caracterizar el hormigón reforzado con fibras. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 54., 2012, Maceió. **Anais**. São Paulo: IBRACON, 2012.

CARVALHO, L. G. et al. Avaliação da dispersão da resistência residual do concreto reforçado com fibras. In: Congresso Brasileiro do Concreto, 56., 2014, Natal. **Anais**. São Paulo: IBRACON, 2014.

CAVALARO, S. H. P. Improved assessment of fibres content and orientation with inductive method in SFRC. **Materials and Structures**, v.48, p. 1859-1873, 2015.

CHEN, W.F. Double punch test for tensile strength of concrete. **ACI Materials Journal**, v.67, n.2, p. 993-995, 1970.

Christopher K.Y. Leung^{*}, Raymond Lai, Augustus Y.F. Lee. Properties of wet-mixed fiber reinforced shotcrete and fiber reinforced concrete with similar composition. **Cement and Concrete Research**, v.35, p. 788 – 795, 2005.

CORREIA, V. C. Estudo da influência do uso de fibras de aço e de estribos no comportamento da ancoragem de barras., 2012. 166 p. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

di PRISCO et al. Fibre reinforced concrete: new design perspectives. **Materials and structures**, v.42, n.9, p.1261-1281. Nov. 2009.

EFNARC. **European Specification for Sprayed Concrete**. European Federation of Producers and Applicators of Specialist Products for Structures (EFNARC), Hampshire, United Kingdom, 1996. 30p.

FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON – **FIB. Fib Model Code For Concrete Structures 2010.** Switzerland, 2013. 402p.

FIGUEIREDO, A. D. **Concreto projetado - Controle do processo de projeção**: Boletim Técnico (BT/PCC/92). São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – Departamento de Engenharia de Construção Civil, 1993.

_____. Dosagem e Controle do Concreto Projetado com Fibras. In: Simpósio Tendência da Engenharia Estrutural Empregando Concreto de Alto Desempenho e Concreto Reforçado com Fibras. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. **Anais**. São Paulo, 1999. 26p.

_____. Concreto com fibras. **Concreto:** ciência e tecnologia. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON), 2011a. 1902 p. cap. 37.

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

_____. Concreto projetado com fibras de aço para túneis: Boletim Técnico (BT/PCC/181). São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – Departamento de Engenharia de Construção Civil, 1997.

______. Evaluation of the test method for crushing strength of steel fibre reinforced concrete pipes. In: INTERNATIONAL RILEM SYMPOSIUM OF FIBER REINFORCED CONCRETE: DESIGN AND APPLICATIONS (BEFIB 2008), 7., 2008, Chennai, India. **Proceedings**... Fiber Reinforced Concrete: Design and Applications, Babneux – France: RILEM Publications S.A.R.L. v.1, p. 989-1000, 2008.

_____. Parâmetros de controle e dosagem do concreto projetado com fibras de aco. Thesis (PhD) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, USP, São Paulo, Brasil, 1997.

_____. **Concreto com fibras de aço**. Boletim Técnico (BT/PCC/260). São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – Departamento de Engenharia de Construção Civil, 2000.

_____. O controle indireto da energia de compactação do concreto projetado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 53., 2011, Florianópolis. **Anais**. São Paulo: IBRACON, 2011c.

GALEOTE, E. et al. Correlation_between_the_Barcelona_test_and_the_threepoint_bending_test_for_the_characterization_of_SCFRC. In: Congresso Iberoamericano Betao Autocompactavel, 4., 2015. **Anais.** Oporto, 2015.

GALOBARDES et al. Estimation of the modulus of elasticity for sprayed concrete. **Construction and Building Materials**, v 53, 48-58, Feb., 2014.

GALOBARDES, I. & FIGUEIREDO, A. Correlation between BEAM and Barcelona tests for FRC quality control for structural applications. **Fibre Concrete 2015**. September 10-11, Prague, Czech Republic, 2015.

GALOBARDES, I. Characterization and control of wet-mix sprayed concrete with accelerators. Thesis (PhD) -. ETSECCP, Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona, Spain, 2013.

GOLAPARATNAM, V.S.; GETTU, R. On the characterization of flexural toughness in fiber reinforced concretes. **Cement & Concrete Composites**, v.17, n 3. p. 239-54, 1995.

JANSSON, A.; GYLLTOFT, K; LÖFGREN, I. Design methods for fibre-reinforced concrete: a state-of-the-art review. In **Nordic Concrete Research. 2008. Pp. 21-36.**

KALIL, R. Z.; ESCARIZ, R. C.; FIGUEIREDO, A. D. . Elaboração de método de ensaio para determinação do teor de fibras em concreto endurecido. In: 520. Congresso Brasileiro do Concreto, 2010, Fortaleza. Materia. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto - IBRACON, 2010.

LEUNG, C.K.Y. et al. Properties of wet-mixed fiber reinforced shotcrete and fiber reinforced concrete with similar composition. **Cement and Concrete Research**, v.35, p. 788 – 795,2005.

LOPEZ, R. Determinación de cuantía y orientación de fibras en HRFA por inducción magnética: mejora de un método existente e implementación para probetas cilíndricas. Thesis (Master) - . ETSECCP, Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona, Spain, 2013.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concrete:** microstructure, properties and materials. 4. Ed. Mc Graw Hill, 2013.

MIGUEL, W.S. Revestimento de túneis em concreto projetado reforçado com fibras de aço. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 43, 2001, Foz do Iguaçu. **Anais**. São Paulo: IBRACON, 2001.

MONTE, R. Caracterização e controle do comportamento mecânico do concreto reforçado com fibras para tubos. 2015. 156p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo,. Brasil, 2015.

MONTE, R.; TOALDO, G. S.; FIGUEIREDO, A. D. Avaliação da tenacidade de concretos reforçados com fibras através de ensaios com sistema aberto. **Matéria (UFRJ)**, v.19, p.132 – 149, 2014.

MORGAN, D.R.; MINDESS, S.; CHEN, L. Testing and Specifying Toughness for Fiber Reinforced Concrete and Shotcrete. In: Second **University-Industry Workshop on Fiber Reinforced Concrete and Other Advanced Materials, 2.,** 1995, Toronto, Canada p.29-50. NUNES, N. L.; TANESI, J.; FIGUEIREDO, A. D. Aplicação do concreto reforçado com fibras de aço na recuperação de estruturas e pavimentos. In: CONGRESSO IBERO-AMERICANO DE PATOLOGIA DAS CONSTRUÇÕES CON PAT, 4., 1997, Porto Alegre, RS: **Anais**, 1997. v. 2, p. 41 - 48.

PFEUFFER, M.; KUSTERLE W. 'Rheology and rebound behaviour of dry-mix shotcrete' Cement and Concrete Research 31:1619-1625. (2001)

PRUDÊNCIO Jr., L. R. Concreto projetado. **Concreto:** ciência e tecnologia. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON), 2011. 1902 p. cap. 38

PRUDÊNCIO Jr., L. R. **Contribuição à dosagem do concreto projetado**. São Paulo, 1993. 224p. Tese (doutorado). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 1993.

PUJADAS, P. Caracterización y diseño del hormigón reforzado con fibras plásticas. 2013. 263p. Thesis (PhD) - ETSECCP, Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona, España, 2013.

PUJADAS, P. et al. New analytical model to generalize the Barcelona test using axial displacement. **Journal of Civil Engineering and Management**, v. 19, n. 2, p. 259-271, 2013.

RILEM TC 162. Final recommendation of RILEM TD 162-TDF: Test and design methods for steel fibre reinforced concrete – σ - ϵ design method. **Materials and Structures**, v. 36, 2003, p. 560-657.

SALUDES, S. Ensayo de doble punzonamiento aplicado al hormigón reforzado con fibras (Ensayo Barcelona). 2006. 338p.Tese (Mestrado). Universidad Politecnica de Cataluña. Barcelona, Março, 2006.

SALVADOR, R.P. Análise comparativa de métodos de ensaio para caracterização do comportamento mecânico de concreto reforçado com fibras., 2013. 201 p. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

SEGURA, L et al. Bi-layer diaphragm walls: Experimental and numerical structural analysis. **Engineering Structures**, v.56, Barcelona, Spain, 2013.

SILFWERBRAND, J. Improvements of the Swedish Concrete Association's Method for Design of SFRC Slabs on Grade. In Nordic Workshop – The design of steel fibre reinforced concrete structures. Sthokholm, Sweden, 2001. pp 23-32.

SILVA. L. C. et al. Avaliação da dispersão de cargas de fissuração e residuais do concreto projetado reforçado com fibras de aço obtida pelo ensaio Barcelona. In: Congresso Brasileiro do Concreto, 57., Bonito. **Anais.** São Paulo: IBRACON, 2015.

THE JAPAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. **JSCE-SF4**: Method of tests for flexural strength and flexural toughness of steel fiber reinforced concrete. Concrete library of JSCE. Part III-2 Method of tests for steel fiber reinforced concrete. 1984. N. 3, p. 58-61.

TOALDO, G. S.; MONTE, R.; FIGUEIREDO, A. D.. Avaliação comparativa de métodos de ensaio para a determinação da tenacidade do concreto reforçado com fibras. In: Congresso Brasileiro do Concreto, 55., Gramado. **Anais**. São Paulo: IBRACON, 2013.

TORRENTS, J.M. et al. Inductive method for assessing the amount and orientation of steel fiber in concrete. **Materials and Structures** (RILEM). v 45, n.10, p.1577-1592, October, 2012.