LUANA DE CARVALHO RIBEIRO SIMÃO

**ESTUDO DE SISTEMAS DE CONTROLE PARA O ENSAIO DE DUPLO
PUNÇIONAMENTO**

São Paulo

2019

LUANA DE CARVALHO RIBEIRO SIMÃO

**ESTUDO DE SISTEMAS DE CONTROLE PARA O ENSAIO DE DUPLO
PUNÇIONAMENTO**

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

**São Paulo
2019**

LUANA DE CARVALHO RIBEIRO SIMÃO

**ESTUDO DE SISTEMAS DE CONTROLE PARA O 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. Antônio 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, 20 de março de 2019

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

Catlogação-na-publicação

Simão, Luana de Carvalho Ribeiro Simão
ESTUDO DE SISTEMAS DE CONTROLE PARA O ENSAIO DE DUPLO
PUNIONAMENTO / L. C. R. S. Simão -- versão corr. -- São Paulo, 2019.
100 p.

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

1.concreto reforçado com fibras 2. ensaios mecânicos 3. controle da
qualidade I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento
de Engenharia de Construção Civil II.t.

DEDICATÓRIAS

Dedico este trabalho à minha amada família, em especial aos meus filhos, Daniel, Davi, Laís, e ao meu marido, Lucas, pela compreensão, carinho e apoio ao longo da elaboração deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

Ao meu marido e filhos, pela compreensão e paciência nos momentos de ausência, por sempre me ampararem em momentos de dificuldades, por me darem forças e me inspirarem na busca por melhores resultados.

Aos meus pais e demais familiares que depositaram confiança em mim, acreditaram em minha capacidade e que, sem dúvida, me prepararam para a sociedade e para superar todos obstáculos em minha caminhada. Ao meu pai (*in memoriam*) por me ensinar a correr atrás daquilo que acredito e minha mãe pelo seu exemplo de dedicação, força e bondade. Aos meus irmãos e sobrinhos, pois saber que tenho vocês me faz feliz.

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

Aos amigos Renata Monte e André Nogueira, por sempre estarem dispostos a colaborar com o desenvolvimento deste trabalho, em especial a Renata Monte por sua disponibilidade, paciência e intensa colaboração para realização deste trabalho.

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

As minhas amigas do laboratório (Lígia, Juliana, Natália e Aline) pelos momentos de aprendizado, inspiração, desabafo e distração, por sempre me darem apoio, confiança e muitas risadas.

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

Agradeço sobretudo a Deus, por estar sempre presente na minha vida me fortalecendo e me guiando com coragem por todos os desafios.

EPÍGRAFE

*“Success is not final, failure is not fatal:
it is the courage to continue that
counts.”*

(Winston Churchill)

RESUMO

Um modelo de controle de qualidade é confiável quando devidamente vinculado a um modelo de dimensionamento de estruturas. O fib Model Code 2010 apresentou um modelo de dimensionamento e controle do concreto reforçado com fibras (CRF) para fins estruturais baseado no ensaio de flexão de prismas com entalhe (EN 14651), mas indica que outros métodos de ensaio podem ser aplicados através de correlação comprovada com o método de referência. Há dificuldades para a utilização do ensaio EN 14651 no Brasil, pois demanda máquinas de ensaio sofisticadas que dificilmente são encontradas em laboratórios de controle tecnológico. O ensaio de duplo punção é um método alternativo para o controle do comportamento mecânico do CRF e utiliza máquinas de ensaio mais simples. No entanto, alguns estudos observaram que podem ocorrer instabilidades após a ruptura da matriz quando são usados CRFs com elevada força da matriz e baixa força residual pós-fissuração. Estas instabilidades ocorrem devido a alguns fatores dentre eles o sistema de controle de ensaio. As instabilidades podem comprometer a avaliação do material. Assim, esta pesquisa estudou os sistemas de controle para o ensaio de duplo punção. Os ensaios foram realizados em máquinas com sistema aberto e fechado e com controle por deslocamento vertical da máquina e deformação do corpo de prova, para verificar se as instabilidades causadas após a fissuração da matriz comprometem a determinação da resistência residual. Os resultados mostraram que, quando os ensaios de duplo punção são realizados em máquinas com sistema aberto, a instabilidade pós-fissuração é maior. No entanto, não influencia negativamente a determinação da resistência residual. Portanto, o ensaio de duplo punção, mesmo realizado em máquinas com sistema aberto, pode ser utilizado como uma alternativa confiável para o controle tecnológico do CRF, estabelecendo como parâmetros de controle valores de forças residuais para determinados deslocamentos verticais.

Palavra-Chave: Concreto reforçado com fibras. Ensaio de duplo punção. Sistemas de controle de ensaio.

ABSTRACT

A quality control model is reliable when properly linked to a structural design model. The fib Model Code 2010 presented a design model of fiber reinforced concrete (FRC) for structural applications where the control of the material is based on the notched beam test (EN 14651). However, this Code indicates that other test methods can be applied as long as proven correlation with the reference method. There are obstacles to the use of the EN 14651 test method in Brazil, as it requires sophisticated testing machines that are difficult to find in laboratories dedicated to quality control. The double punch test is as an alternative test method to control the mechanical behavior of FRC and requires simpler test machines. However, some studies have observed post-peak instabilities in FRC with high matrix strength and low post-crack residual strength low fiber contents are used. These instabilities occur due to some factors including the test control system. The instabilities may compromise the evaluation of the material. Thus, this research studied the control systems for the double punch test. Tests were performed in open and closed-loop test machines and with control by machine displacement and by deformation of the specimen to verify if the instabilities caused after the matrix cracking compromise the determination of residual strength. Results showed that when open-loop test machines are employed, post-crack instability is greater. However, it does not influence the determination of residual strength negatively. Therefore, the double punch test, even when performed in open-loop test machines, may be used for the routine analysis and characterization of FRC, establishing as control parameters residual forces values for certain axial displacement.

Keywords: Fiber reinforced concrete. Double punch test. Test control systems.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1-1 - Instabilidade dos ensaios Open-loop.....	19
Figura 1-2 - Resultados de ensaio Barcelona com presença de instabilidade pós-fissuração.....	20
Figura 2-1 - Esquema do ensaio de flexão de prisma conforme EN 14651 (2007).....	25
Figura 2-2 - Diagrama de força versus CMOD.....	26
Figura 2-3 - Esquema do ensaio de duplo puncionamento.....	27
Figura 2-4 Ensaio de duplo puncionamento com medidor de TCOD do tipo cinta extensométrica	28
Figura 2-5 - Disposição do ensaio de duplo puncionamento sem medidor do TCOD.....	29
Figura 2-6 - Correlação entre TCOD e deslocamento vertical	30
Figura 2-7 – Instabilidade na curva força-deslocamento.....	32
Figura 2-8 – Extensão da instabilidade na curva força-TCOD	32
Figura 2-9 - Esquema de sistema fechado da máquina de ensaio de flexão em vigas controlado por deformação	35
Figura 2-10 - Esquema de sistema fechado da máquina de ensaio de flexão em vigas controlado por deslocamento do atuador	36
Figura 2-11 – Curvas teóricas de desempenho do atuador	37
Figura 2-12 - Esquema de sistema aberto da máquina de ensaio de flexão em vigas controladas por deslocamento do atuador.....	37
Figura 3-1 – Extração de testemunhos a partir dos extremos dos corpos de prova prismáticos (a) e corte para ajuste da altura (b).....	42
Figura 3-2 – Máquina de ensaio em sistema aberto – EMIC DL10000.....	43
Figura 3-3 – Máquina de ensaio em sistema fechado - SHIMADZU.....	44
Figura 3-4 - Curvas de força versus deslocamento vertical – sistema aberto – Macrofibra 1	45
Figura 3-5 - Curvas de força versus deslocamento vertical – sistema aberto – Macrofibra 2	45
Figura 3-6 - Curvas de força versus TCOD – sistema aberto – Macrofibra 1	46

Figura 3-7 - Curvas de força versus TCOD – sistema aberto – Macrofibra 2	46
Figura 3-8 - Curvas de força versus deslocamento vertical – sistema fechado – Macrofibra 1	49
Figura 3-9- Curvas de força versus deslocamento vertical – sistema fechado – Macrofibra 2	49
Figura 3-10 - Curvas de força versus TCOD – sistema fechado – Macrofibra 1	50
Figura 3-11 - Curvas de força versus TCOD – sistema fechado – Macrofibra 2	50
Figura 3-12 – Curvas médias entre sistema aberto e fechado - Macrofibra1	52
Figura 3-13 – Curvas médias entre sistema aberto e fechado – Macrofibra2	52
Figura 4-1 – Corpos de prova moldados e serrados	60
Figura 4-2 - Curvas de força versus deslocamento vertical com controle por deslocamento da máquina	65
Figura 4-3 - Curvas de força versus TCOD com controle por deslocamento da máquina	66
Figura.4-4 - Curvas de força versus deslocamento vertical com controle por TCOD.....	68
Figura 4-5- Curvas de força versus TCOD com controle por TCOD	69
Figura 4-6 - Histogramas de distribuição das forças residuais para os sistemas de controle por deslocamento da máquina e por TCOD	72
Figura 5-1 – Esquema da metodologia utilizada neste capítulo	76
Figura 5-2 – Curva típica de força-deslocamento	77
Figura 5-3 – Curvas da conversão do deslocamento vertical em TCOD para obtenção da extensão da instabilidade	78
Figura 5-4 - TCOD versus $P_{0,5}/F_{cr}$ para sistema aberto	81
Figura 5-5 - TCOD versus $P_{0,5}/F_{cr}$ para sistema fechado	82
Figura 5-6 – Diferença entre TCOD determinado nos ensaios em sistema aberto e fechado em função de $P_{0,5}/F_{cr}$	84
Figura 5-7 – Curvas média da força versus deslocamento vertical de CRF com 2kg/m^3	86

Figura 5-8 – Curvas média da força versus deslocamento vertical de CRF com 6kg/m ³	86
Figura 5-9 – Curvas média da força versus deslocamento vertical de CRF com 10kg/m ³	87
Figura 5-10 - Curvas média da força versus deslocamento vertical de CRF com 50kg/m ³	87

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1- Traço do concreto	40
Tabela 3.2 - Caracterização das macrofibras de polipropileno	40
Tabela 3.3 - Parâmetros utilizados na conversão analítica do deslocamento vertical da máquina para TCOD.....	43
Tabela 3.4 - Médias e coeficiente de variação das forças de fissuração e residuais – sistema aberto – Macrofibra 1	47
Tabela 3.5 - Médias e coeficiente de variação das forças de fissuração e residuais – sistema aberto – Macrofibra 2	47
Tabela 3.6 - Médias e coeficiente de variação das forças de fissuração e residuais – sistema fechado – Macrofibra 1	51
Tabela 3.7 - Médias e coeficiente de variação das forças de fissuração e residuais – sistema fechado – Macrofibra 2.....	51
Tabela 3.8 - Resultados dos testes de igualdade de variância – Macrofibra 1	53
Tabela 3.9 - Resultados dos testes de igualdade de variância – Macrofibra 2	54
Tabela 3.10 - Resultados do teste t para duas médias – Macrofibra 1	54
Tabela 3.11 - Resultados do teste t para duas médias – Macrofibra 2	55
Tabela 4.1- Traço do concreto	59
Tabela 4.2 - Parâmetros utilizados na conversão analítica do deslocamento vertical da máquina para TCOD.....	61
Tabela 4.3 - BCN (controle por TCOD) – Teste I	63
Tabela 4.4 - BCN (controle por TCOD) – Teste II	63
Tabela 4.5 – BCN (controle por TCOD) – Teste III	63
Tabela 4.6 – BCN (controle por TCOD) – Teste IV.....	64
Tabela 4.7 - Médias e coeficiente de variação das forças de fissuração e residuais para controle por deslocamento da máquina.....	67
Tabela 4.8 - Médias e desvios padrão da extensão da instabilidade para os sistemas de controle utilizados.	70
Tabela 4.9 - Médias e variabilidade das forças de fissuração e residuais para o sistema de controle por TCOD.....	70
Tabela 4.10 - Resultados dos testes de igualdade de variância	71

Tabela 4.11 - Resultados do teste t para duas médias	73
Tabela 5.1 – Corpos de provas utilizados na parte 1	80
Tabela 5.2 – Características das fibras apresentadas pelos fornecedores	85
Tabela 5.3 – Resultados médios da extensão da instabilidade para sistemas aberto e fechado utilizando Teste T	88
Tabela 5.4 – Resultados médios da força residual $P_{0,5}$ para sistemas aberto e fechado utilizando Teste T	88

LISTA DE SÍMBOLOS

F_{cr}	Força no ponto do surgimento de fissuração
F_1	Força residual para valor de abertura de fissura (CMOD) de 0,5 mm
F_2	Força residual para valor de abertura de fissura (CMOD) de 1,5 mm
F_3	Força residual para valor de abertura de fissura (CMOD) de 2,5 mm
F_4	Força residual para valor de abertura de fissura (CMOD) de 3,5 mm
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
F	Força no ponto calculado
δ_{cr}	Deslocamento relativo à força de fissuração
$F_{R,0}$	Força no ponto de início da resistência residual
$\delta_{R,0}$	Deslocamento no ponto de início da resistência residual
δ	Deslocamento no ponto calculado
$F_{0,5}$	Força residual para valor de abertura de fissura diametral (TCOD) de 0,5 mm
$F_{1,5}$	Força residual para valor de abertura de fissura diametral (TCOD) de 1,5 mm
$F_{3,5}$	Força residual para valor de abertura de fissura diametral (TCOD) de 3,5 mm
p	Nível de significância de 5%
f_{ck}	Resistência característica do concreto à compressão
$P_{0,5}$	Força residual para valor do deslocamento vertical da máquina de 0,5 mm após a força de fissuração
$\Delta TCOD_{0,5}$	Diferença entre as aberturas de fissura para $P_{0,5}$ determinadas em máquinas de sistema aberto e fechado

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	16
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO E JUSTIFICATIVA	16
1.2	OBJETIVOS.....	20
1.3	ESTRUTURAÇÃO DO TEXTO.....	21
2	CONTROLE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DO CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS	23
2.1	PROCEDIMENTOS DE ENSAIOS NORMALISADOS.....	24
2.1.1	Ensaio de flexão em vigas.....	24
2.1.2	Ensaio de duplo puncionamento	27
2.2	OPERAÇÃO E CONTROLE DE MÁQUINAS DE ENSAIO	33
3	AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO SISTEMA ABERTO E SISTEMA FECHADO NO ENSAIO DE DUPLO PUNCIONAMENTO	39
3.1	PROGRAMA EXPERIMENTAL	39
3.1.1	Materiais e proporções	40
3.1.2	Produção dos corpos de prova e métodos de ensaio.....	41
3.2	RESULTADOS E ANÁLISES.....	44
3.2.1	Ensaio de duplo puncionamento – (sistema aberto).....	44
3.2.2	Ensaio de duplo puncionamento – (sistema fechado)	48
3.2.3	Comparação entre ensaio de duplo puncionamento realizados em sistemas aberto e fechado.....	53
3.2.3.1	Teste para igualdade de variância	53
3.2.3.2	Teste t para comparação de médias.....	54
3.3	CONCLUSÕES DO CAPÍTULO.....	56
4	AVALIAÇÃO DA METODOLOGIA DO ENSAIO DE DUPLO PUNCIONAMENTO EM SISTEMA FECHADO COM CONTROLE POR DESLOCAMENTO DA MÁQUINA E DEFORMAÇÃO DO CORPO DE PROVA	58
4.1	PROGRAMA EXPERIMENTAL	58

4.1.1	Materiais e proporções	59
4.1.2	Produção dos corpos de prova e métodos de ensaio	60
4.1.3	Compatibilização de velocidades	62
4.2	RESULTADOS.....	64
4.2.1	Resistência à compressão	64
4.2.2	Ensaio de duplo puncionamento com sistema de controle por deslocamento da máquina.....	65
4.2.3	Ensaio de duplo puncionamento – controle por deformação do corpo de prova (TCOD)	68
4.2.4	Comparação entre ensaios de duplo puncionamento com controle por deslocamento da máquina e por TCOD.....	71
4.2.5.1	Testes para igualdade de variância	71
4.2.5.2	Teste t para comparação de médias.....	72
4.3	CONCLUSÕES DO CAPÍTULO.....	73
5	 INFLUÊNCIA DA INSTABILIDADE PÓS-FISSURAÇÃO NA DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA RESIDUAL NO ENSAIO DE DUPLO PUNCIONAMENTO	75
5.1	METODOLOGIA	75
5.2	PARTE 1: ANÁLISE DOS DADOS HISTÓRICOS	79
5.2.1	Metodologia da análise	79
5.2.2	Análise dos resultados	81
5.3	PARTE 2: PROGRAMA EXPERIMENTAL	84
5.3.1	Metodologia da análise	84
5.3.2	Análise dos resultados	85
5.4	CONCLUSÕES DO CAPÍTULO.....	89
6	 CONCLUSÕES.....	91
6.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	93
	REFERÊNCIAS	94

ANEXO I – Granulometria e qualidade dos materiais enviados pela concreteira.....	98
---	-----------

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E JUSTIFICATIVA

No Brasil, a utilização do concreto reforçado com fibras (CRF) é crescente e está concentrada em aplicações que utilizam baixo consumo de fibras, tais como estruturas contínuas como pavimentos e concreto projetado para revestimento de túneis e taludes.

A pouca utilização desse material em aplicações de maior responsabilidade estrutural pode estar associada à falta de normas técnicas específicas e à falta de maturidade do meio técnico brasileiro que não demanda avaliações técnicas detalhadas e planos de controle rigorosos (FIGUEIREDO, 2011).

Estudos, como o de Magalhães et al. (2013), já analisaram a deficiência dos laboratórios de controle tecnológico no Brasil, demonstrando que ensaios de compressão (um ensaio simples e frequente nos laboratórios nacionais) quando realizados em cinco laboratórios apresentaram resultados estatisticamente diferentes.

Diante desta dificuldade técnica dos laboratórios brasileiros, é necessário ponderar que os desafios para o controle técnico do CRF são ainda maiores, visto que seu controle tecnológico é bem mais complexo (SALVADOR; FERNANDES; FIGUEIREDO, 2015). Em vista disso, faz-se necessário desenvolver uma metodologia de caracterização do comportamento mecânico do CRF para programas de controle da qualidade fundamentados na realização de ensaios de fácil aplicação com atribuição de resultados confiáveis (MOLINS; AGUADO; SALUDES, 2009; PUJADAS et al., 2014; CARMONA; MOLINS; AGUADO, 2018). Um dos pontos mais críticos nos ensaios de controle do CRF envolve a parametrização do comportamento pós-fissuração, onde a força residual do CRF deve ser quantificada com maior elevada precisão (BURATTI; MAZOTTI; SAVOIA, 2011). O comportamento pós-fissuração do CRF se deve a presenças das fibras que

atuam como ponte de transferência de tensões conferindo à matriz frágil de concreto uma resistência mecânica residual. Esta característica pode ser avaliada através da quantificação da resistência residual.

Diversos métodos de ensaio foram desenvolvidos para caracterizar o comportamento pós-fissuração do CRF, dentre eles os mais utilizados são os ensaios de flexão de prismas (JSCE-SF4, 1984; EN 14651, 2007; ASTM C1609, 2012). O ensaio de flexão da norma Japonesa JSCE-SF4 (1984), apesar de muito antigo, ainda é o mais utilizado no Brasil, principalmente por não exigir o controle do ensaio pela deformação do corpo de prova.

O código modelo europeu *fib Model Code 2010* (FIB, 2013) utiliza o ensaio de flexão com entalhe (EN 14651, 2007) como referência para a parametrização do comportamento do CRF para aplicações estruturais. Porém, este ensaio demanda necessariamente o uso de equipamento complexo, ou seja, exige o uso de uma máquina de ensaio de alta precisão que seja dotada de sistema de controle fechado (*closed-loop*) para a deformação do corpo de prova. Neste ensaio, o controle de carregamento é atrelado à manutenção de uma taxa de deformação constante no corpo de prova. Ou seja, é necessário haver uma retroalimentação da máquina que regula o nível de carregamento de tal maneira que mantenha constante a taxa de deformação do corpo de prova. É praticamente impossível encontrar esse tipo de máquina de ensaio em laboratórios de controle tecnológico no mercado brasileiro e mesmo no exterior. Além disso, as máquinas de ensaio, mesmo que permitam o controle através da deformação do corpo de prova, podem apresentar diferentes capacidades de ajuste da velocidade de ensaio em função da frequência de retroalimentação do sistema. Ciente dessa dificuldade, o *fib Model Code 2010* (FIB, 2013) indica que outros métodos de ensaio podem ser aplicados na avaliação do CRF desde que comprovada correlação com o método de referência.

Um método alternativo de controle é o ensaio de duplo puncionamento, também denominado ensaio Barcelona, normalizado na Espanha pela AENOR UNE 83515 (2010). A possibilidade de correlação dos resultados

obtidos no ensaio de duplo puncionamento e aqueles obtidos com ensaios de flexão de prismas já foi demonstrada anteriormente em vários estudos (GALOBARDES; FIGUEIREDO, 2015; GALEOTE et al 2017; CARMONA; MOLINS; AGUADO, 2018). Esse método é baseado no duplo puncionamento de corpos de prova cilíndricos e o monitoramento do aumento de seu perímetro (TCOD) através de uma cinta extensométrica. Com o ensaio de duplo puncionamento pode ser obtida uma curva de força por deformação medida no perímetro circunferencial do corpo de prova.

Uma simplificação desse procedimento foi proposta por Pujadas et al. (2013), no qual o monitoramento do TCOB é substituído pela medida do deslocamento vertical da máquina de ensaio, declinando do uso da cinta extensométrica. Esse procedimento é mais simples, dado que demanda uma máquina de ensaio convencional dotada apenas de controle por deslocamento vertical (sistema aberto - *open-loop*), o que é mais acessível aos laboratórios de controle de qualidade brasileiros. A aplicação deste ensaio em estudos de CRF estão aumentando (CARMONA; AGUADO; MOLINS; 2013; KIM; LEE; MOON, 2015; AIRE et al, 2015; MONTE et al., 2016; RAMBO et al 2018; SEGURA-CASTILHO et al, 2018; LIU et al, 2018).

Entretanto, a realização de ensaios do CRF com sistema aberto de controle (*open-loop*) é questionada por diversos estudos, como os de GETTU et al., 1996; BANTHIA; DUBEY, 1999; GUPTA; BANTHIA, 2007; BANTHIA; MINDESS; JIANG, 2012; SALVADOR; FIGUEIREDO, 2013; MONTE; TOALD; FIGUEIREDO, 2014. Esse questionamento está associado à frequente ocorrência da instabilidade pós-fissuração, que pode comprometer a confiabilidade na avaliação do comportamento pós-fissuração do CRF. Quando ocorre essa instabilidade, a leitura da força residual pós-fissuração é prejudicada gerando incerteza em sua determinação. O CRF é um material que pode apresentar instabilidade quando a capacidade resistente pós-fissuração é muito menor que a capacidade resistente da matriz.

Banthia e Dubey (1999) compararam o comportamento do CRF determinado através de sistemas aberto e fechado em ensaios de flexão, identificando

uma expressiva instabilidade na região dos valores da força de pós-fissuração da matriz, conforme demonstrado na Figura 1.1.

Figura 1-1 - Instabilidade dos ensaios Open-loop

Fonte: Banthia, Dubey, (1999).

A instabilidade pode ocorrer devido algumas razões como: alta resistência da matriz em comparação a resistência mecânica da fibra; baixo volume de fibras empregado; quantidade insuficiente de fibras na seção de ruptura; falta de rigidez do equipamento; sistema de controle da velocidade ou método de ensaio (BANTHIA; DUBEY, 1999). No caso dos ensaios de flexão, o problema da instabilidade foi solucionado com a utilização de sistema de controle fechado por deformação do corpo de prova.

No ensaio de duplo puncionamento, normalizado na Espanha pela AENOR UNE 83515 (2010), como descrito anteriormente, o controle do ensaio se dá pelo deslocamento da máquina de ensaio e não da deformação do corpo de prova. Por isso, o resultado pode apresentar uma região de instabilidade, sendo identificada por uma grande distância entre os pontos após a força de fissuração (MONTE, TOALDO, FIGUEIREDO, 2013), principalmente para baixos teores de fibra, conforme apresentado na Figura 1.2.

Figura 1-2 - Resultados de ensaio Barcelona com presença de instabilidade pós-fissuração.

Fonte: Monte, Toaldo e Figueiredo (2014).

Considerando esse cenário, faz-se necessário o contínuo desenvolvimento de estudos que abordem a questão da instabilidade no ensaio de duplo puncionamento, como o uso de diferentes sistemas de controle. O ensaio de duplo puncionamento ainda não é normalizado no Brasil, portanto, estes estudos podem contribuir para um maior domínio das variáveis que podem influenciar na confiabilidade dos resultados.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral desta pesquisa é o estudo de sistemas de controle para o ensaio de duplo puncionamento, verificando se a mudança do tipo de controle resulta em uma maior confiabilidade na medida das forças residuais pós-fissuração.

Para alcançar esse objetivo geral, é necessário atingir os seguintes objetivos específicos:

- Identificar e caracterizar as máquinas de ensaio com diferentes tipos de controle;
- Comparar os resultados do ensaio de duplo puncionamento com sistemas de controle aberto e fechado em termos de dispersão, analisando a influência da extensão da instabilidade pós-fissuração;

- Compatibilizar velocidades de ensaio em função do tipo de controle utilizado e analisar a resposta do ensaio de duplo puncionamento quando controlado por deslocamento vertical ou por deformação diametral do corpo de prova;
- Avaliar a extensão da instabilidade no ensaio de duplo puncionamento e verificar sua influência sobre a determinação da resistência residual medida logo após a fissuração da matriz.

1.3 ESTRUTURAÇÃO DO TEXTO

O texto foi estruturado em seis capítulos, sendo que o capítulo 1, este, descreve a contextualização e justificativa do trabalho, seus objetivos e a estruturação do mesmo. O que será discutido nos próximos capítulos será apresentado em seguida:

CAPÍTULO 2 – CONTROLE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DO CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS

Este capítulo apresenta a revisão bibliográfica de aspectos relativos ao controle do comportamento mecânico do CRF, descrevendo os métodos de ensaios de flexão como principal método de ensaio disponível atualmente e o ensaio de duplo puncionamento, utilizado no estudo desta pesquisa, ainda serão descritos os métodos de controle das máquinas de ensaio, que contribuíram para estabelecer o programa experimental deste trabalho.

CAPÍTULO 3 – AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO SISTEMA ABERTO E SISTEMA FECHADO NO ENSAIO DE DUPLO PUNCIONAMENTO

Neste capítulo será apresentada a avaliação do ensaio de duplo puncionamento em sistema aberto e fechado por controle de deslocamento da máquina. Para esta avaliação foi realizado um programa experimental onde foi possível comparar estatisticamente os resultados obtidos entre os dois sistemas aberto e fechado.

CAPÍTULO 4 –AVALIAÇÃO DA METODOLOGIA DO ENSAIO DE DUPLO PUNÇIONAMENTO EM SISTEMA FECHADO COM CONTROLE POR DESLOCAMENTO DA MÁQUINA E DEFORMAÇÃO DO CORPO DE PROVA

Neste capítulo será apresentada a avaliação do ensaio de duplo punçionamento em sistema fechado comparando os dois tipos de controle: por deslocamento da máquina e por deformação do corpo de prova. Esta avaliação foi realizada através de um programa experimental onde serão apresentadas as análises estatísticas desses resultados, e também os resultados obtidos durante a compatibilização de velocidades para o uso do controle por deformação do corpo de prova em sistema fechado.

CAPÍTULO 5 – INFLUÊNCIA DA INSTABILIDADE PÓS-FISSURAÇÃO NA DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA RESIDUAL NO ENSAIO DE DUPLO PUNÇIONAMENTO

O capítulo 5 irá avaliar a extensão de instabilidade no ensaio de duplo punçionamento e verificar sua influência sobre a determinação da resistência residual medida logo após a fissuração da matriz.

CAPÍTULO 6 – CONCLUSÃO

Aponta as conclusões do trabalho e as propostas para futuros estudos.

2 CONTROLE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DO CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS

O controle do comportamento mecânico do CRF é complexo e envolve sua parametrização na condição pós-fissuração, avaliada através da quantificação da resistência residual e/ou da tenacidade. Na avaliação da resistência residual e da tenacidade são utilizados alguns parâmetros obtidos a partir de diversos métodos de ensaio, utilizando curvas de força *versus* deslocamento.

Para o efetivo controle desses parâmetros é importante que os métodos de ensaio forneçam resultados precisos e confiáveis. Porém ainda não existe no Brasil nenhuma norma publicada de método de ensaio para avaliar o comportamento pós-fissuração do CRF. A problemática é ainda maior quando se trata de confiabilidade dos resultados, como comprovado pelo estudo de Magalhães et al. (2013). Esse estudo demonstrou a dificuldade técnica dos laboratórios brasileiros em apresentar resultados confiáveis a respeito do controle tecnológico da resistência à compressão do concreto convencional, que utiliza um método de ensaio muito mais simples que os de caracterização do CRF.

Neste capítulo, uma revisão bibliográfica descreverá os métodos de ensaios normalizados, dentre eles: o ensaio de flexão com entalhe (EN 14651, 2007), recomendado pelo código modelo europeu *fib Model Code 2010* (FIB, 2013); e o ensaio de duplo puncionamento, proposto como alternativa aos métodos convencionais (ensaios de flexão) a fim de facilitar e simplificar o ensaio de controle do CRF. Na sequência, serão discutidos aspectos relativos aos métodos de controle da máquina de ensaio, que podem influenciar na confiabilidade dos ensaios.

2.1 PROCEDIMENTOS DE ENSAIOS NORMALISADOS

2.1.1 Ensaios de flexão em vigas

A maioria dos métodos de ensaio que foram desenvolvidos para caracterizar o comportamento pós-fissuração do CRF são baseados na flexão de pequenas vigas, dentre eles estão as normas: japonesa JSCE-SF4 (1984), europeia EN 14651 (2007) e americana ASTM C1609 (2012). As normas japonesa e americana apresentam métodos de ensaio similares, com a principal diferença no método de controle do ensaio. A ASTM C1609 (2012) indica que o controle da velocidade deve ser feito pela deformação do corpo de prova, enquanto a JSCE-SF4 (1984), por omitir tal exigência, acaba por permitir que o controle seja realizado pelo deslocamento vertical da máquina de ensaio. Isto faz com que o ensaio Japonês seja o mais utilizado no Brasil, onde máquinas com controle de ensaio pela deformação do corpo de prova são dificilmente encontradas.

Atualmente, no Brasil, o Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON) e a Associação Brasileira de Engenharia e Consultoria Estrutural (ABECE), através do Comitê 303, vêm desenvolvendo práticas recomendadas que prescrevam tanto um modelo de dimensionamento para estruturas em CRF, quanto métodos de controle tecnológico do material. Estes documentos estão fortemente alinhados com as diretrizes do *fib Model Code* 2010 (FIB, 2013). Para o dimensionamento, o documento de prática recomendada já se encontra publicado (IBRACON/ABECE, 2017). O método recomendado pelo *fib Model Code* 2010 (FIB, 2013) para a caracterização do CRF é o ensaio de flexão com entalhe (EN 14651, 2007).

Os ensaios de flexão consistem na aplicação de uma força vertical sobre uma viga biapoiada, cuja configuração pode variar em relação à forma de aplicação da força, medição de deslocamento ou presença de entalhes.

A norma EN 14651 (2007) prevê um ensaio de flexão de corpos de prova prismáticos, cujas dimensões são 150 mm x 150 mm x 550 (até 700) mm,

com vão de ensaio de 500 mm. Estes possuem um entalhe de 5 mm de largura por 25 mm de altura centralizado em sua face apoiada nos cutelos inferiores. A função deste entalhe é induzir o posicionamento da fissura. Para a realização deste ensaio é necessária a utilização de um equipamento dotado de sistema fechado de controle de deformação, em que a força é aplicada por apenas um cutelo superior, centralizado em relação ao vão de ensaio. A abertura da fissura é utilizada como parâmetro de controle de ensaio, a qual pode ser medida diretamente através da utilização de um *clip-gage* ou calculada a partir do deslocamento vertical de um LVDT instalado no *yoke* (Figura 2.1).

Figura 2-1 - Esquema do ensaio de flexão de prisma conforme EN 14651 (2007)

Fonte: Adaptado de Salvador, Fernandes e Figueiredo (2015).

O sistema de controle prevê duas velocidades de ensaio: no primeiro trecho, correspondente ao intervalo de abertura de fissura entre 0 e 0,10 mm, a velocidade de abertura de fissura deve ser de 0,05 mm/min. Já no segundo trecho, entre 0,10 e 4,0 mm de abertura de fissura, a velocidade adotada deve ser de 0,20 mm/min. A adoção de uma menor velocidade no trecho inicial tem a função de minimizar a ocorrência da instabilidade pós-fissuração (SALVADOR; FERNANDES; FIGUEIREDO, 2015).

O resultado típico obtido no ensaio de flexão da EN 14651 (2007) é expresso por uma curva de força *versus* deformação, representada pela abertura da fissura e expressa pelo CMOD (*Crack Mouth Opening Displacement*),

conforme exposto na Figura 2.2. A partir deste diagrama é possível quantificar a resistência residual através das equações apresentadas na norma (EN 14651, 2007).

Figura 2-2 - Diagrama de força versus CMOD

Fonte: EN 14651 (2007)

A grande vantagem deste ensaio é que, diferentemente de corpos de prova sem entalhe, a fissura é localizada diretamente sobre o plano do entalhe e deformações não elásticas não ocorrem nas outras regiões do corpo de prova. Portanto, toda a resistência residual pode ser vinculada a uma abertura da fissura específica (SALVADOR; FIGUEIREDO, 2013). Além disso, os resultados obtidos podem ser atrelados ao dimensionamento de estruturas de CRF (FIB, 2013) associando-se as resistências residuais ao estado limite de serviço e último em função do nível de abertura de fissura.

Porém, os ensaios de flexão demandam atividades bastante trabalhosas, como a moldagem dos prismas que são muito pesados, bem como exigem um processo experimental mais complexo do que, por exemplo, o ensaio de duplo puncionamento (item 2.12). Além disso, estes ensaios sofrem influência das características do equipamento logo após a ruptura do corpo de prova, sendo necessários equipamentos sofisticados para a obtenção de resultados mais confiáveis como máquina de ensaio de alta precisão com sistema de controle fechado (*closed-loop*) (BERNARD, 2009), que são dificilmente encontradas nos laboratórios brasileiros de controle tecnológico.

Sabendo destas dificuldades, o *fib Model Code* 2010 (FIB, 2013) também indica que outros métodos de ensaio podem ser aplicados, desde que comprovada correlação com o método de referência, caso do ensaio de duplo puncionamento.

2.1.2 Ensaio de duplo puncionamento

O ensaio de duplo puncionamento foi idealizado por Chen (1970) para medir indiretamente a resistência à tração do concreto convencional. A partir dessa idéia, foi proposto por Saludes (2006) o ensaio de duplo puncionamento. Este ensaio foi normalizado na Espanha pela AENOR UNE 83515 (2010) e utiliza corpos de prova cilíndricos de diâmetro igual à altura, com dimensões de 15 cm para moldados e, no mínimo, 10 cm para corpos de prova preparados a partir de testemunhos extraídos. O ensaio realiza um duplo puncionamento com dois discos de carga, centralizados no topo e no fundo do corpo de prova/testemunho, conforme apresentado na Figura 2.3.

Figura 2-3 - Esquema do ensaio de duplo puncionamento

Fonte: Adaptado de SALUDES (2006).

A norma do ensaio estabelece uma proporção de 1:4 entre o diâmetro do disco de carga e o diâmetro do corpo de prova e 1:5 entre suas alturas. Sobre

os planos concorrentes no eixo do cilindro são induzidas tensões de tração através da força aplicada. Dessa forma, o padrão de fraturas do corpo de prova ocorre paralelamente a estes planos. Em geral, ocorrem entre duas a quatro fissuras (SALUDES, 2006). A força deve ser aplicada de forma uniforme com velocidade de descida do equipamento (movimentação da travessa ou pistão da máquina de ensaio) de $(0,5 \pm 0,05)$ mm/min e devem ser medidos a força aplicada e o aumento do perímetro circunferencial ou TCOD (*Total Circunferencial Opening Displacement*) através de uma corrente extensométrica posicionada no perímetro circunferencial do corpo de prova conforme ilustrado na Figura 2.4.

Figura 2-4 Ensaio de duplo puncionamento com medidor de TCOD do tipo cinta extensométrica

Fonte: Do autor.

O ensaio de duplo puncionamento, pode apresentar dificuldade para se medir o TCOD, pois a cinta extensométrica é um equipamento caro e não usual nos laboratórios. Por isso, Pujadas et al. (2013) apresentaram uma simplificação do método, em que a força aplicada e o deslocamento vertical da máquina são medidos, conforme ilustrado na Figura 2.5, não sendo necessária a utilização do extensômetro para medida do aumento da circunferência.

Figura 2-5 - Disposição do ensaio de duplo puncionamento sem medidor do TCOD

Fonte: Do autor.

Essa simplificação foi possível a partir da constatação da existência de três fases principais na resposta do ensaio de duplo puncionamento: uma primeira fase elástico linear (1); seguida de uma fase de transição (2); e por fim a fase resistência residual (3). Em vista disso, foi proposta por Pujadas et al. (2013) uma conversão analítica entre TCOD e o deslocamento vertical, através das equações 1, 2 e 3, e ilustrada na Figura 2.6.

$$TCOD = 0 \quad \delta \leq \delta_{cr} \quad (\text{Equação 1})$$

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

$$TCOD = n \times \frac{a}{2 \times l} \times \sin \frac{\pi}{n} \times \left[\delta - \delta_{cr} + \delta_{R,0} \times \left(1 - \frac{F_{R,0}}{F_{cr}}\right) \right] \quad \delta \geq \delta_{R,0} \quad (\text{Equação 3})$$

Onde:

n : é número de fissuras radiais formadas no ensaio;

a : é diâmetro do disco de carga utilizado no ensaio;

l : é comprimento da cunha formada sob o disco de carga;

F : é a força no ponto calculado;

F_{cr} , δ_{cr} : são a força e o deslocamento no ponto da força de fissuração;

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

Figura 2-6 - Correlação entre TCOD e deslocamento vertical

Fonte: Monte, Toaldo e Figueiredo (2014).

O ensaio de duplo puncionamento tem sido utilizado em diversas pesquisas no Brasil (TOALDO; MONTE; FIGUEIREDO, 2013; MONTE; TOALDO; FIGUEIREDO, 2014; SILVA et al., 2015; MONTE et al., 2016; SOUZA et al., 2017a; SOUZA et al., 2017b). Esses estudos têm mostrado o potencial desse ensaio para o controle tecnológico do CRF e resultaram na proposta de uma prática recomendada pelo comitê técnico CT303-IBRACON/ABECE (IBRACON/ABECE, 2017): Resistência à tração por duplo puncionamento (fissuração, tenacidade e resistência residual) do concreto reforçado com fibras, elaborado pelo comitê 303 em outubro de 2017. Nesta prática recomendada adotou-se o ensaio de duplo puncionamento executado sem a cinta extensométrica para garantir maior facilidade de aplicação em programas de controle da qualidade.

Estudos como o de Carmona et al. (2012) avaliam a possibilidade de utilizar o deslocamento do pistão para controlar as forças resistidas pelo corpo de

prova após a fissuração além da tenacidade. Este estudo apresentou resultados que permitem a utilização de medidas de deslocamento axial ao invés do deslocamento circunferencial (TCOD) e resultados altamente sucedidos entre o deslocamento axial e o deslocamento do pistão. Mas este estudo também alerta que o uso do deslocamento do pistão não é recomendado para determinar a atuação da força em uma amostra, pois este deslocamento é fortemente afetado pela rigidez da máquina de ensaio, apresentando grandes deformações no início do processo de carregamento proporcionando certa instabilidade nessa região. Mas como a caracterização do concreto reforçado com fibras (CRF) é realizada através de parâmetros obtidos da resposta do deslocamento de força no comportamento pós-fissuração do CRF, o material sofre uma suavização permitindo que a resposta do deslocamento do pistão se estabilize, por isso pode-se considerar o deslocamento do pistão para se determinar não só a tenacidade, mas as forças residuais.

Apesar das vantagens do ensaio de duplo puncionamento, este pode apresentar, na região das forças de pós-fissuração da matriz, uma significativa instabilidade quando são utilizados baixos teores de fibra (MONTE; TOALDO; FIGUEIREDO, 2014). CRFs que apresentam uma alta resistência da matriz em comparação a capacidade de resistência residual do compósito tendem a apresentar uma região de instabilidade pós-fissuração (BANTHIA; DUBEY, 1999; BANTHIA; MINDESS; JIANG, 2012; MONTE; TOALDO; FIGUEIREDO, 2014).

A instabilidade pós-fissuração apresentada no ensaio de duplo puncionamento pode ser identificada por uma queda abrupta na capacidade de força do corpo de prova logo após a fissuração e está representada na Figura 2.7. Quando ocorre a fissuração da matriz e a força é transferida para as fibras, parte da energia armazenada no equipamento é liberada, causando um aumento na taxa de deformação do corpo de prova. Como a aquisição de dados ocorre a uma taxa constante, a instabilidade é observada na curva força-deslocamento por uma região com uma grande distância entre os pontos.

Figura 2-7 – Instabilidade na curva força-deslocamento

Fonte: Do autor.

Para que seja exequível a determinação da extensão da instabilidade da pós-fissuração, o deslocamento vertical precisa de ser convertido na abertura de fissura (TCOD). Para esta conversão, as equações 1, 2 e 3 propostas por Pujadas et al. (2013) podem ser utilizadas. A Figura 2.8 mostra a extensão da instabilidade na curva força-TCOD após a conversão analítica, onde o espaçamento dos pontos se torna mais evidente.

Figura 2-8 – Extensão da instabilidade na curva força-TCOD

Fonte: Do autor.

Pujadas et al. (2014) contextualiza que as três fases principais na resposta do ensaio de duplo puncionamento pode ser responsável pelas instabilidades intrínsecas do ensaio e até apresenta algumas propostas para avaliar este fato. Banthia e Dubey (1999), quando avaliavam o problema da instabilidade em ensaios de flexão, apontaram a falta de rigidez do equipamento e o sistema de controle da velocidade de ensaio a partir da deformação no corpo de prova como os fatores que podem influenciar significativamente nos resultados. Contudo, esse tipo de avaliação não foi realizado para o ensaio de duplo puncionamento.

Alguns estudos discutem se esta instabilidade pode comprometer ou não a confiabilidade na avaliação do comportamento pós-fissuração do CRF (BANTHIA; DUBEY, 1999; BERNARD, 2009; GETTU et al., 1996). Os resultados desses estudos convergiram para a solução de utilização de equipamentos dotados de sistema fechado de controle de velocidade (*closed-loop*) de CMOD ou deslocamento do corpo de prova, para reduzir a instabilidade pós-fissuração em ensaios de flexão. Por isso, as normas americanas (ASTM C 1609, 2012) e europeia (EN 14651, 2007), adotam esse tipo de controle.

Porém, quando se trata do ensaio de duplo puncionamento, não existe nenhum estudo que possa afirmar que os resultados apresentarão maior confiabilidade e reprodutibilidade quando utilizado em sistema fechado. Por esta razão que esta pesquisa se dedica ao estudo de sistemas de controle para o ensaio de duplo puncionamento.

2.2 OPERAÇÃO E CONTROLE DE MÁQUINAS DE ENSAIO

Os requisitos exigidos para as máquinas de ensaio e para o controle dos ensaios para avaliação do CRF sofreram uma constante evolução desde a publicação da norma japonesa (JSCE-SF4, 1984). Este fato se deve a

preocupação de restringir a diferença de comportamento exibida em corpos de prova nominalmente idênticos quando submetidos a diferentes máquinas de ensaio e a interferência na confiabilidade dos resultados.

Os corpos de prova de CRF são sensíveis a característica da máquina de ensaio imediatamente após a fissuração da matriz de concreto, pois são muito rígidos antes da fissura e relativamente deformáveis após a fissura.

Atualmente, acredita-se que as máquinas rígidas servo-controladas, com um sistema de retroalimentação rápido (*fast feedback loop*) e alta capacidade de resposta mecânica, podem controlar de forma adequada possíveis instabilidades pós-fissuração associadas ao rápido descarregamento no momento da ruptura. Todavia, os detalhes precisos dos requisitos mínimos de desempenho da máquina ainda não são claros (BERNARD, 2009).

A instabilidade pode ser definida como um intervalo de deformação "rápida e descontrolada" do corpo de prova que normalmente ocorre na região pós-fissuração logo após se atingir a carga máxima de ensaio. Portanto, a informação sobre o real comportamento do material é perdida na região instável.

Uma das alternativas para o controle da instabilidade é a utilização do sistema de controle fechado de deformação do corpo de prova para manter constante a velocidade de ensaio. O sistema de controle de ensaio aberto utiliza máquinas que não possibilitam o mecanismo de retroalimentação. O sistema de controle de ensaio fechado utiliza a máquinas que possibilitam o mecanismo de retroalimentação. No entanto, é frequente ocorrerem dúvidas relacionadas à diferença entre sistema de controle fechado (*closed-loop*) e sistema de controle aberto (*open-loop*). Portanto, estes tipos de controle de velocidade de ensaio serão mais bem discutidos a seguir.

Controle fechado – CLOSED-LOOP

No contexto da operação da máquina de ensaio, o termo "*closed-loop*" incorpora um mecanismo de retroalimentação ("*feedback*"), que usa a

deformação medida do corpo de prova para regular o aparelho de carregamento a fim de obter uma resposta direto da amostra. Esse "feedback" pode ser entendido como um controle digital, que inclui a utilização, por exemplo, de um transdutor que gera uma corrente ou tensão como resposta a um estímulo, possibilitando a retroalimentação da máquina dos parâmetros pré-definidos, conforme ilustrado na Figura 2.9.

Figura 2-9 - Esquema de sistema fechado da máquina de ensaio de flexão em vigas controlado por deformação

Fonte: Adaptado de BERNARD (2009).

Entretanto, um sistema fechado pode também funcionar dentro de uma máquina de ensaio com o objetivo de restringir o funcionamento de um componente da máquina, como o pistão de força ou atuador, praticamente a uma taxa constante que é independente da resposta do corpo de prova, conforme ilustrado na Figura 2.10.

Figura 2-10 - Esquema de sistema fechado da máquina de ensaio de flexão em vigas controlado por deslocamento do atuador

Fonte: Adaptado de BERNARD (2009).

Este tipo de controle é comum em máquinas servo eletro-hidráulicas, com colunas ativadas por sistema do tipo rosca-sem-fim conduzidas a uma taxa de deslocamento do atuador supostamente constante e controlada pelo sistema de controle digital. As máquinas que utilizam a servo válvula tem se mostrado capazes de responder de maneira rápida o suficiente para controlar adequadamente as instabilidades do pós-fissuração. Estas máquinas são usadas junto com um circuito eletrônico rápido e de alta taxa de abastecimento hidráulico podendo atingir o seu potencial total. Estudos, como o de Gettu et al. (1996), descrevem as máquinas de ensaio servo hidráulicas e um dos fatores que influenciam o desempenho do ensaio é a frequência de aquisição de dados, que pode afetar diretamente o movimento do atuador. Tal característica é demonstrada no gráfico da Figura 2.11, onde as curvas à direita, representam máquinas com maior frequência de aquisição de dados e, conseqüentemente, resultam um melhor comportamento caracterizado.

Figura 2-11 – Curvas teóricas de desempenho do atuador

Fonte: GETTU et al. (1996).

Controle aberto - OPEN-LOOP

Já o termo "*open-loop*" implica na falta deste mecanismo de retroalimentação ("*feedback*") para que o aparelho de carregamento funcione de acordo com os parâmetros pré-definidos, independentemente do comportamento do corpo de prova, conforme ilustrado na Figura 2.12.

Figura 2-12 - Esquema de sistema aberto da máquina de ensaio de flexão em vigas controladas por deslocamento do atuador

Fonte: Adaptado de BERNARD (2009).

Este sistema de controle é utilizado em máquinas com circuito hidráulico simples e um dos fatores que pode influenciar no desempenho em termos de instabilidade é a rigidez da máquina de ensaio.

Para promover aumento da precisão do ensaio é necessário utilizar equipamentos de alta rigidez para que, após o rompimento da matriz, a energia liberada não seja dissipada no corpo de prova que está sendo testado.

Infelizmente, não existe um modelo satisfatório de máquinas de controle de ensaio onde existe uma interação entre máquina e o corpo de prova que atenda as mínimas exigências de desempenho em amostras potencialmente instáveis (BERNARD, 2009).

Tendo em vista este panorama, esta pesquisa visa contribuir para a obtenção de resultados mais precisos e confiáveis quando se utiliza o ensaio de duplo puncionamento para controle do comportamento mecânico do CRF. Assim, a avaliação dos resultados com diferentes sistemas e diferentes máquinas de controle se faz necessária.

3 AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO SISTEMA ABERTO E SISTEMA FECHADO NO ENSAIO DE DUPLO PUNÇIONAMENTO

Como visto no capítulo anterior, existem dois principais sistemas de controle de ensaio: aberto e fechado. Esses sistemas são capazes de influenciar os resultados de ensaios para o controle do comportamento mecânico do CRF com baixos teores de fibra. Em vista disso, este capítulo se propõe a verificar a influência destes controles de ensaio quando o material é submetido ao ensaio de duplo punçionamento.

Porém, vale ainda lembrar que um ensaio em sistema fechado pode ser realizado através de dois tipos de controle (por deslocamento da máquina ou deformação do corpo de prova). Em vista disso, para a avaliação realizada no presente estudo, os sistemas aberto e fechado utilizados no ensaio de duplo punçionamento serão controlados por deslocamento da máquina.

A seguir serão apresentados o programa experimental, os materiais e proporções utilizados, a preparação dos corpos de prova e metodologia de ensaio, resultados e conclusões deste capítulo.

3.1 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental se baseia na comparação dos resultados obtidos através do ensaio de duplo punçionamento realizado na máquina da marca Shimadzu modelo UH-2000kNXR operando com uma frequência de 60 Hz em sistema fechado, com um transdutor que permite a retroalimentação do controle da velocidade de ensaio, em relação àqueles obtidos através do ensaio de duplo punçionamento realizado na máquina EMIC modelo DL10000 em sistema aberto, sem nenhum dispositivo que permite a retroalimentação dos dados de controle da velocidade de ensaio, ambos com controle por deslocamento da máquina. Essa máquina EMIC modelo DL10000 apresenta uma rigidez de 42 kN/mm, porém existem modelos mais

rígidos como a DL20000 que apresenta uma rigidez de 120kN/mm, optou-se por adotar essa máquina menos rígida em sistema aberto por ser aquela disponível no laboratório da Escola Politécnica e a fim de analisar a situação crítica desse sistema.

3.1.1 Materiais e proporções

Para este trabalho foram utilizados CRFs obtidos a partir de uma matriz com proporção em massa de materiais secos de 1:2:2,5 (cimento:areia:brita 0) e relação água/cimento igual a 0,5. A Tabela 3.1 resume os quantitativos do traço e tipifica cada um dos materiais utilizados na produção do concreto. Foram utilizados dois tipos de macrofibras de polipropileno (MF1 e MF2) produzidas por dois fabricantes diferentes com a caracterização descrita na Tabela 3.2.

Tabela 3.1- Traço do concreto

Materiais	Quantidade (kg/m³)	Tipo
Cimento	397	CPII-E-32
Areia	794	Artificial
Brita 0	992	Rocha
Água	198	Potável
Fibras	2,5	polipropileno

Tabela 3.2 - Caracterização das macrofibras de polipropileno

Medida	Resultado médio	
	MF1	MF2
Comprimento (mm)	54 ± 0,02	48 ± 0,05
Densidade (g/cm³)	0,91 ± 0,003	0,92 ± 0,003
Diâmetro equivalente / mm	0,47 ± 0,32	0,78 ± 0,03

O teor de fibra utilizado foi de 2,5 kg/m³, para ambas as fibras. O teor é baixo, quando comparado aos teores de 4 a 5 kg/m³ utilizados nas aplicações mais

usuais do CRF com macrofibra polimérica que são os pavimentos. No entanto, o uso de baixos teores é mais crítico em relação a instabilidade pós-fissuração em ensaios em sistema aberto.

Para garantia de condições de trabalhabilidade uniforme, foi adicionado 200g de aditivo superplastificante, marca Glenium 51, considerando a trabalhabilidade do concreto. O resultado médio da resistência à compressão foi de 39,6 MPa, com desvio padrão de 2,14 MPa. Dado que o f_{ck} previsto era de 35 MPa aos 28 dias. Pode ser então considerado que o mesmo foi adequado e que a introdução das fibras não resultou em qualquer prejuízo na compactação desse concreto que pudesse resultar queda na sua resistência mecânica.

3.1.2 Produção dos corpos de prova e métodos de ensaio

O ensaio de duplo puncionamento foi realizado em testemunhos extraídos de vigas (150 x 150 x 550 mm) moldadas em pesquisas anteriores no laboratório da Escola Politécnica (Figura 3.1a). Primeiramente foram realizadas as extrações dos cilindros com diâmetro de 100 mm e altura de 150 mm. Em seguida foram cortados com altura de 100 mm, mantendo a relação altura/diâmetro igual a um (Figura 3.1b). No total foram obtidos 8 cilindros de 100 x 100 mm de cada macrofibra. Desses, 4 cilindros foram submetidos ao ensaio de duplo puncionamento em sistema fechado e as outros 4 submetidas ao ensaio de duplo puncionamento em sistema aberto, para cada macrofibra avaliada.

Figura 3-1 – Extração de testemunhos a partir dos extremos dos corpos de prova prismáticos (a) e corte para ajuste da altura (b)

Ensaio de duplo puncionamento

Após a produção dos corpos de prova, foi realizado o ensaio de duplo puncionamento. Conforme discutido no Capítulo 2, o ensaio de duplo puncionamento normalizado na Espanha (UNE 83515, 2010) é realizado com uma cinta extensométrica. No entanto, a simplificação desse procedimento foi objeto de estudo que propôs a utilização do deslocamento vertical da máquina de ensaio (PUJADAS et al., 2013). Portanto, neste programa experimental foi utilizado o procedimento proposto por Pujadas et al. (2013), sem a utilização da cinta e sim com a medida do deslocamento vertical da máquina tal como estabelecido pela prática recomendada (IBRACON/ABECE, 2017). A velocidade utilizada foi de 0,5 mm/min, interrompendo o ensaio quando o deslocamento da máquina atingia o valor de 7 mm. Os resultados de deslocamento vertical foram então convertidos para TCOD utilizando as equações 1, 2 e 3 apresentadas no capítulo 2, a Tabela 3.3 apresenta os parâmetros utilizados.

Tabela 3.3 - Parâmetros utilizados na conversão analítica do deslocamento vertical da máquina para TCOD

Parâmetros					
n	a (mm)	l (mm)	F (N)	$F_{cr}; \delta_{cr}$ (N; mm)	$F_{R,0}; \delta_{R,0}$ (N; mm)
3					força e
considerando				força e	deslocamento
a hipótese de	25	26,81	força no	deslocamento	no ponto de
modo de			ponto	no ponto da	início da
ruptura em			calculado	força máxima	resistência
três planos					residual

O ensaio de duplo puncionamento em sistema aberto (sem a retroalimentação do sistema de controle) foi realizado na máquina de ensaio EMIC modelo DL10000, com uma rótula superior e um prato fixo inferior, conforme descrito na norma de ensaios de compressão NBR 5739, 2007, como ilustra a Figura 3.2.

Figura 3-2 – Máquina de ensaio em sistema aberto – EMIC DL10000

O ensaio de duplo puncionamento em sistema fechado (com reatualimentação do sistema de controle) foi realizado na máquina de ensaio SHIMADZU modelo UH-2000kN XR, com uma rótula e um prato fixo inferior, conforme descrito na norma de ensaios de compressão NBR 5739, 2007.

(NBR 5739, 2007). A reatualimentação dessa máquina ocorre através de um transdutor ativo que gera uma corrente ou tensão como resposta a um estímulo, neste caso, o estímulo é do corpo de prova que reflete no deslocamento da máquina (Figura 3.3).

Figura 3-3 – Máquina de ensaio em sistema fechado - SHIMADZU

3.2 RESULTADOS E ANÁLISES

Os resultados estão apresentados e analisados separadamente para o sistema aberto e fechado, para as forças médias de fissuração e residuais, e respectivos coeficientes de variação. Uma análise comparativa dos sistemas de controle também é apresentada, onde são discutidas a extensão da instabilidade e a comparação estatística das médias para as forças residuais obtidas para cada tipo de controle.

3.2.1 Ensaios de duplo puncionamento – (sistema aberto)

As Figuras 3.4 e 3.5 apresentam as curvas de força (kN) versus deslocamento vertical (mm) obtidas com o ensaio de duplo puncionamento em sistema aberto. As curvas da macrofibra 1 estão apresentadas na Figura 3.4 e as curvas da macrofibra 2 na Figura 3.5. Vale ressaltar que, em ambas as figuras, a força de fissuração foi deslocada para o valor zero de deslocamento vertical, pois facilita a avaliação do comportamento residual.

Figura 3-4 - Curvas de força versus deslocamento vertical – sistema aberto –
Macrofibra 1

Figura 3-5 - Curvas de força versus deslocamento vertical – sistema aberto –
Macrofibra 2

As curvas das Figura 3.4 e 3.5 apresentam uma queda abrupta na resistência logo após a força de fissuração. Esta queda pode estar associada à instabilidade pós-fissuração, que fica melhor identificada nas Figuras 3.6 e

3.7, que apresentam a conversão analítica dos valores de deslocamento vertical para abertura de fissura diametral (TCOD) no trecho pós-fissuração. Foi possível identificar também uma pequena variação das curvas com deslocamentos próximos à força de fissuração e um comportamento semelhante das curvas para maiores valores de deslocamento.

Figura 3-6 - Curvas de força versus TCOD – sistema aberto – Macrofibra 1

Figura 3-7 - Curvas de força versus TCOD – sistema aberto – Macrofibra 2

Os resultados apresentados nas Figuras 3.6 e 3.7 permitem visualizar a região de instabilidade, identificada pelo maior afastamento entre os pontos dos gráficos que ocorre no trecho após a ruptura da matriz e se estende até aproximadamente 2,5 mm para algumas curvas.

Para a análise comparativa das forças residuais, optou-se por adotar três valores de forças residuais, quando o TCOd: 0,5; 1,5; 3,0 mm. Os valores das forças correspondentes aos TCOd de 0,5 e 3,0 mm podem ser associados ao Estado Limite de Serviço (ELS) e ao Estado Limite Último (ELU), respectivamente. Os resultados médios obtidos e as suas dispersões estão apresentados nas Tabela 3.4 e 3.5.

Tabela 3.4 - Médias e coeficiente de variação das forças de fissuração e residuais
– sistema aberto – Macrofibra 1

TCOD (mm)	Forças		
	Média (kN)	Desvio padrão (kN)	Coeficiente de variação (%)
0	69,7	3,6	5
0,5	54,4	4,7	9
1,5	23,4	2,0	9
3,0	7,7	1,7	23

Tabela 3.5 - Médias e coeficiente de variação das forças de fissuração e residuais
– sistema aberto – Macrofibra 2

TCOD (mm)	Forças		
	Média (kN)	Desvio padrão (kN)	Coeficiente de variação (%)
0	65,7	3,5	5
0,5	51,3	3,0	6
1,5	22,2	2,6	12
3,0	5,0	1,1	22

Analisando as Tabelas 3.4 e 3.5 verifica-se que o nível de variabilidade da força de fissuração foi inferior à encontrada para as forças residuais. A maior variabilidade observada para o comportamento residual do CRF pode ser justificada pelo fato de depender da quantidade de fibras presentes na seção de ruptura (SALVADOR; FIGUEIREDO, 2013). Além disso, o valor médio da força residual correspondente a 3,0 mm de TCOd é pequeno, quando comparado aos valores médios das forças residuais associadas a menores

aberturas de fissura, fazendo com que haja um aumento do coeficiente de variação.

3.2.2 Ensaios de duplo puncionamento – (sistema fechado)

As Figuras 3.8 e 3.9 apresentam as curvas de força versus deslocamento vertical obtidas com o ensaio de duplo puncionamento em sistema fechado. As curvas do gráfico da macrofibra 1 estão apresentadas na Figura 3.8 e as curvas da macrofibra 2 na Figura 3.9. Ambas também estão com a força de fissuração deslocada para o valor zero do eixo das abscissas para facilitar a avaliação do comportamento residual.

Figura 3-8 - Curvas de força versus deslocamento vertical – sistema fechado –
Macrofibra 1

Figura 3-9- Curvas de força versus deslocamento vertical – sistema fechado –
Macrofibra 2

As curvas apresentadas nas Figuras 3.8 e 3.9, com resultados do ensaio em sistema fechado, mostram uma queda menos abrupta na resistência após a força de fissuração quando comparado com sistema aberto. Essa situação fica melhor identificada nas Figuras 3.10 e 3.11, que apresentam a conversão analítica dos valores de deslocamento vertical para abertura de fissura diametral (TCOD) no trecho pós-fissuração.

Figura 3-10 - Curvas de força versus TCOD – sistema fechado – Macrofibra 1

Figura 3-11 - Curvas de força versus TCOD – sistema fechado – Macrofibra 2

Os resultados dos gráficos das Figuras 3.10 e 3.11 permitem visualizar expressiva redução da região de instabilidade quando comparado com o sistema aberto (Figuras 3.6 e 3.7). Verifica-se que a instabilidade para sistema fechado se estende até aproximadamente 1 mm e para sistema aberto se estende até aproximadamente 2,5 mm, para ambas macrofibras.

Esses resultados demonstram a pertinência do comentado anteriormente com relação as máquinas de ensaio servo hidráulicas que apontou que um dos fatores que influenciam o desempenho do ensaio é a frequência de aquisição de dados (Gettu et al. (1996) e, no caso presente, nitidamente a velocidade não foi alta o suficiente para eliminar a instabilidade.

Para a análise comparativa das forças residuais, de forma análoga as análises realizadas para sistema aberto, foram utilizados os valores das forças residuais quando TCOD: 0,5; 1,5; 3,0 mm. Os resultados médios obtidos e as suas dispersões estão apresentados nas Tabelas 3.6 e 3.7.

Tabela 3.6 - Médias e coeficiente de variação das forças de fissuração e residuais
– sistema fechado – Macrofibra 1

TCOD (mm)	Forças		
	Média (kN)	Desvio padrão (kN)	Coeficiente de variação (%)
0	66,8	4,1	6
0,5	39,3	4,1	10
1,5	9,0	2,4	26
3,0	6,6	2,5	38

Tabela 3.7 - Médias e coeficiente de variação das forças de fissuração e residuais
– sistema fechado – Macrofibra 2

TCOD (mm)	Forças		
	Média (kN)	Desvio padrão (kN)	Coeficiente de variação (%)
0	65,7	3,8	6
0,5	31,8	5,1	16
1,5	6,6	2,0	30
3,0	3,7	1,1	29

Analisando as Tabelas 3.6 e 3.7, verifica-se que a variabilidade da força de fissuração foi inferior à encontrada para as forças residuais em ambas macrofibras. O valor da força média residual correspondente a 3,0 mm de TCOD é baixo, fazendo com que haja um aumento do coeficiente de variação

dados que o desvio padrão é praticamente constante. Esses comportamentos foram, praticamente, os mesmos observados para o sistema aberto.

As figuras 3.12 e 3.13 apresentam a comparação das curvas médias entre o sistema aberto e fechado para cada uma das fibras utilizadas.

Figura 3-12 – Curvas médias entre sistema aberto e fechado - Macrofibra1

Figura 3-13 – Curvas médias entre sistema aberto e fechado – Macrofibra2

3.2.3 Comparação entre ensaio de duplo puncionamento realizados em sistemas aberto e fechado

A fim de correlacionar o ensaio de duplo puncionamento em sistema aberto (EMIC) e sistema fechado (SHIMADZU), foram analisados: a extensão da instabilidade pós-fissuração (TCOD), as forças residuais para pequenos e grandes deslocamentos (regiões associadas ao ELS e ao ELU, respectivamente). Ou seja, forças residuais para valores de TCOD de 0,5; 1,5 e 3,0 mm ($F_{0,5}$; $F_{1,5}$; $F_{3,0}$), para as duas máquinas. Para esta análise foram utilizados dois critérios estatísticos: teste para igualdade de variâncias e teste t para comparação de duas médias.

3.2.3.1 Teste para igualdade de variância

Para verificar se as variâncias observadas entre as duas máquinas podem ser consideradas estatisticamente diferentes foram realizados dois testes: Múltipla Comparação e Levene. Em ambos os casos, a hipótese nula de que todas as variâncias são iguais foi testada ao nível de significância de 5%. Ou seja, era rejeitada a hipótese nula para valores de p menores que 0,05. A Tabela 3.8 sintetiza os resultados da análise estatística realizada para Macrofibra 1 e a Tabela 3.9 para Macrofibra 2.

Tabela 3.8 - Resultados dos testes de igualdade de variância – Macrofibra 1

Parâmetro avaliado	Hipótese nula	Valores de p		Resultado
		Múltiplas Comparações	Levene	
Extensão de instabilidade	Variâncias iguais	0,695	0,578	Não rejeita H_0
$F_{0,5}$		0,817	0,595	Não rejeita H_0
$F_{1,5}$		0,668	0,472	Não rejeita H_0
$F_{3,0}$		0,476	0,523	Não rejeita H_0

Tabela 3.9 - Resultados dos testes de igualdade de variância – Macrofibra 2

Parâmetro avaliado	Hipótese nula	Valores de p		Resultado
		Múltiplas Comparações	Levene	
Extensão de instabilidade	Variâncias iguais	0,798	0,998	Não rejeita H_0
$F_{0,5}$		0,264	0,267	Não rejeita H_0
$F_{1,5}$		0,787	0,951	Não rejeita H_0
$F_{3,0}$		0,994	0,799	Não rejeita H_0

Observa-se nas Tabelas 3.8 e 3.9 que para ambas macrofibras a extensão da instabilidade e as forças residuais $F_{0,5}$, $F_{1,5}$ e $F_{3,0}$ indicaram que não é possível rejeitar a hipótese de igualdade das variâncias para os dois sistemas, aberto e fechado. Visto que as variâncias de todos os parâmetros utilizados nos dois sistemas podem ser consideradas iguais foi realizado o teste t para comparação das médias.

3.2.3.2 Teste t para comparação de médias

A comparação das médias dos parâmetros obtidos com os dois sistemas, aberto e fechado, foi realizado através de um teste t para duas médias. Nesse teste, a hipótese nula é de que a diferença entre as duas médias é igual a zero. Essa hipótese foi testada ao nível de significância de 5%, ou seja, era rejeitada para valores de p menores que 0,05. A Tabela 3.10 sintetiza os resultados da análise estatística realizada para Macrofibra 1 e a Tabela 3.11 para Macrofibra 2.

Tabela 3.10 - Resultados do teste t para duas médias – Macrofibra 1

Parâmetro avaliado	Hipótese nula	Valores de p	Resultado
--------------------	---------------	--------------	-----------

Extensão de instabilidade		0,004	Rejeita H_0
$F_{0,5}$	A diferença das médias é igual a zero	0,005	Rejeita H_0
$F_{1,5}$		0,000	Rejeita H_0
$F_{3,0}$		0,520	Não rejeita H_0

Tabela 3.11 - Resultados do teste t para duas médias – Macrofibra 2

Parâmetro avaliado	Hipótese nula	Valores de p	Resultado
Extensão de instabilidade		0,000	Rejeita H_0
$F_{0,5}$	A diferença das médias é igual a zero	0,002	Rejeita H_0
$F_{1,5}$		0,000	Rejeita H_0
$F_{3,0}$		0,192	Não rejeita H_0

Analisando as Tabelas 3.10 e 3.11, verifica-se que os resultados do teste t indicaram que a extensão de instabilidade com o uso do ensaio em sistema aberto é significativamente maior do que a extensão de instabilidade com uso do ensaio em sistema fechado. A redução de instabilidade pós-fissuração em sistema fechado, por apresentar um maior controle, está associada a uma transferência mais suave de cargas da matriz para a fibra. Dessa maneira, a condição de ancoragem da fibra à matriz deve ter sido menos prejudicada do que quando comparado com sistema aberto, onde essa transferência acontece, não de uma forma suave e sim de forma abrupta. Consequentemente, as resistências residuais pós-fissuração no sistema aberto tendem a ser subestimadas quanto ao valor medido, devido a falta de controle nessa região.

Para as forças residuais $F_{0,5}$ e $F_{1,5}$, os resultados do teste t rejeitaram a hipótese de as médias dos dois sistemas serem igual a zero, confirmando que as forças residuais relacionadas a região associada ao ELS foram afetadas pelo tipo de sistema utilizado no ensaio de duplo puncionamento. Por outro lado, os valores médios muito reduzidos das forças residuais associadas a grandes níveis de TCOD para um mesmo nível de dispersão

dos resultados vão demonstrar que a condição de ancoragem já está tão comprometida que a instabilidade não faz mais diferença. Visto que para a força $F_{3,0}$ não foi possível rejeitar a hipótese de que as diferenças das médias sejam iguais a zero, portanto, não se pode afirmar que as forças residuais relacionadas a região associada ao ELU foram significativamente afetadas pelo tipo de sistema.

3.3 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

A partir dos resultados obtidos neste capítulo para os dois tipos de macrofibras poliméricas, foi possível concluir que, através dos testes estatísticos, o uso de uma máquina com sistema fechado e com as características (rigidez e frequência) da SHIMADZU com relação ao sistema aberto, apresentou uma redução da extensão de instabilidade na região pós-fissuração e resultou forças residuais estatisticamente diferentes para TCODs de 0,5 e 1,5 mm (região associada ao estado limite de serviço - ELS). Porém, os resultados estatísticos das forças residuais para TCOD de 3,0 mm (região associada ao estado limite último – ELU) não apresentaram essa diferença entre os dois sistemas.

Dado o exposto, pode-se concluir, até o momento, que para o controle de CRF com baixo teor de fibra para dois tipos de macrofibras diferentes, o uso do ensaio de duplo puncionamento em sistema aberto apresentou maior instabilidade pós-fissuração e apresentou valores de forças residuais (ELS) estatisticamente diferentes entre os sistemas aberto e fechado. Essa diferença pode estar associada a valores subestimados da determinação das forças residuais na região associada à condição de serviço, quando se utiliza o sistema aberto para controle. Já na determinação das forças residuais na região associada a maiores níveis de TCOD, os resultados não apresentaram diferença significativa.

É possível afirmar também que o uso de sistema aberto ou fechado não altera a variabilidade do ensaio, mas implica numa diferença nos valores

medidos em termos de resistência residual que podem levar à subestimação da capacidade resistente residual do CRF. O uso do sistema aberto por poder subestimar a resistência residual pode ser considerado como um ensaio de controle que fornece parâmetros a favor da segurança.

Após essa análise, o próximo capítulo desta pesquisa visa avaliar a metodologia do ensaio de duplo puncionamento em sistema fechado comparando dois sistemas de controle de deformação diferentes: por deslocamento da máquina e por deformação do corpo de prova através de cinta extensométrica. Pretende-se verificar qual a influência destes métodos na confiabilidade dos resultados.

4 AVALIAÇÃO DA METODOLOGIA DO ENSAIO DE DUPLO PUNCIONAMENTO EM SISTEMA FECHADO COM CONTROLE POR DESLOCAMENTO DA MÁQUINA E DEFORMAÇÃO DO CORPO DE PROVA

Através da avaliação do ensaio de duplo puncionamento em sistema aberto e sistema fechado foi possível verificar que para CRFs com baixo teor de fibra a diferença dos dois sistemas podem influenciar os resultados obtidos na fase pós-fissuração.

Porém, os ensaios de controle de CRF mesmo em sistema fechado podem ser controlados de duas formas diferentes: por deslocamento da máquina e por deformação do corpo de prova. De acordo com estudos como o de Bernard (2009), para ensaios de flexão, a diferença das formas de controle podem influenciar os resultados obtidos, quando utilizados CRFs com baixos teores de fibra. Portanto este capítulo se propõe a verificar essa influência quando este material é submetido ao ensaio de duplo puncionamento.

A seguir serão apresentados o programa experimental, os materiais e proporções utilizados, a preparação dos corpos de prova e metodologia de ensaio, resultados e conclusões deste capítulo.

4.1 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental deste trabalho se baseia na comparação dos resultados obtidos através do ensaio de duplo puncionamento realizado na máquina de ensaio universal servo eletro-hidráulica com sistema fechado da marca Shimadzu Modelo UH-2000kNXR que opera com uma frequência de 60Hz, para dois tipos de controle: por deslocamento da máquina e por deformação no corpo de prova.

Para isso, uma matriz de concreto, reforçada com baixo teor de fibra foi utilizada como compósito de referência para o estudo, dada a maior

susceptibilidade do mesmo a apresentar instabilidades. A seguir, serão descritos os materiais e proporções e a produção dos corpos de prova e métodos de ensaio utilizados neste programa experimental.

4.1.1 Materiais e proporções

Procurou-se adotar um traço do concreto e materiais constituintes o mais próximo possível das condições de uso em campo para uma obra de pavimentos. Assim, contou-se com o apoio da empresa Estrutural Concretos, da unidade de Perus-SP, que forneceu todos os materiais constituintes e o traço de referência para um f_{ck} de 35 MPa. Previamente à produção do concreto, os agregados foram quarteados para garantir maior homogeneidade para a produção dos concretos. Após o quarteamento, os agregados foram secos em estufa durante um período mínimo de 24 horas de modo a evitar a necessidade de ajustes na água de dosagem. A Tabela 4.1 resume os quantitativos do traço e tipifica cada um dos materiais utilizados na produção do concreto. As análises granulométricas fornecidas pela empresa como a carta de qualidade do cimento se encontram no Anexo I deste trabalho. Ressalte-se que a fibra de aço utilizada era do tipo A1, de acordo com a norma ABNT NBR 15530:07, ou seja, com ancoragens em gancho na sua extremidade. No caso específico, a fibra possuía um comprimento de 60 mm e fator de forma 80.

Tabela 4.1- Traço do concreto

Materiais	Quantidade (kg/m ³)	Tipo
Cimento	380	CPII-E-40
Areia Média	447	Quartzo
Areia Grossa	239	Artificial
Brita 1	1061	Granito
Água	192	Potável
Fibra	15	A1* 80/60

* Conforme a norma ABNT NBR 15530:07

O concreto foi misturado em betoneira estacionária de eixo inclinado no próprio laboratório da Escola Politécnica. Para garantia de condições de trabalhabilidade uniforme, foi adicionado 0,3% de aditivo polifuncional sobre o peso de cimento de modo a atingir um abatimento de tronco de cone (NM 67, 1998) de (100 ± 10) mm. As fibras foram adicionadas após a finalização da mistura da matriz e com a betoneira em movimento. Após a adição de toda a quantidade prevista de fibras para o traço, deu-se prosseguimento ao processo de mistura mantendo a betoneira em funcionamento por mais 5 minutos.

4.1.2 Produção dos corpos de prova e métodos de ensaio

Após a mistura foram moldados onze corpos de prova cilíndricos de 15 x 30 cm e dois 10 x 20 cm para caracterização da resistência à compressão (NBR 5739, 2007). Os onze foram cortados ao meio para realização dos ensaios de duplo puncionamento, o que resultou em vinte e dois cilindros de 15 x 15 cm (Figura 4.1). Todos os ensaios foram realizados quando a idade do concreto atingiu 35 dias.

Figura 4-1 – Corpos de prova moldados e serrados

Fonte: Do autor.

Ensaio de duplo puncionamento

Os corpos de prova foram moldados com dimensões de acordo com a norma AENOR UNE 83515 (2010) que são de 150 x 150 mm. Portanto, foram utilizados discos de carga com diâmetro de 37,5 mm e altura de 30 mm.

No primeiro procedimento de ensaio adotou-se uma velocidade de deslocamento da máquina de ensaio de 0,5 mm/min. Os resultados aqusitados foram as forças aplicadas e os seus respectivos deslocamentos verticais. Como o ensaio era concluído quando o deslocamento da máquina atingia o valor de 7 mm, resultando num tempo de ensaio de 14 minutos. Os valores de deslocamento vertical foram então convertidos para TCOD utilizando as equações 1, 2 e 3 apresentadas no capítulo 2, a Tabela 4.2 apresenta os parâmetros utilizados.

Tabela 4.2 - Parâmetros utilizados na conversão analítica do deslocamento vertical da máquina para TCOD

Parâmetros					
n	a (mm)	l (mm)	F (N)	$F_{cr}; \delta_{cr}$ (N; mm)	$F_{R,0}; \delta_{R,0}$ (N; mm)
3					força e
considerando			força no	força e	deslocamento
a hipótese de	37,5	40,21	ponto	deslocamento	no ponto de
modo de			calculado	no ponto da	início da
ruptura em				força máxima	resistência
três planos					residual

Para o outro tipo de controle foi realizado o ensaio de duplo puncionamento tradicional com a utilização de uma cinta extensométrica, conforme o preconizado pela norma AENOR UNE 83515 (2010). Ou seja, o controle da velocidade de ensaio foi feito a partir da deformação lida no extensômetro eletrônico acoplado à mesma. Esse procedimento difere do preconizado pela norma AENOR UNE 83515 (2010), pois o uso da cinta extensométrica é indicado apenas como dispositivo de medida da variação no perímetro e não para o controle da velocidade do ensaio. Porém, no caso específico do

procedimento de ensaio adotado no presente estudo, impôs-se o controle da velocidade de ensaio através de um sistema fechado vinculado à medida da deformação circunferencial.

Conforme comentado anteriormente, a norma espanhola fixa a velocidade de ensaio em $0,5 \pm 0,05$ mm/m, medida em termos de deslocamento do equipamento, e não determina uma correspondência à deformação perimetral. Sendo assim, o primeiro passo adotado para a definição do procedimento experimental foi a determinação de uma velocidade de ensaio equivalente para o controle por deformação do corpo de prova. Nesse sentido, foram realizados quatro testes piloto previamente, variando-se a velocidade de ensaio em termos de TCOD de modo a encontrar uma taxa equivalente de deslocamento vertical da máquina.

4.1.3 Compatibilização de velocidades

Para a implementação do ensaio de duplo puncionamento com controle por deformação do corpo de prova (abertura de fissura – TCOD) foi necessário estabelecer uma velocidade de controle para o mesmo. Em vista disso, foi realizado um estudo para garantir a compatibilidade de velocidades através de quatro testes, avaliando o nível de instabilidade na região pós-fissuração e o tempo necessário para a realização do ensaio.

Para o Teste I, foi estabelecida a velocidade de 0,02 mm/min por abertura de fissura (TCOD), que é equivalente a velocidade de $(0,5 \pm 0,05)$ mm/m por deslocamento vertical da máquina, proposta na norma para o sistema aberto. Porém, apesar de apresentar uma redução da instabilidade na região pós-fissuração, o ensaio teve duração de 30 minutos até atingir a abertura de fissura de 0,56 mm (Tabela 4.3), sendo que durante a realização do ensaio de duplo puncionamento com controle por deslocamento da máquina consome-se um tempo de aproximadamente 14 minutos para atingir aproximadamente 4 mm da abertura de fissura.

Tabela 4.3 - BCN (controle por TCOD) – Teste I

Velocidade média TCOD	Velocidade média DESLOCAMENTO	Tempo de ensaio	TCOD - Limite
0,02 (mm/min)	0,5 (mm/min)	30 (min)	0,56 (mm)

Para o Teste II a velocidade do ensaio foi aumentada em 5 vezes, atingindo 0,1 mm/min, mas o tempo de ensaio observado foi de 36 minutos (Tabela 4.4), mais do que o dobro do tempo de ensaio com o sistema aberto.

Tabela 4.4 - BCN (controle por TCOD) – Teste II

Velocidade média TCOD	Velocidade média DESLOCAMENTO	Tempo de ensaio	TCOD - Limite
0,1 (mm/min)	0,15 (mm/min)	36 (min)	3,6 (mm)

Buscando compatibilizar os tempos de ensaio foi realizado um Teste III (Tabela 4.5), sendo propostas duas velocidades: 0,02 mm/min para o trecho correspondente à variação de TCOD de 0 mm até 0,1 mm e 0,3 mm/min para o trecho acima de 0,1 mm indo até o nível máximo de 3,6 mm para o TCOD. Contudo, apesar de apresentar um tempo de ensaio de 12 minutos, este ensaio resultou em elevada instabilidade na região pós-fissuração compreendida no primeiro trecho de TCOD (entre 0 e 0,5 mm).

Tabela 4.5 – BCN (controle por TCOD) – Teste III

Velocidade média TCOD	Velocidade média DESLOCAMENTO	Tempo de ensaio	TCOD - Limite
Até 0,1 mm - 0,02 (mm/min)	0,5 (mm/min)	12 (min)	3,6 (mm)
Entre 0,1 mm e 3,6 mm - 0,3 (mm/min)			

Optou-se por aumentar um pouco o tempo de ensaio para reduzir a instabilidade pós-fissuração e, para o Teste IV (Tabela 4.6), as velocidades foram de 0,05 mm/min até 0,5 mm e de 0,3 mm/min até 3,6 mm.

Tabela 4.6 – BCN (controle por TCOD) – Teste IV

Velocidade média TCOD	Velocidade média DESLOCAMENTO	Tempo de ensaio	TCOD - Limite
Até 0,5 mm - 0,05 (mm/min)	0,27 (mm/min)	20 (min)	3,6 (mm)
Entre 0,5 mm e 3,6 mm - 0,3 (mm/min)			

O resultado da Tabela 4.6 mostra que o Teste IV apresentou um tempo para realização do ensaio de 20 minutos, aumentando em 6 minutos o tempo de ensaio em relação ao ensaio controlado por deslocamento da máquina. Percebeu-se que a eliminação completa da instabilidade não era possível para o tipo de máquina de ensaio utilizada, pois por menor que fosse a velocidade utilizada a condicionante era a capacidade de controle do sistema da máquina. Para os ensaios de duplo puncionamento com controle por TCOD foram então adotadas as velocidades do Teste IV.

4.2 RESULTADOS

Serão apresentados os resultados e análises: da determinação da resistência à compressão, da força de fissuração e das forças resistentes residuais do ensaio de duplo puncionamento em sistema fechado para os dois controles de velocidade.

4.2.1 Resistência à compressão

O resultado médio da resistência à compressão, com idade de 35 dias, foi de 48,3 MPa, com desvio padrão de 3,1 MPa. Dado que o f_{ck} previsto era de 35 MPa aos 28 dias. Pode ser então considerado que o mesmo foi atendido e que a introdução das fibras não resultou em qualquer prejuízo na

compactação desse concreto que pudesse resultar queda na sua resistência mecânica.

4.2.2 Ensaio de duplo puncionamento com sistema de controle por deslocamento da máquina

A Figura 4.2 apresenta as curvas de força (kN) versus deslocamento vertical (mm) obtidas com o ensaio de dez corpos de prova submetidos ao ensaio de duplo puncionamento com controle por deslocamento da máquina. Note-se que os mesmos já se encontram apresentados de maneira a alinhar as forças de fissuração ao valor zero de TCOD conforme o procedimento normalmente utilizado para a análise (PUJADAS et al., 2013). Dessa maneira, é possível caracterizar as forças de maneira vinculada ao deslocamento de referência no trecho pós-fissuração, ou seja, após a força de fissuração.

Figura 4-2 - Curvas de força versus deslocamento vertical com controle por deslocamento da máquina

Observam-se na Figura 4.2 que as curvas apresentaram um padrão de comportamento pós-fissuração, correspondente à resistência residual, bem uniforme e, conseqüentemente, bastante semelhante entre os corpos de prova avaliados. Percebe-se que, após a força de fissuração, ocorre uma queda abrupta na resistência. Esta queda pode estar associada à instabilidade pós-fissuração, a qual seria identificada através da ocorrência de um maior afastamento dos pontos adquiridos no ensaio (MONTE et al., 2014). No entanto, não foi possível realizar a identificação da instabilidade através desse afastamento dos pontos deste gráfico específico. Isto fica melhor identificado na Figura 4.3 que apresenta a conversão analítica dos valores de deslocamento vertical para abertura de fissura diametral (TCOD) no trecho pós-fissuração.

Figura 4-3 - Curvas de força versus TCOD com controle por deslocamento da máquina

Os resultados do gráfico da Figura 4.3 permitem visualizar a região de instabilidade, identificada pelo maior afastamento entre os pontos dos gráficos que ocorre no trecho logo após a ruptura da matriz. Neste caso específico, a instabilidade ocorreu para valores de TCOD inferiores a 0,5 mm.

Para a análise comparativa das resistências residuais, optou-se por adotar dois níveis de referência para o TCOD: 0,5 e 3,0 mm. Estes dois níveis de deslocamento estão associados a dois níveis de abertura de fissura, sendo um mais baixo e outro elevado que podem ser associados ao Estado Limite de Serviço (ELS) e ao Estado Limite Último (ELU), respectivamente. Os resultados médios obtidos e as suas dispersões estão apresentados na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 - Médias e coeficiente de variação das forças de fissuração e residuais para controle por deslocamento da máquina

TCOD (mm)	Forças		
	Média (kN)	Desvio padrão (kN)	Coeficiente de variação (%)
0	122,1	6,07	5
0,5	87,0	12,97	15
3,0	22,5	6,33	28

Analisando a Tabela 4.7 verifica-se que o nível de variabilidade da força de fissuração foi inferior à encontrada para as forças residuais. A maior variabilidade observada para o comportamento residual do CRF pode ser justificada pelo fato de depender da quantidade de fibras presentes na seção de ruptura, especialmente quando são utilizadas fibras de aço (SALVADOR; FIGUEIREDO, 2013). Além disso, o valor da força média residual correspondente a 3,0 mm de TCOD é reduzido, fazendo com que haja um aumento do coeficiente de variação dado que o nível do desvio padrão é praticamente constante.

4.2.3 Ensaios de duplo puncionamento – controle por deformação do corpo de prova (TCOD)

A Figura 4.4 apresenta as curvas de força (kN) versus deslocamento vertical (mm) de dez corpos de prova do ensaio de duplo puncionamento realizados com sistema de controle por deformação do corpo de prova (TCOD).

Figura.4-4 - Curvas de força versus deslocamento vertical com controle por TCOD

Percebe-se na Figura 4.4 que o padrão de comportamento pós-fissuração apresentado nas curvas foi semelhante entre os corpos de prova avaliados. A região imediatamente após a força de fissuração é de difícil visualização nesse gráfico. Nos ensaios realizados com sistema de controle fechado foi utilizada a cinta extensométrica e a medida da abertura de fissura diametral (TCOD) foi quantificada diretamente, sem necessidade de realizar a conversão dos valores como ocorreu para o caso anterior. A Figura 4.5 apresenta as curvas de força (kN) versus TCOD (mm) dos dez corpos de prova ensaiados.

Figura 4-5- Curvas de força versus TCOD com controle por TCOD

As curvas apresentadas na Figura 4.5 apresentaram, na região pós-fissuração, a formação de “laços”, que podem estar relacionados à baixa capacidade de resposta do sistema de controle da máquina de ensaio utilizada em função da sua baixa taxa de aquisição de dados. Com isso, como a velocidade de processamento dos dados não foi alta o suficiente, a máquina gerava estes retornos de deslocamento de modo a garantir uma velocidade média de deformação no corpo de prova constante para todo o ensaio, quando o ideal seria mantê-la com o mínimo de variação ao longo de todo o ensaio. A recuperação do carregamento ocorria então com a própria recuperação elástica da deformação das fibras que atuavam como ponte de transferência de cargas pelas fissuras formadas. Ainda assim, percebe-se uma redução na extensão da instabilidade quando comparado com o sistema aberto. Ou seja, a distância de separação dos pontos consecutivos do gráfico volta a ser reduzida ao final da região de instabilidade. A Tabela 4.8 apresenta os resultados médios e desvios padrão da extensão da instabilidade para os sistemas de controle por deslocamento da máquina e por TCOD.

Tabela 4.8 - Médias e desvios padrão da extensão da instabilidade para os sistemas de controle utilizados.

Sistema de Controle	Extensão da Instabilidade no TCOD (mm)	
	Média	Desvio Padrão
Deslocamento da máquina	0,35	0,15
TCOD	0,14	0,08

Observa-se na Tabela 4.8 que a extensão da instabilidade reduziu, em média, 60% quando o controle da velocidade foi realizado através da deformação do corpo de prova (TCOD). A análise comparativa das resistências de fissuração e residuais para valores de TCOD iguais a 0,5 mm e 3,0 mm para os ensaios realizados com sistema de controle por TCOD estão apresentados na Tabela 4.9.

Tabela 4.9 - Médias e variabilidade das forças de fissuração e residuais para o sistema de controle por TCOD

TCOD (mm)	Forças		
	Médias (kN)	Desvio padrão (kN)	Coefficiente de variação (%)
0	120,4	8,4	7
0,5	86,9	7,0	8
3,0	27,1	4,0	15

Analisando a Tabela 4.9 verifica-se que o coeficiente de variação das forças de fissuração e residuais foram inferiores aos observados para o controle por deslocamento da máquina (mostrados na Tabela 4.3). Porém, em relação às médias os resultados dos dois tipos de controle foram próximos, o que será melhor discutido no item seguinte.

4.2.4 Comparação entre ensaios de duplo puncionamento com controle por deslocamento da máquina e por TCOD

A fim de correlacionar o ensaio de duplo puncionamento com controle por deslocamento da máquina e por TCOD, foram analisados: a extensão da instabilidade pós-fissuração (TCOD), as forças residuais para pequenos deslocamentos (região associada ao ELS) e maiores deslocamentos (região correlacionável com o ELU), ou seja, forças residuais para valores de TCOD de 0,5 e 3,0 mm ($F_{0,5}$; $F_{3,0}$), para os dois sistemas. Para esta análise foram utilizados dois critérios estatísticos para testar a igualdade de variâncias e um teste t para comparação de duas médias.

4.2.5.1 Testes para igualdade de variância

Para verificar se as variâncias observadas entre os dois sistemas de controle podem ser consideradas estatisticamente diferentes foram realizados dois testes: Múltipla Comparação e Levene. Em ambos os casos, a hipótese nula de que todas as variâncias são iguais foi testada ao nível de significância de 5%. Ou seja, era rejeitada a hipótese nula para valores de p menores que 0,05. A Tabela 4.10 sintetiza os resultados da análise estatística realizada.

Tabela 4.10 - Resultados dos testes de igualdade de variância

Parâmetro avaliado	Hipótese nula	Valores de p		Resultado
		Múltiplas Comparações	Levene	
Extensão de instabilidade	Variâncias	0,018	0,005	Rejeita H_0
$F_{0,5}$	iguais	0,109	0,184	Não rejeita H_0
$F_{3,0}$		0,252	0,255	Não rejeita H_0

Observa-se na Tabela 4.10 que para extensão da instabilidade ambos os testes indicaram a rejeição da hipótese de igualdade das variâncias. Com isso, as variâncias da extensão da instabilidade dos dois sistemas de

controle não podem ser consideradas iguais e a variância observada para a extensão da instabilidade no sistema de controle por deslocamento da vertical da máquina foi significativamente maior que a observada no sistema de controle por TCOD. No que se refere às forças residuais $P_{0,5}$ e $P_{3,0}$, os resultados de ambos os testes não rejeitaram a hipótese de igualdade das médias. Contudo, a avaliação descritiva das Tabelas 4.3 e 4.9 indicam que, para a resistência residual $F_{0,5}$, a média é praticamente igual e o desvio padrão o dobro quando o sistema de controle aberto é utilizado. Os testes estatísticos não conseguiram identificar essa diferença, pois a distribuição dos resultados foi semelhante, apresentando-se apenas mais achatada (curtose negativa) para os resultados do sistema de controle por deslocamento da máquina. A Figura 4.6 ilustra a forma de distribuição dos resultados obtidos.

Figura 4-6 - Histogramas de distribuição das forças residuais para os sistemas de controle por deslocamento da máquina e por TCOD

4.2.5.2 Teste t para comparação de médias

A comparação das médias dos parâmetros obtidos para os dois controles foi feita através de um teste t para duas médias. Nesse teste, a hipótese nula é de que a diferença entre as duas médias é igual a zero. Essa hipótese foi testada ao nível de significância de 5%, ou seja, era rejeitada para valores de p menores que 0,05. A Tabela 4.11 sintetiza os resultados da análise estatística realizada.

Tabela 4.11 - Resultados do teste t para duas médias

Parâmetro	Hipótese nula	Valores de p	Resultado
Extensão de instabilidade	A diferença das médias é igual a zero	0,002	Rejeita H_0
$F_{0,5}$		0,979	Não rejeita H_0
$F_{3,0}$		0,069	Não rejeita H_0

Analisando a Tabela 4.11, verifica-se que os resultados do teste t indicaram que a extensão de instabilidade com o uso do controle por deslocamento da máquina é significativamente maior que com uso do controle por TCOD. Para as forças residuais $F_{0,5}$ e $F_{3,0}$, não foi possível rejeitar a hipótese de que as diferenças das médias sejam iguais a zero. Portanto, não se pode afirmar que as forças residuais foram significativamente afetadas pelo tipo de sistema de controle utilizado.

4.3 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

A partir dos resultados obtidos neste capítulo foi possível concluir que:

- Para implementação do ensaio de duplo puncionamento em sistema fechado com controle de velocidade por deformação do corpo de prova (TCOD) é necessário compatibilizar a velocidade de controle, visando uma redução da instabilidade na região pós-fissuração e um tempo de ensaio viável para implementação em laboratórios;
- O ensaio de duplo puncionamento em sistema fechado com controle de velocidade por TCOD, utilizando as velocidades adotadas neste estudo, apresentou uma redução da instabilidade na região pós-fissuração. Porém, os resultados apresentaram a formação de “laços” devido à dificuldade de controle da velocidade pela máquina. Portanto, a qualidade da resposta em ensaios realizados com sistema fechado pode depender significativamente da capacidade da máquina

de ensaio no processamento dos dados para utilização como variável de controle da velocidade;

- Através dos testes estatísticos, foi possível concluir que o uso do sistema de controle por TCOD reduziu a extensão da instabilidade na região pós-fissuração, mas não resultaram forças residuais estatisticamente diferentes das obtidas com controle por deslocamento da máquina.

Portanto, o ensaio de duplo puncionamento em sistema fechado com controle por deslocamento da máquina, apesar de apresentar maior instabilidade pós-fissuração, não resultou em comprometimento para a determinação precisa tanto das forças residuais na região associada à condição de serviço como para o caso daquelas associadas à região de pré-ruptura. Dessa forma, não se pode afirmar que o uso de um sistema fechado de deslocamento seja essencial para se garantir a confiabilidade da determinação das forças resistentes residuais.

5 INFLUÊNCIA DA INSTABILIDADE PÓS-FISSURAÇÃO NA DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA RESIDUAL NO ENSAIO DE DUPLO PUNCIONAMENTO

Através dos capítulos 3 e 4 foi possível concluir que, para o ensaio de duplo puncionamento, os diferentes sistemas de controle influenciam a incidência da instabilidade pós-fissuração e algumas medidas de comportamento pós-fissuração, mas não todos os parâmetros.

Atualmente, no Brasil, além das orientações do fib Model Code (FIB, 2013), já existem práticas recomendadas publicadas pelo comitê técnico CT303-IBRACON/ABECE tanto para orientações de projeto como para controle de materiais. Esse comitê cita o ensaio de duplo puncionamento realizado com controle por deslocamento da máquina (EDP) em seu texto base como método de controle do CRF (IBRACON/ABECE, 2017). Este método propõem a força residual $P_{0,5}$, determinada a 0,5 mm do deslocamento vertical da máquina, após a força de fissuração da matriz (F_{cr}), como um parâmetro de caracterização da resistência residual associado ao estado limite de serviço, devido ao menor nível de fissuração (IBRACON/ABECE, 2017).

Sendo assim, este capítulo visa avaliar a extensão de instabilidade no ensaio de duplo puncionamento e verificar sua influência sobre a resistência residual medida logo após a fissuração da matriz, através do parâmetro da medida da força residual ($P_{0,5}$).

A seguir serão apresentados a metodologia, resultados e conclusões deste capítulo.

5.1 METODOLOGIA

A metodologia utilizada neste capítulo foi conduzida no laboratório de materiais, componentes e processos de construção da Escola Politécnica da

Universidade de São Paulo (USP, Brasil) e contém duas partes. A primeira parte compreende uma análise teórica dos dados históricos do EDP realizados em equipamentos em sistemas aberto e fechado com CRFs variados. Esta parte teve como objetivo avaliar a extensão da instabilidade pós-fissuração e verificar se a determinação da força residual $P_{0,5}$ é comprometida por essa região de instabilidade. A segunda parte concentrou-se na análise experimental da influência do sistema de controle (aberto e fechado) na resposta pós-fissuração para um determinado compósito. A Figura 5.1 apresenta o esquema adotado para o estudo. As descrições do ensaio de duplo puncionamento e da instabilidade pós-fissuração são apresentadas posteriormente.

Figura 5-1 – Esquema da metodologia utilizada neste capítulo

Ensaio de duplo puncionamento

O ensaio de duplo puncionamento, normalizado por AENOR UNE 83515, utilizado neste capítulo é o mesmo descrito no capítulo 2 e utilizado no capítulo 3. Realizado em corpos de prova cilíndricos, cujos diâmetros são 100 ou 150 mm, com proporções de diâmetro/altura iguais a 1. A carga é aplicada a uma taxa de deslocamento constante igual a 0,50 mm/min, até que o deslocamento vertical de 7,0 mm seja atingido. E a curva de força-deslocamento típica obtida no ensaio é apresentada na Figura 5.2.

Figura 5-2 – Curva típica de força-deslocamento

A parte inicial da curva (0-0,6 mm, aproximadamente) corresponde à acomodação do corpo de prova no equipamento e não é considerada para a avaliação do material. Depois disso, o carregamento efetivo do corpo de prova começa, até que a força de fissuração (F_{cr}) seja atingida. O valor de F_{cr} é o primeiro parâmetro de caracterização do CRF obtido pelo EDP. Neste ponto, as fissuras da matriz geram uma transferência de forças para as fibras e o comportamento residual do material pode ser então caracterizado. A força residual $P_{0,5}$ pode ser associada ao estado limite de serviço do compósito e é determinada quando é atingido o deslocamento vertical de 0,5 mm na parte pós-fissuração da curva (GALOBARDES; FIGUEIREDO, 2015;

GALEOTE et al, 2017). É o parâmetro mais crítico a ser obtido, pois é aquele que ocorre logo após se atingir a carga de pico (associada a F_{cr} quando o teor de fibras é baixo e o CRF apresenta comportamento de softening) e pode estar sujeito à instabilidade pós-fissuração.

Os ensaios foram realizados nas duas máquinas de ensaios com sistemas de controle aberto e fechado já utilizado nos capítulos anteriores. Sendo uma delas uma máquina de teste universal eletromecânica com sistema aberto, da EMIC, modelo DL10000, com capacidade igual a 100 kN e tenacidade igual a 42 kN/mm. E a outra uma máquina servo-hidráulica com sistema fechado, SHIMADZU, modelo UH-2000kNXR.

Instabilidade pós-fissuração

Para determinar a extensão da instabilidade pós-fissuração, assim como nos capítulos 3 e 4, foi necessário converter os valores de deslocamento vertical para abertura de fissura (TCOD), conforme ilustrado na Figura 5.3. Para essa conversão, foram utilizadas as equações 1, 2 e 3 apresentadas no capítulo 2. Os parâmetros utilizados nas equações são os mesmos do capítulo 3 (Tabela 3.2), para os corpos de prova de 100 mm, e os mesmos do capítulo 4 (Tabela 4.2), para os corpos de prova de 150 mm.

Figura 5-3 – Curvas da conversão do deslocamento vertical em TCOD para obtenção da extensão da instabilidade

5.2 PARTE 1: ANÁLISE DOS DADOS HISTÓRICOS

5.2.1 Metodologia da análise

A parte 1 consistiu em determinar a extensão da instabilidade pós-fissuração no ensaio de duplo puncionamento, a fim de verificar se compromete a determinação da força residual $P_{0,5}$, determinada quando o deslocamento vertical é de 0,5 mm após a força de fissuração. Um total de 135 curvas de força-deslocamento foram coletadas e analisadas a partir de estudos prévios realizados no laboratório da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. O deslocamento vertical obtido nas curvas foi convertido analiticamente para abertura de fissura (TCOD) para determinar a abertura de fissura quando $P_{0,5}$. Os testes foram realizados em máquinas com sistemas aberto e fechado, permitindo comparar o efeito dessa variável. A Tabela 5.1 apresenta os CRFs utilizados nesta primeira parte do estudo. Os resultados não publicados referem-se a programas experimentais realizados por alunos de graduação. Corpos de prova cujos diâmetros de 100 mm foram extraídos de vigas prismáticos medindo 150 mm x 150 mm x 550 mm (altura x largura x comprimento). Corpos de prova cujos diâmetros de 150 mm foram obtidos a partir do corte de cilindros medindo 150 mm x 300 mm (diâmetro x altura). Ambas as amostras foram ensaiadas em máquinas de sistema aberto e fechado.

Tabela 5.1 – Corpos de provas utilizados na parte 1

Diâmetro (mm)	Matriz	Fibra				Referência
	f_{ck} (MPa)	Material	Comprimento (mm)	Fator de forma	Teor (kg/m ³)	
150	45	Polipropileno	-	-	5; 7; 10	Não publicado
150	45	Aço	60	80	20; 30; 45	Não publicado
150	35	Aço	60	80	15; 30; 55	NOGUEIRA et al., 2017
150	40	Aço	33	40	15; 30	Não publicado
150	45	Polipropileno	48	-	3,5	Não publicado
150	45	Vidro	43	59	3,8; 7,6; 11,5	MANZONI et al., 2018
100	35	Polipropileno	54	115	2,5	SIMÃO et al., 2017
100	35	Polipropileno	48	61	2,5	SIMÃO et al., 2017
100	30	Aço	60	80	20; 35; 55	Não publicado
100	30	Aço	60	80	20; 35; 55	Não publicado
100	30	Aço	30	45	30; 47	Não publicado
100	30	Polipropileno	54	180	5,5	Não publicado
100	30	Aço	30	45	30	Não publicado
		Polipropileno	54	180	1,8	
100	30	Aço	30	45	30	Não publicado
		Polipropileno	54	180	9,1	

5.2.2 Análise dos resultados

5.2.2.1 Resultados obtidos em sistema aberto

Para analisar a influência da extensão da instabilidade na força residual $P_{0,5}$, comparou-se a abertura de fissura (TCOD) no final da instabilidade e a abertura de fissura para a força residual $P_{0,5}$. A Figura 5.4 apresenta as correlações obtidas entre os resultados de TCOD (mm) versus $P_{0,5}/F_{cr}$ (kN/kN). A curva tracejada representa a extensão da instabilidade e a curva contínua representa a abertura de fissura para $P_{0,5}$. Cada ponto experimental representa um CRF.

Figura 5-4 - TCOD versus $P_{0,5}/F_{cr}$ para sistema aberto

Os valores de abertura de fissura para a determinação de $P_{0,5}$ são sempre maiores do que os valores correspondentes à extensão da instabilidade para as condições analisadas. Isso indica que $P_{0,5}$ é determinado a partir de valores de abertura de fissura que se encontram fora da região de instabilidade do ensaio. Quando a relação $P_{0,5}/F_{cr}$ se aproxima de 0,1 e 1, os valores de abertura de fissura tanto para $P_{0,5}$ quanto para a extensão da instabilidade foram acima de 2,0 mm e abaixo de 0,5 mm, respectivamente. Entretanto, quando a relação de $P_{0,5}/F_{cr}$ é maior do que 0,6, a abertura de

fissura tanto para $P_{0,5}$ quanto para a extensão da instabilidade não é influenciada significativamente (os valores da abertura de fissura entre 0,7 e 0,9 mm), isto é, o nível da instabilidade é muito baixo. Os resultados confirmam que a instabilidade é inversamente proporcional a relação entre resistência residual do compósito e a força da matriz (BANTHIA; DUBEY, 1999; BANTHIA; MINDESS; JIANG, 2012).

A redução da extensão de instabilidade com a aproximação de $P_{0,5}/F_{cr}$ do valor 1 é coerente porque indica que a transferência de carga da matriz para a fibra ocorre de maneira mais suave e que a fibra, em maior quantidade, consegue responder ao carregamento de maneira mais rápida e sem escorregamentos. Os escorregamentos das fibras é que geram a maior extensão de instabilidade e a perda de resistência residual.

5.2.2.2 Resultados obtidos em sistema fechado

Essa análise foi feita de forma semelhante à anterior. A Figura 5.5 apresenta as correlações obtidas entre os resultados de TCOD (mm) versus $P_{0,5}/F_{cr}$ (kN/kN), onde a curva tracejada representa a extensão da instabilidade e a curva contínua representa a abertura da fenda para $P_{0,5}$.

Figura 5-5 - TCOD versus $P_{0,5}/F_{cr}$ para sistema fechado

A extensão da instabilidade é significativamente reduzida quando a máquina com sistema fechado é empregada. Comparando-se as Figuras 5.4 e 5.5, é possível observar que $P_{0,5}$ e a extensão da instabilidade estão associadas a menores aberturas de fissura (TCOD) para o ensaio em sistema fechado. O sistema fechado já garante uma maior “suavização” desta transferência de carga, diminuindo assim a extensão de instabilidade e minimizando o “prejuízo” de resistência residual do CRF com baixos teores de fibras ou baixa relação $P_{0,5}/F_{cr}$. Embora a magnitude da instabilidade seja menor, ela não é completamente eliminada quando ocorre o feedback de deslocamento vertical. Uma solução possível seria usar a deformação da amostra como um parâmetro do gabarito para a aplicação da carga.

A Figura 5.6 ilustra a diferença entre as aberturas de fissura para $P_{0,5}$ ($\Delta TCOD_{0,5}$) determinadas em máquinas de sistema aberto e fechado, que varia de acordo com a relação $P_{0,5}/F_{cr}$. A diferença excede 1 mm quando a relação de $P_{0,5}/F_{cr}$ se aproxima de 0,1. Portanto, quanto maior a distância entre a força de fissuração e a força residual em 0,5 mm, maior o TCOD associado à força $P_{0,5}$. Isso pode ser considerado uma limitação do método de ensaio, especialmente para a parametrização do comportamento pós-fissuração e para o estabelecimento de equações constitutivas. No entanto, o uso do ensaio de duplo puncionamento como ensaio de controle pode ser viável se a resposta pós-fissuração for estabelecida em função do deslocamento vertical e se estiverem correlacionadas com os ensaios de flexão de 3 pontos. Nesse sentido, é necessário verificar a confiabilidade da determinação de $P_{0,5}$ em função do sistema de controle do equipamento, que foi o objetivo do programa experimental (parte 2) realizado neste estudo.

Figura 5-6 – Diferença entre TCO_D determinado nos ensaios em sistema aberto e fechado em função de $P_{0,5}/F_{cr}$

5.3 PARTE 2: PROGRAMA EXPERIMENTAL

5.3.1 Metodologia da análise

A parte 2 consistiu na avaliação do comportamento mecânico de corpos de prova cilíndricos de CRF através do ensaio de duplo puncionamento realizado em máquinas de sistemas aberto e fechado. Uma matriz de concreto com f_{ck} igual a 35 MPa foi produzida e duas fibras diferentes foram empregadas (Tabela 5.2). A fibra de aço foi utilizada em 10 kg/m³ (0,13%), 30 kg/m³ (0,39%) e 50 kg/m³ (0,65%) e uma fibra de polipropileno em 2 kg/m³ (0,22%), 4 kg/m³ (0,44%) e 6 kg/m³ (0,66%). Para cada tipo de fibra e conteúdo, foram produzidos dezesseis corpos de prova medindo 100 mm de diâmetro. Oito deles foram ensaiados na máquina com sistema aberto e os outros oito na máquina com sistema fechado.

Tabela 5.2 – Características das fibras apresentadas pelos fornecedores

Material	Resistência à tração (MPa)	Teor (kg/m ³)	Diâmetro (mm)	Comprimento (mm)	Geometria
Aço	1100	10; 30; 50	0,75	33	Ancoragem em gancho
Polipropileno	700	2; 4; 6	0,34	54	Monofilamento

5.3.2 Análise dos resultados

As Figuras 5.7 e 5.8 mostram as curvas médias de força versus deslocamento vertical obtidas com CRFs contendo 2 e 6 kg/m³ de fibras de polipropileno, respectivamente. As Figuras 5.9 e 5.10 apresentam os resultados obtidos com CRFs contendo 10 e 50 kg/m³ de fibras de aço, respectivamente. Em ambos os casos, as curvas obtidas em máquinas com sistemas aberto e fechado são apresentadas. Nestes números, a instabilidade é identificada por uma queda abrupta na capacidade de carga do corpo de prova logo após a fissuração, o que é mais evidente quando a máquina de sistema aberto é utilizada.

Figura 5-7 – Curvas média da força versus deslocamento vertical de CRF com 2kg/m^3

Figura 5-8 – Curvas média da força versus deslocamento vertical de CRF com 6kg/m^3

Figura 5-9 – Curvas média da força versus deslocamento vertical de CRF com 10kg/m³

Figura 5-10 - Curvas média da força versus deslocamento vertical de CRF com 50kg/m³

A extensão da instabilidade pós-fissuração (TCOD) e a força residual $P_{0,5}$ obtidas com ambas as máquinas foram comparadas estatisticamente para verificar se os sistemas de controle dos equipamentos influenciam os resultados derivados das curvas de deslocamento de carga. Os valores médios foram comparados por um teste t, com nível de significância de 5%. A hipótese nula é que os valores médios são iguais, e é rejeitado para valores de p abaixo de 0,5. A Tabela 5.3 e a Tabela 5.4 resumem os resultados obtidos para a extensão da instabilidade e $P_{0,5}$, respectivamente.

Tabela 5.3 – Resultados médios da extensão da instabilidade para sistemas aberto e fechado utilizando Teste T

Fibra	Teor (kg/m ³)	Extensão da instabilidade (mm)		p-valor	Resultado
		Sistema aberto	Sistema fechado		
Polipropileno	2	1,96	1,02	0,000	Rejeita H_0
	4	1,33	0,88	0,016	Rejeita H_0
	6	1,23	0,61	0,030	Rejeita H_0
Aço	10	2,24	1,17	0,001	Rejeita H_0
	30	1,11	0,48	0,027	Rejeita H_0
	50	1,15	0,45	0,004	Rejeita H_0

Tabela 5.4 – Resultados médios da força residual $P_{0,5}$ para sistemas aberto e fechado utilizando Teste T

Fibra	Teor (kg/m ³)	$P_{0,5}$ (kN)		p-valor	Resultado
		Sistema aberto	Sistema fechado		
Polipropileno	2	8,9	8,2	0,666	Não rejeita H_0
	4	13,6	13,9	0,815	Não rejeita H_0
	6	17,0	20,2	0,165	Não rejeita H_0
Aço	10	5,2	8,1	0,134	Não rejeita H_0
	30	15,3	18,4	0,203	Não rejeita H_0
	50	17,9	24,3	0,092	Não rejeita H_0

Analisando a Tabela 5.3, pode-se verificar que a extensão da instabilidade é significativamente maior quando a máquina com sistema aberto é empregada. No entanto, não é possível rejeitar a hipótese de que as diferenças em $P_{0,5}$ são iguais a zero, conforme apresentado na Tabela 5.4, mesmo com os valores médios do sistema fechado estarem acima dos

obtidos pelo sistema aberto como bem evidente nos resultados obtidos para as fibras de aço

Consequentemente, pode-se concluir que a $P_{0,5}$ não é influenciada significativamente pelo sistema de controle em termos de valores médios e permanece fora da região de instabilidade. Ou seja, as forças residuais podem ser consideradas equivalentes do ponto de vista estatístico, independentemente da máquina empregada e qualquer instabilidade que ocorra. Esta análise mostra que o ensaio de duplo puncionamento é robusto e capaz de produzir resultados comparáveis para ser utilizado como instrumento de controle da qualidade do CRF mesmo quando diferentes sistemas de controle são utilizados. Esta circunstância é favorável para sua aplicação no controle tecnológico de CRF, em que $P_{0,5}$ é o parâmetro crítico avaliado.

5.4 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

Este capítulo avaliou a extensão da instabilidade nos ensaios de duplo puncionamento realizados em máquinas de ensaio com diferentes sistemas de controle para analisar sua influência sobre a força residual $P_{0,5}$. A partir dos resultados obtidos foi possível concluir que:

- O ensaio de duplo puncionamento apresenta instabilidade, cuja magnitude varia de acordo com o tipo de controle de deslocamento utilizado durante o ensaio. Em CRF com força elevada da matriz e baixa força residual pós-fissuração, a extensão da instabilidade é mais elevada. Ou seja, a extensão da instabilidade é inversamente proporcional à relação $P_{0,5}/F_{cr}$. Para uma relação $P_{0,5}/F_{cr}$ dada a instabilidade obtida no sistema aberto é maior.
- A extensão da instabilidade pós-fissuração não excede os valores de TCOD correspondentes à determinação da força residual $P_{0,5}$ para todos os compósitos avaliados tanto em sistemas aberto quanto em fechado. Portanto, $P_{0,5}$ não está sujeita à incerteza da região de instabilidade para qualquer sistema de controle utilizado.

- Embora o sistema fechado seja capaz de reduzir a extensão da instabilidade na região pós-fissuração, os valores médios obtidos para $P_{0,5}$ não foram considerados estatisticamente diferentes quando utilizado sistema aberto. Portanto, o ensaio de duplo puncionamento realizado em sistema aberto pode ser considerado como ensaio alternativo confiável para o controle tecnológico da CRF.

6 CONCLUSÕES

Por meio desta dissertação foi possível concluir que os diferentes sistemas de controle utilizados para a realização do ensaio de duplo puncionamento alteram a resposta de ensaio. Apesar do sistema de controle fechado possibilitar um menor nível de instabilidade pós-pico e não subestimar a capacidade resistente residual, é possível afirmar que o EDP é confiável mesmo quando utilizado para controle da qualidade do CRF em condições críticas. Ou seja, é possível realizar a determinação confiável de forças resistentes residuais na região associada ao ELS sem influência da instabilidade. Isto justifica a adoção do EDP para fins de controle do CRF quando o mesmo estiver bem correlacionado com os ensaios de caracterização básicos, como é o caso dos ensaios de flexão de prismas.

Neste aspecto, cumpriu-se com objetivo geral proposta para esta dissertação com a conclusão de que o ensaio de duplo puncionamento pode ser considerado como uma alternativa confiável para o controle tecnológico do CRF, estabelecendo como parâmetros de controle valores de forças residuais para determinados deslocamentos verticais.

Como objetivos específicos, esta dissertação procurou: (a) comparar os resultados do ensaio de duplo puncionamento com sistemas de controle aberto e fechado em termos de dispersão, analisando a influência da extensão da instabilidade pós-fissuração; (b) compatibilizar velocidades de ensaio em função do tipo de controle utilizado e analisar a resposta do ensaio de duplo puncionamento quando controlado por deslocamento vertical ou por deformação diametral; e (c) avaliar a extensão da instabilidade no ensaio de duplo puncionamento e verificar sua influência sobre a determinação da resistência residual medida logo após a fissuração da matriz.

A revisão bibliográfica em conjunto com a realização dos programas experimentais descritos ao longo desta dissertação, permitiu concluir que:

- Na comparação dos resultados do ensaio de duplo puncionamento com sistemas de controle aberto e fechado, a utilização de máquinas com sistema aberto apresenta uma instabilidade pós-fissuração maior do que aquela verificada no sistema fechado. No entanto, foi possível concluir que esta instabilidade pós-fissuração não influencia negativamente a determinação da resistência residual, através do parâmetro $P_{0,5}$;
- A implementação do ensaio de duplo puncionamento em sistema fechado com controle por deformação diametral do corpo de prova (TCOD), através da compatibilização das velocidades de ensaio, apresentou algumas dificuldades apontadas ao longo da pesquisa. Dentre as dificuldades verificadas, é importante destacar o controle através da cinta extensiométrica. Além deste ser um material com elevado custo financeiro, há necessidade de compatibilização com a máquina de ensaio. A máquina de ensaio para compatibilização também possui um maior custo financeiro do que uma máquina convencional, o que dificulta a acessibilidade do controle nos laboratórios brasileiros.
- CRFs com força elevada da matriz e baixa força residual pós-fissuração apresentam uma maior extensão da instabilidade. Quando verificada a influência da extensão da instabilidade sobre a determinação da resistência residual medida logo após a fissuração da matriz, concluiu-se que a extensão da instabilidade pós-fissuração não excede os valores de TCOD correspondentes à determinação da força residual $P_{0,5}$. Tal conclusão reforça a confiabilidade desses resultados na resposta do ensaio, independente do CRF e do tipo de sistema de controle utilizado (aberto ou fechado).

6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Através dos resultados obtidos nesta pesquisa, foi possível verificar que a diferença entre a abertura de fissura determinada para a força $P_{0,5}$ em sistemas aberto ou fechado, é função da distância entre a força de fissuração e a força residual em 0,5 mm. Essa diferença pode ultrapassar 1 mm para valores baixos da relação $P_{0,5}/F_{cr}$. Isto é uma limitação do método de ensaio quando utilizado para parametrizar o comportamento pós-fissuração ou estabelecer equações constitutivas. Sabendo que essa seria uma condição crítica para utilizar o ensaio de duplo puncionamento como parametrização do comportamento pós-fissuração do CRF, seria interessante que trabalhos futuros avaliassem o CRF nesta condição, com baixos valores da relação $P_{0,5}/F_{cr}$, possibilitando a proposição de uma correlação geral entre os ensaios de flexão, utilizados para parâmetros de projeto e o ensaio de duplo puncionamento.

Nesta pesquisa foi discutido o método do ensaio de duplo puncionamento e a influência dos procedimentos na determinação dos valores médios de forças resistentes residuais com pouca ênfase para a verificação de sua dispersão. Resultados são mais confiáveis quando a dispersão dos valores obtidos é menor. Sendo assim, seria interessante que trabalhos futuros pudessem analisar a dispersão deste ensaio em comparação com outros tipos de ensaio de controle, além da avaliação da reprodutibilidade e repetibilidade deste ensaio. Além disso, seria muito importante avaliar a parametrização da dispersão para a condição em que se utiliza um volume maior de amostras, como é o caso de algumas obras de infraestrutura. Dessa forma, seria importante aproveitar dados de controle corriqueiro de obra para realização deste tipo de avaliação.

REFERÊNCIAS

AMERICAN STANDARD FOR TESTING MATERIALS. **ASTM C1609**: standard test method for flexural performance of fiber-reinforced concrete (using beam with third-point loading). Philadelphia, 2012. 8p.

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 5739**: Concreto – ensaios de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007. 9p.

____. **NBR NM 67**: Concreto: determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998. 8p.

____. **NBR 15530**: Concreto: determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 2007. 7p.

AIRE, C. et al. Double-Punch Test of Fiber-Reinforced Concrete: Effect of Specimen Origin and Size. **ACI Materials Journal**, V. 112, n. 2, p. 199-208, 2015.

BANTHIA, N.; DUBEY A. Measurement of Flexural Toughness of Fiber Reinforced Concrete Using a Novel Technique-Part 1: Assessment and Calibration. **ACI Materials Journal**, V. 96, n. 6, p. 651-656, 1999.

BANTHIA, N.; MINDESS, S.; JIANG, Z. Influence of Feedback Control on Flexural Toughness of Fiber Reinforced Concrete in ASTM C1399 Tests. **Journal of Testing and Evaluation**, v. 39, n. 4, p. 664-670, 2012.

BERNARD, E., S. Influence of Test Machine Control Method on flexural Performance of Fiber Reinforced Concrete Beams. **Journal of astm internacional**, v. 6, n. 9, p. 3-11, 2009.

BURATTI, N.; MAZOTTI, C.; SAVOIA, M. Post-cracking behavior of steel and macro-synthetic fibre-reinforced concretes. **Construction and Building Materials**, v. 25, p. 2713-22, 2011.

CARMONA, S.; AGUADO, A.; MOLINS, A. 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 to determine FRC properties. **Construction and Building Materials**, v.181, p. 673-686, 2018.

CHEN, W. F. Double punch test for tensile strength of concrete. **ACI Mater Journal**, V. 67, n. 2, p. 993–995, 1970.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 14651**. Test Method FOR METalic Fiber Concrete – Measuring the Flexural Tensile Strength (Limit of Proportionality, Residual), 2007. 20p.

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

FIGUEIREDO, A. D. **Concreto reforçado com fibras**. 2011. 247 p. Tese (Livre-docência) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

GALEOTE, E. et al. 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. D. Correlation between beam and Barcelona tests for FRC quality control for structural applications. **Fibre Concrete**, p. 0-10, 2015.

GETTU, R. et al. Testing of concrete under closed-loop control. **Advanced Cement Based Materials**, v. 3, n. 2, p. 54-71, 1996.

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. **ACI Special Publication**, SP 248-6, p. 67-82, 2007.

IBRACON/ABECE. Controle da qualidade do concreto reforçado com fibras. **Prática Recomendada**, 2017.

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.

KIM, J.; LEE, G. P.; MOON, D. Y. Evaluation of mechanical properties of steel-fibre-reinforced concrete exposed to high temperatures by double-punch test. **Construction and Building Materials**, v. 79, p. 182-191, 2015.

LIU, X. et al. Assessing the potential of functionally graded concrete using fibre reinforced and recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, v. 171, p. 793-801, 2018.

MAGALHÃES, F. C. et al. Concreto não conforme – Análise da influência do local do ensaio nos resultados de resistência á compressão de um mesmo lote. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 55., 2013, Gramado. **Anais...** Ações concretas para o futuro da construção em concreto no Brasil. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON), 2013.

MANZONI, J. P.; REAL, L. V.; FIGEUREDO, A. D.; MONTE, R. Mechanical characterization of concrete reinforced with composite glass macrofibre. **Anais...** 4th Brazilian Conference on Composite Materials, Rio de Janeiro, 2018.

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, p. 1175-1184, 2016.

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

NOGUEIRA, A. B.; SIMÃO, L. R.; MONTE, R.; FIGUEIREDO, A. D. Avaliação da reprodutibilidade do ensaio Barcelona para controle do concreto reforçado com fibras. **Anais...** 59o. Congresso Brasileiro do Concreto – IBRACON, Bento Gonçalves, 2017.

PUJADAS, P. et al. Multidirectional double punch test to assess the post-cracking behavior and fibre orientation on FRC. **Construction and Building Materials**, v. 58, p. 214-224, 2014.

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

RAMBO, D.; BLANCO, A.; FIGUEIREDO, A. D.; SANTOS, E.; TOLEDO, R.; GOMES, O. Study of temperature effect on macro-synthetic fiber reinforced concretes by means of Barcelona test: An approach focused on tunnels assessment. **Construction and Building Materials**, v.158, p. 443-453, 2018.

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

SALVADOR, R. P., FIGUEIREDO, A. D. Análise comparativa de comportamento mecânico de concreto reforçado com macrofibra polimérica e com fibra de aço. **Matéria (UFRJ)**, v. 18, n. 2, p. 1273-1285, 2013.

SALVADOR, R. P.; FERNANDES, J. F.; FIGUEIREDO, A. D. Avaliação do concreto reforçado com baixos teores de fibras para fins estruturais segundo a norma EN 14651-2007. **Matéria (UFRJ)**, v. 20, p. 961-974, 2015.

SEGURA-CASTILHO, L. et al. Fibre distribution and tensile response anisotropy in sprayed fibre reinforced concrete. **Materials and Structures**, v. 51:29, 2018.

SHAH, S. P.; KUDER, K. G.; MU, B. Fiber-reinforced cement-based composites: a forty-year odyssey. In: RILEM SYMPOSIUM ON FIBRE-REINFORCED CONCRETE (FRC), 6., 2004, Verena, Italy. **BEFIB**, 2004. p. 3-30.

SILVA, C. L.; GALO BARDES, I.; MONTE, R.; FIGUEIREDO, A. D. Avaliação da dispersão de forças de fissuração e residuais do concreto projetado reforçado com fibras de aço obtida pelo ensaio Barcelona. **Anais...** 57o Congresso Brasileiro do Concreto, 2015, Bonito. O Futuro do Concreto para a Sustentabilidade nas Construções. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON), 2015.

SIMÃO, L. R.; NOGUEIRA, A. B.; MONTE, R.; FIGUEIREDO, A. D. Avaliação do ensaio Barcelona em sistema fechado. **Anais...** 59o Congresso Brasileiro do Concreto – IBRACON, Bento Gonçalves, 2017, pp.1–16.

SOUZA, D. A. et al. Aplicação do Ensaio de Dupla Punção na Análise do Comportamento Estrutural de Concreto Fluido Reforçado com Fibras. **Anais...** 59o Congresso Brasileiro do Concreto, 2017(a).

SOUZA, D. A. et al. Avaliação do Comportamento Mecânico de Concreto Fluido Reforçado com Fibras de Borracha. **ENARC**, 2017(b).

TOALDO, G. S.; MONTE, R.; FIGUEIREDO, A. D. Avaliação comparativa de métodos de ensaio para a determinação da tenacidade do concreto reforçado com fibras. **Anais...** 55o Congresso Brasileiro do Concreto, 2013, Gramado. Ações concretas para o futuro da construção em concreto no Brasil, 2013.

ANEXO I – Granulometria e qualidade dos materiais enviados pela concreteira

- Carta de qualidade do cimento CII-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]	(%)	[h:min]	[h:min]	R1 [MPa]	R3 [MPa]	R7 [MPa]	R28 [MPa]		
01																						
02	4,17	22,96	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	49,6		
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	3,52	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	2,52	0,30	1,00	2,32	0,9	4,9	4.980	29,6	02:55	04:35	11,3	25,3	38,6			
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	02:50	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	02:50	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	02:40	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	3,58	23,13	7,22	2,37	52,51	2,84	2,54	0,30	0,99	2,39	0,6	5,0	5.050	29,6	02:55	04:30	9,7	28,9	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	36,6			
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	3,86	23,01	7,01	2,45	53,02	2,73	2,74	0,31	0,99	2,30	0,9	4,0	4.950	29,6	03:19	05:15	10,0	25,7	35,5			
28	3,93	23,10	6,96	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	26,6	37,0	48,4		
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	239,92	0,00	0,01	0,01	1,40	1,42	1,63	1,46		
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	29,6	2:06	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 de reprodutibilidade interna.

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	MATERIAL E PROCED.: Areia Média - Barrocão Areia Grossa - Lamas & Lamas	DATA COLETA:		Nº ORDEM:
DATA DO ENSAIO:	29/09/2016		28/09/2016		009_16

- Granulometria das britas utilizadas no estudo de reprodutibilidade interna.

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.: <i>Eng.º Fernando</i>			USINA:	<i>Perus</i>	NÚCLEO: <i>Campinas</i>	
LABORATORISTA: <i>Jonathan</i>		MATERIAL E PROCED.:	<i>Brita 1 - B0900 Brita 0 - B0900</i>		DATA COLETA:	Nº ORDEM:
DATA DO ENSAIO:	<i>06/10/2016</i>				<i>05/10/2016</i>	<i>010_16</i>

- Granulometria da areia grossa artificial utilizada no programa interlaboratorial.

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 Areia Grossa	2,63	-	-	-	8,80	-
Amostra 2 0	-	-	-	-	-	-
Amostra 3 0	-	-	-	-	-	
Limites Normativos	-----	-----	-----	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.: <i>Eng.º Fernando</i>			USINA:	<i>Perus - B0900</i>	NÚCLEO: <i>CAMPINAS</i>	
LABORATORISTA: <i>Jonathan/Thiago</i>		MATERIAL E PROCED.:	<i>AREIA GROSSA ARTIFICIAL - PEDRIX</i>		DATA COLETA:	Nº ORDEM:
DATA DO ENSAIO:	<i>20/03/2017</i>				<i>20/03/2017</i>	<i>003_17</i>