UNIVERSIDADE ESTADUAL DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA

ANDRÉ BALTAZAR NOGUEIRA

AVALIAÇÃO DA REPETIBILIDADE E DA REPRODUTIBILIDADE DO
ENSAIO DE DUPLO PUNCIONAMENTO

São Paulo
2019

ANDRÉ BALTAZAR NOGUEIRA

**AVALIAÇÃO DA REPETIBILIDADE E DA REPRODUTIBILIDADE DO
ENSAIO DE DUPLO PUNÇIONAMENTO**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica de São Paulo para obtenção
do título de Mestre em Ciências

São Paulo

2019

ANDRÉ BALTAZAR NOGUEIRA

**AVALIAÇÃO DA REPETIBILIDADE E DA REPRODUTIBILIDADE DO
ENSAIO DE DUPLO PUNCIONAMENTO**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica de São Paulo para obtenção
do título de Mestre em Ciências.

Área de concentração: Engenharia de
Construção Civil e Urbana

Orientador: Prof. Dr. Antonio
Domingues de Figueiredo

São Paulo

2019

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

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

São Paulo, _____ de _____ de _____

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

Catálogo-na-publicação

Nogueira, André Baltazar

AVALIAÇÃO DA REPETIBILIDADE E DA REPRODUTIBILIDADE DO
ENSAIO DE DUPLO PUNÇONAMENTO / A. B. Nogueira -- versão corr. --
São Paulo, 2019.
104 p.

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

1.Concreto reforçado com fibras 2.Repetibilidade 3.Reprodutibilidade
4.Controle da qualidade I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica.
Departamento de Engenharia de Construção Civil II.t.

DEDICATÓRIA

Dedico à minha noiva Carol,
e meus pais amados

AGRADECIMENTOS

Primeiro agradeço a Deus pela vida e oportunidade de estudar.

Aos meus pais que me criaram, educaram e ensinaram o valor do estudo para formação de um cidadão. Sem o apoio deles não teria chegado até aqui.

À Carol, amor da minha vida, que nunca me deixou desanimar frente as dificuldades, me dando conselhos valiosos e ajudando a organizar os pensamentos e compromissos.

Ao meu orientador professor Antonio Figueiredo, pela participação ativa no trabalho, sendo inspiração em vários momentos, ensinando e guiando as ideias ao longo de todo o processo. Muito mais que um orientador, foi um amigo em que não faltaram conversas sobre muito mais que engenharia.

À minha parceira de pesquisa, Luana Simão, por sua ajuda direta e precisa com todos os trabalhos das disciplinas, condução dos programas experimentais, análises e pesquisas. Muito obrigado!

À Renata Monte e o Renan Picolo, pelo auxílio na produção de artigos e aulas sobre estatística.

Agradeço ainda todo o corpo técnico do laboratório de construção civil por terem atuado e disponibilizado recursos para a condução dos ensaios realizados neste trabalho. Agradeço também a concreteira Estrutural Concreto Unidade de Perus pela doação dos materiais

EPÍGRAFE

Tudo o que fizerem, seja em palavra seja em ação, façam-no em nome do Senhor Jesus, dando por meio dele graças a Deus Pai.

(A Bíblia, Colossenses 3:17)

RESUMO

Os avanços na utilização do concreto reforçado com fibras (CRF) para fins estruturais trazem cada vez mais a necessidade de se desenvolver ensaios práticos que possam controlar o material, analisando a capacidade resistente residual do compósito para diferentes níveis de abertura de fissura. O ensaio de duplo puncionamento (EDP) é uma promissora alternativa nesta direção, uma vez que haja uma correlação já comprovada com outros métodos de ensaio bem estabelecidos. Este trabalho objetivou investigar a repetibilidade e reprodutibilidade do EDP, considerando os parâmetros de cargas de fissura da matriz cimentícia e cargas residuais, verificando se existe igualdade de médias e igualdade de variâncias nas diferentes situações criadas, para 95% de confiabilidade. A repetibilidade foi avaliada por meio de um programa experimental, com moldagem dos corpos de prova no Centro de Pesquisa e Desenvolvimento da Construção Civil – CPqDCC, da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, envolvendo dois teores de fibra de aço com ancoragem em gancho (30 kg/m³ e 55 kg/m³) em três séries iguais de moldagem. A reprodutibilidade foi avaliada em um programa interlaboratorial, com participação de 6 laboratórios independentes e empregando a mesma fibra e teores. Como ferramentas para comparação dos resultados e avaliar se houve repetição e reprodução dos parâmetros do ensaio, foi utilizada análise de variância (ANOVA) e a metodologia da ASTM E691. Os resultados mostraram que foi possível obter repetibilidade e reprodutibilidade de médias para os parâmetros de cargas residuais com um número limitado de corpos de prova. No entanto, as variâncias são mais sensíveis que as médias, e não mostraram repetição total quando a homogeneização das fibras no volume total do concreto é prejudicada. Ainda, as cargas de fissuração do ensaio (P_f) não se mostraram totalmente repetíveis e nem reprodutíveis, pois podem ser afetadas pela máquina de ensaio e operador.

Palavras-chave: repetibilidade, reprodutibilidade, concreto reforçado com fibras, ensaio de duplo puncionamento.

ABSTRACT

The advances in the use of fiber reinforced concrete (CRF) for structural applications bring the need to develop more practical tests to control the FRC by analyzing the residual strength of the composite for different crack openings levels. The double punch test (DPT) is a promising alternative in that sense, once a correlation with already proven test methods is achievable. This work aimed to investigate the repeatability and reproducibility of the DPT, considering the parameters of crack load and residual loads, verifying if there is equality of means and equality of variances in the different situations created, for 95% reliability. The repeatability was evaluated by an experimental program, with the specimens molding at the Research and Development Center in Civil Construction - CPqDCC, at the Polytechnic School of the University of São Paulo, involving two hooked end steel fiber contents (30 kg/m^3 and 55 kg / m^3), in three equal molding series. The reproducibility was evaluated in an interlaboratory program, with the participation of six independent laboratories, and using the same fiber and contents. The analysis of variance (ANOVA) and the ASTM E691 methodology were applied as a tool to compare the results and to evaluate if there were repetition and reproduction of the test parameters occurred. Together with these tools, an inductive test was used on the reproducibility specimens to verify the scatter of the fiber among them. The results showed that it was possible to obtain repeatability and reproducibility of means for the parameters related to the residual loads. However, the variances are more sensitive than the means, and did not show total repetition when the homogenization of the fibers in the total volume of the concrete is compromised. Moreover, the cracking loads of the test (P_f) were not totally repeatable and reproducible, as they can be affected by the testing machine.

Keywords: repeatability, reproducibility, fiber reinforced concrete, double punch test

LISTA DE ABREVIATURAS

Sigla	Descrição
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American Society for Testing Materials
EN	European Standards
AENOR	Associação Espanhola de Normalização e Certificação
FIB	Fédération Internationale du Béton
EFNARC	Experts for Specialized Construction and Concrete Systems
CRF	Concreto reforçado com fibra
EDP	Ensaio de Duplo Puncionamento
ELS	Estado limite de serviço
ELU	Estado limite último
ANOVA	Análise de variância

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Unidade	Descrição
CMOD	mm	Abertura de fissura
TCOD	mm	Abertura do perímetro circunferencial
T30	kg/m ³	Teor de fibra do corpo de prova
T55	kg/m ³	Teor de fibra do corpo de prova
f_c	MPa	Resistência à compressão
f_{cm}	MPa	Resistência média à compressão

f_{ck}	MPa	Resistência característica à compressão
σ	kN	Desvio padrão
CV	%	Coeficiente de variação
CV _m	%	Coeficiente de variação médio das cargas residuais
n	Und.	Número mínimo de corpos de prova para se ter confiança nas médias e variâncias de um grupo de resultados
p	-	Parâmetro estatístico da ANOVA que mostra se o efeito de uma variável é significativo ou não
L	H	Indutância medida com campo magnético
P	kN	Valor de carga do EDP em determinado deslocamento vertical
P _f	kN	Valor de carga do EDP de fissuração da matriz
P _{0,5}	kN	Carga residual com deslocamento vertical de 0,5 mm a partir da carga de fissuração
P _{1,5}	kN	Carga residual com deslocamento vertical de 1,5 mm a partir da carga de fissuração
P _{2,5}	kN	Carga residual com deslocamento vertical de 2,5 mm a partir da carga de fissuração
P _{3,5}	kN	Carga residual com deslocamento vertical de 3,5 mm a partir da carga de fissuração
h _{crt}	-	Valor adimensional crítico (tabelado) para comparação de médias da ASTM E691
k _{crt}	-	Valor adimensional crítico (tabelado) para comparação de variâncias da ASTM E691
h	-	Valor adimensional calculado para comparação de médias da ASTM E691
k	-	Valor adimensional calculado para comparação de variâncias da ASTM E691

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Ensaio de flexão por três pontos com entalhe da norma EN 14651:2007	24
Figura 2.2 – Configuração do ensaio de flexão por 4 pontos com flexão pura no terço médio do corpo de prova (a); curva de carga por deslocamento do ensaio (b)	25
Figura 2.3 - Esquema do ensaio de flexão de placas quadradas com entalhe (a); curva de carga por deslocamento do ensaio (b)	26
Figura 2.4 – Esquema do ensaio Montevideu (a); e curva de carga por deslocamento do pistão (b)	27
Figura 2.5 – Corpo de prova DEWS com extensômetros fixados (a); e curva de tensão por abertura de fissura (b)	29
Figura 2.6 - Ensaio de indutância para quantificação do teor de fibra de aço	30
Figura 2.7 - Corpo de prova de calibração (a) e definição dos eixos de leitura de indutância (b).....	30
Figura 2.8 - Ensaio de duplo puncionamento segundo norma UNE 83515 com leitura de TCOD (a); e simplificação do método com leitura de deslocamento vertical (b) ..	32
Figura 2.9 - Fases principais do ensaio de duplo puncionamento.....	33
Figura 2.10 - Correlação entre TCOD e deslocamento vertical.....	33
Figura 2.11 - Correlação entre ensaio de prisma JSCE e EDP	35
Figura 2.12 - Relação entre valores estimados e valores experimentais para o ensaio EN14651 e duplo puncionamento	36
Figura 2.13 - Correlação analítica entre ensaio da EN14651 e duplo puncionamento para deslocamento vertical de 1,5 mm.....	36
Figura 2.14 - Zonas de incerteza padrão nos resultados de resistência residual do CRF	38
Figura 2.15 - Fontes de variação do CRF	39
Figura 2.16 - Resultados possíveis com (a) alta exatidão e alta precisão, (b) baixa exatidão e alta precisão, (c) alta exatidão e baixa precisão e (d) baixa exatidão e baixa precisão.....	40
Figura 2.17 - Exemplos de resultados inconclusivos, sem qualquer reprodutibilidade, obtidos com ensaios de prisma	42
Figura 2.18 – Curvas médias do EDP sobrepostas de dois laboratórios independentes	43

Figura 3.1 – Esquema do programa experimental conduzido no estudo.	45
Figura 4.1 - Fibra de aço 80/60 com ancoragem na extremidade utilizada no trabalho	47
Figura 4.2 – Consistência medida para o traço T30 (a) e o traço T55 (b)	48
Figura 4.3 – Fibras aglomeradas no T55 em betoneira de baixa energia de rotação	48
Figura 4.4 – Serra estacionária para corte dos corpos de prova (a); detalhe dos corpos de prova cortados e identificados (b)	49
Figura 4.5 – Configuração do EDP (a); posicionamento do corpo de prova antes do início do funcionamento (b)	51
Figura 4.6 - Etapas de análise de repetibilidade	54
Figura 4.7 – Padrão de fissuração nos corpos de prova do EDP	60
Figura 5.1 – Planejamento geral do programa interlaboratorial do EDP	74
Figura 5.2 - Prensas utilizadas em cada laboratório	76
Figura 5.3 - Etapas de análise de reprodutibilidade	76

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 4.1 – Curva de carga por deslocamento obtida com os dados da prensa (a); curva final com P_f deslocado para o zero do eixo x com <i>softening</i> (b) e <i>hardening</i> (c).	53
Gráfico 4.2 – Curva de carga por deslocamento vertical dos corpos de prova referentes à parte 1 – T30 (a); curva ajustada com P_f deslocado para valor zero do eixo x (b).61	
Gráfico 4.3 - Curva de carga por deslocamento vertical dos corpos de prova referentes à parte 1 – T55 (a); curva ajustada com P_f deslocado para valor zero do eixo x (b).62	
Gráfico 4.4 – Calibração do aparelho de leitura de indutância	64
Gráfico 4.5 - Identificação dos corpos de prova com excesso de fibra incorporada da série 1 na curva de carga por deslocamento vertical	65
Gráfico 4.6 – Aderência dos resultados a uma distribuição normal dos pontos $P_{1,5}$; $P_{2,5}$ e $P_{3,5}$ para T30 (a); T55 (b) e T55* (c).....	67
Gráfico 4.7 - Resultados de h (a); e k (b) para repetibilidade	70
Gráfico 5.1 – Curva de carga por deslocamento vertical dos corpos de prova referentes à parte 2 – T30 (a); curva ajustada com P_f deslocado para valor zero do eixo x (b).78	
Gráfico 5.2 - Curva de carga por deslocamento vertical dos corpos de prova referentes à parte 2 – T55 (a); curva ajustada com P_f deslocado para valor zero do eixo x (b).79	
Gráfico 5.3 - Aderência dos resultados à uma distribuição normal para T30 (a); e T55 (b).....	83
Gráfico 5.4 – Resultados de h (a); e k (b) para reprodutibilidade	86

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Parâmetros do ensaio indutivo para corpos de prova cilíndricos	30
Tabela 4.1 – Traço do concreto utilizado para moldagem dos corpos de prova	46
Tabela 4.2 – Programa experimental para parte 1 do estudo	50
Tabela 4.3 – Valores de h_{crt} e k_{crt} para parte 1	58
Tabela 4.4 – Slump (mm) e resistência à compressão (MPa) das três séries de CRF analisadas	59
Tabela 4.5 – Resultados médios e coeficiente de variação da parte 1 do estudo.....	63
Tabela 4.6 - Quantidade real de fibra incorporada por corpo de prova para o teor T55 da parte 1 do estudo	64
Tabela 4.7 - Teste de normalidade Ryan-Joiner para parte 1	66
Tabela 4.8 - Resultados de comparação de médias para a repetibilidade	68
Tabela 4.9 – Comparação de Tukey para P_f na parte 1 do estudo	69
Tabela 4.10 - Resultados de comparação de variâncias para repetibilidade	69
Tabela 4.11 – Resultados de n baseado em CV_m	71
Tabela 5.1 – Laboratórios participantes do programa de reprodutibilidade.....	75
Tabela 5.2 - Slump (mm) e resistência à compressão (MPa) das duas betonadas de CRF produzidas	77
Tabela 5.3 - Resultados médios e coeficiente de variação da parte 2 do estudo.....	80
Tabela 5.4 - Quantidade real de fibra incorporada por corpo de prova para o teor T55 da parte 2 do estudo	81
Tabela 5.5 - Teste de normalidade Ryan-Joiner para parte 2	82
Tabela 5.6 - Resultados de comparação de médias para a reprodutibilidade.....	83
Tabela 5.7 - Comparação de Tukey para P_f na parte 2 do estudo	84
Tabela 5.8 - Resultados de comparação de variâncias para reprodutibilidade	85

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	JUSTIFICATIVA DA PESQUISA	20
1.2	OBJETIVOS	21
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	21
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
2.1	CONTROLE TECNOLÓGICO DO CRF	23
2.1.1	Ensaio de duplo puncionamento	31
2.1.2	Correlação entre o EDP e outros ensaios de CRF	34
2.2	INCERTEZA NOS RESULTADOS MECÂNICOS DO CRF	37
2.2.1	Erro de ensaio	39
2.2.2	Repetibilidade e reprodutibilidade do CRF	40
3	PLANEJAMENTO GERAL DO PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	44
4	PARTE 1: ESTUDO PRELIMINAR (ANÁLISE DE REPETIBILIDADE)	46
4.1	MATERIAIS.....	46
4.2	PROCEDIMENTOS DE MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA	47
4.3	ENSAIO DE DUPLO PUNCIONAMENTO.....	50
4.4	METODOLOGIA DE ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	53
4.4.1	Modelo das análises estatísticas	54
4.5	RESULTADOS.....	59
4.5.1	Avaliação da repetibilidade.....	59
4.5.2	Ensaio indutivo	63
4.5.3	Análise estatística dos resultados.....	66
4.6	CONCLUSÕES DA PARTE 1	72
5	PARTE 2: INTERLABORATORIAL (ANÁLISE DE REPRODUTIBILIDADE)	73
5.1	MATERIAIS.....	73
5.2	PROCEDIMENTO DE MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA	73

5.3	PLANEJAMENTO DO INTERLABORATORIAL	74
5.4	METODOLOGIA DE ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	76
5.4.1	Modelo das análises estatísticas	77
5.5	RESULTADOS.....	77
5.5.1	Avaliação da reprodutibilidade.....	77
5.5.2	Ensaio indutivo	80
5.5.3	Análise estatística dos resultados.....	82
5.6	CONCLUSÕES DA PARTE 2	87
6	CONCLUSÕES FINAIS	88
6.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	89
	REFERÊNCIAS.....	90
	APÊNDICE I - Cálculo dos valores críticos da ASTM E691.....	98
	APÊNDICE II - Valores obtidos em todos os corpos de prova no EDP	100
	ANEXO I.....	103

1 INTRODUÇÃO

O concreto, devido a inúmeras causas, sofre com a presença de microfissuras na matriz cimentícia que prejudicam o comportamento do material (MEHTA, MONTEIRO, 2008). Essas microfissuras ou descontinuidades são suficientes para concentrar tensões em suas bordas, diminuindo a resistência à tração do elemento concreto como um todo, fazendo-o ser um material puramente frágil quando solicitado (SHACKELFORD, 2008).

Por conseguir contornar essas condições, o concreto reforçado com fibras (CRF) ganha cada vez mais atenção. Atuando como ponte de transferência de tensões nas fissuras, as fibras dispersas na matriz garantem uma resistência do elemento mesmo após fissuração da matriz cimentícia, permitindo uma maior deformação e mudando o comportamento de antes frágil para um pseudo-dúctil, com maior capacidade de absorver energia pelas deformações (BANTHIA; DUBEY, 1999; BENTUR; MINDESS, 2007; FIGUEIREDO, 2011).

Estudos nessa área possibilitaram alguns avanços recentes como a publicação do novo *fib Model Code* 2010 (FIB, 2013) onde foi inserida a possibilidade de se dimensionar estruturas utilizando as fibras como reforço único ou complementar (DI PRISCO; PLIZZARI; VANDEWALLE, 2009). A proposta do código orienta para que as avaliações do concreto reforçado com fibras ocorram parametrizando a resistência da matriz e resistências residuais em diferentes níveis de abertura de fissura, caracterizando estado limite de serviço (ELS) para baixas aberturas de fissura, e estado limite último (ELU) para grandes aberturas de fissuras.

Visto que o CRF possui suas peculiaridades (FIGUEIREDO, 2011), suas características e propriedades devem ser devidamente contempladas tanto na etapa de concepção da estrutura como no controle da qualidade desse concreto durante recebimento em obra. Neste sentido, o novo Código Modelo *fib* 2010 (fib, 2013) adotou o ensaio tradicional de flexão em prismas por três pontos, definido pela norma europeia EN14651 (2007), como o método de ensaio padrão de caracterização do CRF para aplicações estruturais. O problema deste ensaio está na dificuldade de executá-lo e de aplicá-lo como controle tecnológico de material em obra, como recomendado pelo Código Modelo *fib* (fib, 2013). A dificuldade de encontrar laboratórios de controle tecnológico que o executem, principalmente devido à complexidade dos equipamentos necessários é um primeiro empecilho

(FIGUEIREDO, 2014). Como segunda dificuldade, pode-se comentar os corpos de prova de grandes dimensões, que chegam a pesar mais de 25 kg, o que não é prático para rotina de obra e laboratorial (MOLINS et al, 2009).

O próprio *fib Model Code* (FIB, 2013) prevê a possibilidade de utilização de ensaios alternativos para o controle do CRF contanto que estejam bem correlacionados. Assim, pode-se considerar como alternativa ao ensaio da EN 14651, a norma espanhola AENOR UNE 83515 (2010). Essa norma propõe o ensaio de duplo puncionamento (EDP), que apresenta uma configuração diferente de um ensaio de flexão de prisma. Para avaliação do comportamento pós-fissuração do CRF, o procedimento de ensaio estabelece a realização do duplo puncionamento de corpos de prova cilíndricos de dimensões bem menores que dos prismas. Além disso, para a realização do EDP não é exigido que se utilize sistemas de controle fechado (GOLAPARATNAM, GETTU, 1995; GUPTA, BANTHIA, 2016), como ocorre para os ensaios de flexão como o EN14651. Assim, o EDP se apresenta como ensaio alternativo mais prático e capaz de ser viabilizado para a execução pelos laboratórios de controle de maneira mais fácil. Isso não elimina a necessidade de execução dos ensaios através da metodologia da EN14651 para a caracterização do material (FIB, 2013), mas a complementa, pois com o EDP foca-se no controle tecnológico do CRF em obras. Visto que o controle do CRF ainda é um desafio no Brasil (FIGUEIREDO, 2014), métodos de ensaio confiáveis e de fácil execução devem ser o foco principal para resolução deste problema.

Além das orientações do *fib Model Code* (FIB, 2013), já existem práticas recomendadas publicadas no Brasil pelo comitê técnico CT303-IBRACON/ABECE que contemplam orientações de projeto e práticas para controle de materiais. Esse comitê levou em consideração tanto os avanços publicados pelo *fib* (FIB, 2013) quanto os mais recentes avanços relacionados a métodos de ensaio alternativos como o EDP (IBRACON, 2017). Dessa forma, foi disponibilizado à comunidade brasileira envolvida com CRF a proposta do método EDP por meio dessas práticas recomendadas. Isto é positivo pois permite a divulgação da metodologia de ensaio visando elevar o potencial nacional de uso do CRF para aplicações estruturais com seu devido controle.

Poucas são as pesquisas abordando a repetibilidade e reprodutibilidade dos resultados de um ensaio mecânico de CRF, assim como pesquisas que abordem esse aspecto especificamente para o caso do EDP. Visto que o objetivo final do ensaio é

servir como controle sistemático de material em obra, estudos de repetibilidade e programas interlaboratoriais são necessários para garantir a sua aplicabilidade.

1.1 JUSTIFICATIVA DA PESQUISA

É importante ter em vista que, para implantação de um novo ensaio que visa controle sistemático de material em obra, é necessário conseguir confiança nos resultados obtidos com o mesmo. É historicamente sabido que os ensaios de avaliação mecânica do CRF no regime de pós-fissuração apresentam alta incerteza nos resultados (MORGAN MINDESS; CHEN, 1995). Assim, o EDP deve ser estudado para entender qual o grau de incerteza que seus resultados mecânicos podem apresentar. Além disso, é importante saber quais pontos da metodologia do ensaio mais podem influenciar nesses resultados. Para isso, os estudos de repetibilidade e reprodutibilidade são fundamentais, trazendo uma análise da qualidade dos resultados, testando metodologias em programas interlaboratoriais (CHUI; BISPO; IAMASHITA, 2004).

No Brasil e no mundo, ainda são poucos os estudos que se propõem analisar a capacidade de se repetir e reproduzir resultados do CRF, como abordado no item 2.2.2 deste trabalho. Para o EDP, esse número é menor ainda. Visto que é um ensaio que objetiva controle sistemático do CRF em obra, ele deve ser confiável na sua resposta mecânica, tanto na carga de fissuração da matriz cimentícia, como na resposta residual, independentemente do local de ensaio.

Como as publicações científicas com relação ao EDP estão aumentando, avaliando diferentes aplicações para o ensaio e medindo seu potencial, o estudo de repetibilidade e reprodutibilidade do EDP pode também ser usado para avaliar o número de corpos de prova necessário para garantir a qualidade dos seus resultados mecânicos. Além disso, esse estudo permite melhor entender pontos específicos da metodologia do ensaio que tem grande influência nos resultados mecânicos, além de contribuir na disseminação do conhecimento acerca do EDP usado para o controle da qualidade do CRF, como forma de melhorar o nível técnico nacional em relação ao uso do material.

1.2 OBJETIVOS

Esta pesquisa tem como objetivo principal verificar a repetibilidade do EDP dentro de um único laboratório e, em segundo momento, a reprodutibilidade do EDP, variando o local de ensaio.

Como objetivos específicos, neste trabalho busca-se verificar se a metodologia do ensaio é robusta o suficiente para reprodução de médias e variâncias de carga de fissuração e cargas residuais em diferentes contextos, utilizando concreto com um traço convencional para o Brasil e fibra de aço disponível no mercado. O trabalho também busca verificar dentro da metodologia de moldagem e rompimento, quais etapas do processo influenciaram de forma significativa as condições de repetibilidade e reprodutibilidade do ensaio, identificando os pontos críticos para o EDP.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Esta dissertação está organizada em 6 capítulos que versam sobre os seguintes temas:

- a) Capítulo 1: Neste capítulo é feita uma introdução ao tema do controle da qualidade do concreto reforçado com fibras, apresenta-se a justificativa para o estudo de repetibilidade e reprodutibilidade do ensaio de duplo puncionamento e os objetivos da pesquisa. Além disso, também é apresentada a estrutura da dissertação;
- b) Capítulo 2: Neste capítulo foi realizado um levantamento aprofundado sobre como é feito o controle de qualidade do concreto, quais os principais ensaios existem para avaliar o comportamento do CRF e quais condições podem influenciar esses resultados. Ainda, o item apresenta um levantamento de quais pesquisas já abordaram a avaliação de repetibilidade e reprodutibilidade do CRF;
- c) Capítulo 3: Este capítulo apresenta, de forma resumida, o planejamento experimental e as etapas realizadas. Descreve-se brevemente a parte 1 e a parte 2 do estudo;
- d) Capítulo 4: Neste capítulo, é apresentado em detalhes toda a metodologia, resultados e conclusões da parte 1 do estudo, que envolve a repetibilidade dos resultados do ensaio de duplo puncionamento;

- e) Capítulo 5: Este capítulo dá continuação à pesquisa, incorpora as conclusões da primeira parte 1 e apresenta a parte 2. Detalha-se a metodologia do programa interlaboratorial, os resultados e conclusões;
- f) Capítulo 6: É feito um resumo das principais conclusões do trabalho, analisando tanto parte 1 como parte 2 do programa experimental conduzido. Ainda, com base nos resultados obtidos ao longo do estudo, sugere-se novas pesquisas que possam dar continuidade ao tema.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CONTROLE TECNOLÓGICO DO CRF

O controle de qualidade de materiais em obra deveria ser algo básico dentro da engenharia civil. A necessidade de ensaios práticos e confiáveis para o CRF é essencial para a realidade brasileira, visto que até para os ensaios padrões em concreto convencional existe dificuldade de se obter boa qualidade de resultados nos laboratórios nacionais (CARROMEU et al., 2012; MAGALHÃES et al., 2013).

Até o ano de 2010, a utilização do CRF era altamente voltada para aplicações em sistemas com capacidade de redistribuição de esforços, como pavimentos e concreto projetado para revestimento de taludes (FIGUIREDO, 2011). As novas perspectivas de uso da solução em CRF foram motivadas pelo surgimento do *fib* Model Code 2010 (FIB, 2013), possibilitando uma utilização mais arrojada do uso das fibras, contemplando elementos com maior demanda estrutural.

Na Europa, fibras de aço já são utilizadas em lajes suspensas de concreto como único sistema de reforço, ou reforço misto. As pesquisas nessa área buscam quantificar a contribuição das fibras, absorvendo parte dos esforços à flexão das lajes, melhorando a resistência ao puncionamento e diminuindo o reforço convencional (BARROS, et al., 2012; GOUVEIA et al., 2017; McMAHON; BIRELY, 2017; PUJADAS et al., 2014). Outro campo de pesquisa que avança ao é o uso das fibras nas vigas de concreto armado e concreto protendido, tanto com reforço exclusivo, como reforço misto (junto com armadura convencional). Com esses trabalhos, busca-se quantificar a real contribuição das fibras na resposta mecânica e ductilidade (BLANCO, 2013; CUENCA et al., FOSTER et al., 2017; OSTA et al., 2017; XIA et al., 2018; YOO et al., 2017). Ainda, a difusão do uso do CRF cresce e ganha novos campos experimentais além dos elementos estruturais já citados, como é o caso de ligações pré-fabricadas em CRF para juntas secas de pontes, anéis pré-moldados de metro e peças de concreto protendido (CONFORTI et. al, 2017; SOETENS et. al, 2017; LIU et al, 2018).

Conforme cita Figueiredo (2011), os fundamentos para o controle tecnológico do CRF estão embasados na interação fibra e matriz, e nesse sentido, vários ensaios foram criados. Ainda, o controle tecnológico do CRF deve ser rigoroso, visto que cada vez mais se exige dessa solução uma maior responsabilidade estrutural. O método de ensaio de referência no *fib* Model Code é descrito pela norma EN 14651 (2007), por flexão de prisma por 3 pontos, com entalhe inferior que induz a fissuração (Figura 2.1).

Em função do nível de abertura de fissura (CMOD) a partir do entalhe, os valores de resistência residual são obtidos e então associados ao estado limite de serviço (ELS) e estado limite último (ELU) (di PRISCO; PLIZZARI; VANDEWALLE, 2009).

Figura 2.1 - Ensaio de flexão por três pontos com entalhe da norma EN 14651:2007 (BUTTIGNOL et. al, 2018)

No Brasil, além do ensaio de flexão por três pontos, adotado pelo *fib* Model Code, outros ensaios de flexão de prisma são vistos, como a metodologia da ASTM C1609 (2012) e da JSCE SF4 (1984) (DIAS, 2108; MONTE e FIGUEIREDO, 2014). Visualmente os ensaios se assemelham ao flexionar o prisma de concreto por quatro pontos, criando uma zona de flexão pura no topo médio do corpo de prova (Figura 2.2a). O controle do ensaio é realizado pelo deslocamento vertical do prisma (Figura 2.2b), medido por um LVDT, que alimenta um sistema de aquisição de dados. O ensaio da ASTM C1609 utiliza sistema fechado de controle de velocidade de deslocamento do corpo de prova. Isso busca minimizar o efeito da instabilidade pós pico, percebida principalmente para baixas dosagens de fibra (FIGUEIREDO, 2011; SALVADOR, 2013). Já o ensaio da JSCE SF4 (1984) não utiliza esse sistema, sendo constante o deslocamento do pistão da prensa e não o deslocamento do corpo de prova (ensaio em sistema aberto).

Figura 2.2 – Configuração do ensaio de flexão por 4 pontos com flexão pura no terço médio do corpo de prova (a) (MONTE e FIGUEIREDO, 2014); curva de carga por deslocamento do ensaio (b) (ASTM C1609, 2012)

Além da flexão por prismas, existem os ensaios de puncionamento de placas, com surgimento na Europa como outra forma de avaliação da tenacidade (ROBBIN, 1995). As primeiras metodologias de ensaio de puncionamento utilizadas aqui no Brasil foram das normas EFNARC (1996) e ASTM C1550 (2005), com controle por deslocamento vertical das placas. Esses ensaios são mais direcionados para controle de concreto projetado, visando se aproximar dos métodos de dimensionamento da estrutura de revestimento de túneis. A metodologia de ensaio por placas da EFNARC passou por uma atualização em 2011, apresentando um novo formato de ensaio, conforme Figura 2.3a. Esse novo modelo se baseia em uma flexão de placa quadrada, carregada por um cutelo superior e entalhe na face de baixo da placa de CRF. O controle do ensaio é feito pela deslocamento da placa ou abertura de fissura, gerando um gráfico de carga por deslocamento (Figura 2.3b). Claramente se observa uma aproximação do método de ensaio da EFNARC (2011) com a flexão por três pontos da EN14651 (2007).

Figura 2.3 - Esquema do ensaio de flexão de placas quadradas com entalhe (a); curva de carga por deslocamento do ensaio (b) (EFNARC, 2011)

Todos os métodos descritos anteriormente (flexão de prismas, placas e puncionamento de placas) buscam se aproximar dos modelos de dimensionamento das estruturas de CRF, porém acabam esbarrando na dificuldade operacional, seja na capacidade do laboratório de reproduzir o ensaio por falta de conhecimento seja por falta de aparatos necessários. O que se busca, como alternativas para esses casos, são métodos de ensaio mais simples, que avaliem a interação fibra e matriz do corpo de prova no regime de pós-fissuração, mantendo a confiança nos resultados. Nesse sentido, a norma Espanhola AENOR UNE 83515 propôs o ensaio de duplo puncionamento. Por ser o foco principal desse trabalho, ele será descrito com maiores detalhes no item 2.1.1.

Outra metodologia em desenvolvimento, que busca simplificar a avaliação mecânica do CRF, é o ensaio Montevideu. Como premissa básica, o ensaio propõe um método de fácil aplicação, buscando maior absorção pelos laboratórios de controle. A metodologia consiste na penetração de uma cunha metálica em um corpo de prova cúbico ou cilíndrico, previamente entalhado em uma das faces (Figura 2.4 a). Diferentemente dos ensaios de viga e placa, que requerem um controle de deslocamento do corpo de prova com sistemas de LVDT ou *clipgage*, no ensaio Montevideu o controle é feito exclusivamente pela velocidade de descida do pistão da prensa. Ao final, é possível traçar um gráfico de força por deslocamento vertical (Figura 2.4b). Ainda, caso seja necessário, é possível uma correlação analítica entre deslocamento vertical e a abertura de fissura. (SEGURA-CASTILLO, et al. 2018).

Figura 2.4 – Esquema do ensaio Montevideu (a); e curva de carga por deslocamento do pistão (b) (CASTILLO, 2017)

Da mesma forma que o concreto armado ou protendido utiliza-se de um valor característico de projeto (f_{cd}) como modelo básico para o dimensionamento da estrutura, o CRF busca o mesmo caminho. Porém, parametrizar o comportamento do compósito fibra-matriz nos elementos estruturais finais traçando uma relação com os ensaios de controle ainda é campo de pesquisa recente, ou seja, o cálculo de um valor característico de projeto para o CRF ainda não possui uma metodologia totalmente definida. Pelo fato de as fibras estarem dispersas no volume de concreto, conferindo um reforço 3D à matriz (FIGEUIREDO, 2011), muitos fatores influenciam para se alcançar a melhor estimativa de valor característico para CRF. Primeiro pela dificuldade de se estabelecer um padrão de incerteza nos resultados mecânicos de CRF, com coeficientes de variação que dependem do tipo de fibra, teor na mistura de concreto e da máquina de ensaio (BANTHIA, 1999; SALVADOR, 2012). Em segundo momento, isto ocorre pelo fato de que ensaios laboratoriais em pequena escala poderem apresentar coeficientes de variação maiores quando comparados a ensaios em escala real, utilizando corpos de prova do tamanho do elemento estrutural final. Essa redução da variação dos resultados mecânicos em corpos de prova na escala real é devida, principalmente, pela maior capacidade de redistribuição de esforços, aumentando a área fissurada e mobilizando uma maior quantidade de fibras (CAVALARO e AGUADO, 2015; di PRISCO; PLIZZARI; VANDEWALLE, 2009; FIB, 2013). Cavalaro e Aguado (2015) afirmam que o coeficiente de variação da resposta residual do CRF varia em função das dimensões do elemento. Assim, quanto maiores

forem as dimensões do corpo de prova, menor será o coeficiente de variação da resistência residual medida. (CAVALARO; AGUADO, 2015)

Partindo desse princípio, pesquisas também avançam para entender como as fibras se distribuem tanto no corpo de prova de pequena escala como no elemento estrutural final. O próprio *fib* traz essa sugestão de ponderação entre corpo de prova e estrutura a partir de um fator k , que descreve a orientação principal das fibras no concreto. Porém o próprio código modelo não traz um modelo matemático base, pelo contrário, sugere maior quantidade de estudos acerca desse tema. Assim, pesquisas envolvendo o fator k avançam e buscam compreender melhor o mecanismo de fissuração do CRF em escala real e qual a orientação principal das fibras em função das diferentes geometrias das estruturas. O objetivo é propor valores de k que auxiliem no cálculo de um valor característico e consequente melhor controle do CRF (BLANCO et al., 2015; PUJADAS et al., 2014).

Outra ferramenta criada para análise da orientação das fibras no corpo de prova é a metodologia do ensaio *Double Edge Wedge Splitting Test* (DEWS), criando por di Prisco, Lamperti e Lapolla (2010). O método consiste na compressão de corpos de prova com duplo entalhe em forma de cunha; com aplicação de carga pela prensa, registro das tensões em MPa e abertura de fissura a partir dos entalhes (COD). Durante o carregamento, a abertura de fissura possui velocidade controlada, medida por um extensômetro (Figura 2.5a), o que possibilita, ao final do ensaio, a plotagem de um gráfico de tensão por abertura de fissura (Figura 2.5b). Como o ensaio é realizado em corpos de prova cúbicos, existe a possibilidade de o corte em cunha ser posicionado em pares de lados opostos do cubo e em direções distintas. Ou seja, pode-se avaliar um corpo de prova cortado em duas direções ortogonais entre si, auxiliando no estudo de orientação das fibras (BORGES; MONTE; FIGUEIREDO, 2014; BORGES et al., 2019).

Figura 2.5 – Corpo de prova DEWS com extensômetros fixados (a); e curva de tensão por abertura de fissura (b) (BORGES; MONTE; FIGUEIREDO, 2014)

Uma forma de complementar o controle da qualidade do CRF, quando empregadas exclusivamente fibras de aço, é a utilização do ensaio de indutância (ou ensaio indutivo). Por meio da geração de campos magnéticos com bobinas de aço e corrente elétrica (Figura 2.6), é realizada uma leitura de indutância, medindo a quantidade real de fibras de aço dentro de um corpo de CRF. Torrents et al. (2012) e Cavalaro et al. (2016) propuseram metodologias de avaliação da quantidade de fibra de aço incorporada em corpos de prova cilíndrico e cúbico, o que também favorece para quantificação em situações de corpos de prova extraídos de estruturas.

Segundo Cavalaro et. al. (2016), para interpretação dos resultados e cálculo da quantidade real de fibras de aço incorporada, é necessária uma calibração do equipamento. Através da obtenção de dois valores de indutância em corpos de prova de poliestireno (Figura 2.7a), com mesma geometria do corpo de prova de concreto e com quantidades conhecidas da mesma fibra, é traçada uma reta de calibração. Posteriormente, são definidos três eixos principais em que ocorreram as leituras de indutância, tanto nos corpos de prova de calibração quanto nos de concreto (Figura 2.7b).

Figura 2.6 - Ensaio de indutância para quantificação do teor de fibra de aço (CAVALARO et al., 2016)

Figura 2.7 - Corpo de prova de calibração (a) e definição dos eixos de leitura de indutância (b) (CAVALARO et al, 2016)

Segundo a metodologia proposta por Cavalaro et al. (2016), é realizada a soma das indutâncias em henry (H) dos três eixos, sempre descontando a leitura inicial, quando nenhum corpo de prova está no centro da bobina. Cada valor de indutância ainda é dividido por um parâmetro de correção que depende da geometria do corpo de prova (Tabela 2.1).

$$L_{total} = \frac{L_x - L_i}{B_{v,x}} + \frac{L_y - L_i}{B_{v,y}} + \frac{L_z - L_i}{B_{v,z}} \quad (\text{Equação 2.1})$$

Tabela 2.1 - Parâmetros do ensaio indutivo para corpos de prova cilíndricos

Formato	Tamanho (mm)	Parâmetros		
		$B_{v,x}$	$B_{v,y}$	$B_{v,z}$
Cilíndrico	100x100	536	536	538
	150x150	1,789	1,789	1,809

Por último, o valor de coeficiente angular (α) obtido na reta de calibração é utilizado como constante de relação entre a somatória de indutância (L_{total}) e o valor real de fibra incorporada em cada corpo de prova (m_f).

$$m_f = L_{total}\alpha \quad (\text{Equação 2.2})$$

Alferes Filho (2016) já mostrou que essa metodologia pode ser uma grande ferramenta para análise de qualidade final do CRF. Este ensaio fornece um subsídio interessante para se verificar se a origem da variabilidade do resultado pode estar associada à variação do teor real de fibra empregado.

2.1.1 Ensaio de duplo puncionamento

A iniciativa de se desenvolver um ensaio simples para avaliação da resposta residual do CRF não é recente, visto que o próprio ensaio de prisma em sistema aberto (sem controle de velocidade de deslocamento do corpo de prova) da ASTM 1399 já era considerado como alternativa simplificadora dos ensaios de prisma mais elaborados no final do século 20 (ZOLLO; HAYS; ZELLERS, 1999). Mesmo hoje, e em países emergentes, existe uma tendência de se relacionar métodos de dimensionamento com ensaios mais simplificados de avaliação do CRF (MONTE e FIGUEIREDO, 2014; NAYAR; GETTU, 2012). Dessa forma, há um aumento da possibilidade de capacitação de mais projetistas e laboratórios a utilizarem a solução em CRF nas obras de engenharia civil.

O ensaio de duplo puncionamento (EDP) nasceu de pesquisas que buscavam uma simplificação dos atuais ensaios mecânicos do CRF, que envolviam basicamente prismas e placas de concreto (MOLINS et al., 2009; SALUDES, 2006). Posteriormente as primeiras pesquisas, no ano de 2010, o ensaio foi normalizado na Espanha pela AENOR UNE 83515 (2010). O ensaio realiza o duplo puncionamento de corpos de prova cilíndricos de dimensões bem menores que as dos prismas e placas (aproximadamente 5,5 kg por corpo de prova), também com a finalidade de avaliar os parâmetros associados ao comportamento pós-fissuração do CRF. Além disso, por possuir dimensões menores e formato cilíndrico, é possível a extração de testemunhos das estruturas com muito maior facilidade, podendo-se utilizar o ensaio para caracterizar o CRF utilizado na produção do elemento estrutural final. Assim

como já comprovado na literatura, este ensaio consiste em um método de fácil execução e, portanto, mais econômico e com capacidade de ser absorvido pelos laboratórios de controle (MALATESTA; AGUADO; MOLINS, 2012; MOLINS; AGUADO; SALUDES, 2009; PUJADAS et al., 2013).

Inicialmente, o ensaio foi proposto em 2010 com aplicação de carga para puncionamento e leitura do aumento do perímetro circunferencial (TCOD) do corpo de prova de CRF. Porém Pujadas et al. (2013) possibilitaram a simplificação do método, correlacionando analiticamente esse aumento de perímetro por simples deslocamento vertical do pistão da prensa com erro máximo de 7%, sendo amplamente aceito pela comunidade científica. A Figura 2.8a e 2.8b compara o método tradicional da norma e a proposta de simplificação de Pujadas (2013), respectivamente.

Figura 2.8 - Ensaio de duplo puncionamento segundo norma UNE 83515 com leitura de TCOD (a) (SALUDES, 2006); e simplificação do método com leitura de deslocamento vertical (b)

A correlação entre TCOD e deslocamento vertical proposta por Pujadas et al. (2013) foi feita a partir da constatação da existência de três fases principais na resposta do ensaio [elástica linear (1º estágio), transição (2º estágio) e resistência residual (3º estágio)], conforme Figura 2.9. Essas três fases são definidas visualmente no gráfico de carga por deslocamento vertical, ilustrado pelos pontos pretos no gráfico da Figura 2.10. Para efetuar a conversão analítica são então utilizadas as equações de 1 a 3.

Figura 2.9 - Fases principais do ensaio de duplo puncionamento (PUJADAS et al., 2013)

Figura 2.10 - Correlação entre TCOD e deslocamento vertical (MONTE; FIGUEIREDO, 2014)

$$TCOD = 0$$

$$\delta \leq \delta_{cr} \quad (\text{Equação 2.3})$$

$$TCOD = n \times \frac{a \times \delta_{R,0}}{2 \times l} \times \sin \frac{\pi}{n} \times \left(1 - \frac{F}{F_{cr}} \right)$$

$$\delta_{cr} < \delta < \delta_{R,0} \quad (\text{Equação 2.4})$$

$$TCOD = n \times \frac{a}{2 \times l} \times \sin \frac{\pi}{n} \times \left[\delta - \delta_{cr} + \delta_{R,0} \times \left(1 - \frac{F_{R,0}}{F_{cr}} \right) \right]$$

$$\delta \geq \delta_{R,0} \quad (\text{Equação 2.5})$$

Onde:

n : número de fissuras radiais formadas no ensaio;

a : diâmetro do disco de carga utilizado no ensaio;

l : comprimento da cunha formada sob o disco de carga, calculado em função do diâmetro do disco de aplicação da carga e do ângulo de atrito;

F : carga no ponto calculado;

F_{cr} , δ_{cr} : carga e o deslocamento no ponto da carga máxima;

$F_{R,0}$, $\delta_{R,0}$: carga e o deslocamento no ponto de início da resistência residual.

O EDP não fixa uma prensa de capacidade mínima para o ensaio, porém baseado em trabalhos já realizados, recomenda-se máquinas com capacidade acima de 200 kN. Isto porque, dependendo da resistência à compressão do concreto, os valores de carga para rompimento da matriz podem exceder 100 kN (GALEOTE, 2017; MOLINS, 2009). O ensaio permite a utilização de uma prensa *open loop*, onde não existe a retroalimentação da aplicação de carga a partir das deformações do corpo de prova (GETTU et al., 1996).

Diante desses avanços e com um novo ensaio capaz de simplificar o método de controle do CRF, pesquisas buscam equações constitutivas para modelar matematicamente o comportamento do CRF a partir de dados do EDP. Um modelo matemático sólido e confiável permitiria um controle tecnológico do concreto estrutural reforçado com fibras a partir da resposta do EDP, capacitando mais laboratórios para realizar esse controle, simplificando o controle proposto pela EN 14651. Assim, algumas pesquisas já trazem modelos constitutivos para prever o comportamento do EDP de concretos reforçados com diferentes fibras e teores (BLANCO et al., 2013). De forma prática, Monte et. al. (2016) já mostraram ser possível usar os parâmetros do EDP para dimensionamento de tubos de concreto reforçado com fibras, o que então permitiria o seu controle tecnológico com o ensaio.

No cenário brasileiro, o EDP possui base cada vez mais sólida para ser disseminado no Brasil. Além das orientações do *fib* Model Code (FIB, 2013), já existem práticas recomendadas publicadas no Brasil pelo comitê técnico CT303-IBRACON/ABECE tanto para orientações de projeto como para controle de materiais. Esse comitê levou em consideração os recentes avanços do CRF e já cita o EDP em seu texto base como método alternativo de controle do CRF (IBRACON/ABECE, 2017). Essa publicação tende a alavancar a utilização do ensaio EPD para controle de qualidade do CRF, visando futura normalização.

2.1.2 Correlação entre o EDP e outros ensaios de CRF

O *fib* Model Code 2010 parametriza as avaliações do CRF como material estrutural para diferentes níveis de abertura de fissura, por isso referencia o ensaio de prisma EN 14651 (2007) como método de avaliação do compósito. Porém o próprio *fib* em seu item 5.6.2.2 permite que a avaliação dessas características seja realizada por outro método de ensaio, desde que sua correlação com o ensaio da EN 14651 seja provada.

Várias pesquisas têm se dedicado a relacionar o ensaio de duplo puncionamento com outros métodos de avaliação do CRF. Alguns estudos já provaram que essa perspectiva é positiva, o que atenderia a proposta do *fib*. Visto que a tenacidade ainda é um parâmetro de análise do CRF muito utilizado no Brasil, Toaldo, Monte e Figueiredo (2013) já mostraram correlações entre tenacidade de prismas na norma japonesa JSCE-SF4 (1984) e o ensaio de duplo puncionamento. Monte e Figueiredo (2014) também demonstraram que a resistência residual do CRF é correlacionável entre os mesmos ensaios, principalmente quando utilizado fibras de aço (Figura 2.11).

Figura 2.11 - Correlação entre ensaio de prisma JSCE e EDP (MONTE e FIGUEIREDO, 2014)

Para o ensaio de prisma da EN 14651 (2007) proposto no *fib* Model Code 2010 (FIB, 2013), Galobardes e Figueiredo (2015) mostraram que fixando a mesma matriz cimentícia, uma correlação analítica com comprovação experimental é possível para os dois ensaios. No estudo, valores estimados (V_{est}) e valores experimentais (V_{exp}), para diferentes resistências residuais, mostraram tendência de se aproximarem, conforme Figura 2.12.

Figura 2.12 - Relação entre valores estimados e valores experimentais para o ensaio EN14651 e duplo puncionamento (GALOBARDES e FIGUEIREDO, 2015)

Ainda relacionando o ensaio de prisma da EN14651 (2007) com o ensaio de duplo puncionamento, Galeote et al. (2017) mostraram através de uma vasta campanha de ensaios que é razoável prever resultados do ensaio da EN14651 baseando-se em resultados do ensaio de duplo puncionamento. Segundo os autores, foi possível alcançar essa relação com boa confiabilidade principalmente para deslocamentos verticais de puncionamento acima de 1,5 mm, incluindo na regressão mais de um parâmetro de ensaio, como força residual e energia absorvida. A Figura 2.13 mostra o agrupamento de valores quando medido por ensaio e por correlação analítica.

Figura 2.13 - Correlação analítica entre ensaio da EN14651 e duplo puncionamento para deslocamento vertical de 1,5 mm (GALEOTE et al., 2017)

O CRF é muito utilizado em concreto projetado, pois a solução estrutural em túneis e metro muitas vezes é concebida pensando em redistribuição de esforços, o que favorece o uso das fibras. Nesse sentido, Silva (2016) também demonstrou com seu programa experimental que é possível obter os parâmetros de resistência residual em ensaio de concreto projetado da EFNARC (1996) a partir do ensaio de duplo punção, com correlações entre os parâmetros de ensaios e deslocamento.

Por último, as pesquisas mais recentes buscam a melhor relação do EDP com ensaios de flexão por três pontos (EN 14651), traçando relações geométricas entre o TCO do ensaio de duplo punção e a abertura da fissura principal do prisma. Esse tipo de estudo e metodologia busca a máxima aproximação do EDP com os métodos de dimensionamento de CRF do *fib*, que envolve abertura de fissura do elemento como parâmetro base (CARMONA; MOLINS; AGUADO, 2018). As correlações do trabalho citado possibilitaram concluir ser possível realizar controle sistemático de concreto projetado a partir de resultados do EDP.

2.2 INCERTEZA NOS RESULTADOS MECÂNICOS DO CRF

Todo resultado de algum tipo de medição necessita de alguma indicação quantitativa da qualidade do resultado, de forma a avaliar a confiabilidade do que se obteve (INMETRO, 2003). A definição de incerteza segundo o Guia para Expressão da Incerteza de Medição é: “parâmetro, associado ao resultado de uma medição, que caracteriza a dispersão dos valores que podem ser razoavelmente atribuídos ao mensurando” (INMETRO, 2003, p.12).

É historicamente sabido que ensaios mecânicos de CRF, mesmo que dentro de laboratórios em ambientes controlados, podem mostrar variações altas de resultados (MORGAN; MINDESS; CHEN, 1995; CAVALARO e AGUADO, 2015). Segundo Cavalaro (2015), o coeficiente de variação da resposta residual em ensaios prismáticos usualmente ultrapassa 20%. No caso do EDP, segundo Molins (2008) e Cavalaro (2014), a dispersão de resultados é menor e o CV médio é de 13%. Nesses casos, essa dispersão natural dos resultados é tratada como uma incerteza padrão, já que se utiliza o desvio padrão dos resultados para avaliar essa dúvida. Ou seja, a incerteza reflete a falta de conhecimento exato do resultado. Os históricos de ensaios mecânicos de CRF mostram que mesmo em diferentes metodologias para avaliação da resposta residual do CRF, existe a zona de incerteza padrão ao longo de toda

curva do respectivo ensaio. Tanto em flexão de prismas, punção de placas ou mais recentemente, no ensaio de duplo puncionamento, essas zonas se repetem, mostrando que a avaliação e conclusões acerca de uma amostra de corpos de prova podem não ser diretas e intuitivas. A Figura 2.14 exemplifica esse fato, em que é possível observar a zona de incerteza padrão em ensaios de prisma (2.14a), ensaios de duplo puncionamento (2.14b), e ensaios de puncionamento em placa (2.14c).

Figura 2.14 - Zonas de incerteza padrão nos resultados de resistência residual do CRF (SALVADOR, 2013; MONTE, 2015; ALFERES, 2016)

Segundo Cavalaro e Aguado (2015), essa incerteza (ou dispersão) nos resultados mecânicos do CRF possui três fontes, sendo a metodologia de ensaio, moldagem dos corpos de prova e variação intrínseca no ensaio; com suas respectivas variáveis que as controlam (Figura 2.15). Isso mostra que mesmo dentro de laboratórios e ambientes controlados, os resultados podem variar muito, já que a própria variação intrínseca de resultados mecânicos em um ensaio de CRF é uma fonte que não se controla. Isto ocorre mesmo considerando as fibras homogeneamente distribuídas no material. Deve-se levar em conta, como indicado na Figura 2.15, que variações na condição de produção do CRF, tais como falhas de homogeneização na mistura, irão impactar na variabilidade do ensaio. Dessa forma, os métodos de ensaio utilizados para o controle do material também devem ter a capacidade de verificar se houve falha de homogeneização do CRF de modo a servir

como meio de controle adequado da sua qualidade para aplicação estrutural. No entanto, quanto menor for a variabilidade associada ao método de ensaio, maior será o grau de confiança na caracterização do material e, inclusive, garantir a certeza de que falhas de homogeneização não ocorreram. Portanto, a avaliação da variabilidade associada ao método de ensaio e seu impacto na repetibilidade e reprodutibilidade do mesmo são essenciais.

Figura 2.15 - Fontes de variação do CRF (CAVALARO; AGUADO, 2015)

2.2.1 Erro de ensaio

Tradicionalmente, o erro é visto como tendo duas componentes: o erro aleatório e o erro sistemático. O primeiro está ligado a variações temporais, estocásticas ou imprevisíveis. É impossível de compensar um erro aleatório, mas sua influência é diminuída quando se aumenta o número de observações ou tamanho de amostra. O segundo tipo de erro decorre de problemas persistentes, normalmente mais fáceis de serem descobertos, podendo ser compensados caso seja significativo para a exatidão requerida (INMETRO, 2003).

Os erros em medições de propriedades dos materiais podem possuir diversas fontes, sendo o próprio material considerado como uma delas. Os fatores de influência para os erros que devem ser considerados em programas experimentais são (FENG, 2015; ISO, 1994):

- 1) Heterogeneidade do material;
- 2) Operador;
- 3) Equipamento usado;
- 4) Calibração do equipamento;
- 5) Ambiente (temperatura, umidade, etc.);
- 6) Tempo entre as medições;

7) Próprio procedimento de ensaio

Erros existem em todo tipo de medição, o que torna a exatidão e a precisão de resultados experimentais condições importantes de estudo. Ilustrado pela Figura 2.16, os resultados a partir de um teste podem ter alta exatidão e alta precisão (a), baixa exatidão e alta precisão (b), alta exatidão e baixa precisão (c) e baixa precisão e baixa exatidão (d). Normalmente, a exatidão está associada à média dos resultados enquanto que a precisão é expressa em função do desvio padrão.

Figura 2.16 - Resultados possíveis com (a) alta exatidão e alta precisão, (b) baixa exatidão e alta precisão, (c) alta exatidão e baixa precisão e (d) baixa exatidão e baixa precisão

Como a resposta do concreto reforçado com fibra depende muito da interação do tipo de matriz cimentícia com a fibra utilizada (BENTUR e MINDESS, 2007; FIGUEIREDO, 2011; MORGAN; MINDESS; CHEN, 1995), a exatidão de um resultado mecânico de CRF é apenas estimada, a menos que haja um valor de referência amplamente aceito. Assim a forma de avaliar a exatidão é através da obtenção de mais de um conjunto de resultados, ou programas interlaboratorial do ensaio em estudo, para então comparação das respostas (CHUI; BISPO; IAMASHITA, 2004). Já a precisão é mais facilmente estudada, visto que pode ser analisada pelo próprio grupo de resultados obtidos na campanha experimental.

2.2.2 Repetibilidade e reprodutibilidade do CRF

Como os ensaios mecânicos para avaliação do comportamento pós-fissuração do CRF mostram zonas de incerteza acentuadas, dificultando muitas vezes concluir sobre a exatidão e precisão dos resultados, estudos estatísticos de repetição e reprodução dos resultados são pertinentes para dar credibilidade ao método. A aleatoriedade das fibras na mistura do concreto faz com que diferentes teores sejam incorporados em corpos de prova provenientes de um mesmo volume de mistura de

concreto, acarretando então em diferenças significativas de resultados entre exemplares de uma mesma série de moldagem (BANTHIA e DUBEY, 1999; BENTUR e MINDESS, 2007; CAVALARO e AGUADO, 2015 FIGUEIREDO, 2011; SALVADOR, 2013).

A norma americana ASTM E691 *Standard Practice for Conducting an Interlaboratory Study to Determine the Precision of a Test Method* (ASTM, 2016) traz definições claras de repetibilidade e reprodutibilidade de resultados, independente do teste que for ser executado.

- Repetibilidade: é a capacidade de se repetir um resultado em mesmas amostras, ensaiadas no mesmo local, com mesmos equipamentos e mesmo operador;
- Reprodutibilidade: é a capacidade de se reproduzir um resultado em mesmas amostras, ensaiadas em locais diferentes, com equipamentos diferentes e operadores diferentes.

Em programas interlaboratoriais, é importante medir a exatidão e precisão de resultados. Dessa forma, é possível concluir sobre a consistência dos resultados dentro de um laboratório, e se eles se os mesmos se reproduziram quando variado o local de ensaio (ASTM E691, 2016; FENG et al., 2015). Essa metodologia de análise é frequentemente vista na engenharia civil, com diversas pesquisas se utilizando de ferramentas como análise de variância (ANOVA) e a orientações da ASTM E691 como ferramentas para avaliar ensaios e programas interlaboratoriais (GUDIMETTLA; TANESI; ARDANI, 2015; SLEIMAN et al., 2015; MOHAMMADI, 2017; TANYILDIZI e SAHIN, 2017; WELDEGIORGIS e TAREFDER, 2014).

Os conceitos de reprodução de resultados são importantes campos de estudo a fim de propor um novo método de ensaio, principalmente se a função desse método for servir de controle sistemático de material em obra de engenharia civil. Trabalhos anteriores já mostraram a dificuldade de se conseguir reprodutibilidade dos ensaios de avaliação do CRF (GUIMARÃES et. al., 2002). Este estudo mostrou que o ensaio de determinação da tenacidade através do tradicional método JSCE SF4 (JSCE, 1984), realizado com o mesmo concreto em quatro laboratórios distintos demonstrou-se problemático em termos de reprodutibilidade. Foi observada uma grande dispersão dos resultados provenientes de quatro laboratórios objeto da análise. Desta forma, por ser um ensaio mais complexo, o ensaio de tenacidade à flexão necessita de maiores

cuidados e estudos, além de pessoas qualificadas para conduzi-lo. Quando isto não ocorre, podem ser observados resultados inconclusivos e sem consistência, como os representados na Figura 2.17.

Figura 2.17 - Exemplos de resultados inconclusivos, sem qualquer reprodutibilidade, obtidos com ensaios de prisma (GUIMARÃES e FIGUEIREDO, 2002)

Visto que o EDP busca propor um ensaio mais simples que as avaliações mecânicas do CRF por prismas ou placas, objetivando principalmente controle tecnológico, as avaliações de repetibilidade e reprodutibilidade são fundamentais. Utilizando tanto um traço concreto quanto dosagem de fibra de aço longa considerados padrões no mercado Brasileiro, já foi possível mostrar que o EDP é repetível, ensaiando amostras produzidas em um mesmo laboratório em períodos diferentes (NOGUEIRA et al, 2017). Ou seja, a pura variação intrínseca do CRF na metodologia do EDP, para os materiais usados na pesquisa, é controlada, podendo obter repetição de médias e variações das medições do ensaio.

Outro estudo que evidencia a possível reprodução de resultados mecânicos utilizando o EDP é o trabalho de Pereira (2017). Nessa pesquisa, foi proposto um programa interlaboratorial do EDP, e os resultados médios de carga por deslocamento vertical foram plotados sobrepostos. Assim, verificou-se indícios de reprodutibilidade dos resultados, com as curvas se aproximando uma das outras. Na Figura 2.18, as curvas de diferentes cores representam a curva média de cada laboratório, para teores de fibra e matrizes de concreto diferentes. No entanto, no estudo de Pereira (2017), não foram considerados pontos essenciais para o estudo de reprodutibilidade como a avaliação do tamanho mínimo de uma amostra que garanta representatividade de médias e variâncias dos resultados, bem como avaliação da quantidade mínima de laboratórios participantes de um programa interlaboratorial com base normativa.

Figura 2.18 – Curvas médias do EDP sobrepostas de dois laboratórios independentes (PEREIRA, 2017)

3 PLANEJAMENTO GERAL DO PROGRAMA EXPERIMENTAL

De forma a conduzir um planejamento experimental adequado, principalmente para avaliação da reprodutibilidade, onde existe a variação dos locais e máquinas de ensaio, foi necessário previamente parametrizar as condições de variabilidade dos resultados. Nesse sentido, foi decidido conduzir um estudo interno, utilizando apenas um único laboratório, comparando resultados do EDP de três diferentes séries de moldagens. Com esse estudo preliminar, foi possível verificar o nível da variabilidade da resposta do ensaio, verificar condições de repetibilidade do EDP e, simultaneamente, quantificar o mínimo número de corpos de prova necessário para condução do estudo interlaboratorial.

Dessa forma, o trabalho foi dividido em duas partes principais, a primeira focando o estudo preliminar de repetibilidade do EDP (parte 1) e a segunda o estudo do interlaboratorial (parte 2). Para ambas as partes, foi utilizado o laboratório de construção civil da USP para moldagem de todos os corpos de prova, com dois teores de uma mesma fibra de aço, 30 kg/m^3 e 55 kg/m^3 , simbolizados por T30 e T55 respectivamente. 30 kg/m^3 é um teor usual de fibra de aço em aplicações de pavimentos de concreto e 55 kg/m^3 extrapola esse teor usual, criando um segundo cenário para análise. Ambas as partes experimentais também utilizaram uma única matriz de concreto.

Na primeira parte foram produzidas três séries de corpos de prova, em datas diferentes. Essa abordagem permite avaliar a repetibilidade dos resultados, comparando médias e variâncias de carga de fissuração e residuais nas séries produzidas. Com os resultados desse estudo preliminar, foi possível quantificar o número mínimo de corpos de prova para a segunda parte, que pudesse garantir adequada representação de médias e variâncias.

Na segunda parte, foi desenvolvido um programa interlaboratorial, envolvendo seis laboratórios independentes. As amostras foram distribuídas aos laboratórios para a realização dos ensaios segundo procedimentos pré-estabelecidos do EDP. Assim, foi possível avaliar a reprodução de médias e variâncias de resultados obtidos por meio de diferentes máquinas de ensaio. Deve-se ressaltar que esta parte do estudo foi desenvolvida com capacidade de carga e frequência de aquisição de dados diferentes.

A Figura 3.1 resume todo o processo da pesquisa. O programa experimental representa a moldagem das séries de corpos de prova na parte 1 ou a moldagem das amostras para o interlaboratorial da parte 2. A análise estatística mostra o tratamento dos dados realizado em cada parte do estudo. Em ambas as partes foram conduzidos testes de normalidade nos resultados do ensaio e realizada a verificação da repetição (parte 1) ou reprodução (parte 2) de médias e variâncias por meio de análise estatística através da ANOVA e pelo método da ASTM E691. Os itens 4 e 5 deste trabalho mostram em detalhes a metodologia da parte 1 e parte 2 respectivamente.

Figura 3.1 – Esquema do programa experimental conduzido no estudo.

4 PARTE 1: ESTUDO PRELIMINAR (ANÁLISE DE REPETIBILIDADE)

4.1 MATERIAIS

Como dito anteriormente, todo o concreto foi produzido no laboratório de construção civil da Escola Politécnica da USP São Paulo. Para que o concreto utilizado na pesquisa pudesse se aproximar de um material empregado na prática de engenharia do Brasil, tanto o traço de concreto quanto os materiais foram gentilmente doados pela empresa Estrutural Concretos, da unidade de Perus-SP. Segundo a própria empresa, o traço fornecido é utilizado para aplicações de CRF em pisos industriais e radiers na região de São Paulo. A Tabela 4.1 resume os quantitativos do traço que foi utilizado para produção dos corpos de prova.

Tabela 4.1 – Traço do concreto utilizado para moldagem dos corpos de prova

Materiais	Quantidade (kg/m ³)	Tipo
Cimento	380	CPII-E-40
Areia Média	447	Quartzito
Areia Grossa	239	Areia de rio
Brita 1	1061	Granito
Água	192	Potável
Superplastificante	1.9	Policarboxilato
Fibra	30/55	Aço 80/60

A resistência característica à compressão (f_{ck}) divulgado pela concreteira foi de 35 MPa e resistência média (f_{cm}) de 40 MPa, ambas aos 28 dias. Tanto as análises granulométricas fornecidas pela empresa como a carta de qualidade do cimento se encontram no Anexo I deste trabalho.

Segundo a classificação da NBR 15530/2007, a fibra de aço utilizada no programa é do tipo A-I (tipo A - com ancoragem nas extremidades; classe I – arame trefilado à frio), diâmetro de 0,75 mm, comprimento de 60 mm e fator de forma 80. A Figura 4.1 mostra a fibra utilizada.

Figura 4.1 - Fibra de aço 80/60 com ancoragem na extremidade utilizada no trabalho
Disponível em: <http://www.belgobekaert.com.br/Produtos/Documents/Catalogo-Dramix.pdf>. Acesso em: 24 janeiro 2019.

4.2 PROCEDIMENTOS DE MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA

Para a primeira parte do estudo, foi utilizada uma betoneira de capacidade de 120 litros, considerada como um sistema de baixa energia de mistura. A mistura do concreto e moldagens dos corpos de prova seguiu rigorosamente a mesma metodologia em todas as betonadas de concreto produzidas. Para homogeneização do concreto, manteve-se sempre a ordem de preparação da betoneira e adição de materiais:

- a) Brita 1;
- b) Areia grossa;
- c) Areia média;
- d) Cimento;
- e) 1/3 da quantidade total de água do traço.

Após uma homogeneização inicial desse material seco, com duração máxima de 2 minutos em giro na betoneira, foram adicionados:

- f) Restante da água;
- g) Fibras (lançamento em quantidades pequenas e constantes);
- h) Aditivo superplastificante.

O tempo mínimo de mistura de todos os materiais na betoneira foi estabelecido em 10 minutos. Após esse período, foi medido o abatimento através da NBR NM 67 (ABNT, 1998). O uso de 0,5% sobre o peso de cimento de aditivo superplastificante foi necessário para que tanto o T30 e o T55 pudessem alcançar o abatimento de 100 ± 20 mm sem alterar a relação água cimento das misturas. A Figura 4.2 mostra a consistência do T30 e T55 após adição do superplastificante.

Figura 4.2 – Consistência medida para o traço T30 (a) e o traço T55 (b)

No teor T55 as fibras apresentaram dificuldade de homogeneização no concreto fresco, especialmente na série 1 de moldagem, gerando aglomerados de fibra (Figura 4.3). Mesmo nesse cenário, essa série foi mantida no estudo visando avaliar os efeitos de uma possível mistura prejudicada do concreto com as fibras. Dessa forma, criou-se um cenário onde as condições de variabilidade e, conseqüentemente a dispersão de resultados, seriam avaliadas em condições críticas.

Figura 4.3 – Fibras aglomeradas no T55 em betoneira de baixa energia de rotação

Para cada série e teor, foram moldados três cilindros com diâmetro de 150 mm e altura de 300 mm destinados ao EDP. Também foram moldados dois cilindros de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura para determinação da resistência à compressão pela NBR 5739 (ABNT, 2007). O ensaio de compressão simples da NBR 5739 é um procedimento regular para controle da qualidade do CRF em projetos de engenharia, objetivando controle da matriz do concreto. Para adensamento do concreto nas formas metálicas, foi utilizada mesa vibratória, compactando o concreto

em duas camadas nos cilindros maiores e apenas em uma camada nos cilindros menores.

Após as primeiras 24 horas, os corpos de prova foram desmoldados e postos em câmara úmida, com temperatura de $23 \pm 2^\circ\text{C}$. Durante a cura, depois de decorrido tempo de mínimo de 14 dias, os corpos de prova para EDP foram retirados da câmara úmida e utilizada serra estacionária para corte na metade da altura de cada corpo de prova (Figura 4.4a), conforme recomenda da norma do ensaio (AENOR, 2010). Depois de serrados ao meio, os corpos de prova foram identificados como sendo “A” a metade superior do cilindro e “B” a metade inferior (Figura 4.4b), devolvendo então todos à câmara úmida. Os corpos de prova, tanto para o EDP como para controle da matriz, foram rompidos com 21 dias de idade. Cabe ressaltar que apenas os corpos de prova de 10x20 cm, usados no ensaio de compressão, tiveram as superfícies retificadas com máquina. Nenhuma técnica de retificação foi aplicada nos corpos de prova do EDP, já que a norma base AENOR UNE 83515 pouco aborda sobre o assunto.

Figura 4.4 – Serra estacionária para corte dos corpos de prova (a); detalhe dos corpos de prova cortados e identificados (b)

A Tabela 4.2 resume o programa experimental produzido na parte 1 da pesquisa.

Tabela 4.2 – Programa experimental para parte 1 do estudo

Série	Identificação	Dosagens de fibra (kg/m ³)	Nº de corpos de prova	Moldagem	Idade de ensaio
1	T30	30	6	11/10/2016	21 dias
	T55	55	6		
2	T30	30	6	19/10/2016	21 dias
	T55	55	6		
3	T30	30	6	26/01/2017	21 dias
	T55	55	6		

4.3 ENSAIO DE DUPLO PUNCIONAMENTO

O procedimento normatizado pela UNE 83515 (AENOR, 2010) recomenda o uso de um extensômetro colocado na metade da altura, cobrindo todo o perímetro do corpo de prova e medindo a abertura de perímetro (TCOD). Para esse estudo, foi utilizado uma simplificação do método, onde a aquisição de dados é feita pelo deslocamento vertical do atuador da prensa, ao invés do TCOD (PUJADAS et al., 2013). Várias outras pesquisas se utilizam dessa simplificação para determinar carga de fissuração e cargas residuais do CRF (CARMONA et al., 2013; GALEOTE et al., 2017; GALO BARDES; FIGUEIREDO, 2015; MONTE et al., 2016; PUJADAS et al., 2013).

De acordo com a norma AENOR UNE 83515, o ensaio consiste no duplo puncionamento de cilindros de diâmetro igual à altura, sendo todos os corpos de prova deste programa com 15 cm. O puncionamento é realizado através de dois cilindros metálicos, com diâmetro de 1/4 do diâmetro do corpo de prova e altura de 1/5 da altura do corpo de prova. Ou seja, para este trabalho, eles possuíam diâmetro 3,75 cm e altura de 3,0 cm respectivamente. O material utilizado nos cilindros foi o aço temperado de dureza superior a 55 HRC, determinada através da NBR NM ISO 6508-1 (ABNT, 2008). Essa definição de dureza é recomendação da própria norma UNE 83515 do EDP (AENOR, 2010).

Para centralização correta dos cilindros de aço nas duas faces do corpo de prova de concreto, foi produzido um gabarito simples de papelão, com mesmo diâmetro de 15 cm do corpo de prova e furado no centro com o mesmo diâmetro do cilindro de punção. A Figura 4.5a mostra a configuração do ensaio, enquanto que a Figura 4.5b apresenta um corpo de prova momentos antes de iniciar o puncionamento.

Segundo a norma espanhola, o deslocamento vertical do pistão da máquina de ensaio deve ser fixado a uma velocidade constante de $0,5 \pm 0,05$ mm/min. Para o programa experimental o deslocamento vertical máximo foi fixado em 7,0 mm, o que levou a aproximadamente 14 minutos de ensaio por corpo de prova. O movimento de descida do pistão e a transferência da carga dos cilindros metálicos para o concreto geram tensões internas, que aumentam com o incremento da carga, fissurando o concreto quando a resistência à tração é superada. Após esse momento, as fibras atuam como ponte de transferência de tensões, proporcionando resistências residuais (NATARAJA; DHANG; GUPTA, 2000).

Figura 4.5 – Configuração do EDP (a); posicionamento do corpo de prova antes do início do puncionamento (b)

Assim, foi utilizada uma prensa da marca Shimadzu, de capacidade de carga de 2000 kN, frequência de aquisição de dados de 20 Hz, operando em *open loop* e precisão da célula de carga de 0,0001 N de força aplicada.

Com os dados de carga e deslocamento vertical da máquina, exportados em formato de tabelas, é possível traçar um gráfico de carga em função do deslocamento vertical (Gráfico 4.1a). Cinco pontos foram definidos como referência de análise das curvas; avaliação similar à referência proposta pelo ensaio de flexão em três pontos da EN 14651:2007. Esses pontos representam a carga de fissuração da matriz cimentícia (P_f) e as cargas residuais para os deslocamentos verticais de 0,5; 1,5; 2,5; e 3,5 mm ($P_{0,5}$; $P_{1,5}$; $P_{2,5}$; e $P_{3,5}$ respectivamente).

Após a obtenção das curvas pelos dados da prensa, o eixo y foi deslocado para coincidir com o P_f e o valor zero do eixo x. Assim, esse ponto zero foi considerado

como referência para os deslocamentos verticais, como mostra o Gráfico 4.1b, com P_f na origem do eixo das abcissas. Cabe ressaltar que quando existe o comportamento de *softening* na pós-fissuração, o P_f coincide com a maior carga de ensaio. Nos teores elevados de fibra de aço, como T55, o comportamento de *hardening* no EDP pode ocorrer (GALEOTE et al., 2017; MALATESTA et al., 2012) e o P_f deve ser identificado como o primeiro pico de carga, e não o maior valor absoluto de carga do ensaio (Gráfico 4.1c). Nesses casos do T55, é possível que a obtenção do valor da carga P_f fique dificultada pela subjetividade de onde realmente ocorra. Para este trabalho adotou-se o pico local de carga, com posterior mudança de inclinação do gráfico, caracterizando rompimento da matriz cimentícia e mudança de módulo de elasticidade do compósito. Aplicação de zoom nos gráficos durante plotagem contribui para essas identificações.

Gráfico 4.1 – Curva de carga por deslocamento obtida com os dados da prensa (a); curva final com P_f deslocado para o zero do eixo x com *softening* (b) e *hardening* (c).

4.4 METODOLOGIA DE ANÁLISE DOS RESULTADOS

A Figura 4.6 resume as etapas de análise que foram empregadas nos resultados obtidos com o EDP. Iniciou-se as análises plotando as curvas de carga por deslocamento resultante das três séries no mesmo eixo, separando um gráfico para T30 e outro para T55. Dessa forma, já é possível uma primeira análise visual dos

resultados, verificando se existiu uma tendência das curvas de se sobreporem. Junto com os gráficos, são analisados os resultados numéricos de carga de fissuração e residual.

Posteriormente a essas primeiras análises, foram conduzidos os testes estatísticos de normalidade, análise de variância (ANOVA), ASTM E691 (2016) e cálculo do número n . Esses métodos são devidamente detalhados no item 4.4.2.

Figura 4.6 - Etapas de análise de repetibilidade

4.4.1 Modelo das análises estatísticas

A metodologia de análise estatística dos resultados seguiu uma sequência pré-determinada, com a análise de normalidade, ANOVA, ASTM E691 e cálculo do n . O raciocínio que guiou esta etapa foi utilizar ferramentas estatísticas para comparar os cinco pontos do ensaio (P_f ; $P_{0,5}$; $P_{1,5}$; $P_{2,5}$; $P_{3,5}$) entre as três séries.

Entende-se que mesmo sendo ferramentas estatísticas de origens diferentes, o emprego delas é válido, visto que o objetivo não é comparar uma ferramenta com a outra e sim utiliza-las concomitantemente para compreender o EDP da melhor forma. Assim pode-se concluir de uma forma mais robusta a capacidade de repetição dos resultados. As análises estatísticas foram realizadas na seguinte ordem:

a) Análise de normalidade dos resultados

Muitos procedimentos estatísticos assumem que a população de resultados segue uma distribuição normal. Dessa forma, a partir dos resultados de todas as séries do ensaio de duplo punção, foram criados dois grupos: resultados de T30 e de T55. Nesses dois conjuntos de resultados, foi aplicado teste estatístico de normalidade Ryan-Joiner (similar ao teste Shapiro-Wilk), que correlaciona os dados da amostra com dados esperados em uma distribuição normal. O teste Ryan-Joiner foi selecionado pois está disponível na ferramenta estatística Minitab®, utilizada nas análises, além de ser considerado, segundo o próprio software, mais rigoroso que o teste Kolmogorov-Smirnov, também disponível na ferramenta. A partir dos resultados do software, foram plotados gráficos mostrando como é a aderência desses grupos de resultados à uma distribuição normal.

b) Igualdade de médias (ANOVA)

A análise de variância (ANOVA) já é amplamente difundida como método estatístico de comparação de resultados. Recentemente essa ferramenta vem sendo empregada para caracterizar ensaios de CRF, ajudando a identificar as variações de resposta do compósito para diferentes fibras e traços de concreto (AKCA; CAKIR; IPEK, 2015; KWAN; RAMLI; CHEAH, 2014; MOHAN e SUMATHI, 2015; MONTE, 2015; PARK et al., 2016; ZOALFAKAR et al., 2016). Neste estudo, foi empregado o modelo linear geral da ANOVA, com nível de significância (α) de 5%.

O objetivo com essa análise é verificar se houve repetibilidade de médias dos cinco pontos do ensaio (P_f ; $P_{0,5}$; $P_{1,5}$; $P_{2,5}$; $P_{3,5}$). O parâmetro estatístico mais importante no modelo linear geral da ANOVA é o valor p . Quando atribuído a uma determinada variável, mostra se o efeito dessa variável é significativo ($p < 0,05$) ou não ($p > 0,05$). Dessa forma, foi avaliado a influência de duas variáveis em cada um dos cinco pontos: valores de *Médias* entre as séries e *Teor de Fibra* entre as séries. Também foi avaliada a interação entre essas duas variáveis (*Média*Teor de fibra*). Essa interação objetiva verificar se os valores médios das séries para cada ponto mostraram ou não um mesmo padrão de comportamento quando variado o *Teor de Fibra*.

Entende-se que esse modelo linear geral avalia os resultados de uma forma mais representativa, agrupando os teores T30 e T55 nas análises. Com isso, realiza-se uma avaliação estatística rigorosa.

c) Teste Tukey (ANOVA)

Caso algum ponto do ensaio (P_f ; $P_{0,5}$; $P_{1,5}$; $P_{2,5}$; $P_{3,5}$) não mostre repetibilidade de médias no modelo linear geral descrito anteriormente, uma análise aprofundada foi conduzida para melhor entender os resultados desse ponto em específico. Para essa análise, foi realizado um teste Tukey com nível de significância (α) de 5%, pareando as séries de um mesmo teor de fibra. Ou seja, isolando T30 e T55.

d) Igualdade de variâncias (ANOVA)

Por meio do Teste Levene, é estabelecido uma hipótese inicial (H_0) de igualdade de variâncias entre as séries para um determinado ponto do ensaio (P_f ; $P_{0,5}$; $P_{1,5}$; $P_{2,5}$; $P_{3,5}$). Se o valor de p for maior que 0,05, aceita-se H_0 e a variância entre séries pode ser considerada igual. Se p for menor que 0,05, rejeita-se H_0 . Novamente, este modelo agrupa T30 e T55, criando uma amostra mais representativa e uma análise robusta.

e) ASTM E691:16

De forma a complementar os resultados da ANOVA, foi conduzida análise estatística proposta na norma ASTM E691/2016 *Standard Practice for Conducting an Interlaboratory Study to Determine the Precision of a Test Method*. Essa norma traz sua própria metodologia de análise de resultados, realizando comparações de médias e variâncias, podendo funcionar como indicador de qualidade dos resultados obtidos. Pesquisas já realizadas mostram que a metodologia dessa norma pode servir como ferramenta de apoio dentro de estudos da dispersão e comparação de resultados (GUDIMETTLA; TANESI; ARDANI, 2015; SLEIMAN et al., 2015; WELDEGIORGIS e TAREFDER, 2015).

A metodologia de comparação consiste no cálculo de dois parâmetros adimensionais: h e k . O parâmetro h é desenvolvido a partir da média dos resultados obtidos, enquanto que o parâmetro k é desenvolvido a partir dos desvios padrão dos resultados. Esses dois valores calculados são então comparados com valores críticos

tabelados, que levam em consideração além do número de lotes e de corpos de prova, o nível de confiança dentro de uma distribuição Student para o h crítico (h_{crt}), e o nível de confiabilidade dentro de uma distribuição Fisher para o k crítico (k_{crt}). Ou seja, para se concluir positivamente sobre repetição de resultados, os valores h e k calculados devem ser menores que seus respectivos valores críticos tabelados.

A fim de facilitar o entendimento, considera-se como $x_{i,j}^k$ o resultado obtido a partir da série k , no ponto do gráfico i do EDP, na dosagem de fibra j . Sendo ainda q o número de corpos de prova dentro de uma série (6 corpos de prova para a parte 1) e p o número de séries (três para a parte 1), as equações de 4.1 até 4.5 mostram o cálculo de h (parâmetro de comparação com o h_{crt}).

$$\bar{X}_{i,j}^k = \frac{1}{q} \sum_{1}^q x_{i,j}^k \quad (\text{Equação 4.1})$$

$$\bar{\bar{X}}_{i,j} = \frac{1}{p} \sum_{1}^p \bar{X}_{i,j}^k \quad (\text{Equação 4.2})$$

$$d_{i,j}^k = \bar{X}_{i,j}^k - \bar{\bar{X}}_{i,j} \quad (\text{Equação 4.3})$$

$$S_{\bar{X}_{i,j}} = \sqrt{\sum_{1}^p \frac{d_{i,j}^k}{(p-1)}} \quad (\text{Equação 4.4})$$

$$h = \frac{d_{i,j}^k}{S_{\bar{X}_{i,j}}} \quad (\text{Equação 4.5})$$

Já o cálculo do k parte do desvio padrão e é realizado utilizando as equações de 4.6 a 4.8:

$$\sigma_{i,j}^k = \sqrt{\sum_{1}^q \frac{(X_{i,j}^k - \bar{X}_{i,j}^k)^2}{(q-1)}} \quad (\text{Equação 4.6})$$

$$S_{r_{i,j}} = \sqrt{\sum_{1}^p \frac{(s_{i,j}^k)^2}{p}} \quad (\text{Equação 4.7})$$

$$k = \frac{s}{S_{r_{i,j}}} \quad (\text{Equação 4.8})$$

Para este trabalho, foi considerado nível de significância (α) de 5%. A Tabela 4.3 apresenta os valores críticos h_{crt} e k_{crt} para a parte 1 do estudo. Os cálculos desses valores críticos, bem como suas adequações para este programa experimental, estão apresentados no apêndice I.

Tabela 4.3 – Valores de h_{crt} e k_{crt} para parte 1

Parâmetro	Parte 1 (repetibilidade)
h_{crt}	1,15
k_{crt}	1,66

f) Cálculo do número n

O número de 6 corpos de prova por teor de fibra adotado para a parte 1 do estudo foi baseado em pesquisas anteriores (MALATESTA et al, 2012; MOLINS et al, 2009). É importante ressaltar que a norma espanhola do ensaio não fixa nenhuma quantidade mínima de corpos de prova, tão pouco estabelece um desvio padrão aceitável (AENOR, 2010).

Dessa forma, a última análise estatística empregada na parte 1 foi a determinação do número n . O objetivo dessa etapa foi contribuir para o planejamento da parte 2 do estudo (interlaboratorial), calculando o número mínimo de corpos de prova para uma amostra representativa. Ainda, essa metodologia permite checar se os 6 corpos de prova adotados foram suficientes para representar adequadamente médias e variâncias obtidas na parte 1.

Para se determinar o número n , foi calculado um valor médio dos coeficientes de variação dos resultados de carga residual (CV_m), excluindo o valor de P_f . Entende-se que o P_f é governado predominantemente pela matriz cimentícia, a qual possui variabilidade e comportamento diferente da resposta residual do compósito. Para determinação do n , foi utilizada a Equação 4.9 (MORETTIN; BUSSAB, 2005).

$$n = \frac{\sigma^2 Z_y^2}{\epsilon^2} \quad (\text{Equação 4.9})$$

Na Equação 4.9, σ é o desvio padrão de cada ponto do ensaio (P_f ; $P_{0,5}$; $P_{1,5}$; $P_{2,5}$; e $P_{3,5}$), Z_y é o valor crítico encontrado na tabela de distribuição normal e igual a

1,64 (para 95% de confiabilidade). Por último, ε é o erro admitido que incide sobre a média. Esse erro é obtido multiplicando a média de um ponto do trecho residual do EDP ($P_{0,5}$; $P_{1,5}$; $P_{2,5}$; e $P_{3,5}$) pelo CV_m da parte 1 do estudo. A equação 4.9 parte do princípio que a população segue uma distribuição normal.

4.5 RESULTADOS

Inicialmente foram avaliados os resultados de ensaio de compressão. A Tabela 4.4 mostra os resultados de consistência (*slump*) e resistência à compressão para as três séries produzidas.

Tabela 4.4 – *Slump* (mm) e resistência à compressão (MPa) das três séries de CRF analisadas

Identificação	Série	<i>Slump</i> (mm)	f_{cm} (MPa)	CV (%)
T30	1	110	45,9	5,7
	2	95	42,1	3,4
	3	95	42,4	9,0
T55	1	115	45,6	3,3
	2	120	43,8	1,9
	3	100	41,8	3,2

O valor médio de resistência à compressão obtido com a parte 1 foi de 44 MPa, considerado satisfatório por ter alcançado média acima de 40 MPa em menos de 28 dias, conforme pré-estabelecido no traço de concreto. Nenhuma diferença significativa na resistência à compressão foi notada. A baixa variação dos valores desse parâmetro indica que a influência das características da matriz no comportamento do CRF foi restrita como esperado (BENTUR, MINDESS, 2007; MORGAN et al., 1995). Ainda, foi possível obter valor de *slump* de 100 ± 20 com nível controlado de aditivo superplastificante (0,5%).

4.5.1 Avaliação da repetibilidade

Todos os corpos de prova ensaiados apresentaram o padrão esperado de fissuração, sendo de duas a quatro fissuras radiais principais nas superfícies de puncionamento, que se estendem ao longo de toda a altura do corpo de prova (MALATESTA et al., 2012). A Figura 4.7 exemplifica em detalhe o padrão encontrado nos rompimentos.

Figura 4.7 – Padrão de fissuração nos corpos de prova do EDP

O Gráfico 4.2a apresenta as curvas de carga por deslocamento vertical resultado das três séries ensaiadas no T30. Primeiro, todos os resultados mostraram comportamento de *softening*, onde a carga de fissuração (P_f) é maior que qualquer outra carga medida. Além disso, pelo Gráfico 4.2a é possível notar que o P_f é obtido a partir de diferentes deslocamentos verticais, em uma faixa de valores de 1,0 mm até 2,5 mm. Essa variação no deslocamento vertical do P_f acontece devido à acomodação dos cilindros de punção na superfície do corpo de prova. Apenas um corpo de prova apresentou P_f com deslocamento vertical acima de 3,0 mm. Esse resultado é devido um agregado grão na zona de punção, o que levou a uma distribuição não homogeneia de tensões no interior do corpo de prova. Nesse caso, como a alteração ficou restrita à carga P_f , reduzindo seu valor, existiu um discreto comportamento de *hardening*. Ainda assim, os valores de carga residual não ficaram distantes do grupo de resultados.

O Gráfico 4.2b mostra as curvas de carga por deslocamento após ajustar o P_f no valor de zero do eixo x. As linhas mais grossas do gráfico indicam as curvas médias das séries 1, 2 e 3. Já as curvas dos corpos de prova tiveram as cores suavizadas. O

Gráfico 4.2b mostra que o comportamento na pós-fissuração foi similar, e as curvas médias estão praticamente sobrepostas, o que é um indicativo de repetição de médias.

Gráfico 4.2 – Curva de carga por deslocamento vertical dos corpos de prova referentes à parte 1 – T30 (a); curva ajustada com P_f deslocado para valor zero do eixo x (b)

O Gráfico 4.3a mostra as curvas de carga por deslocamento vertical resultantes das três séries testadas no T55. 50% dos corpos de prova apresentaram comportamento de *hardening*, quando a carga da resposta residual é maior que P_f . Esse tipo de comportamento no EDP já foi visto em outros estudos (MALATESTA, AGUADO, 2012; GALEOTE et al., 2017). Visualmente, a dispersão de resultados no T55 é maior que no T30 e as curvas médias estão mais separadas (Gráfico 4.3b). Claramente, ao menos um corpo de prova apresentou um padrão de comportamento diferenciado, com cargas residuais muito superiores aos demais. Mesmo assim,

nenhum resultado foi removido dos testes estatísticos de repetibilidade para garantir maior rigor nas avaliações.

Gráfico 4.3 - Curva de carga por deslocamento vertical dos corpos de prova referentes à parte 1 – T55 (a); curva ajustada com P_f deslocado para valor zero do eixo x (b)

A Tabela 4.5 mostra os resultados médios e os coeficientes de variação para carga de fissuração e residual de todas as séries. Os resultados de todos os corpos de prova estão apresentados no apêndice II.

Tabela 4.5 – Resultados médios e coeficiente de variação da parte 1 do estudo

Série	Identificação	P _f		P _{0,5}		P _{1,5}		P _{2,5}		P _{3,5}	
		Média (kN)	C.V. (%)	Média (kN)	C.V. (%)	Média (kN)	C.V. (%)	Média (kN)	C.V. (%)	Média (kN)	C.V. (%)
1	T30	104,39	14,3	72,65	11,0	52,99	21,0	41,70	20,5	35,14	20,5
	T55	112,58	8,3	112,82	23,5	93,14	43,6	74,19	50,0	58,10	46,6
2	T30	96,85	6,5	71,26	20,9	52,09	25,3	41,29	22,4	34,51	19,8
	T55	102,42	5,8	95,28	7,8	73,63	8,7	56,32	10,8	46,47	13,3
3	T30	106,71	8,0	76,12	10,1	53,69	27,0	40,20	27,0	32,60	27,4
	T55	112,08	12,7	116,50	14,6	95,35	19,1	75,05	22,7	61,88	23,5

Pela Tabela 4.5, é possível notar que a maior zona de incerteza na pós-fissuração ocorreu na dosagem de 55 kg/m³ da série 1, com CV chegando a 50%. Isso pode ser explicado pelos já mencionados aglomerados (popularmente conhecidos como “ouriços”) de fibras que foram percebidos durante a moldagem. Esta condição pode ter acarretado diferenças grandes de quantidade de fibra incorporada nos corpos de prova dessa betonada gerando uma variação de resultado que não é simplesmente associada ao método de ensaio. Esse grau de dispersão mostrou que, no presente estudo, o processo de moldagem utilizando betoneiras de menor energia de rotação teve influência na dispersão total dos resultados (CAVALARO; AGUADO, 2015; MORGAN; MINDESS; CHEN, 1995). Dessa forma, decidiu-se por complementar a análise com a realização do ensaio indutivo como descrito no item 4.5.2.

4.5.2 Ensaio indutivo

Como forma de comprovar essa hipótese de homogeneidade entre fibras e concreto prejudicada no T55 da série 1, foi conduzido um ensaio indutivo que mede a quantidade real de fibra de aço incorporada dentro de cada corpo de prova. O ensaio seguiu a metodologia publicada por Cavalaro et al. (2016) para corpos de prova cilíndricos, sendo então uma ferramenta complementar para as análises.

O Gráfico 4.4 apresenta a calibração realizada no aparelho de medição de indutância utilizando os corpos de prova de poliestireno nas quantidades de 26,42 g e 79,58 g da fibra de aço 80/60. De acordo com a reta de calibração, o valor do coeficiente angular (α) obtido foi de 0,01764, que deve ser a constante de relação entre a somatória final de indutância e o teor real de fibra.

Gráfico 4.4 – Calibração do aparelho de leitura de indutância

A Tabela 4.6 apresenta os resultados de quantidade real de fibra incorporada por corpo de prova de cada série da parte 1. A coluna CP identifica o corpo de prova, sendo “A” metade superior do cilindro inicial de 15 cm por 30 cm (antes do corte) e “B” a metade inferior. As colunas de Z a 90° apresentam os valores lidos de indutância, L_{total} mostra a soma de indutância pela Equação 2.1 e m_f a quantidade em quilogramas de fibra incorporada calculado pela Equação 2.2. A última coluna mostra o erro do teor esperado de 55 kg/m³ em relação ao teor real de fibra incorporada.

Tabela 4.6 - Quantidade real de fibra incorporada por corpo de prova para o teor T55 da parte 1 do estudo

Identificação	CP	Z (H)	0°(H)	45°(H)	90°(H)	$L_{total}(H)$	m_f (kg)	Teor real (kg/m³)	Erro em relação 55 kg/m³ (%)
T55_1	CP1-A	2,85	5,17	4,93	5,14	7,34	0,13	49,09	10,7
	CP1-B	2,71	4,80	4,77	4,30	6,58	0,12	43,63	20,6
	CP2-A	4,82	8,46	8,95	9,71	12,82	0,23	85,14	54,8
	CP2-B	3,63	5,01	6,11	6,55	8,47	0,15	56,81	1,8
	CP3-A	5,17	9,54	9,11	9,54	13,52	0,24	90,33	64,2
	CP3-B	4,70	6,90	7,54	7,42	10,60	0,19	71,85	30,1
T55_2	CP1-A	2,51	5,52	5,18	5,11	7,33	0,13	49,65	9,7
	CP1-B	2,83	5,37	5,13	4,90	7,31	0,13	47,80	13,1
	CP2-A	2,74	5,93	5,45	4,99	7,62	0,13	51,96	5,5
	CP2-B	2,12	5,61	4,89	5,14	7,18	0,13	47,57	13,5
	CP3-A	4,16	8,27	9,17	8,74	11,81	0,21	76,89	39,8
	CP3-B	2,10	5,12	5,22	5,24	6,95	0,12	46,78	14,9
T55_3	CP1-A	3,18	6,27	5,66	4,97	8,04	0,14	52,86	3,9
	CP1-B	5,42	7,75	7,07	6,95	11,21	0,20	74,58	35,6
	CP2-A	3,25	6,48	5,72	6,35	8,97	0,16	59,85	4,8
	CP2-B	3,14	8,31	7,74	7,03	10,31	0,18	69,30	26,0
	CP3-A	3,01	6,53	6,45	7,07	9,27	0,16	60,09	9,2
	CP3-B	3,08	5,03	4,87	5,46	7,56	0,13	50,96	7,3

Os resultados da Tabela 4.6 mostram que, de fato, a série 1 apresentou menor homogeneidade com relação as demais séries. Destacam-se CP3-A com 90,3 kg/m³ de fibra e o CP2-A com 85,1 kg/m³ de fibra. Esses resultados são exatamente as curvas do Gráfico 4.3 que apresentaram os maiores valores em kN de resposta residual. O Gráfico 4.5 identifica cada corpo de prova mencionado com a curva de carga por deslocamento no trecho residual.

Gráfico 4.5 - Identificação dos corpos de prova com excesso de fibra incorporada da série 1 na curva de carga por deslocamento vertical

Os resultados do ensaio indutivo, utilizado como controle da qualidade da homogeneidade de fibras no concreto, mostrou que ao mínimo três corpos de prova da série 1 apresentaram valores muito superiores à 55 kg/m³ de fibra. Comprova-se a hipóteses de má homogeneização percebida durante a moldagem dos corpos de prova e plotagem dos gráficos da série 1. Nota-se também a alta sensibilidade do ensaio à variação no teor de fibra, com comportamentos acentuados de *hardenning*. Como o trabalho objetiva verificar a repetibilidade e reprodutibilidade dos resultados do EDP, empregando materiais e métodos possíveis de se encontrar em laboratórios no Brasil, esses corpos de prova não foram excluídos das análises estatísticas de repetibilidade dessa parte 1 do estudo, visando maior rigor nos testes.

4.5.3 Análise estatística dos resultados

a) Teste de normalidade

Como descrito no item 4.4.2, a primeira análise estatística foi a verificação da aderência dos resultados à uma distribuição normal. Para isso, foi conduzido teste de normalidade Ryan-Joiner nos resultados da parte 1. A Tabela 4.7 apresenta o resumo dos resultados. As linhas de teor “T30” e “T55” mostram os resultados de teste normal utilizando todos os resultados obtidos. De forma a explorar diferentes cenários e agregar nas análises, foi também excluído o maior resultado da série 1 do teor T55 (CP3A), que apresentou comportamento diferenciado, com teor excessivo de fibra de aço incorporado provado pelo ensaio indutivo. Esse cenário gerou a terceira linha da Tabela 4.7, identificada como T55*.

Tabela 4.7 - Teste de normalidade Ryan-Joiner para parte 1

Identificação	P_f	$P_{0,5}$	$P_{1,5}$	$P_{2,5}$	$P_{3,5}$
T30	>0,1	>0,1	>0,1	>0,1	>0,1
T55	>0,1	>0,1	<0,01	<0,01	0,022
T55* (Sem CP3A)	>0,1	>0,1	>0,1	>0,1	>0,1

Pela tabela 4.7, novamente, $P_{1,5}$, $P_{2,5}$ e $P_{3,5}$ na dosagem T55 apresentaram comportamento diferenciado dos demais, não se adequando à uma distribuição normal. Excluindo o corpo de prova com incorporação excessiva de fibra (linha T55*), os resultados voltam a se adequar a uma distribuição normal. O Gráfico 4.6 ilustra essas três situações analisadas com gráficos de aderência à uma distribuição normal para T30 com $p > 0,1$ (Gráfico 4.6a), para T55 com $p < 0,1$ (Gráfico 4.6b) e para T55* novamente com $p > 0,1$ (Gráfico 4.6c). Nota-se que uma distribuição mais homogênea das fibras entre os corpos de prova favorece a adequação a uma distribuição normal dos resultados do EDP.

Gráfico 4.6 – Aderência dos resultados a uma distribuição normal dos pontos $P_{1,5}$; $P_{2,5}$ e $P_{3,5}$ para T30 (a); T55 (b) e T55* (c)

b) Igualdade de médias (ANOVA)

A Tabela 4.8 apresenta os resultados de igualdade de médias da ANOVA por modelo linear geral com α de 0,05.

Tabela 4.8 - Resultados de comparação de médias para a repetibilidade

Variável		P_f	$P_{0,5}$	$P_{1,5}$	$P_{2,5}$	$P_{3,5}$
Média*Teor de Fibra	Valor de p	0,94	0,26	0,41	0,34	0,30
	Significativo	Não	Não	Não	Não	Não
Teor de Fibra	Valor de p	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00
	Significativo	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Média (entre as séries)	Valor de p	0,03	0,08	0,33	0,37	0,40
	Significativo	Sim	Não	Não	Não	Não

Pela Tabela 4.8, nota-se que a interação entre as duas variáveis (Média das séries*Teor de fibra) não foi significativo no processo ($p > 0,05$). Isso significa que a alteração no teor de fibra influencia a média das séries sempre no mesmo padrão, o que é esperado para um ensaio mecânico de caracterização do CRF. A variável *Teor de Fibra* apresentou resultados de $p < 0,05$ para todos os pontos. Portanto, o *Teor de Fibra* é significativo no processo e o EDP é totalmente sensível a alteração de dosagem da fibra, conclusão também esperada (CARMONA et al., 2018; GALEOTE et al., 2017; GALO BARDES; FIGUEIREDO, 2015; MALATESTA et al., 2012; MOLINS et al., 2009; MONTE et al., 2016). Por último, na comparação de *Média* entre as três séries, todos os pontos de carga residual apresentaram valores de p acima de 0,05, indicando que diferenças de médias entre as séries não é significativo. Em outras palavras, foi alcançada repetibilidade de valores médios de pós-fissuração. O ponto P_f foi o único que não mostrou repetição de valores médios nesse modelo.

c) Teste Tukey (ANOVA)

Como o ponto P_f foi o único que não mostrou reprodutibilidade de médias, foi realizada uma análise aprofundada desse ponto do ensaio visando melhor entender seu comportamento. A Tabela 4.9 apresenta uma comparação pareada de Tukey com 95% de confiabilidade para a carga de fissuração (P_f).

Tabela 4.9 – Comparação de Tukey para P_f na parte 1 do estudo

Identificação	Série	N° de corpos de prova	Média de P_f (kN)	Agrupamento*
T30	1	6	106,71	A-B
	2	6	104,39	B
	3	6	96,85	A-B
T55	1	6	115,42	A
	2	6	112,58	A-B
	3	6	102,95	A

*Valores médios de P_f que não compartilham a letra A ou B são significativamente diferentes

Dos resultados da Tabela 4.9, é possível afirmar que, com 95% de confiança, todos os valores de T30 podem ser agrupados em *B*, enquanto que todos os resultados de T55 podem ser agrupados em *A*. Assim, mesmo que utilizando a mesma matriz de concreto, P_f só é repetível no mesmo teor de fibra. Ou seja, conclui-se que é possível controlar P_f se o grupo de resultados utilizar o mesmo teor de fibra.

d) Igualdade de variâncias (ANOVA)

A Tabela 4.10 apresenta os resultados de comparação de variâncias pelo teste de Levene, também com nível de significância (α) de 0,05. A hipótese inicial (H_0) do teste é de variâncias iguais entre as três séries.

Tabela 4.10 - Resultados de comparação de variâncias para repetibilidade

Ponto	Hipótese nula (H_0)	Valor de p	Resultado
P_f	Variâncias iguais	0,96	Aceita H_0
$P_{0,5}$		0,08	Aceita H_0
$P_{1,5}$		0,047	Rejeita H_0
$P_{2,5}$		0,025	Rejeita H_0
$P_{3,5}$		0,10	Aceita H_0

Usando o teste de Levene, as variâncias não puderam ser consideradas iguais em todos os pontos do ensaio. Entre os cinco pontos de análise, apenas P_f , $P_{0,5}$ e $P_{3,5}$ apresentaram repetição de variâncias, com valor de p maior que 0,05. O alto CV da série 1, com incorporação excessiva de fibra nos corpos de prova comprovado pelo ensaio indutivo, afetou as análises, comprometendo a repetibilidade de variâncias das cargas residuais.

e) **ASTM E691:16**

Conforme metodologia apresentada no item 4.4.2, a norma trata os resultados comparando as médias (parâmetro h) e os desvios padrão (parâmetro k). O Gráfico 4.7a apresenta os resultados calculados de h (Eq. 4.1 a Eq. 4.5) para cada ponto do ensaio, sendo as retas vermelhas correspondentes ao valor de 1,15, referente ao h_{crt} (Apêndice I). Já o Gráfico 4.7b apresenta os resultados calculados de k (Eq. 4.6 a Eq. 4.8) para cada ponto, sendo a reta vermelha o valor correspondente a 1,37 referente ao k_{crt} (Apêndice I).

Gráfico 4.7 - Resultados de h (a); e k (b) para repetibilidade

Os resultados do Gráfico 4.7a mostram que todos os valores de h permaneceram entre as duas retas que marcam o valor crítico. Ou seja, houve total repetição de médias entre as três séries de ensaio; mesma conclusão obtida na

ANOVA. No Gráfico 4.7b, os pontos referentes à pós-fissuração da série 1/T55 não mostraram repetição com as demais séries, resultando em valores de k acima do crítico. Esse grupo de resultados é composto pelos corpos de prova que obtiverem teor excessivo de fibra incorporada, e que também não demonstraram repetição de variâncias na ANOVA e prejudicaram a aderência à uma distribuição normal.

f) Cálculo do número n

A última ferramenta estatística utilizada objetiva determinar o número n , afim de planejar a parte 2 do trabalho e estabelecer um número mínimo de corpos de prova que represente médias e variâncias. O valor de CV_m para aparte 1 do estudo, conforme metodologia apresentada no item 4.4.2, foi de 22%. A Tabela 4.11 resume os resultados encontrados com a aplicação da Eq. 4.11 e o CV_m obtido.

Tabela 4.11 – Resultados de n baseado em CV_m

Identificação	Série	$P_{0,5}$	$P_{1,5}$	$P_{2,5}$	$P_{3,5}$
T30	1	0.6	2.2	2.2	2.3
	2	2.1	3.1	2.6	2.0
	3	0.6	3.8	3.6	3.5
T55	1	3.1	11.3	15.2	12.3
	2	0.3	0.3	0.6	0.7
	3	1.3	2.3	2.9	3.5

De acordo com a Tabela 4.11, apenas os pontos $P_{1,5}$, $P_{2,5}$ e $P_{3,5}$ da série 1 e dosagem T55 apresentaram valor acima de 6, sendo exatamente os pontos que apresentaram alta dispersão por falta de homogeneidade nos corpos de prova. Todos os demais pontos nas séries e dosagens apresentaram n menor que 4. Entende-se que caso mais pontos de outras séries no teor 55 kg/m³ também apresentassem valores de n acima de 6, seria uma indicação da perda total de precisão do EDP nessa dosagem. Cabe mencionar que o valor de 22% do CV_m é superior aos valores obtidos por outros programas experimentais, com valores abaixo de 20%. Nesse caso, pode-se considerar que esse número mínimo de corpos de prova foi obtido em condições críticas de ensaio (CARMONA; AGUADO; MOLINS, 2013; MALATESTA; AGUADO; MOLINS, 2012; MOLINS; AGUADO; SALUDES, 2009). Dessa forma estabeleceu-se como sendo 4 o número de corpos de prova em cada amostra na segunda parte da pesquisa.

4.6 CONCLUSÕES DA PARTE 1

Resumindo todas as análises realizadas na parte 1 do estudo, mesmo com o EDP testado em situações crítica, foi possível repetir valores médios de carga residual. Assim, o ensaio se mostrou robusto para identificar corpos de prova que apresentem diferenças elevadas na quantidade de fibra incorporada. Ou seja, existe uma boa confiabilidade na determinação das cargas resistentes residuais médias. Já para os valores médios e variâncias associadas ao P_r , também é totalmente possível obter repetição dos resultados, porém deve-se considerar a análise apenas para grupos de resultados com mesmo teor de fibra.

A má homogeneização de fibras é um cenário possível quando se mistura altas dosagens de fibras de aço longas em betoneiras de baixa energia de rotação, comprovado pelo ensaio indutivo. Nessas condições, ficou claro a tendência dos resultados do EDP não se adequar à uma distribuição normal de resultados, além de afetar diretamente a capacidade do ensaio de repetir variâncias. Os 21 dias de idade do concreto no rompimento não se mostrou uma variável significativa no processo, visto que todos os corpos de prova se encontravam na mesma situação. Assim, o EDP se mostrou útil como instrumento de controle de homogeneidade do CRF se forem verificadas as condições de repetibilidade de variâncias.

A parte 1 do estudo mostrou um ensaio parcialmente repetível (apenas nos valores médios), porém com alto potencial de ser totalmente repetível se boa homogeneização de fibras for garantido. Tanto os modelos estatísticos da ANOVA quanto da ASTM E691 se mostraram adequados para verificar igualdade de médias e variâncias. O modelo estatístico proposto pela ASTM E691 também se mostrou adequado para verificar a qualidade dos resultados, estabelecendo uma tolerância nas variações de resultados, funcionando como indicador de qualidade do ensaio realizado.

Por último, a análise do número n mostrou que 6 corpos de prova foram suficientes para representar médias e variâncias. Ainda, de acordo com os resultados do número n , é possível reduzir esse número de 6 para 4, partindo-se do princípio que existe uma condição mínima de homogeneidade de fibra incorporada entre os corpos de prova. Assim, conclui-se que 4 corpos de prova são adequados como tamanho de amostra para a segunda parte do trabalho e controle do ensaio.

5 PARTE 2: INTERLABORATORIAL (ANÁLISE DE REPRODUTIBILIDADE)

5.1 MATERIAIS

Da mesma forma que na parte 1 (item 4.1), todo o concreto foi produzido no laboratório de construção civil da Escola Politécnica da USP São Paulo, utilizando a mesma matriz de concreto e mesma fibra de aço nos teores de 30 kg/m³ e 55 kg/m³ (T30 e T55).

Foi utilizado o mesmo traço de concreto e materiais da parte 1 do trabalho, também com todos os materiais doados pela Estrutural Concretos, da unidade de Perus-SP, indicando traço de f_{cm} de 40 MPa e f_{ck} de 35 MPa aos 28 dias.

5.2 PROCEDIMENTO DE MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA

Os procedimentos de moldagem, cura e corte na metade da altura foram os mesmos da parte 1 do programa. Entretanto, foi utilizada uma betoneira de maior energia de mistura, com capacidade de 400 L. Essa mudança foi realizada devido as conclusões da parte 1 do estudo, buscando uma distribuição mais homogeneia das fibras nos corpos de prova.

Foram produzidas duas betonadas de concreto, uma para T30 e uma para T55. Em cada betonada, foram moldados 12 cilindros de 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura, destinado ao EDP, e 4 cilindros de 100mm de diâmetro por 200 mm de altura para determinação da resistência à compressão. Ao serem serrados ao meio, o total final foi de 24 corpos de prova de cada teor de fibra para o EDP.

O procedimento de moldagem ocorreu em um dia e os corpos de prova permaneceram em cura úmida por no mínimo 180 dias, antes de serem distribuídos para todos os laboratórios. Esse longo período de cura foi devido à dificuldade de marcar o mesmo dia no cronograma de ensaio para todos os laboratórios participantes. Dessa forma, todos os rompimentos foram realizados em intervalos não maiores que duas semanas, e a idade bem acima de 28 dias dos corpos de prova pode prevenir variações significativas nas características da matriz do concreto. Com isso buscou-se a eliminação desta variável interveniente. Nos laboratórios, os corpos de prova foram armazenados dentro das respectivas instalações, protegidos de umidade e sol. Os corpos de prova permaneceram nessa situação por não mais que 1 mês antes de serem rompidos.

5.3 PLANEJAMENTO DO INTERLABORATORIAL

O objetivo com a parte 2 é avaliar se o EDP é robusto o suficiente para garantir reprodutibilidade de resultados quando testado em diferentes laboratórios. Tais laboratórios são equipados com diferentes máquinas de ensaio, com variações de capacidade de carga e frequência de aquisição de dados. Como mencionado, todos os laboratórios precisam ter prensas com capacidade de carga mínima de 200 kN e capaz de fixar uma taxa de deslocamento vertical do atuador em 0,5 mm/min. Todas as máquinas operavam com sistema de controle de deslocamento da prensa, ou seja, no sistema *open loop*. A frequência de aquisição de dados (medida em Hz) para a obtenção das curvas de carga por deslocamento não foi um parâmetro de valor fixo entre os laboratórios pois dependia do equipamento utilizado e não interferia no sistema de controle do ensaio (GETTU et al., 1996).

De acordo com a norma ASTM E691, base para programas interlaboratoriais, em nenhuma circunstância uma conclusão definitiva sobre a precisão de um método de ensaio deve se basear em um estudo com menos de 6 laboratórios (ASTM, 2016). Como o próprio Laboratório de Escola Politécnica da USP já se configurava como um participante, foram então definidos mais 5 laboratórios participantes do programa. De forma geral, a condução do interlaboratorial se deu em três etapas, conforme Figura 5.1 resume:

Figura 5.1 – Planejamento geral do programa interlaboratorial do EDP

Com exceção do laboratório da Escola Politécnica da USP, nenhum outro participante do programa tinha experiência com o EDP. Assim, foi criada uma instrução técnica (IT) que pudesse estabelecer um padrão na forma de execução do EDP e disponibilização dos resultados, fixando um mesmo processo entre todos os envolvidos. Deve-se encarar a IT como uma ferramenta de grande importância em um programa interlaboratorial, visto que ela colocará todos os participantes no mesmo nível de entendimento do processo. Segundo a ASTM E691 (ASTM, 2016) a IT deve possuir pontos indispensáveis como:

- Estabelecer um grupo de trabalho que define a metodologia de ensaio;
- Responsável pelo programa, que fará os contatos com participantes e passará as orientações;
- Número de amostras que o laboratório participante recebe;
- Formas de armazenamento dos corpos de prova;
- Método de ensaio e detalhes pertinentes;
- Forma de apresentação e envio dos resultados;
- Identificação do laboratório, aparatos e máquinas de ensaio utilizados;
- Data da última calibração da prensa;
- Contato dos responsáveis pelo programa interlaboratorial;
- Referências bibliográficas para consulta dos profissionais dos laboratórios participantes.

Ao se planejar quais laboratórios iriam participar do programa, deu-se preferência para laboratórios independentes que já trabalham com controle de qualidade de concreto em obras de engenharia civil. Assim, aproxima-se os resultados e conclusões desta pesquisa com a realidade técnica do mercado nacional. No entanto, isto não foi possível de viabilizar para todos os laboratórios e, portanto, dois laboratórios de pesquisa foram utilizados. A Tabela 5.1 apresenta um resumo dos laboratórios participantes, o número de corpos de prova de cada laboratório, as cidades e detalhes das prensas. O número de quatro corpos de prova foi adotado com base nos resultados do número n da parte 1, conforme análises do item 4.5.2. Já a Figura 5.2 mostra as prensas utilizadas por cada laboratório. A precisão mínima da célula de carga foi de 0,01 N de força aplicada.

Tabela 5.1 – Laboratórios participantes do programa de reprodutibilidade

Laboratório	Principal atividade	Nº de corpos de prova adotados por teor de fibra	Cidade	Marca da prensa	Capacidade da prensa (tf)	Frequência de aquisição de dados (Hz)
1	Comercial	4	São Paulo	Kratos	30	0,38
2	Comercial	4	São Paulo	Emic	30	2
3	Comercial	4	São Paulo	Emic	100	2
4	Comercial	4	São Paulo	Emic	20	2
5	Pesquisa	4	São Carlos	Instron	30	10
6 (USP-SP)	Pesquisa	4	São Paulo	Shimadzu	200	20

Figura 5.2 - Prensas utilizadas em cada laboratório

5.4 METODOLOGIA DE ANÁLISE DOS RESULTADOS

A análise de resultados seguiu a mesma sequência da parte 1 do estudo (item 4.4). A Figura 5.3 resume as etapas de análise de resultados que foram empregadas nos resultados obtidos com o programa interlaboratorial do EDP. Como foi aplicado o ensaio indutivo no T55 da primeira parte do trabalho, repetiu-se o ensaio aqui na segunda parte. Não foi calculado número n , visto que o objetivo desse cálculo era determinar a amostragem mínima para planejamento adequado dessa segunda parte.

Figura 5.3 - Etapas de análise de reprodutibilidade

5.4.1 Modelo das análises estatísticas

Da mesma maneira que na parte 1 do estudo, foi aplicada a mesma sequência de análise estatística detalhada anteriormente no item 4.4.2. As análises da ANOVA verificaram igualdade de médias e variâncias entre os laboratórios, com teste Tukey empregado para compreender em detalhes pontos do EDP em que não foram alcançadas reprodução.

Para a análise da ASTM E691, os valores de h_{crt} e k_{crt} correspondem a 1,66 e 1,54 respectivamente, devido ao fato do menor número de corpos de prova em cada amostra (de 6 na parte 1 para 4 na parte 2). O Apêndice I detalha esse cálculo.

5.5 RESULTADOS

A Tabela 5.2 mostra os resultados de consistência (slump) e resistência à compressão dos corpos de prova de controle moldados na betonada do T30 e T55.

Tabela 5.2 - Slump (mm) e resistência à compressão (MPa) das duas betonadas de CRF produzidas

Identificação	Slump (mm)	f_c (MPa)	CV (%)
T30	130	44,3	4,6
		41,5	
T55	160	53,2	6,3
		48,6	

Os resultados da Tabela 5.2 mostram uma alta consistência do concreto, maior que a obtida na parte 1 do estudo. Esse fato pode estar associado com o melhor processo de mistura, com a betoneira de maior capacidade. O valor médio de resistência à compressão de 47 MPa é considerado satisfatório, sendo maior que o valor médio de 40 MPa divulgado pela concreteira. Resultados da parte 2 são maiores que da parte 1 pois o corpo de prova foi ensaiado com idade muito superior, próxima de 180 dias.

5.5.1 Avaliação da reprodutibilidade

Como ocorrido na parte 1, todos os corpos de prova apresentaram o padrão esperado de fissuração (de duas até quatro fissuras principais – Figura 4.7). O Gráfico 5.1a apresenta as curvas de carga por deslocamento resultantes dos seis laboratórios participantes no teor T30. Os resultados mostram um padrão similar ao observado na

parte 1, com a carga de pico variando entre 1,0 e 2,5 mm de deslocamento vertical. A grande diferença é que não foram observados resultados isolados. O Gráfico 5.1b mostra as curvas ajustadas, com as linhas mais grossas indicando as curvas médias de cada laboratório. O comportamento pós-fissuração foi similar à parte 1 do estudo, apresentando *softening* em todos os corpos de prova. Ainda, as curvas médias estão sobrepostas, o que é um indicativo de reprodutibilidade de médias

Gráfico 5.1 – Curva de carga por deslocamento vertical dos corpos de prova referentes à parte 2 – T30 (a); curva ajustada com P_f deslocado para valor zero do eixo x (b)

O Gráfico 5.2a mostra as curvas de carga por deslocamento vertical resultantes dos seis laboratórios para o teor de T55. 66% dos corpos de prova apresentaram comportamento de *hardening*, devido ao alto teor de fibra de aço (MALATESTA et al.,

2012; GALEOTE et al., 2017). Visualmente, comparando com T30, P_f apresentou alta dispersão, tanto para carga de fissuração como para seu deslocamento vertical associado. O Gráfico 5.2b mostra o ajuste nos gráficos, com as curvas médias destacadas. É possível observar que as curvas médias estão mais separadas uma das outras quando comparado ao T30. A Tabela 5.3 resume os resultados médios e CV das cargas de fissuração e residuais

Gráfico 5.2 - Curva de carga por deslocamento vertical dos corpos de prova referentes à parte 2 – T55 (a); curva ajustada com P_f deslocado para valor zero do eixo x (b)

Tabela 5.3 - Resultados médios e coeficiente de variação da parte 2 do estudo

Lab.	Identificação	P _f		P _{0,5}		P _{1,5}		P _{2,5}		P _{3,5}	
		Média (kN)	C.V. (%)	Média (kN)	C.V. (%)	Média (kN)	C.V. (%)	Média (kN)	C.V. (%)	Média (kN)	C.V. (%)
1	T30	133,7	9,1	89,0	14,7	55,4	17,6	43,8	14,4	36,2	13,9
	T55	139,5	9,0	126,3	8,9	87,7	10,6	68,8	14,3	58,5	12,3
2	T30	147,8	3,0	92,0	7,6	57,4	9,5	44,8	15,7	37,7	21,2
	T55	141,9	12,0	153,5	11,3	11,8	6,3	90,7	4,1	72,9	5,3
3	T30	138,2	2,6	91,2	10,5	56,1	19,0	43,6	16,8	24,5	21,5
	T55	144,3	9,8	142,4	9,4	95,2	14,3	72,3	19,5	60,9	20,1
4	T30	130,5	3,9	88,1	12,7	56,0	9,3	45,4	6,3	42,2	8,9
	T55	131,8	4,4	125,0	18,3	91,7	26,8	68,0	25,3	53,6	24,9
5	T30	123,4	4,9	95,0	22,6	61,6	18,1	46,4	16,4	38,6	15,3
	T55	125,3	9,7	123,6	13,9	81,8	12,5	65,0	14,4	56,5	11,4
6	T30	119,5	4,1	91,0	9,7	56,9	3,6	42,6	8,4	33,5	10,2
	T55	108,3	6,4	119,8	4,6	91,2	14,1	68,9	9,5	57,2	11,9

Dos 48 resultados de comportamento pós-fissuração, apenas seis deles mostraram CV maior que 20%. Excluindo P_f , o CV_m da parte 2 foi de 13%, menor que os 22% da parte 1. O fato de que nenhum aglomerado de fibra aparecer durante as moldagens pode ter contribuído para uma maior homogeneidade do concreto e, conseqüentemente, menor dispersão dos resultados. Esses resultados já sugerem que uma betoneira, com maior energia de mistura, proporciona um CRF mais homogêneo, levando a uma menor dispersão de resultados

5.5.2 Ensaio indutivo

O ensaio indutivo foi realizado da mesma maneira que a parte 1, como um complemento para a análise dos resultados. Assim, foi possível utilizar a curva de calibração do Gráfico 4.4. A Tabela 5.4 possui a mesma apresentação da Tabela 4.6 da parte 1, com a coluna final mostrando o erro entre teor real e o teor nominal de 55 kg/m³.

Os resultados de teor real de fibra incorporada da Tabela 5.4 mostram que, de fato, houve uma maior homogeneidade de fibra incorporada entre os corpos de prova quando comparado à parte 1 do estudo. O erro máximo obtido em relação a 55 kg/m³ foi do CP11B, com valor de 35,3%, menor que 64,2% da parte 1. O erro médio foi de 14,4% para essa parte 2, também menor que o erro médio da parte 1 do programa, que ficou em 20,3%. Nota-se que a mudança na metodologia de mistura do concreto

para uma betoneira de maior energia de mistura, de fato, trouxe resultados mais próximos de 55 kg/m³.

Tabela 5.4 - Quantidade real de fibra incorporada por corpo de prova para o teor T55 da parte 2 do estudo

Laboratório	CP	Z (H)	0° (H)	45° (H)	90° (H)	L _{total}	m _f (kg)	Teor real (kg/m ³)	Erro em relação 55 kg/m ³
1_T55	CP2A	4,12	6,63	7,05	6,21	9,46	0,16	62,70	14,0%
	CP2B	4,54	6,41	7,51	7,45	10,26	0,17	63,00	14,5%
	CP11A	3,14	5,94	5,93	5,50	8,13	0,14	51,23	6,8%
	CP11B	4,13	8,83	8,92	7,86	11,61	0,20	74,41	35,3%
2_T55	CP3A	3,47	4,90	5,05	5,21	7,57	0,13	50,16	8,8%
	CP3B	3,72	7,47	6,80	6,48	9,85	0,17	61,25	11,4%
	CP4A	3,98	6,77	7,10	7,37	10,10	0,17	67,57	22,9%
	CP4B	4,29	8,03	8,17	7,41	11,00	0,19	68,49	24,5%
3_T55	CP9A	3,96	6,19	6,04	5,46	8,70	0,15	57,52	4,6%
	CP9B	4,32	6,97	7,01	7,02	10,21	0,17	63,03	14,6%
	CP10A	3,80	4,51	4,66	4,62	7,20	0,12	45,09	18,0%
	CP10B	4,38	6,07	5,92	6,46	9,43	0,16	62,24	13,2%
4_T55	CP1A	3,14	6,51	6,65	5,97	8,71	0,15	56,28	2,3%
	CP1B	4,18	6,71	6,70	6,63	9,77	0,16	63,53	15,5%
	CP7A	3,00	5,03	5,14	4,90	7,21	0,12	47,84	13,0%
	CP7B	3,63	6,69	6,36	5,96	9,08	0,15	55,68	1,2%
5_T55	CP6A	3,15	5,55	5,15	5,16	7,73	0,13	49,55	9,9%
	CP6B	3,57	6,97	7,10	6,85	9,70	0,16	62,41	13,5%
	CP8A	2,66	3,45	3,61	3,44	5,32	0,09	35,62	35,2%
	CP8B	2,68	4,91	4,46	4,36	6,66	0,11	41,30	24,9%
6_T55	CP5A	3,96	5,23	5,61	5,84	8,38	0,14	51,08	7,1%
	CP5B	3,88	6,09	6,28	5,85	8,82	0,15	58,73	6,8%
	CP12A	3,15	5,41	4,90	5,08	7,60	0,13	50,72	7,8%
	CP12B	2,68	4,69	4,67	5,12	6,96	0,12	43,76	20,4%

5.5.3 Análise estatística dos resultados

a) Teste de normalidade

De forma semelhante à parte 1, foi conduzido um teste de normalidade nos resultados, identificando se a mudança na metodologia de moldagem e o CV_m menor contribui para uma população de resultados mais aderente a uma distribuição normal.

A Tabela 5.5 mostra os resultados obtidos no teste Ryan-Joiner.

Tabela 5.5 - Teste de normalidade Ryan-Joiner para parte 2

Identificação	P_f	$P_{0.5}$	$P_{1.5}$	$P_{2.5}$	$P_{3.5}$
T30	>0,1	>0,1	>0,1	>0,1	>0,1
T55	>0,1	>0,1	>0,1	>0,1	>0,1

Os resultados da Tabela 5.5 mostram que tanto T30 como T55 se adequam completamente à distribuição normal. Essa conclusão é aderente à hipótese criada na parte 1, em que corpos de prova com teores similares de fibra incorporada tendem a seguir uma distribuição de Gauss. O Gráfico 5.3 mostra a aderência a uma distribuição normal do T30, e T55, utilizando o ponto $P_{3.5}$ como exemplo.

Gráfico 5.3 - Aderência dos resultados à uma distribuição normal para T30 (a); e T55 (b)

b) Igualdade de médias (ANOVA)

A Tabela 5.6 resume os resultados de igualdade de médias para carga de fissuração e residuais no modelo linear geral da ANOVA, com α de 0,05

Tabela 5.6 - Resultados de comparação de médias para a reprodutibilidade

Variável		P_f	$P_{0,5}$	$P_{1,5}$	$P_{2,5}$	$P_{3,5}$
Média*Teor de Fibra	Valor de p	0,43	0,12	0,06	0,09	0,13
	Significativo	Não	Não	Não	Não	Não
Teor de Fibra	Valor de p	0,88	0,00	0,00	0,00	0,00
	Significativo	Não	Sim	Sim	Sim	Sim
Médias (entre laboratórios)	Valor de p	0,00	0,24	0,12	0,17	0,44
	Significativo	Sim	Não	Não	Não	Não

A Tabela 5.6 mostra que a interação entre as duas variáveis (Média*Teor de Fibra) não foi significativo no processo ($p > 0,05$). Ou seja, o teor de fibra influencia as médias dos laboratórios sempre da mesma maneira, dentro de um padrão, como esperado. A variável *Teor de Fibra* resultou em $p > 0,05$ apenas para P_f . Essa condição indica que o ponto P_f não é sensível a variações no teor de fibra dos corpos de prova quando o ensaio é realizado em locais diferentes. Ou seja, não foi obtido nenhum padrão, e é possível obter resultados variados de P_f tanto usando 30 kg/m³ como usando 55 kg/m³ de fibra de aço, mesmo com a matriz cimentícia padronizada. Comparando valores de *Média* entre laboratórios, todos os pontos relacionados à pós-fissuração obtiveram valores de p acima de 0,05, indicando que para todos os laboratórios, diferenças nos valores médios não são significativos. Esse resultado significa que, pela ANOVA, reprodutibilidade de médias foi alcançada. O ponto P_f não mostrou reprodutibilidade ($p < 0,05$), conclusão similar à parte 1.

c) Teste Tukey (ANOVA)

Para entender melhor o comportamento do P_f no programa interlaboratorial, a Tabela 5.7 apresenta uma comparação pareada de Tukey com α de 0,05.

Tabela 5.7 - Comparação de Tukey para P_f na parte 2 do estudo

Identificação	Laboratório	Nº de corpos de prova	Média de P_f (kN)	Agrupamento*
T30	1	4	138,2	A-B
	2	4	147,8	A
	3	4	138,2	A-B
	4	4	130,5	A-B-C
	5	4	123,4	B-C
	6	4	120,1	B-C
T55	1	4	139,5	A-B
	2	4	141,9	A-B
	3	4	144,3	A-B
	4	4	131,8	A-B-C
	5	4	125,3	A-B-C
	6	4	108,3	C

*Valores médios de P_f que não compartilham a letra A, B ou C são significativamente diferentes

A partir dos resultados da Tabela 5.7, mesmo isolando os dois teores de fibra, o teste estatístico não encontrou um padrão nos resultados, especialmente devido ao

laboratório 2 que se isolou do grupo T30 e laboratório 6, isolando-se do grupo T55. Este resultado sugere que, com nível de confiança de 95%, o controle de P_f com diferentes prensas pode resultar em valores diferentes. Essa conclusão é diferente da parte 1 do estudo, em que foi possível repetir P_f para um grupo de resultados com mesmo teor de fibra.

d) Igualdade de variâncias (ANOVA)

A Tabela 5.8 mostra os resultados de comparação de variâncias pelo teste Levene.

Tabela 5.8 - Resultados de comparação de variâncias para reprodutibilidade

Ponto	Hipótese nula (H_0)	Valor de p	Resultado
P_f	Variâncias iguais	0,028	Rejeita H_0
$P_{0,5}$		0,49	Não rejeita H_0
$P_{1,5}$		0,59	Não rejeita H_0
$P_{2,5}$		0,60	Não rejeita H_0
$P_{3,5}$		0,82	Não rejeita H_0

O teste Levene, pela Tabela 5.8, mostrou que as variâncias do P_f não podem ser consideradas iguais ao longo dos seis laboratórios participantes ($p < 0,05$). Essa conclusão é diferente da obtida na parte 1 do estudo. Ou seja, quando o EDP é realizado no mesmo laboratório, existe repetição de variâncias para P_f . Porém, quando variado o local de ensaio, não existe reprodução de variâncias. Já no regime de pós-fissuração, todos os pontos mostraram igualdade de variância, aceitando H_0 . Essa fato corrobora para hipótese criada na primeira parte, em que o EDP é robusto para repetir, e no caso reproduzir, resultados de variâncias quando uma homogeneidade mínima entre fibras e concreto é garantida, mesmo variando local de ensaio.

e) ASTM E691:16

O Gráfico 5.4a resume os resultados de h (comparação de médias) pela metodologia da norma ASTM E691 (ASTM, 2016), com a reta em vermelho indicando o valor crítico de 1,66 em módulo. O Gráfico 5.4b mostra os valores de k (comparação de variâncias), com a linha vermelha indicando o valor crítico de 1,54. Os valores críticos, conforme já mencionado, possuem modelo matemático apresentado no Apêndice I.

Gráfico 5.4 – Resultados de h (a); e k (b) para reprodutibilidade

De acordo com os resultados do Gráfico 5.4a, dos 48 pontos referentes à pós-fissuração analisados para cada laboratório e teor de fibra, 6% dos resultados não mostraram reprodução de médias ($P_{1.5}$; $P_{2.5}$ e $P_{3.5}$ do laboratório 2). Em toda a pesquisa, esse foi o maior valor de erro para valores médios no regime de pós-fissuração. O P_f do laboratório 6 não foi reproduzível, o que já foi observado em outras análises como o teste Tukey. De acordo com o Gráfico 5.4b, dos resultados de k , apenas um ponto referente à pós-fissuração, de 48 analisados, não mostrou reprodução de variâncias ($P_{1.5}$ do laboratório 4). Ou seja, foi alcançada reprodução de

variâncias; mesma conclusão encontrada na ANOVA. Já para P_f , apenas o laboratório 1 não reproduziu variâncias. Esse é o menor erro encontrado no estudo para P_f .

5.6 CONCLUSÕES DA PARTE 2

Resumindo os resultados, análises e conclusões ao longo da parte 2 do estudo, foram analisadas as condições de reprodutibilidade do ensaio, utilizando número mínimo de 4 corpos de prova por amostra para avaliação. O teste de normalidade mostrou que quando garantida uma homogeneidade no teor de fibra entre os corpos de prova, o teor crítico T55 tende a seguir uma distribuição normal, igual ao T30. Hipótese criada na parte 1 e comprovada na parte 2.

O ensaio foi realizado em diferentes locais, manipulado por diferentes operadores e realizado em máquinas completamente diferentes. Mesmo assim, o EDP foi capaz de reproduzir médias e variâncias no regime de pós-fissuração, comprovado pela ANOVA e método da ASTM E691. Tal fato confirma a hipótese da parte 1 do estudo que 4 corpos de prova seriam o suficiente para adequada representação de médias e variâncias do EDP.

Diferentes operadores, máquinas de ensaio, capacidade de carga e sensibilidade para aquisição de dados se mostraram variáveis que não interferem significativamente nas comparações de resultados de cargas residual do EDP. Ou seja, contemplando todas essas variáveis nas análises estatísticas, o EDP mostrou total repetição de médias e variâncias.

Uma conclusão diferente pode ser feita para o P_f . Esse ponto não mostrou um padrão de comportamento e não reproduziu médias e variâncias quando testado em diferentes máquinas, de capacidade de carga diferentes. O CV desse ponto é menor que o CV dos resultados de pós-fissuração, o que resulta em uma maior probabilidade de não reproduzir médias e variâncias para um mesmo intervalo de confiança.

6 CONCLUSÕES FINAIS

Nessa dissertação foi possível colocar o EDP em situação crítica para a parte 1 do trabalho e testar a robustez do ensaio, obtendo as condições mínimas de repetibilidade. Assim, foi possível planejar adequadamente a segunda parte do estudo, obtendo as condições de reprodutibilidade dos resultados. A principal conclusão obtida neste estudo foi a verificação do fato de que o ensaio de duplo punção apresenta condições de repetibilidade e reprodutibilidade. Além disso, outra conclusão obtida neste estudo é o fato de que o processo de mistura é um fator chave para uma melhor homogeneização do compósito e, conseqüentemente, para alcançar boas condições de repetição e reprodução do EDP e que o mesmo, portanto, é robusto o suficiente para detectar possíveis condições adversas de produção. Nesse sentido, o EDP pode ser um instrumento robusto de controle de conformidade e mesmo da homogeneidade do CRF, o que é verificável pela avaliação das condições de repetibilidade de variâncias segundo a metodologia utilizada neste estudo. Portanto, para aplicações estruturais do CRF, é importante estabelecer tolerâncias para valores mínimos de médias e variâncias desses resultados.

Para a parte 1 do estudo, foi possível repetir os valores de P_f para mesmo teor de fibra. Já para a segunda parte, não foi possível obter reprodução de P_f . Entretanto, o controle do P_f poderia ser compensado pela análise da resistência à compressão, uma vez que esse ponto está relacionado às características da matriz. Quanto ao regime de pós fissuração do EDP, uma vez obtida uma boa homogeneidade da mistura, a igualdade de cargas residuais é alcançada em termos de valores médios e de variância usando quatro corpos de prova, e os resultados seguem uma distribuição de Gauss.

Nenhum efeito significativo nas cargas residuais foi observado devido a diferenças em termos de máquinas de teste, como capacidade de carga e frequência de aquisição de dados. Isto confirma o fato de que o EDP pode ser considerado um teste robusto e prático para ser usado como uma ferramenta confiável para o controle de qualidade regular da CRF em termos de comportamento residual. Ou seja, em um controle de qualidade sistemático de obra com o EDP, dispondo de uma maior população de resultados, estima-se que a tendência é de resultados aderentes à uma distribuição de Gauss, com repetibilidade e reprodutibilidade de médias e variações para cargas residuais. Ainda, o modelo de análise da ASTM E691 se mostrou

ferramenta interessante para acompanhamento de um grupo de resultados, identificando facilmente valores que fogem do padrão esperado; ou seja, funcionando como um indicador de qualidade dos resultados.

Por último, olhando para o conjunto da pesquisa, foi possível desenvolver uma metodologia aceitável e confiável para avaliação da repetibilidade e reprodutibilidade dos resultados de carga de fissuração e cargas residuais do EDP, podendo ser replicada para outros ensaios mecânicos de avaliação do CRF.

6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O presente estudo buscou desenvolver uma metodologia de avaliação da repetibilidade e reprodutibilidade, avaliando o cenário do EDP em dois teores de fibra de aço e uma mesma matriz cimentícia. É importante estender a avaliação do EDP, buscando observar:

- Repetição e reprodução de resultados do EDP para outras fibras de aço mais curtas e com menor fator de forma; bem como para as fibras de polipropileno, que ganham cada vez mais espaço no mercado nacional, podendo ser comparadas com os resultados de reprodutibilidade das fibras de aço. Pode-se ainda adotar outros ensaios de qualificação do CRF, verificando tais condições;
- Repetição e reprodução de resultados do EDP (e outros ensaios de qualificação do CRF) para concretos com matrizes cimentícia diferentes, buscando as diferentes aplicações do CRF, como concreto projetado e concreto auto adensável;
- Estudo aprofundado da faixa de variância aceitável para resultados de carga de fissuração e residual do EDP em escala de obra, onde existe a influência de outras fontes de variação; podendo ainda comparar os resultados de corpos de prova moldados durante o lançamento do concreto com corpos de prova extraídos da estrutura de CRF.

REFERÊNCIAS

IBRACON/ABECE. **Controle da qualidade do concreto reforçado com fibras**. CT 303, 2018

AKÇA, K. R.; ÇAKIR, Ö.; İPEK, M. Properties of polypropylene fiber reinforced concrete using recycled aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 98, p. 620–630, nov. 2015.

ALFERES FILHO, R. S. **Avaliação da Influência do Direcionamento de Fibras de Aço no Comportamento Mecânico de Concreto Auto adensável Aplicado em Elementos Planos**. 2016. 100p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

AMERICAN STANDARD FOR TESTING MATERIALS. **ASTM E691**: Standard Practice for Conducting an Interlaboratory Study to Determine the Precision of a Test Method. West Conshohocken, 2016. 22p.

_____. **ASTM C1550**: standard test method for flexural performance of fiber-reinforce concrete (using beam with third-point loading). Book of ASTM Standards, USA. 2005

_____. **ASTM C1609**: standard test method for flexural performance of fiber-reinforce concrete (using beam with third-point loading). Philadelphia, 2012. 8p.

ARCELORMITTAL. Catálogo Dramix, 2009. Disponível em: <http://www.belgobekaert.com.br/Produtos/Documents/Catalogo-Dramix.pdf>. Acesso em: 24 janeiro 2019.

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN. **UNE 83515**. Hormigones con fibras. Determinación de la resistencia a fisuración, tenacidad y resistencia residual a tracción. Método Barcelona. Barcelona, 2010. 10p

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 67**: Concreto: determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998. 8p.

_____. **NBR 5739**: Concreto: ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007a. 9p.

_____. **NBR 15530**: Fibras de aço para concreto – Especificação. Rio de Janeiro, 2007b. 7p.

_____. **NBR NM ISO 6508-1**: Materiais metálicos - Ensaio de dureza Rockwell Parte 1: Método de ensaio (escalas A, B, C, D, E, F, G, H, K, N, T), 2008.

BANTHIA, Nemkumar; DUBEY, Ashish. Measurement of flexural toughness of fiber-reinforced concrete using a novel technique – part 1: assessment and calibration. **ACI Materials Journal**, v. 96, n. 6, pp. 651-656, 1999.

BANTHIA, N; DUBEY, A. Measurement of flexural toughness of fiber-reinforced concrete using a novel technique – part 2: performance of various composites. **ACI Materials Journal**, v. 97, n. 1, pp. 03-11, 2000.

BARROS, J.A.O., SALEHIAN, H., PIRES, N.M.M.A., GONÇALVES, D.M.F. Design and testing elevated steel fibre reinforced self-compacting concrete slabs. In: Eighth RILEM International Symposium on Fibre Reinforced Concrete (BEFIB 2012), 2012. Guimarães. **Fibre Reinforced Concrete: challenges and opportunities**. Bagneux: RILEM Publications SARL, 2012.

BENTUR, A.; MINDESS, S. **Fibre reinforced cementitious composites**. United Kingdom: Elsevier, 2007.

BLANCO, A. **Characterization and modelling of SFRC elements**. 282p. Thesis Doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya, Spain, 2013.

BLANCO, A., PUJADAS, P., de la FUENTE, A., CAVALARO, S. H. P., AGUADO, A. Assessment of the fibre orientation factor in SFRC slabs. **Composites Part B: Engineering**, v 68, p. 342-354, 2015.

BORGES, L. A. C.; MONTE, R.; FIGUEIREDO, A. D. ANÁLISE DO EFEITO DA ORIENTAÇÃO DAS FIBRAS NA RESISTÊNCIA PÓS-FISSURAÇÃO POR MEIO DO ENSAIO DE COMPRESSÃO DE CORPOS DE PROVA COM DUPLO CORTE EM CUNHA. 56º Congresso Brasileiro do Concreto, **Anais**. 2014.

BORGES, L. A. C.; MONTE, R.; RAMBO, D. A. S.; FIGUEIREDO, A. D. **Evaluation of post-cracking behavior of fiber reinforced concrete using indirect tension test**. CONSTRUCTION AND BUILDING MATERIALS, v. 204, p. 510-519, 2019.

BUTTIGNOL, T. E. T.; FERNANDES, J. F.; BITTENCOURT, T. N.; SOUSA, J. L. A. Verificação de vigas de concreto armado reforçadas com fibras de aço no estado limite último. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 11, n. 5, p. 997-1024, 2018.

CARMONA, S., AGUADO, A., MOLINS, C. Characterization of the properties of steel fiber reinforced concrete by means of the generalized Barcelona test. **Construction and Building Materials**, v. 48, p. 592-600, 2013.

CARMONA, S., MOLINS, C., AGUADO, A. Correlation between bending test and Barcelona tests to determine FRC properties. **Construction and Building Materials**, v. 181, p. 673-686, 2018.

CARROMEU, C. C.; OLIVEIRA K. C.; HELENE P.; HERVÉ NETO, E.; BILESKY P.; PACHECO, J. A importância da acreditação laboratorial e da certificação de mão de obra no controle de aceitação do concreto. In: **54o Congresso Brasileiro do Concreto** do Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON), Maceió, 2012.

CAVALARO, S. H. P. et al. Assessment of fibre content and 3D profile in cylindrical SFRC specimens. **Materials and Structures**, v. 49, n. 1–2, p. 577–595, jan. 2016.

CAVALARO, S. H. P.; AGUADO, A. Intrinsic scatter of FRC: an alternative philosophy to estimate characteristic values. **Materials and Structures**, v. 48, n. 11, p. 3537–3555, nov. 2015.

CHUI, Q. S. H.; BISPO, J. M. A.; IAMASHITA, C. O. O papel dos programas interlaboratoriais para a qualidade dos resultados analíticos. **Quim. Nova**, v. 27, n. 6, 993-1003, 2004.

CONFORTI, A.; TIBERTI, G.; PLIZZARI, G. A.; CARATELLI, A.; MEDA, A. Precast tunnel segments reinforced by macro-synthetic fibers. **Tunnelling and Underground Space Technology**, v. 63, p. 1-11, 2017.

CUENCA, E.; OVIEDO, J.; SERNA, P. Ductility analysis on the post-peak behavior of self-compacting fiber reinforced concrete (SCFRC) beams subjected to shear. **8th RILEM International Symposium on fibre reinforced concrete: Challenges and Opportunities (BEFIB 2012)**, 2017.

DIAS, R. F. Comparação da determinação da tenacidade do concreto reforçado com fibras de aço por meio do ensaio de abertura por encunhamento e da ASTM c1609. **Dissertação de mestrado**, Universidade Federal de Uberlândia, 2018

di PRISCO, M.; LAMPERTI, M. G. L.; LAPLLA, S. Double-edge wedge splitting test: an indirect tension test to identify post-cracking behaviour of fibre reinforced cementitious composites. **Materials and Structures**, v. 46, p. 1893-1918, 2013.

di PRISCO, M.; LAMPERTI, M. G. L.; LAPLLA, S. Double-edge wedge splitting test: preliminary results. **Proceedings FraMCoS**, p. 1533-1540, 2010.

di PRISCO, M.; PLIZZARI, G.; VANDEWALLE, L. Fibre reinforced concrete: new design perspectives. **Material and Structures**, v. 42, p. 1261-1281, 2009.

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

EFNARC. **Testing Sprayed Concrete: EFNARC three point bending test on square panel with notch**. European Federation of Producers and Applicators of Specialist Products for Structures (EFNARC), Hampshire, UK, 14p., 2011.

EN 14651. **Test method for metallic fibre concrete – Measuring the flexural tensile strength (limit of proportionality (LOP), residual)**. European Standard, 2007.

FENG, C. et al. Hygric properties of porous building materials: Analysis of measurement repeatability and reproducibility. **Building and Environment**, v. 85, p. 160–172, 2015.

FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON (FIB). **Fib Model Code for Concrete Structures 2010**, Switzerland, 402p, 2013.

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

_____. **Os desafios para o uso do concreto reforçado com fibras como material estrutural**. In: 56o. Congresso Brasileiro do Concreto, 2014, Natal. As construções em concreto como fator de integração entre as nações, 2014.

FOSTER, S. J.; AGARWAL, A.; AMIN.; A. Design of steel fiber reinforced concrete beams for shear using inverse analysis for determination of residual tensile strength. **Structural Concrete**, v. 19, n.1, p.129-140, 2018.

GALEOTE, E., BLANCO, A., CAVALARO, S., de la FUENTE, A., Correlation between the Barcelona test and the bending test in fibre reinforced concrete. **Construction and Building Materials**, V.152, p. 529-538, 2017.

GALOBARDES, I.; FIGUEIREDO, A. Correlation between beam and barcelona tests for FRC quality control for structural applications. **Fibre Concrete**, Prague, Czech Republic, 2015.

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.

GETTU, R., MOBASHER, B., CARMONA, S., JANSEN, D. C. Testing of concrete under closed-loop control. **Advanced Cement Based Materials**, v. 2, p. 54, 1996.

GOUVEIA, N. D.; LAPI, M.; ORLANDO, M.; FARIA, D. M. V.; RAMOS, A. M. P. Experimental and theoretical evaluation of punching strength of steel fiber reinforced concrete slabs. **Structural Concrete**, v. 19, n. 1, p. 217-229, 2018.

GUDIMETTLA, J. M. et al. Interlaboratory Study and Precision Statement for AASHTO T 336 Test Method. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, v. 2508, p. 13–21, 2015.

GUIMARÃES, M. C. N., FIGUEIREDO, A. D. Análise da repetibilidade e reprodutibilidade do ensaio de tenacidade à flexão dos concretos. In: Congresso

Brasileiro do Concreto. 44., 2002. Belo Horizonte. **Anais...** São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 2002.

GUPTA, R. BANTHIA, N. Effect of Open-Loop or Closed-Loop Deflection Control on Measured Toughness of FRC, Special Publication. **American Concrete Institute**, p. 67–82, 2016.

INMETRO. Guia para a expressão da incerteza de medição. 3º ed. 2003.

INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION. **ISO 5725-1**: Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results - part 1: general principles and definitions, 1994.

JAPAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. **Method of tests for flexural strength and flexural toughness of steel fiber reinforced concrete**. JSCE-SF4. Concrete Library of JSCE. Part III-2 Method of tests for steel fiber reinforced concrete, n. 3, June 1984. pp. 58-61.

KWAN, W. H.; RAMLI, M.; CHEAH, C. B. Flexural strength and impact resistance study of fibre reinforced concrete in simulated aggressive environment. **Construction and Building Materials**, v. 63, p. 62–71, jul. 2014. 69.

LIU, T.; WANG, Z.; GUO, J.; WANG, J. Shear Strength of Dry Joints in Precast UHPC Segmental Bridges: Experimental and Theoretical Research. **Journal of Bridge Engineering**, v. 24, n. 1, p. 04018100, 2018.

MAGALHÃES, F. C.; CHIES, J.; SILVA, B. V.; REAL, M. V.; SILVA FILHO, L. C. P. Concreto não conforme – Análise da influência do local do ensaio nos resultados de resistência à compressão de um mesmo lote. In: **55o Congresso Brasileiro do Concreto**, 2013, Gramado. Ações concretas para o futuro da construção em concreto no Brasil. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON), 2013.

MALATESTA, S. C.; AGUADO, A.; MOLINS, C. Generalization of the Barcelona test for toughness controlo FRC. **Material and Structures**, v. 45, n. 7, p. 1053-1069, 2012.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. Concreto: microestrutura, propriedades e materiais. 3. ed. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON), 2008.

McMAHON, J. A.; BIRELY, A. C. Service performance of steel fiber reinforced concrete (SFRC) slabs. **Engineering Structures**, v. 168, p. 58-68, 2018.

MOHAMMADI, J., SOUTH, W. Measuring Chromium in General Purpose (GP) Cement”, **Journal of Testing and Evaluation**, v. 45, n. 4, p. 362-1377, 2017.

MOHAN, K. S. R.; SUMATHI, A. Studies on Fly Ash Concrete Composites. **Jordan Journal of Civil Engineering**, v. 9, n. 1, p. 117–124, 2015.

MOLINS, C.; AGUADO, A.; SALUDES, S. Double Punch Test to control the energy dissipation in tension of FRC (Barcelona test). **Materials and Structures**, v. 42, n. 4, p. 415–425, 2009.

MONTE, R.; de la FUENTE, A.; FIGUEIREDO, A. D., AGUADO, A. Barcelona Test as an Alternative Method to Control and Design Fiber-Reinforced Concrete Pipes. **ACI Structural Journal**, v. 113, n. 6, 2016.

MONTE, R.; TOALDO, G. S.; FIGUEIREDO, A. D. Avaliação da tenacidade de concretos reforçados com fibras através de ensaios com sistema aberto. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 19, n. 2, p. 132–149, jun. 2014.

MONTE, R. **Caracterização e controle do comportamento mecânico do concreto reforçado com fibras para tubos**. 159p. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

MORETTIN, P.A.; BUSSAB, W.O. **Estatística Básica**. 5a Ed. São Paulo: Editora Saraiva, 2005. 507 p.

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. Toronto, Canada. **Proceedings**. p.29-50. 1995.

NATARAJA, M. C.; DHANG, N.; GUPTA, A. P. Toughness characterization of steel fiber reinforced concrete by JSCE approach. **Cement and Concrete Research**, v. 30, p. 593-597, 2000.

NAYAR, S. K.; GETTU, R. On the design of steel fibre reinforced concrete pavements and slabs-on-grade. **RILEM, Publications SARL**, p. 1070–1081, 2012.

NOGUEIRA, A. B.; SIMÃO, L.; MONTE, R.; FIGUEIREDO, A. D.; **Avaliação da reprodutibilidade do ensaio barcelona para controle do concreto reforçado com fibras**. 59º Congresso Brasileiro do Concreto, 2018.

OSTA, M. A. A.; ISA, M. N.; BALUCH, M. H.; RAHMAN, M. K. Flexural behavior of reinforced concrete beams strengthened with ultra-high performance fiber reinforced concrete. **Construction and Building Materials**, v. 134, p. 279-296, 2017.

PARK, Y. et al. Compressive strength of fly ash-based geopolymer concrete with crumb rubber partially replacing sand. **Construction and Building Materials**, v. 118, p. 43–51, ago. 2016.

PEREIRA, M. M. **Avaliação da eficiência do ensaio Barcelona simplificado para a determinação da tenacidade do concreto reforçado com fibras**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, 2017.

PUJADAS, P.; BLANCO, A.; CAVALARO, S.H.P.; de la FUENTE, A.; AGUADO, A. Multidirectional double punch test to assess the post-cracking behavior and fibre orientation of FRC, **Construction and Building Materials**, v. 58, p. 214–224, 2014.

PUJADAS, P., BLANCO, A., CAVALARO, S., AGUADO, A. Plastic fibres as the only reinforcement for flat suspended slabs: Experimental investigation and numerical simulation. **Construction and Building Materials**, v. 57, p. 92-104, 2014

PUJADAS, P., BLANCO, A., CAVALARO, S., de la FUENTE, A., AGUADO, A. Fibre distribution in macro-plastic fibre reinforced concrete slab-panels. **Construction and Building Materials**, v. 64, p. 496-503, 2014.

PUJADAS, P. et al. New analytical mode to generalize the Barcelona test using axial displacement. **Journal of Civil Engineering and Management**, v.19, n. 2, p. 259-71, 2013.

SALUDES, S. R. Ensayo de doble punzonamiento aplicado al hormigón reforzado con fibras (Ensayo Barcelona). Minor Thesis, UPC, Barcelona, España, 2006

SALVADOR, R. P. **Análise comparativa de métodos de ensaio para caracterização do comportamento mecânico de concreto reforçado com fibras**. 178p. Tese (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

SALVADOR, Renan Pícolo; FIGUEIREDO, Antonio Domingues de. Análise comparativa de comportamento mecânico de concreto reforçado com macrofibra polimérica e com fibra de aço. **Revista Matéria**, v. 18, n. 2, p. 1273-1285, 2013.

SEGURA-CASTILLO, C. L.; MONTE, R.; FIGUEIREDO, A. D. Characterisation of the tensile constitutive behaviour of fibre-reinforced concrete: A new configuration for the Wedge Splitting Test. **Construction and building materials**, v. 192, p. 731-741, 2018.

SHAKELFORD, F. S. **Ciência dos Materiais**. 6. ed. São Paulo: LTC, 2008. 558 p.

SILVA, C. L. **Proposta de metodologia alternativa para controle de qualidade da aplicação estrutural do concreto projetado reforçado com fibras de aço**. 87p. Tese (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016

SLEIMAN, M. et al. Soiling of building envelope surfaces and its effect on solar reflectance—Part III: Interlaboratory study of an accelerated aging method for roofing materials. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 143, p. 581–590, 2015.

SOETENS, T.; MATTHYS, S.; HERTELÉ, S.; de WAELE, W. Shear behaviour of prestressed precast SFRC girders. **Engineering Structures**, v. 142, p. 20-35.

TANYILDIZI, H.; ŞAHİN, M. Taguchi optimization approach for the polypropylene fiber reinforced concrete strengthening with polymer after high temperature. **Structural and Multidisciplinary Optimization**, v. 55, n. 2, p. 529–534, 2017.

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: 55o Congresso Brasileiro do Concreto, 2013, Gramado. Ações concretas para o futuro da construção em concreto no Brasil. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON), 2013.

TORRENTS, J. M. et al. Inductive method for assessing the amount and orientation of steel fibers in concrete. **Materials and Structures**, v. 45, n. 10, p. 1577–1592, 24 abr. 2012.

XIA, J.; CHAN, T.; MACKIE, K. R.; SALEEM, M. A.; MIRMIRAN, A. Sectional analysis for design of ultra-high performance fiber reinforced concrete beams with passive reinforcement. **Engineering Structures**, v. 160, p. 121-132.

WELDEGIORGIS, M. T.; TAREFDER, R. A. Precision Study for Dynamic Modulus Testing of Asphalt Concrete Using Independent Assurance Testing. **American Society of Civil Engineers**, p. 04014133, 2014.

YOO, D. Y.; KANG, S. T.; BANTHIA, N.; YOON, Y. S. Nonlinear finite element analysis of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete beams. **International Journal of Damage Mechanics**, v. 26, n. 5, p. 735-757, 2017.

ZOALFAKAR, S. H. et al. Multiresponse Optimization of Postfire Residual Properties of Fiber-Reinforced High-Performance Concrete. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 28, n. 10, p. 04016111, out. 2016.

ZOLLO, R.; HAYS, C.; ZELLERS, R. A. New Test Method for Fiber-Reinforced Concrete, **Cement, Concrete and Aggregates**, v. 21, n. 2, 1999, pp. 111-116.

APÊNDICE I - CÁLCULO DOS VALORES CRÍTICOS DA ASTM E691

Os valores críticos de consistência (h_{crt} e k_{crt}) dependem de um conjunto de variáveis.

Para o cálculo de h_{crt} com nível de significância α , temos:

$$h_{crt} = \frac{(p-1)t}{\sqrt{p(t^2 + p - 2)^2}}$$

Onde:

p : número de laboratórios;

t : valor a partir de uma distribuição t Student's não pareada com nível de significância

α – função INV.T.BC(α , $p-2$) no *Microsoft Excel* (2010).

Para o cálculo de k_{crt} com nível de significância α , temos:

$$k_{crt} = \sqrt{\frac{p}{1 + \frac{p-1}{F}}}$$

Onde:

p : número de laboratórios;

F : valor a partir de uma distribuição F com nível de significância α – função INV.F.CD(α , $n-1$, $(n-1)*(p-1)$);

n : número de corpos de prova em uma série.

Os valores tabelados de h_{crt} e k_{crt} para n corpos de prova, p laboratórios e α de 5% podem ser obtidos na Tabela A.1.

Tabela A 1 - Valores críticos para h e k com α de 5%

h_{crt}	Nº de laboratórios (p)	Valores de k_{crt} para número de repetições por laboratório (n)								
		2	3	4	5	6	7	8	9	10
1,15	3	1,65	1,53	1,45	1,40	1,37	1,34	1,32	1,30	1,29
1,43	4	1,76	1,59	1,50	1,44	1,40	1,37	1,35	1,33	1,31
1,57	5	1,76	1,62	1,53	1,46	1,42	1,39	1,36	1,34	1,32
1,66	6	1,85	1,64	1,54	1,48	1,43	1,40	1,37	1,35	1,33
1,71	7	1,87	1,66	1,55	1,49	1,44	1,41	1,38	1,36	1,34
1,75	8	1,88	1,67	1,56	1,50	1,45	1,41	1,38	1,36	1,34
1,78	9	1,90	1,68	1,57	1,50	1,45	1,42	1,39	1,36	1,35
1,80	10	1,90	1,68	1,57	1,50	1,46	1,42	1,39	1,37	1,35

APENDICE II - Valores obtidos em todos os corpos de prova no EDP

Tabela A 2 – Valores de carga (kN), desvio padrão (kN) e CV (%) para os corpos de prova de 30 kg/m³ e 55 kg/m³ da parte 1 e parte 2

T30 - Parte 1										
Série	Ponto	CP1A	CP1B	CP2A	CP2B	CP3A	CP3B	MÉDIAS	σ	CV
Série 1	P _f	105,56	112,96	74,46	113,12	109,56	110,69	104,39	14,92	14%
	P _{0,5}	62,48	79,58	65,67	68,62	81,14	78,39	72,65	8,02	11%
	P _{1,5}	41,82	60,89	65,76	37,55	58,21	53,72	52,99	11,1	21%
	P _{2,5}	33,33	51,3	47,62	29,27	43,67	45,02	41,7	8,56	21%
	P _{3,5}	28,26	43,55	36,76	24,77	37,15	40,36	35,14	7,2	21%
Série 2	P _f	89,96	89,03	96,51	104,64	101,81	99,17	96,85	6,32	7%
	P _{0,5}	47,69	82,49	72,22	65,61	68,65	90,87	71,26	14,87	21%
	P _{1,5}	33,63	65,94	53,32	40,68	52,71	66,24	52,09	13,15	25%
	P _{2,5}	27,48	49,61	40,77	34,49	43,13	52,23	41,29	9,27	22%
	P _{3,5}	23,55	40,61	33,51	31,32	35,53	42,52	34,51	6,84	20%
Série 3	P _f	109,14	92,16	101,42	108,99	113,13	115,43	106,71	8,58	8%
	P _{0,5}	87,67	76,02	78,72	75,31	63,62	75,36	76,12	7,72	10%
	P _{1,5}	52,65	77,85	62,67	40,1	40,49	48,38	53,69	14,51	27%
	P _{2,5}	39,22	56,94	49,18	28,89	31,22	35,77	40,2	10,86	27%
	P _{3,5}	32,58	43,11	42,99	21,59	25,24	30,08	32,6	8,95	27%

T55 – Parte 1										
Série	Ponto	CP1A	CP1B	CP2A	CP2B	CP3A	CP3B	MÉDIAS	σ	CV
Série 1	P _f	109,95	100,37	108,72	113,81	114,01	128,65	112,58	9,3	8%
	P _{0,5}	102,12	89,57	86,05	136,63	110,13	152,42	112,82	26,51	23%
	P _{1,5}	64,94	59,35	65,85	103,95	97,96	166,78	93,14	40,61	44%
	P _{2,5}	44,6	44,78	52,22	79,94	81,88	141,7	74,19	37,08	50%
	P _{3,5}	38,44	34,74	44,09	60,49	62,74	108,12	58,1	27,05	47%
Série 2	P _f	94,26	99,65	103,46	106,16	99,71	111,28	102,95	5,76	6%
	P _{0,5}	90,3	98,59	84,74	99,47	92,94	105,61	93,74	7,57	8%
	P _{1,5}	77,33	73,80	62,74	71,48	75,43	81,01	72,34	6,95	10%
	P _{2,5}	52,2	58,79	46,23	58,86	58,41	63,41	55,41	6,06	11%
	P _{3,5}	41,49	46,96	37,48	52,06	47,04	53,78	45,62	6,44	14%
Série 3	P _f	120,74	120,48	113,52	127,61	99,93	90,2	115,44	13,15	11%
	P _{0,5}	112,64	126,55	121,58	138,32	111,96	87,94	116,89	16,95	15%
	P _{1,5}	87,29	105,22	99,86	117,44	98,28	63,99	93,33	18,51	20%
	P _{2,5}	70,18	81,76	76,79	96,93	77,33	47,32	73,93	16,32	22%
	P _{3,5}	59,21	66,43	64,72	79,78	65,45	35,7	61,3	14,42	24%

T30 – Parte 2								
Laboratório	Ponto	CP1	CP2	CP3	CP4	Médias	σ	CV
1	P _f	133,80	117,15	138,15	145,80	133,73	12,11	9,1%
	P _{0,5}	87,60	88,35	106,12	74,10	89,04	13,13	14,7%
	P _{1,5}	57,15	52,95	67,50	43,95	55,39	9,77	17,6%
	P _{2,5}	44,55	42,75	51,60	36,30	43,80	6,29	14,4%
	P _{3,5}	34,80	37,42	42,30	30,30	36,21	5,02	13,9%
2	P _f	141,37	151,46	150,19	148,25	147,82	4,50	3,0%
	P _{0,5}	85,09	90,36	90,90	101,82	92,04	7,03	7,6%
	P _{1,5}	52,72	62,99	52,65	61,09	57,36	5,45	9,5%
	P _{2,5}	41,70	55,25	39,94	42,21	44,77	7,05	15,7%
	P _{3,5}	35,68	49,48	31,92	33,79	37,72	7,99	21,2%
3	P _f	135,17	142,09	46,99	137,36	138,21	3,54	2,6%
	P _{0,5}	90,34	82,06	39,61	101,13	91,17	9,56	10,5%
	P _{1,5}	50,53	49,31	32,49	68,35	56,06	10,66	19,0%
	P _{2,5}	41,33	37,72	24,44	51,82	43,62	7,33	16,8%
	P _{3,5}	29,41	31,09	20,56	43,05	34,52	7,44	21,5%
4	P _f	132,07	125,03	128,12	136,86	130,52	5,12	3,9%
	P _{0,5}	80,69	104,65	82,01	85,08	88,11	11,18	12,7%
	P _{1,5}	54,12	63,38	51,22	55,10	55,96	5,21	9,3%
	P _{2,5}	43,81	48,34	42,24	47,13	45,38	2,84	6,3%
	P _{3,5}	37,94	42,17	47,13	41,69	42,23	3,78	8,9%
5	P _f	123,47	125,43	115,16	129,45	123,38	6,02	4,9%
	P _{0,5}	106,08	119,76	76,36	77,61	94,95	21,49	22,6%
	P _{1,5}	72,36	69,87	50,62	53,39	61,56	11,14	18,1%
	P _{2,5}	53,22	52,67	39,05	40,60	46,39	7,61	16,4%
	P _{3,5}	43,20	44,16	32,65	34,39	38,60	5,92	15,3%
6	P _f	114,34	122,05	124,15	119,85	119,45	4,92	4,1%
	P _{0,5}	100,80	121,39	83,71	88,41	90,97	8,83	9,7%
	P _{1,5}	55,79	84,01	55,61	59,24	56,88	2,05	3,6%
	P _{2,5}	40,83	71,54	40,30	46,79	42,64	3,60	8,4%
	P _{3,5}	31,50	63,52	31,52	37,43	33,48	3,42	10,2%

T55 – Parte 2								
Laboratório	Ponto	CP1	CP2	CP3	CP4	Médias	σ	CV
1	P _f	136,50	147,00	123,15	151,35	139,50	12,56	9,0%
	P _{0,5}	120,75	129,90	114,45	140,25	126,34	11,24	8,9%
	P _{1,5}	87,15	88,20	76,35	99,15	87,71	9,32	10,6%
	P _{2,5}	62,55	68,60	61,35	82,80	68,83	9,84	14,3%
	P _{3,5}	54,90	57,10	53,10	69,00	58,53	7,17	12,3%
2	P _f	126,46	156,17	127,96	157,12	141,93	17,01	12,0%
	P _{0,5}	133,55	168,76	144,48	167,09	153,47	17,29	11,3%
	P _{1,5}	117,47	116,98	127,55	109,39	117,85	7,45	6,3%
	P _{2,5}	87,95	90,12	96,04	88,56	90,67	3,69	4,1%
	P _{3,5}	73,24	68,97	71,29	78,00	72,87	3,84	5,3%
3	P _f	125,77	158,78	141,99	150,57	144,28	14,11	9,8%
	P _{0,5}	138,75	156,96	125,73	148,22	142,42	13,38	9,4%
	P _{1,5}	100,57	111,66	81,76	86,59	95,15	13,60	14,3%
	P _{2,5}	79,08	86,79	54,27	68,88	72,26	14,05	19,5%
	P _{3,5}	66,10	72,95	44,27	60,17	60,87	12,24	20,1%
4	P _f	139,50	130,56	131,75	125,32	131,78	5,85	4,4%
	P _{0,5}	128,43	136,28	91,94	143,15	124,95	22,81	18,3%
	P _{1,5}	89,83	95,49	60,82	120,66	91,70	24,56	26,8%
	P _{2,5}	66,22	69,23	47,23	89,16	67,96	17,16	25,3%
	P _{3,5}	52,01	55,15	37,34	69,89	53,60	13,35	24,9%
5	P _f	124,78	136,56	108,59	131,26	125,29	12,14	9,7%
	P _{0,5}	125,85	139,84	99,47	129,24	123,60	17,16	13,9%
	P _{1,5}	87,17	93,30	71,02	75,87	81,84	10,21	12,5%
	P _{2,5}	70,68	73,72	52,67	63,05	65,03	9,38	14,4%
	P _{3,5}	60,82	62,01	47,94	55,13	56,47	6,43	11,4%
6	P _f	100,75	104,94	116,57	110,89	108,29	6,91	6,4%
	P _{0,5}	113,21	119,30	126,55	120,13	119,80	5,46	4,6%
	P _{1,5}	105,62	88,99	95,16	74,93	91,18	12,82	14,1%
	P _{2,5}	75,98	72,40	65,95	61,30	68,91	6,55	9,5%
	P _{3,5}	62,96	63,22	52,15	50,49	57,20	6,83	11,9%

ANEXO I

✓ Carta de qualidade do cimento CPlI-E-40

Fábrica de Pedra do Sino Sistema de Gestão da Qualidade Cimento CP II-E-40 - MOGI Setembro de 2016										Marco Aurélio da Silva Responsabilidade Técnica Cimento Tupi S.A. - CRQ 12300702							
Dia	P.F.	SiO2	Al2O3	Fe2O3	CaO	MgO	SO3	Na2O	K2O	R.I.	Finuras		Blaine	Consistência Normal	Tempo de Pega		Resistência à Compressão				
	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	#200	#325	[cm2/g]	[%]	Início [h:min]	Fim [h:min]	R1 [MPa]	R3 [MPa]	R7 [MPa]	R28 [MPa]	
01																					
02	4,17	22,98	7,40	2,42	53,08	2,94	2,48	0,30	1,02	2,42	0,5	3,9	4.770	29,6	02:35	04:10	13,2	28,9	38,1	47,9	
03	3,76	23,15	7,30	2,43	53,24	2,93	2,51	0,30	1,00	1,92	0,5	3,9	4.740	29,6	02:35	04:10	13,8	29,4	39,1	49,5	
04																					
05	3,32	22,94	7,34	2,42	53,00	2,87	2,47	0,30	0,99	1,87	0,5	3,3	4.610	29,6	02:35	04:00	14,8	29,7	40,9	50,8	
06	3,98	23,01	7,41	2,42	53,08	2,94	2,49	0,30	1,02	2,09	0,9	4,9	4.780	29,6	02:45	04:25	11,2	26,5	35,0		
07																					
08																					
09																					
10	3,17	23,08	7,21	2,44	53,19	2,91	2,52	0,30	1,00	1,90	0,5	3,3	4.730	29,6	02:45	04:15	12,0	27,7	37,0		
11																					
12	3,62	22,99	7,14	2,46	53,21	2,89	2,41	0,30	0,99	2,21	1,0	4,8	4.940	29,6	02:35	04:10	11,4	26,6	35,4		
13	3,35	23,38	7,13	2,41	53,22	2,84	2,62	0,30	1,00	2,32	0,9	4,9	4.980	29,6	02:55	04:35	11,3	25,3	38,0		
14	3,45	23,50	7,24	2,38	52,50	2,93	2,50	0,30	0,99	2,50	0,7	4,5	4.940	29,6	02:59	04:30	12,4	26,7	38,5		
15	3,46	23,80	7,49	2,38	52,60	2,99	2,52	0,30	0,99	2,50	0,9	5,3	5.000	29,6	02:59	04:30	10,8	25,0	38,7		
16	3,73	23,91	7,47	2,36	52,71	2,97	2,54	0,30	1,00	2,13	0,8	5,2	4.480	29,6	02:49	04:15	10,8	28,0	38,0		
17																					
18																					
19	3,59	22,97	7,25	2,36	52,43	2,84	2,54	0,30	0,99	2,42	0,9	5,4	5.090	29,6	02:35	04:25	10,1	26,4	36,5		
20	3,56	23,13	7,22	2,37	52,51	2,84	2,54	0,30	0,99	2,38	0,6	5,0	5.060	29,6	02:55	04:30	9,7	26,9	35,3		
21	3,78	23,21	7,24	2,37	52,78	2,83	2,52	0,30	0,99	2,40	0,6	4,6	5.110	29,6	02:00	04:20	10,4	27,5	36,8		
22	3,95	23,01	7,13	2,40	52,93	2,79	2,53	0,30	1,00	2,49	0,8	4,6	4.170	29,6	02:30	04:20	12,5	27,2	37,1		
23																					
24																					
25	3,89	22,99	7,10	2,37	52,60	2,89	2,80	0,30	0,98	2,46	0,8	4,6	5.120	29,6	02:25	04:10	12,0	26,6	37,1		
26	3,41	23,04	7,10	2,41	52,96	2,81	2,81	0,30	1,01	2,34	0,9	4,6	5.110	29,6	02:55	04:45	10,1	25,0	35,7		
27	3,88	23,01	7,01	2,45	53,02	2,73	2,74	0,31	0,99	2,30	0,9	4,0	4.990	29,6	03:19	05:15	10,0	25,7	35,5		
28	3,93	23,10	6,95	2,47	53,30	2,73	2,84	0,30	0,99	2,50	0,4	3,9	4.900	29,6	03:00	05:10	10,1	25,2	34,9		
29	4,29	22,55	6,79	2,52	53,24	2,64	2,54	0,30	0,99	2,21	0,7	3,7	5.000	29,6	02:50	04:50	10,9	26,2			
30	4,09	22,70	6,88	2,51	53,45	2,64	2,52	0,31	0,99	2,36	0,7	3,7	4.920	29,6	02:40	04:45	10,1	25,3			
31																					
Média	3,71	23,12	7,19	2,42	52,95	2,85	2,57	0,30	1,00	2,29	0,7	4,4	4871	29,6	2:42	4:28	11,4	26,8	37,0	46,4	
D. Padrão	0,31	0,32	0,19	0,05	0,31	0,10	0,12	0,00	0,01	0,21	0,18	0,65	238,92	0,00	0,01	0,01	1,40	1,42	1,63	1,95	
Mínimo	3,17	22,55	6,79	2,36	52,43	2,84	2,41	0,30	0,98	1,87	0,4	3,3	4170	28,6	2:00	4:00	9,7	25,0	34,9	47,9	
Máximo	4,29	23,91	7,49	2,52	53,45	2,99	2,84	0,31	1,02	2,50	1,0	5,4	5120	29,6	3:16	5:15	14,8	29,7	40,9	50,8	

✓ Granulometria das areias utilizadas no estudo.

MATERIAL	MASSA ESPECÍFICA (Mg/m ³)	MASSA UNIT. SECA (Mg/m ³)	MASSA UNIT. ÚMIDA 4% (Mg/m ³)	TORRÕES DE ARGILA (%)	MATERIAL PULVERULENTO (%)	IMPUREZAS ORGÂNICAS (PPM)
Amostra 1 Barrocão	2,64	1,42	1,39	1,00	1,50	MAIS CLARA
Amostra 2 Lamas&Lamas	2,64	1,20	1,52	0,95	1,24	MAIS CLARA
Amostra 3 0	-----	-----	-----	-----	-----	-----
Limites Normativos	-----	-----	-----	Máx.: 3%	Máx.: 3%	Mais Clara que a solução Padrão
NORMAS	NBR NM 52	NBR NM 45	NBR NM 45	NBR 7218	NBR NM 46	NBR NM 49
TÉCNICO RESP.: Eng.º Fernando		USINA: PERUS - B0900		NÚCLEO: CAMPINAS		
LABORATORISTA: Jonathan		MATERIALE PROCED.: Areia Média - Barrocão		DATA COLETA: 28/09/2016		Nº ORDEM: 009_16
DATA DO ENSAIO: 29/09/2016		Areia Grossa - Lamas & Lamas				

✓ Granulometria da brita 1 utilizadas no trabalho.

MATERIAL	MASSA ESPECÍFICA (Mg/m ³)	MASSA UNIT. SECA (Mg/m ³)	MASSA UNIT. ÚMIDA 4% (Mg/m ³)	TORRÕES DE ARGILA (%)	MATERIAL PULVERULENTO (%)	ABRASÃO " LOS ANGELES "
Amostra 1 BRITA-1	2,70	1,38	Não Aplicavel	Não Aplicavel	0,55	Não Aplicavel
Amostra 2 BRITA-0	2,70	1,38	Não Aplicavel	Não Aplicavel	0,95	Não Aplicavel
Amostra 3 0						
Limites Normativos	-----	-----	-----	-----	Máx.: 1%	Não Aplicável
NORMAS	NBR NM 53	NBR NM 45	-----	-----	NBR NM 46	NBR NM 51
TÉCNICO RESP.: Eng.º Fernando			USINA:	Perus	NÚCLEO:	Campinas
LABORATORISTA: Jonathan		MATERIAL E PROCED.:	Brita 1 - B0900 Brita 0 - B0900		DATA COLETA:	Nº ORDEM:
DATA DO ENSAIO:	06/10/2016				05/10/2016	010_16