

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA

FELIPE PEREIRA SANTOS

**Avaliação do ensaio de duplo puncionamento aplicado para o controle do
concreto projetado reforçado com fibras de aço**

São Paulo
2022

FELIPE PEREIRA SANTOS

**Avaliação do ensaio de duplo puncionamento aplicado para o controle do
concreto projetado reforçado com fibras de aço**

Versão Revisada

Dissertação apresentada a Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do título de Mestre
em Ciências.

Área de concentração: Construção Civil

Orientador: Prof. Dr. Antonio Domingues
de Figueiredo

Coorientador: Prof. Dr. Luís Antônio
Guimarães Bitencourt Júnior

São Paulo

2022

*“All models are wrong, but some are
useful.”*

- George E. P. Box

AGRADECIMENTOS

Como um trabalho com características quase que empreendedoras, não poderia deixar de fazer menção a alguns colaboradores diretos e indiretos que tornaram este trabalho possível.

Gostaria de agradecer: Em primeiro lugar, à minha mãe, Mara Helena, a quem devo imensamente por nunca ter poupado esforços em assuntos relacionados a minha educação formal e, por isso, principal responsável por tornar possível a elaboração desta dissertação.

Agradeço à minha noiva, Joana Abrão, por me ajudar a estabelecer um ambiente psicológico propenso ao desenvolvimento deste e outros trabalhos, além de se fazer presente para auxiliar em todos os momentos, provendo sempre o suporte necessário inobstante à situação.

Ao meu irmão, sócio e por vezes meu “orientador acadêmico pessoal”, Caio César, pelo auxílio direto em diversas etapas do desenvolvimento deste trabalho, desde o programa experimental até as revisões de texto.

Aos meus orientadores, Antonio Figueiredo e Luís Bitencourt, aos quais faço questão de, nesta área reservada da dissertação, utilizar menções pessoais somente. Uma vez que, além da incontestável capacidade técnica e acadêmica, demonstraram sempre imensa empatia durante todo o processo de desenvolvimento do trabalho e por toda convivência me permito, hoje, os chamar de amigos.

Ao geólogo Manolo Morales que, apesar de não haver mantido contato, encontrava-se, à época de início deste trabalho, como responsável técnico do túnel onde foram realizadas as moldagens e a quem tive o privilégio de atuar próximo profissionalmente. Foi ele a ponte de comunicação que permitiu meu acesso à obra e assim o desenrolar do projeto laboratorial deste estudo. Agradecer também a todos os funcionários da obra à época.

Ao Dsc. Rafael Celeghini por todo o auxílio logístico e intelectual às partes que se referem ao DIC nesta dissertação. O autor agradece também a Lynx Comércio e Importação Ltda. pelo fornecimento do sistema VIC-3D de Soluções Correlacionadas utilizado para o desenvolvimento deste trabalho.

Por fim, à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo pelo fornecimento de parte da infraestrutura necessária para a execução.

RESUMO

SANTOS, F. P. **Avaliação do ensaio de duplo puncionamento aplicado para o controle do concreto projetado reforçado com fibras de aço.** 2022. 62f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo

O ensaio de duplo puncionamento (EDP) tem se difundido internacionalmente como controle de qualidade de concreto projetado reforçado com fibra (CPRF). Porém, sua utilização ainda carece de um melhor entendimento quanto a sua própria dinâmica. Sua complexidade comportamental em contraste com a facilidade de execução pode comprometer a precisão dos resultados das análises. Quando o monitoramento do perímetro circunferencial é dispensado para tornar o procedimento de teste mais simples pode ocasionar em interpretações contestáveis. Este estudo pretende verificar a influência do diâmetro dos testemunhos do EDP no comportamento da resistência residual do concreto reforçado com fibras de aço (CRFA). O programa experimental foi conduzido para avaliar a dinâmica do ensaio em função da conversão analítica dos resultados de deslocamento axial em *“total circumference opening displacement”* (TCOD) frente aos obtidos pela correlação de imagem 3D (DIC 3D), a fim de avaliar sua aplicabilidade como método de controle de qualidade do CPRF. Foram ensaiados 12 cilindros com diâmetro de 10 cm e 9 com 15 cm, sendo as alturas iguais aos diâmetros. 3 corpos de prova de cada grupo foram monitorados por um sistema de DIC 3D. Os resultados demonstraram que o TCOD pode ser obtido por conversão analítica com precisão confiável, portanto a análise do EDP pode ser realizada levando em consideração o TCOD de forma a permitir a obtenção de equações constitutivas. O estudo comprovou que o diâmetro dos cilindros do EDP influencia diretamente nos parâmetros estruturais do CRFA e o cilindro de menores dimensões subestima a capacidade resistente residual associada ao estado limite de serviço. Além disso, para a mesma confiabilidade, o cálculo amostral de quantidade de testemunhos de 10 cm é o dobro da de 15 cm.

Palavras-chave: Controle de qualidade. Concreto projetado reforçado com fibras. Carga residual. Ensaio de duplo puncionamento. Método indutivo. Correlação de imagens (DIC).

ABSTRACT

SANTOS, F. P. **Analysis of the double punch test applied for steel fiber reinforced shotcrete mechanical characterization.** 2022. 62f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

The double punch test (DPT) is increasingly used internationally as a quality control of fiber reinforced shotcrete (FRS). However, its use still deserves better understanding regarding the test mechanism itself. The complexity of the test mechanism, in contrast to the ease execution, may compromise the accuracy of the results analysis. When circumferential perimeter measurement is dismissed in order to simplify the test procedure, misinterpretations may occur. This study intends to verify the influence of the DPT specimens' diameter on the residual strength behavior of the steel fiber reinforced concrete (SFRC). The experimental program aimed to evaluate the dynamics of the test in terms of the results obtained from analytical conversion of the axial displacement into total circumferential opening displacement (TCOD) comparing to those obtained through the 3D digital image correlation (DIC3D), in order to evaluate its applicability as quality control method of the FRS. 21 cylindrical specimens were tested having the diameter equal to the height (12 specimens with 10 cm and 9 specimens with 15 cm). 3 specimens of each group were monitored by a DIC3D. The main results demonstrated that the TCOD can be easily obtained by analytical conversion with reliable accuracy, therefore the analysis of the DPT results could be carried out taking into account the level of crack opening in order to permit to obtain constitutive equations. The study demonstrates that the diameter of the DPT specimens has influence on the structural parameters of the SFRC and the smaller cylinder underestimates the residual strength associated to the service limit state. Moreover, this influence exists in such a manner that, for the same reliability, the sample sizing of the 10 cm's specimens is twice the quantity from the 15 cm's.

Keywords: Quality control. Steel fiber reinforced shotcrete. Residual strength. Double punch test. Inductive test. Digital image correlation (DIC).

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação das 3 etapas do EDP. a) etapa visco elástica; b) etapa de transição; c) etapa pós fissuração.	23
Figura 2 - Mapa de calor das tensões Von-Mises geradas durante o ensaio de duplo puncionamento - corte longitudinal. (Acervo próprio)	23
Figura 3 - a) Exemplo de fibra integrada a matriz; b) Mapa de calor de distribuição de tensões Von-Mises fibra e matriz (Acervo próprio); c) Deslizamento completo; d) Ruptura total da fibra; e) Fraturamento da matriz.....	24
Figura 4 - Emboque do túnel RODOANEL - Lote 5.....	25
Figura 5 - Geometria do painel de teste utilizado na projeção: (a) vista superior (b) corte transversal.....	27
Figura 6 – Planejamento seguido para extração dos testemunhos dos painéis projetados.	28
Figura 7 – a) Planejamento de extração; b) Procedimento de extração dos cilindros; c) Painel de concreto projetado após a extração dos testemunhos; d) Polimento da superfície.....	28
Figura 8 – a) Equipamento de medição de indutância; b) Representação do campo de indução medido pelo equipamento com posicionamento do testemunho em duas disposições.....	30
Figura 9 - Interpolação da calibração dos corpos de prova de 10 cm de diâmetro.	31
Figura 10 - Interpolação da calibração dos corpos de prova de 15 cm de diâmetro.	31
Figura 11 – Parte dos procedimentos de preparo. a) Testemunho logo após a extração das placas; b) Testemunho após a aplicação de massa polimérica e tinta branca; c) Imagem do decorrer dos ensaios, com os cilindros já finalizados com a camada de pontos pretos “speckle pattern”	33
Figura 12 – a) Montagem do Sistema de DIC 3D; b) Representação dos resultados obtidos e superfície monitorada.....	34
Figura 13 – Representação dos chamados “subsets” e de como é realizado o controle pelo software.	35
Figura 14 – Referência dos monitoramentos realizados nos cilindros: S0, S1 and E0. .	36

Figura 15 – Correlação de imagens 3D. a) Região de origem da fissura radial; b) Seção superior com maior incremento perimetral; c) Seção inferior com menor incremento perimetral.....	37
Figura 16 – Representação da carga por deslocamento axial (ABNT NBR16939).	38
Figura 17 - Diagrama do EDP e suas designações.....	39
Figura 18 - Mecanismos de fratura ocorridos presentes a campanha de ensaios. a) 2 fissuras radiais; b) 3 fissuras radiais; c) 4 fissuras radiais.....	39
Figura 19 - Ilustração da dedução da conversão de deslocamento axial em deformação circunferencial.	40
Figura 20 – Correlação entre o TCOD obtido pela conversão analítica e o aumento perimetral obtido pelos DIC 3D para os corpos de prova de 10 cm.....	43
Figura 21 – Correlação entre o TCOD obtido pela conversão analítica e o aumento perimetral obtido pelos DIC 3D para os corpos de prova de 15 cm.....	44
Figura 22 - Carga aplicada x Deslocamento vertical para os corpos de prova de 10 cm de diâmetro.....	45
Figura 23 - Carga aplicada x Deslocamento vertical para os corpos de prova de 15 cm de diâmetro.....	45
Figura 24 – Coeficiente de variação versus deslocamento vertical após a carga de pico.	46
Figura 25 – Tensão x TCOD para os corpos de prova de 10 cm de diâmetro.....	47
Figura 26 – Tensão x TCOD para os corpos de prova de 15 cm de diâmetro.....	47
Figura 27 – Correlação entre os TCODs para os dois diâmetros e os pontos de controle de deslocamento vertical.....	48
Figura 28 – Destaque isolado para os pontos de F_{cr} (0 mm), ELS (1,5 mm) e ELU (4,5 mm) com Tensão x TCOD.	49
Figura 29 - Carga aplicada por aumento perimetral (dR) – Testemunho 10_10.....	59
Figura 30 - Carga aplicada por aumento perimetral (dR) – Testemunho 10_11.....	60
Figura 31 - Carga aplicada por aumento perimetral (dR) – Testemunho 10_12.....	60
Figura 32 - Carga aplicada por aumento perimetral (dR) – Testemunho 15_7.....	61
Figura 33 - Carga aplicada por aumento perimetral (dR) – Testemunho 15_8.....	61
Figura 34 - Carga aplicada por aumento perimetral (dR) – Testemunho 15_9.....	62

Figura 35 – Comparação entre perímetro medido por extensômetro virtual E0 (dL) e incremento de diâmetro dR para os corpos de prova de 10 cm.....	63
Figura 36 – Comparação entre perímetro medido por extensômetro virtual E0 (dL) e incremento de diâmetro dR para os corpos de prova de 15 cm.....	63
Figura 37 – Correlação entre as cargas (kN) para os dois diâmetros com os mesmos deslocamentos verticais.....	68
Figura 38 - Teste t para amostras emparelhadas de 10 e 15 cm. Cálculos realizados no software "Jamovi" https://www.jamovi.org	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Métodos de controle e seus respectivos coeficientes de variação, adaptado de (Molins, et al., 2009).....	21
Tabela 2 - Controle de materiais utilizados na projeção, segundo ficha de verificação de obra - Composição do CPRF	26
Tabela 3 - Controle das fibras utilizadas, segundo dados fornecidos pela fabricante. Propriedades mecânicas e geométricas das fibras de aço (dados fornecidos pela fabricante).....	26
Tabela 4 - Calibração das indutâncias.....	31
Tabela 5 - Teores médios de fibra e respectivos desvios padrões.	42
Tabela 6 - Resultados dos cálculos amostrais.	50
Apêndices	
Tabela 7 - Resultados individuais de indutância.	58
Tabela 8 - Resultados individuais de carga (kN) por deslocamento vertical (mm) – Corpos de prova de 10 cm.....	64
Tabela 9 - Resultados individuais de carga (kN) por deslocamento vertical (mm) – Corpos de prova de 15 cm.....	66
Tabela 10 - Tensão de tração calculada (MPa) nos TCODs para os corpos de prova de 10 cm.....	69
Tabela 11 - Tensão de tração calculada (MPa) nos TCODs para os corpos de prova de 15 cm.....	69
Tabela 12 - Diferenças proporcionais para a média entre tensões nos pontos de TCOD.	70

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CBT	Comitê Brasileiro de Túneis
CPRF	Concreto Projetado Reforçado com Fibras
CRF	Concreto Reforçado com Fibras
CRFA	Concreto Reforçado com Fibras de Aço
CV	Coeficiente de Variação
DIC	<i>Digital Image Correlation</i>
DIC3D	<i>Tridimensional Digital Image Correlation</i>
EDP	Ensaio de Duplo Puncionamento
ELS	Estado Limite de Serviço
ELU	Estado Limite Último
NATM	<i>New Austrian Tunneling Method</i>
TCOD	<i>Total Circunferential Opening Displacement</i>
UFABC	Universidade Federal do ABC
USP	Universidade de São Paulo

SUMÁRIO

1. Introdução	14
1.1. Objetivo do trabalho	17
2. O ensaio de duplo puncionamento utilizado para o controle do concreto projetado reforçado com fibras.....	19
3. Metodologia experimental.....	25
3.1. Materiais utilizados	25
3.2. Extração e preparação de testemunhos.....	26
3.3. Métodos de ensaio.....	29
3.3.1. Método Indutivo	29
3.3.1. Análise de imagens	32
3.3.2. Ensaio de duplo puncionamento.....	37
4. Resultados e discussões	42
4.1. Apresentação dos resultados do método indutivo.....	42
4.2. Análise de imagens DIC-3D.....	42
4.3. Ensaio de duplo puncionamento	44
4.3.1. Carga por deslocamento axial	44
4.3.2. Resistência residual por TCOD.....	46
4.3.3. Dimensionamento amostral para TCOD	49
5. Considerações finais.....	51
5.1. Recomendações para revisão de norma ABNT NBR 16939	52
5.2. Sugestões para trabalhos futuros.....	52
6. Referências	54

1. INTRODUÇÃO

Com o passar dos anos, a utilização do concreto projetado reforçado com fibra (CPRF) se difundiu amplamente na construção civil. Dentro das aplicações geotécnicas, o CPRF se destaca por seu uso em contenções de solo, na estabilização de taludes e revestimento de túneis. Este último uso está fortemente ligado ao NATM (New Austrian Tunneling Method) e visa mobilizar a capacidade de resistência do solo para garantir menores níveis de tensão no revestimento estrutural, uma vez que há uma redistribuição de cargas sem perda de competência estrutural (VANDEWALLE, 1997; BERNARD e THOMAS, 2020). Esta condição fez com que, progressivamente, o CPRF assumisse a condição de uma das principais aplicações de concreto com fibras em termos de volume empregado no Brasil (FIGUEIREDO, 2011), ficando atrás apenas do concreto com fibras aplicado em pavimentos. Apesar disto, a especificação do CPRF ainda é feita de maneira empírica e, muitas vezes, sujeita a equívocos de interpretação. Há alguns anos, a publicação do fib Model Code (FIB, 2013) representou um avanço importante na utilização do concreto reforçado com fibras (CRF). Porém este código de dimensionamento e controle de estruturas aplicando o CRF é explícito ao indicar que o mesmo não é aplicável para o CPRF.

Durante o processo de projeção do CPRF, a maior parte do volume do concreto permanece na superfície, porém parte dos materiais constituintes são refletidos de forma não uniforme (FIGUEIREDO, 1999). A intensidade deste fenômeno varia em conforme com diversos fatores do processo, como velocidade de projeção e superfície de impacto (GALOBARDES, SILVA, *et al.*, 2019; GINOUSE, JOLIN e BISSONNETTE, 2014). Um dos principais constituintes que pode ter sua composição mais afetada pela reflexão são as fibras de aço (ARMELIN, 1997; KAUFFMAN, FRECH, *et al.*, 2013). Isto pode resultar em divergências entre o teor de fibra estipulado em projeto e o efetivamente incorporado na estrutura, assim, conseqüentemente as propriedades mecânicas do CPRF. O que gera dúvida quanto ao comportamento estrutural projetado e a verdadeira grandeza. A capacidade de resistência pós-fissuração do CPRF está correlacionada com as interações da fibra-matriz, razão pela qual o controle de qualidade do compósito é tipicamente realizado pela avaliação do teor de fibra e propriedades relacionadas à

tenacidade (FIGUEIREDO, 2011). A publicação da Prática Recomendada do CBT (Comitê Brasileiro de Túneis da ABMS) (FIGUEIREDO, SALVADOR, *et al.*, 2020) prevê a utilização diversos ensaios disponíveis na normalização brasileira e internacional para o controle do CPRF. Estes ensaios são baseados na punção de placas e flexão de prismas, principalmente, mas essa recomendação já prevê o ensaio de duplo puncionamento (EDP) como alternativa para o controle do CPRF. Neste contexto, atualmente, as orientações mais referenciadas recomendam o controle do CPRF por testes tradicionais como o ensaio de punção de placas quadradas EN14487-5 (EFNARC:EN14488-5, 2006) e o de flexão de prismas EN14488-3 (EFNARC:EN14488-3, 2004), onde o CPRF é classificado a partir do cálculo de energia total absorvida durante a punção das placas e a resistência pós fissuração medida sob níveis de deslocamento axial ou abertura de fissura, respectivamente. Ambos procedimentos (e outros métodos de ensaio semelhantes) podem ser demorados e de difícil realização, além disso, inviabilizam a extração de testemunhos diretamente da estrutura (GALOBARDES, SILVA, *et al.*, 2019; CÁCERES, MONTE, *et al.*, 2021). Nesse sentido, o ensaio de duplo puncionamento (EDP) apresenta vantagem por ser exequível de maneira mais célere e ergonômica, utilizando testemunhos que podem ser extraídos diretamente do revestimento do túnel além de contar com normalização brasileira ABNT NBR 16939 (ABNT:NBR16939, 2021).

Para a avaliação do teor de fibras de aço efetivamente incorporado no CPRF, a metodologia tipicamente recomendada é por lavagem do CPRF e contagem ou pesagem das fibras EN14488-7 (EFNARC:EN14488-7, 2006). No entanto, para testemunhos menores existem alternativas não destrutivas como o método indutivo, que se mostra como uma opção de ensaio mais rápido e assertivo (TORRENTS, PUJADAS, *et al.*, 2012; LÓPEZ, 2013; CAVALARO, LÓPEZ, *et al.*, 2015) além de apresentar a vantagem de poder ser realizado no mesmo corpo de prova utilizado para o EDP. Além disso, a adoção desta metodologia viabiliza avaliar a orientação das fibras no corpo de prova, o que é um dado de entrada relevante em modelos numéricos de previsão de comportamento residual (CAVALARO, LÓPEZ, *et al.*, 2015; ALFERES FILHO, MONTE, *et al.*, 2019). Como o teor de fibras no concreto projetado é dependente do processo de projeção, um controle de qualidade que permita a extração de testemunhos diretamente da estrutura

aliado a uma metodologia capaz de aferir o teor e orientação realmente incorporado representa uma vantagem para a avaliação do comportamento estrutural do material (CÁCERES, MONTE, *et al.*, 2021).

Sob o ponto de vista das políticas de segurança do trabalho e ergonomia dos operadores de ensaios em laboratórios o EDP tem características atrativas, uma vez que os corpos de prova utilizados são menores, com 10 cm a 15 cm de altura e diâmetro, e mais fáceis de manusear em relação a outros ensaios mais tradicionais. Como consequência, gera redução no risco de lesões durante o manuseio e torna possível o aumento da frequência de ensaios, utilizando menores volumes de concreto e melhorando a representatividade da amostra.

Alguns estudos endossam o EDP como uma alternativa viável para o controle do CPRF (GALOBARDES, SILVA, *et al.*, 2019; CÁCERES, MONTE, *et al.*, 2021). Em boa medida, esta indicação está baseada no fato de que este método de controle fornece boa correlação com ensaios característicos de absorção de energia e tensão residual, como o teste de painel quadrado EN14487-1 (CÁCERES, CAVALARO e FIGUEIREDO, 2021) e o de flexão EN14488-3 (CÁCERES, MONTE, *et al.*, 2021; GALOBARDES, SILVA, *et al.*, 2019; MONTEIRO e SILVA, 2020), respectivamente, o que o endossa como método alternativo aos tradicionais mais trabalhosos e dispendiosos.

O EDP ainda carece de melhor entendimento quanto ao próprio mecanismo do ensaio, que depende de uma série fatores associados à interação fibra-matriz e também à interação matriz-matriz, o que é bem mais complexo do que o associado aos testes de flexão (BLANCO, PUJADAS, *et al.*, 2014). A configuração do equipamento e sistemas de controle associados ao EDP podem alterar os resultados do teste como, por exemplo, influenciando o nível de extensão da instabilidade e, conseqüentemente, a determinação de resistências residuais na região de baixo nível de deslocamento e abertura de fissura (SIMÃO, NOGUEIRA, *et al.*, 2019). Nesse sentido, métodos como a correlação de imagens 3D (DIC 3D) são uma alternativa interessante (AMYOT, PICKWORTH, *et al.*, 2019) que, com o decorrer do tempo, tende a se tornar cada vez mais acessível para laboratórios, principalmente pela evolução intensa que ocorre em relação à tecnologia portátil em de captura de imagem. Não foi possível encontrar estudos prévios em que

tenha sido realizada a aplicação de sistema de medição por DIC 3D para avaliar o comportamento do EDP na literatura disponível até o momento.

As simplificações nos padrões de controle do ensaio podem, então, levar a um comprometimento da análise dos resultados. Este pode ser o caso da norma brasileira ABNT NBR 16939 (ABNT:NBR16939, 2021) que orienta pelo controle exclusivo de níveis pré-determinados de deslocamento axial independentes das dimensões dos cilindros como parâmetro de controle do ensaio. Neste método normalizado excluiu-se ainda a exigência de conversão dos dados em TCOD ou monitoramento simultâneo por um extensômetro circunferencial.

Esta condição pode levar a diferentes níveis de correspondência em termos de abertura de fissuras e, conseqüentemente, comprometer a precisão na determinação das resistências residuais. Embora trabalhos anteriores forneçam boas correlações entre o EDP e outros métodos, é importante que a análise seja realizada levando em consideração também o nível de abertura de fissura, pois este está diretamente ligado à avaliação do material nas condições associadas ao racional de estado limite de serviço (ELS) e estado limite último (ELU) (ITA, 2020), o que é uma nova tendência em relação ao CPRF aplicado em revestimentos de túneis (LARIVE, BOUTEILLE e BERTHOZ, 2020).

1.1. Objetivo do trabalho

O principal objetivo deste estudo é prover um melhor entendimento do EDP, de modo a avaliar sua aplicabilidade como método de controle de qualidade do CPRF com fins estruturais. Neste sentido, os seguintes objetivos específicos foram estabelecidos:

- O direcionamento principal do trabalho será feito através da verificação da influência dos diâmetros dos corpos de prova preparados a partir de testemunhos extraídos de placas para a caracterização do material pelo controle por deslocamento axial, considerando as resistências residuais associadas a ELS e ELU.

- Avaliar a consistência do ensaio em termos de correspondência entre os resultados obtidos a partir conversão analítica do deslocamento axial em TCOD através do DIC 3D.
- Caracterizar o teor de fibras efetivamente incorporado ao material através do método indutivo aplicado em cada um dos corpos de prova utilizados no experimento.
- Avaliar o tamanho da amostra necessária para a obtenção de resultados estatisticamente confiáveis em função da dimensão do corpo de prova utilizado durante o ensaio.

2. O ENSAIO DE DUPLO PUNÇIONAMENTO UTILIZADO PARA O CONTROLE DO CONCRETO PROJETADO REFORÇADO COM FIBRAS

O concreto reforçado com fibras evoluiu muito como tecnologia no Brasil e no mundo, hoje sendo amplamente empregado em diversas obras de infraestrutura, saneamento básico e transportes. Estruturalmente, o CRF proporciona ao elemento uma pseudo-ductilidade, pois estas trabalham como pontes de tensão, reduzindo a velocidade de propagação das fissuras surgentes (FIGUEIREDO, 2011), isso permite que a estrutura possa absorver deformações consideráveis antes da falha.

Desde 2007, o Brasil conta com normalização para fibras de aço ABNT NBR 15530 (ABNT:NBR15530, 2019), com o intuito de fornecer requisitos mínimos de forma geométrica, tolerâncias dimensionais, resistência à tração e dobramento, além de parâmetros de classificação para as fibras de aço de baixo teor de carbono (FIGUEIREDO, NETO e FARIA, 2008). A regulação da produção de fibras de aço garante um mínimo de domínio para a assertividade da utilização deste tipo de reforço.


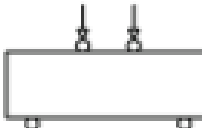
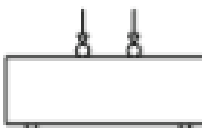
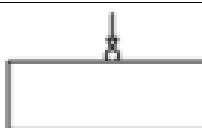
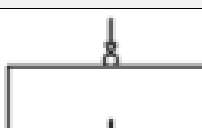
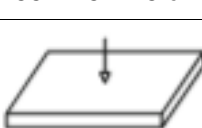
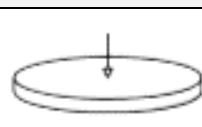
A publicação do fib model code (FIB, 2013) representou uma grande contribuição para a aplicação estrutural do CRF em geral, com fundamentação para métodos de dimensionamento. Esta publicação serve de fundamentação para a atual norma brasileira de dimensionamento de estruturas utilizando o CRF (ABNT:NBR16935, 2021) que também contempla a utilização do material em estruturas contínuas apoiadas em meio elástico como é o caso de pavimentos. Em termos de controle, a normalização brasileira já prevê a utilização do ensaio de duplo punçionamento para verificação da conformidade do CRF (ABNT:NBR16939, 2021). Esta norma brasileira está fundamentada na norma espanhola (AENOR:UNE83515, 2010) já incorporando a possibilidade de controle do ensaio apenas pelo deslocamento como proposto por PUJADAS (2013). Ambas as normas permitem a utilização de cilindros com 10 cm de diâmetro, especialmente quando os corpos de prova são obtidos à partir de testemunhos extraídos tal é o caso da prática de controle do CPRF. A tendência de utilização de corpos de prova de menores dimensões é demonstrada pelos estudos experimentais recentes focando o controle do CPRF baseado no EDP (GALOBARDES, SILVA, *et al.*, 2019; MONTEIRO e SILVA, 2020).

A cultura de utilização do EDP para o controle do CRF está se disseminando progressivamente no Brasil. No que se refere ao CPRF isto também ocorre e o método do EDP está previsto na prática recomendada do CBT (FIGUEIREDO, SALVADOR, *et al.*, 2020) como uma alternativa aos métodos tradicionais de punção de placas e de flexão de prismas.

O uso do EDP para o controle do CPRF pode ser feito como complementar aos ensaios de punção de placas que são fundamentados na mensuração da energia absorvida durante o ensaio (CÁCERES, CAVALARO e FIGUEIREDO, 2021). A tendência mais recente, fundamentada na abordagem adotada pelo fib Model Code (FIB, 2013) e pela norma brasileira (ABNT:NBR16935, 2021) é utilizar ensaios que permitam a mensuração da resistência residual do material. Isto permite a obtenção de equações constitutivas que mais facilmente são empregadas nos critérios de dimensionamento de estruturas que utilizam o CRF. Neste sentido, o EDP também já se mostrou correlacionável com outros ensaios mais complexos de execução para o controle do CPRF (CÁCERES, MONTE, *et al.*, 2021).

O EDP apresenta-se como uma alternativa frente a métodos de controle mais tradicionalmente recomendados por conta das características já citadas. Vale ressaltar que, devido a carência tecnológica de controle de qualidade no emprego de fibras como reforço, novos métodos de controle e caracterização continuam frequentemente sendo propostos como substituição destes mais usuais. A Tabela 1, adaptada de (MOLINS, AGUADO e SALUDES, 2009), ilustra algumas destas alternativas, assim como seus respectivos coeficientes de variação. No estudo, o autor (MOLINS, AGUADO e SALUDES, 2009) apresenta um coeficiente de variação esperado para o EDP de 13%, mas vale destacar que esta medida pode ser maior em níveis elevados de deslocamento axial e a depender da configuração de equipamento utilizado na execução (NOGUEIRA, SIMÃO, *et al.*, 2020; SIMÃO, NOGUEIRA, *et al.*, 2019).

Tabela 1 - Métodos de controle e seus respectivos coeficientes de variação, adaptado de (Molins, et al., 2009)

Método de ensaio	Layout	Coeficiente de Variação
ASTM C-1018	 35 x 10 x 10 cm	15%
NBN B 15-238	 60 x 15 x 15 cm	12-20%
Viga EFNARC	 55 x 7.5 x 12.5 cm	20%
Ensaio de 3 pontos	 55 x 7.5 x 12.5 cm	17%
RILEM de 3 pontos	 55 x 15 x 15 cm	10-25%
Painel quadrado EFNARC	 60 x 60 x 10 cm	9%
Painel Circular	 7.5 x Ø80 cm	6-13%

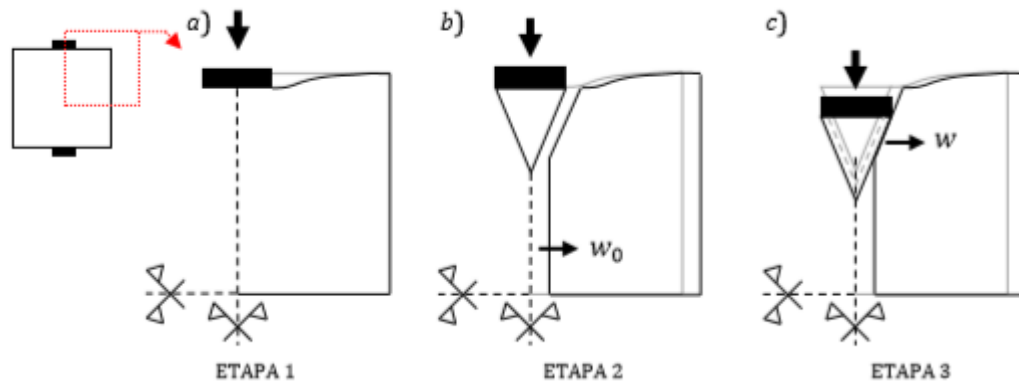
Como proposta, o EDP baseia-se na mensuração indireta da capacidade resistente residual do compósito a partir do duplo puncionamento do corpo cilíndrico por discos de aço e surgiu como alternativa justamente para a avaliação do CRF.

Com o incremento da aplicação das forças, o aumento das tensões se dá radialmente a partir da base do disco, de onde as fraturas começam a evoluir com a propensão de formação de dois cones nas extremidades. Segundo a configuração original proposta para o ensaio, padronizada pela norma espanhola UNE 83515:2010 (AENOR:UNE83515, 2010), o aumento do perímetro deve ser monitorado por um extensômetro de circunferência (TCOD – “*total circumferential opening displacement*”), o que gera uma certa dificuldade de exequibilidade do ensaio. Uma vez que, não se trata de um equipamento frequentemente presente na maioria dos laboratórios.

Visando maior disseminação da metodologia de ensaio, foi proposto um modelo de conversão analítica para a transformação da medida de deslocamento vertical em TCOD (PUJADAS, 2013), eliminando-se o uso do extensômetro. Esta proposta foi validada experimentalmente com erro inferior a 6,7% por MONTE, TOALDO e FIGUEIREDO, 2014 com resultados de variabilidade reduzida. Todavia, validações extras no modelo de simplificação proposto por diferentes métodos de medição podem fornecer maior confiabilidade ao EDP.

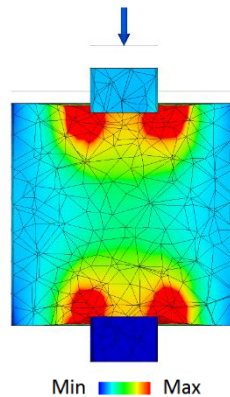
A conversão analítica do controle do EDP por deslocamento axial para TCOD se dá pela compreensão de seu funcionamento e divisão em 3 etapas (PUJADAS, 2013). São estas: uma primeira etapa elástica – linear, uma posterior de transição e uma terceira fase onde se mensuram as tensões residuais. As Figura 1 e Figura 2 representam, respectivamente, as etapas mecânicas do EDP e um mapa de calor da distribuição de tensões antes da ruptura - obtidas por um modelo simples de elementos finitos de 900 nós para a representação da etapa elástico linear.

Figura 1 - Representação das 3 etapas do EDP. a) etapa visco elástica; b) etapa de transição; c) etapa pós fissuração.



Fonte: Reproduzido de (Pujadas, 2013).

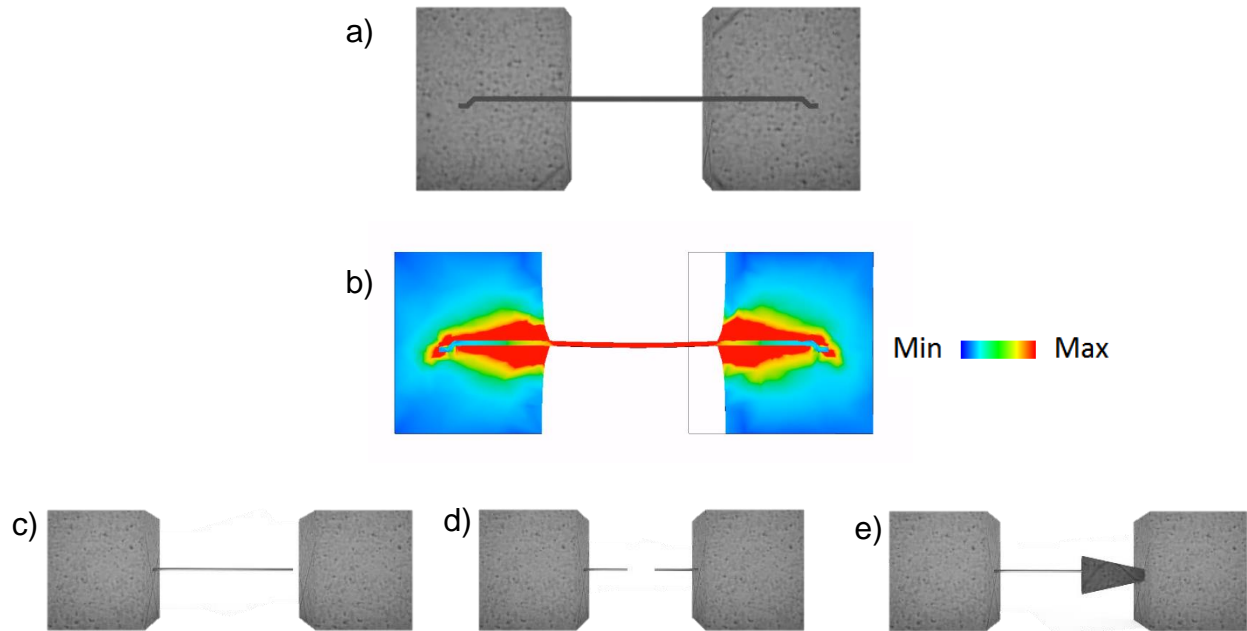
Figura 2 - Mapa de calor das tensões Von-Mises geradas durante o ensaio de duplo puncionamento - corte longitudinal. (Acervo próprio)



A capacidade de resistência residual mensurada pelo EDP, e demais métodos de controle, pode ser relacionada a interação das fibras com a matriz, que varia de acordo com o teor, geometria e características intrínsecas das mesmas, além da resistência da matriz cimentícia que as envolve (FIGUEIREDO, 2011). Esta interação das fibras com a matriz é responsável por permitir a absorção de tensões e deformações em quaisquer pontos e direções na estrutura, uma vez que as fibras atuam como pontes de transferência tensão, onde, com o decorrer da propagação das fissuras, o reforço desempenha a ancoragem das duas extremidades até a ruptura total da fibra, o deslizamento completo ou o fraturamento da matriz. Estes fenômenos governam o

comportamento residual do concreto reforçado por fibras e são representados por modelos na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

Figura 3 - a) Exemplo de fibra integrada a matriz; b) Mapa de calor de distribuição de tensões Von-Mises fibra e matriz (Acervo próprio); c) Deslizamento completo; d) Ruptura total da fibra; e) Fraturamento da matriz.



No presente estudo, o foco principal é o de avaliação do EDP no que se refere à sua capacidade de quantificação das resistências residuais para a avaliação do CPRF para a finalidade estrutural de execução do revestimento de túneis.

3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Para garantir a reprodução adequada das condições de aplicação do concreto projetado ao revestimento do túnel, todos os corpos de prova foram produzidos a partir de testemunhos extraídos de painéis de teste moldados *in loco*, em um túnel em construção em São Paulo, Brasil ("Rodoanel - Lote 5 " pelo consórcio Construcap-Copasa) - o emboque deste túnel é apresentado na Figura 4.

Figura 4 - Emboque do túnel RODOANEL - Lote 5.



3.1. Materiais utilizados

Os painéis de teste foram moldados com um equipamento de concreto projetado Sika® PM500 robojet, mistura úmida. Estes painéis foram todos moldados com a mesma composição de concreto e na mesma série de projeção. Os procedimentos definidos em Norma Brasileira ABNT NBR 13070 (ABNT:NBR13070, 2012) foram seguidos em todas as etapas desde a preparação das placas até a cura.

As matérias-primas e composição da mistura de concreto projetado utilizados no programa experimental foram desenvolvidos e fornecidos pelo consórcio Construcap-Copasa. Os materiais utilizados são descritos nas Tabela 2 e Tabela 3, em sua composição de matriz cimentícia e características de fibras de aço utilizadas, respectivamente. A resistência característica a compressão (f_{ck}) especificada do CPRF

foi de 30 MPa. No ANEXO A deste trabalho encontram-se a ficha de relatório de obra referente a moldagem das placas.

Tabela 2 - Controle de materiais utilizados na projeção, segundo ficha de verificação de obra - Composição do CPRF

<i>Cimento Votorantim tipo CPV Ari (kg/m³)</i>	430
<i>Areia natural (kg/m³)</i>	263
<i>Areia artificial (kg/m³)</i>	1004
<i>Agregado graúdo (kg/m³)</i>	434
<i>Água (kg/m³)</i>	206
<i>Superplastificante Glenium (L)</i>	2.58
<i>Acelerador MasterRoc* (L)</i>	13
<i>Teor de fibras (kg/m³)</i>	40

Tabela 3 - Controle das fibras utilizadas, segundo dados fornecidos pela fabricante. Propriedades mecânicas e geométricas das fibras de aço (dados fornecidos pela fabricante)

<i>Tipo de fibra</i>	DRAMIX® 3D 45/35 BL
<i>Comprimento L_f</i>	35 mm
<i>Diâmetro ϕ</i>	0.75 mm
<i>Fator de forma L_f/ϕ</i>	45
<i>Tensão de ruptura f_{uf}</i>	1225 MPa
<i>Módulo de Young E_{sf}</i>	210 GPa
<i>Poisson ν</i>	0.3

3.2. Extração e preparação de testemunhos

Para a realização dos ensaios, foram extraídos um total de 21 testemunhos cilíndricos, sendo doze deles com 10 cm e nove com 15 cm de altura/diâmetro. Os testemunhos foram extraídos de três placas moldadas, com dimensões de acordo com Figura 5, e planejamento/distribuição como representado na Figura 6. Inicialmente, as superfícies dos painéis foram marcadas com uma disposição que permite a extração de cinco

* Não foi informada pela equipe de obra quais foram as subespecificações dos aditivos GLENIUM® e MasterRoc® utilizados na composição do concreto

círculos pequenos e quatro círculos maiores, respectivamente de 10 cm e 15 cm de diâmetro, conforme demonstrado na Figura 7 – a). A extração dos cilindros a partir dos painéis foi realizada no laboratório da Universidade de São Paulo utilizando serras copo de coroa diamantada. Após as extrações, cada cilindro foi identificado em suas superfícies superior e inferior, a fim de garantir que todos os cilindros fossem ensaiados com a mesma orientação e posição na máquina de teste, a fim de mitigar uma possível interferência desta variável nos ensaios, uma vez que, devido ao fenômeno de reflexão que ocorre durante o processo de projeção, existe a possibilidade de que a concentração de fibras varie ao longo da altura dos testemunhos e tal variação só poderia ser investigada, dentro da metodologia adotada neste trabalho, por meios destrutivos. As faces que estavam em contato com a fôrma foram designadas e identificadas como “fundo” e a outra superfície como “topo”.

Figura 5 - Geometria do painel de teste utilizado na projeção: (a) vista superior (b) corte transversal.

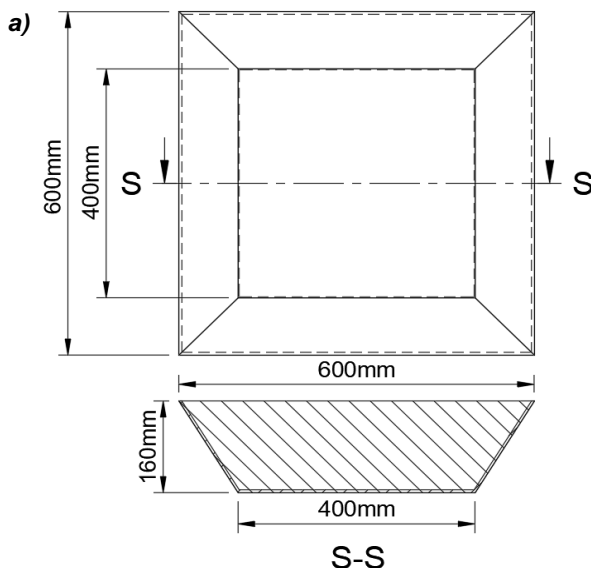


Figura 6 – Planejamento seguido para extração dos testemunhos dos painéis projetados.

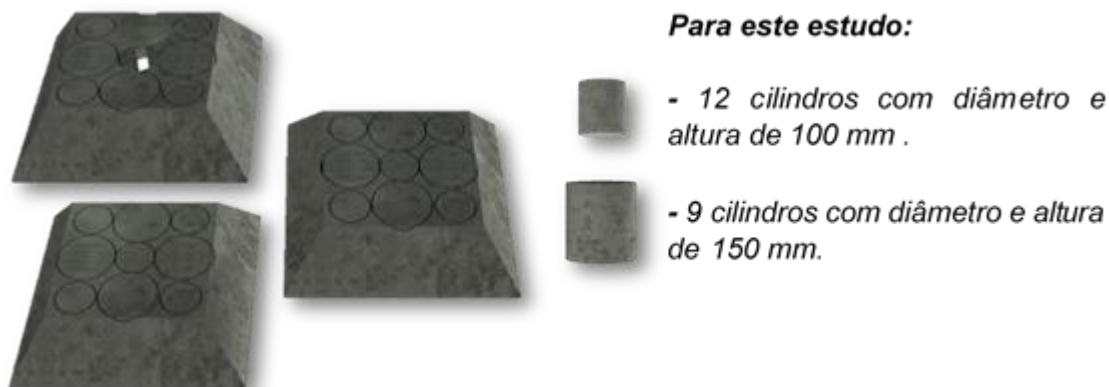
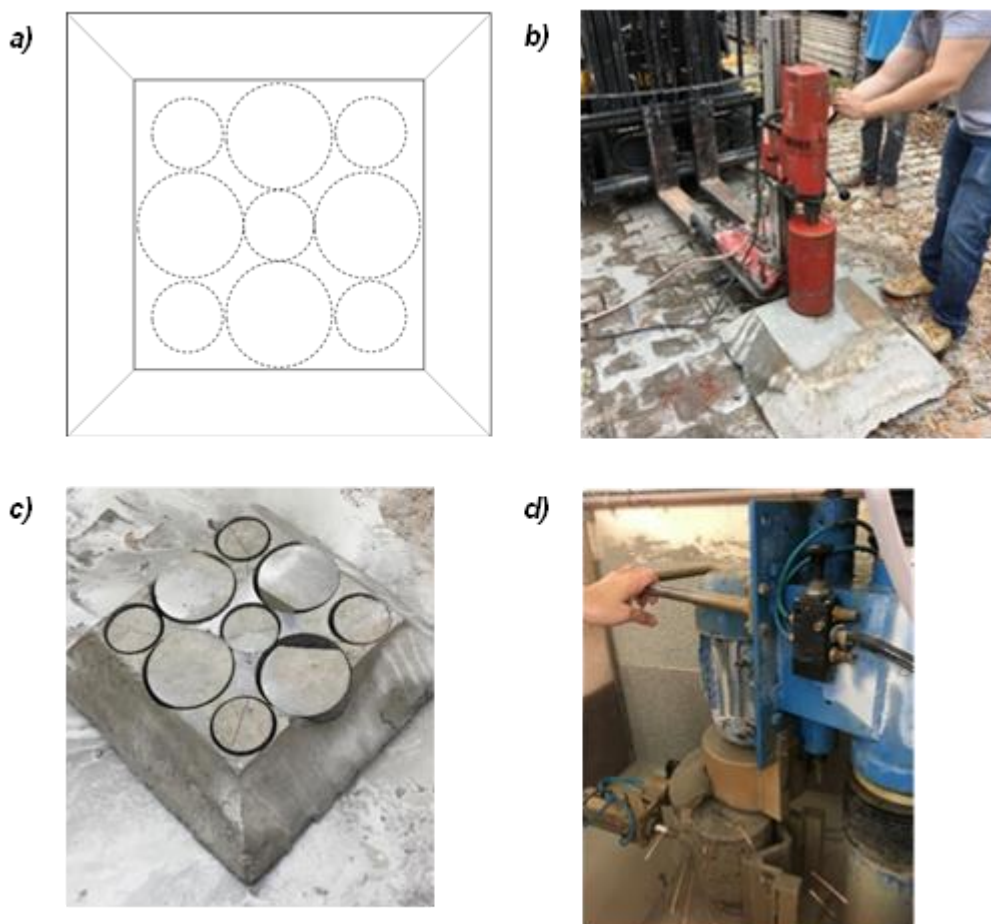


Figura 7 – a) Planejamento de extração; b) Procedimento de extração dos cilindros; c) Painel de concreto projetado após a extração dos testemunhos; d) Polimento da superfície.



As extrações foram conduzidas conforme Figura 7 - (b) e (c). O material excedente do testemunho foi cortado para garantir que os corpos de prova cilíndricos tivessem alturas

de 10 cm e 15 cm, mantendo a relação altura:diâmetro de 1:1. Por fim, as superfícies de “topo” dos cilindros também foram polidas e retificadas, conforme Figura 7 - (d). Este procedimento foi feito para garantir uma boa superfície de contato com os discos de carregamento de aço, evitando qualquer concentração de tensões indesejadas nesta área (NOGUEIRA, SIMÃO, *et al.*, 2020).

3.3. Métodos de ensaio

Todos os ensaios do programa foram realizados quando a idade do CPRF já havia superado o tempo de 50 dias em relação a data de projeção. A realização dos ensaios com elevada idade mitiga possíveis influências relacionadas às condições de hidratação do material uma vez que, à medida que aceleradores e cimento de alta resistência inicial foram utilizados, nesta idade, a resistência já se encontra estabilizada. Esta preocupação decorreu do fato de não ser possível realizar todos os ensaios em um único dia.

Para a avaliação da representatividade do EDP, os ensaios foram realizados em duas séries, uma primeira de 10 cm de diâmetro e 12 corpos de prova e a segunda de 15 cm com 9 corpos de prova. Previamente, cada cilindro foi submetido ao ensaio de indutância para a determinação dos teores de fibra de aço.

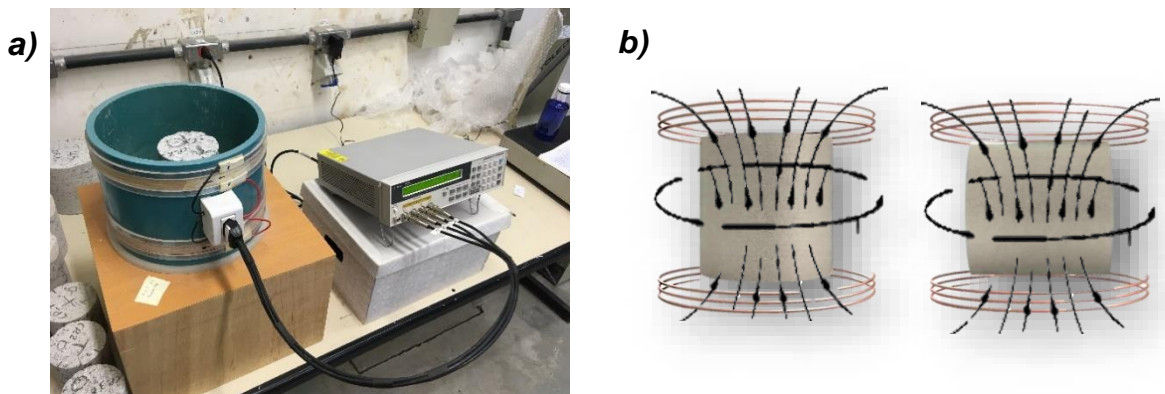
Três corpos de prova de cada amostra foram monitorados por equipamento de DIC 3D, totalizando 6 ensaios EDP por este método. Como esta metodologia não é convencionalmente descrita por normas e a sua utilização em trabalhos científicos voltados para o CRF não ocorre com frequência, uma descrição mais detalhada é fornecida mais adiante. Por fim, o EDP foi abordado sob uma perspectiva de modelagem numérica futura. Neste estudo, fez-se apenas uma avaliação inicial da aplicabilidade desta modelagem, o que está melhor detalhado no Apêndice 1. A seguir serão descritos em maiores detalhes os métodos de ensaio utilizados neste trabalho.

3.3.1. Método Indutivo

O método consiste na medição da variação de indutância causada pelo aço das fibras em cada corpo de prova (TORRENTS, PUJADAS, *et al.*, 2012; LÓPEZ, 2013; CAVALARO,

LÓPEZ, *et al.*, 2015). O procedimento foi o mesmo utilizado por (GALOBARDES, SILVA, *et al.*, 2019; CÁCERES, MONTE, *et al.*, 2021) e permite quantificar o teor de fibra de aço para cada corpo de prova cilíndrico com precisão. O teor de fibras é estimado a partir das variações proporcionais nos posicionamentos dos cilindros em uma caixa de indutância. Previamente às medições, realiza-se uma calibração com a mesma fibra de aço utilizada na projeção e com teores conhecidos. As quantidades utilizadas foram referentes a 15 e 45 kg/m³. As fibras foram aplicadas manualmente em cilindros de isopor de mesmas dimensões e conseqüentemente volumes de 785,40 cm³ e 2650,72 cm³ referente aos respectivos diâmetros de 10 cm e 15 cm. Em massa, foram inseridas 11,78 g e 35,34 g de fibras para 10 cm; 39,78 g e 119,24 g para 15 cm. Após a calibração, a medição da indutância nos testemunhos extraídos é realizada em quatro posições, uma na vertical (ΔL_z) e as outras três na horizontal, nos ângulos de 0° e 90° (ΔL_0 , ΔL_{90} , respectivamente).

Figura 8 – a) Equipamento de medição de indutância; b) Representação do campo de indução medido pelo equipamento com posicionamento do testemunho em duas disposições.



Os cilindros, quando posicionados em diferentes disposições dentro da caixa da Figura 8 – a), causam diferentes ΔL , dependendo do teor e orientação das fibras internamente. Ao analisar a soma dessas variações de indutância, estima-se o teor de fibras e, a partir da proporção de variação em cada posição, é possível estimar a orientação predominante das fibras. Para este trabalho, esta orientação preponderante não foi calculada. Nas Tabela 4, Figura 9 e Figura 10 estão apresentados os resultados de calibração.

Tabela 4 - Calibração das indutâncias	Testemunhos de 10 cm		Testemunhos de 15 cm	
	11,78 gr.	35,34 gr.	39,75 gr.	119,24 gr.
Z	0,312 mH	0,911 mH	0,903 mH	2,740 mH
0°	0,467 mH	0,989 mH	1,078 mH	3,465 mH
90°	0,307 mH	1,056 mH	1,179 mH	3,651 mH
Indutância total	1,083 mH	2,956 mH	3,160 mH	9,857 mH

Figura 9 - Interpolação da calibração dos corpos de prova de 10 cm de diâmetro.

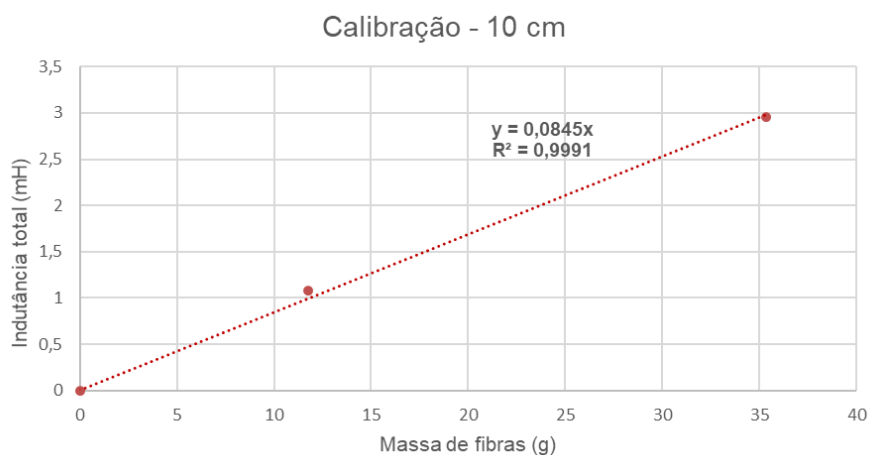
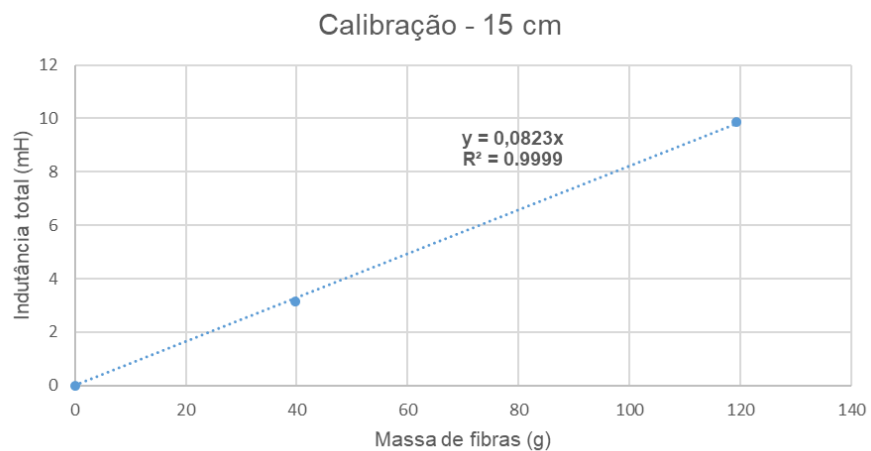


Figura 10 - Interpolação da calibração dos corpos de prova de 15 cm de diâmetro.



3.3.1. Análise de imagens

A análise de imagem, muito comumente referenciada como “*digital image correlation*” (DIC), é um método fotogramétrico de medição sem contato e não destrutivo, que é comprovadamente preciso e amplamente adotado em engenharia mecânica e aeroespacial (AMYOT, PICKWORTH, *et al.*, 2019). Para deslocamentos que ocorram em profundidade, duas ou mais câmeras devem ser utilizadas (DIC 3D). Neste estudo, para monitorar o incremento de diâmetro (dR) dos corpos de prova durante o EDP, foi utilizado um sistema de DIC 3D.

O DIC 3D, no caso do EDP, permite uma alternativa à corrente extensométrica sem apresentar os mesmos problemas de contato e escorregamentos desta. Além disso, é um método que permite o monitoramento do campo de deslocamentos ao longo de toda a altura e não somente na região central, possibilitando uma maior amplitude de avaliação e uma quantidade maior de informação que pode ser contrastada com modelos numéricos que simulam essa condição. Em contrapartida, o ângulo medido por duas câmeras fica próximo a 120° e refere-se a cerca de 1/3 de toda superfície lateral dos cilindros.

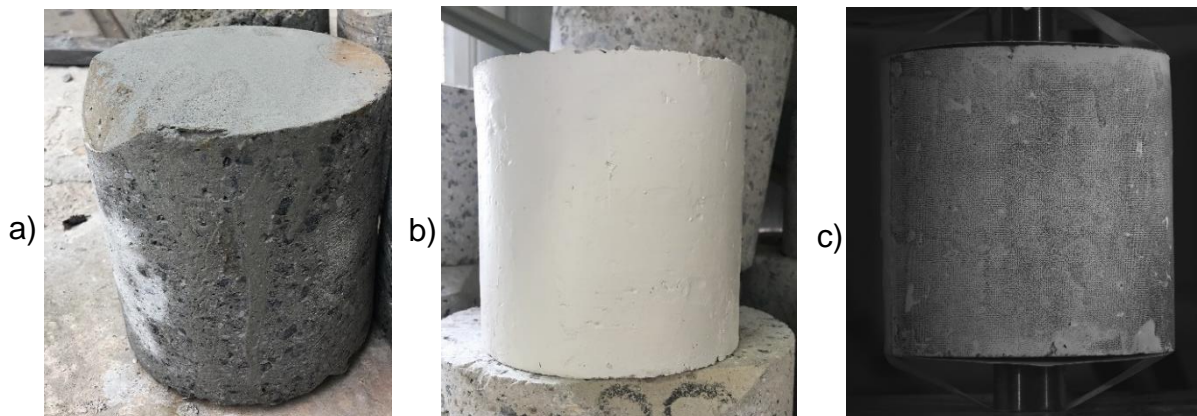
A metodologia permite ainda a avaliação de possíveis discrepâncias ao longo da própria extensão dos cilindros como, por exemplo, uma possível diferença entre o aumento diametral na seção superior em relação a inferior, ou vice-versa, que pode ocorrer por uma possível diferença no teor de fibras ao longo do cilindro.

Para a preparação dos testemunhos, as falhas superficiais dos testemunhos foram preenchidas com massa acrílica para garantir uma superfície lisa que pudesse ser inteiramente monitorada. Esta camada de massa foi aplicada apenas em pontos específicos e descontínuos, de modo que não houve contingência da propagação de fissuras.

Após a suavização da superfície, foram aplicadas três camadas de tinta branca e, em seguida, uma última camada aleatória de pontos pretos, referenciada comumente como

“*speckle pattern*”, foi aplicada nas superfícies laterais dos cilindros com o auxílio de um carimbo próprio[†] para isso. A Figura 11 ilustra estas etapas descritas.

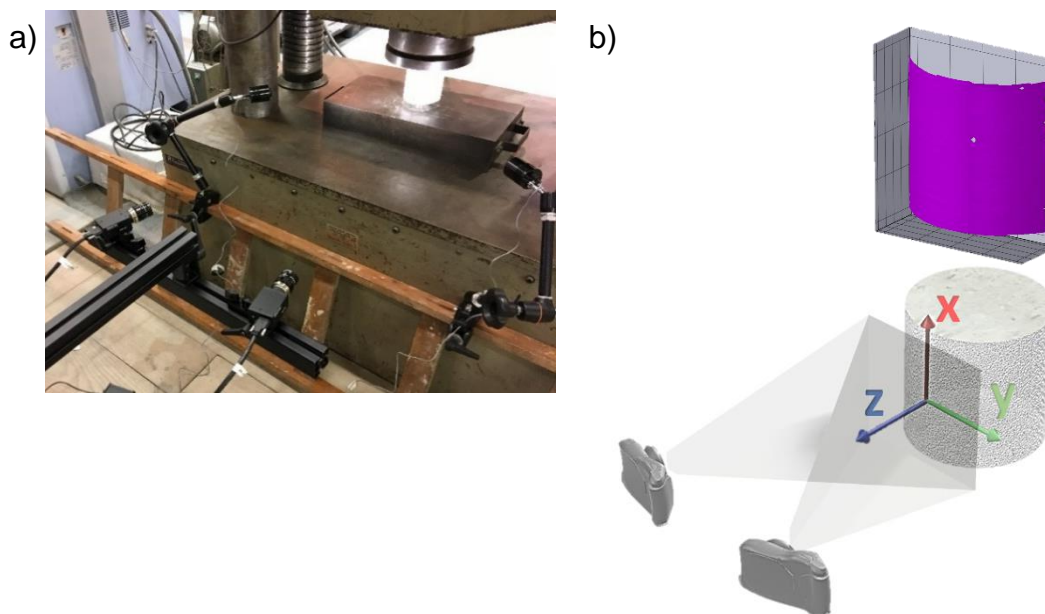
Figura 11 – Parte dos procedimentos de preparo. a) Testemunho logo após a extração das placas; b) Testemunho após a aplicação de massa polimérica e tinta branca; c) Imagem do decorrer dos ensaios, com os cilindros já finalizados com a camada de pontos pretos “*speckle pattern*”.



Os cilindros foram monitorados por duas câmeras de 5,0 megapixels, sincronizadas e com capturas a uma taxa de 1 fps. Os equipamentos utilizados para a captação e processamento das imagens foram cedidos pela empresa LYNX, as imagens foram processadas pelo *software VIC-3D* da *correlated solutions*, no laboratório de engenharia aeroespacial da UFABC. A Figura 12 mostra o conjunto de equipamentos utilizado.

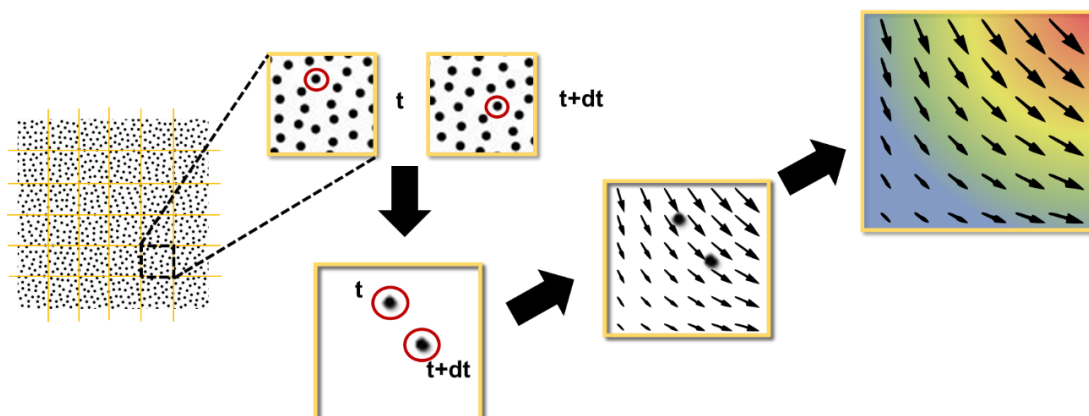
[†] Recomenda-se, para o melhor resultado do monitoramento, que cada ponto preto seja equivalente a aproximadamente 6 pixels da imagem. Tendo as variáveis de resolução das câmeras utilizadas, distância e tamanho dos corpos de prova definidos, pode-se optar pelo carimbo que resultará em menores erros nas medidas pela recomendação do fabricante.

Figura 12 – a) Montagem do Sistema de DIC 3D; b) Representação dos resultados obtidos e superfície monitorada.



O processo algorítmico do DIC analisa uma sequência de imagens, a fim de dividir a área monitorada em regiões de subconjuntos de pontos - “subset” - para assim realizar os rastreios de deformações (a quantidade de “subsets” na área monitorada pode ser definida manualmente também). Os campos de deformações são então calculados a partir da análise das imagens de cada “subset” no tempo, onde o posicionamento de cada ponto é comparado com sua origem referencial (onde a imagem atual é comparada com a imagem de referência do início do ensaio), ou incremental (comparação da imagem atual com a anterior). Neste estudo a correlação das imagens foi adotada pela abordagem referencial, uma vez que a análise incremental resulta em acúmulo de erros. A Figura 13 de SUTTON, ORTEU e SCHREIER, 2009 ilustra o raciocínio algorítmico descrito. Vale destacar a importância de que a aplicação da camada de pontos pretos - “speckle pattern” - seja aleatória, pois isto permite com que o algoritmo diferencie os subconjuntos - “subsets” - nas imagens monitoradas. Em caso contrário, o controle do campo de deformações ficaria comprometido.

Figura 13 – Representação dos chamados “subsets” e de como é realizado o controle pelo software.



Fonte: Reproduzido de (SUTTON, ORTEU e SCHREIER, 2009).

Analogamente, para controle de corpos de prova que tenham superfícies com três dimensões (cilindros, no caso deste estudo), a utilização de duas câmeras permite a triangulação do posicionamento dos pontos dos “subsets” e através de transformada cilíndrica surge a possibilidade do monitoramento de novas variáveis R , Z (cilindros) e Θ , bem como dR , dZ (cilindros) e $d\Theta$. Estes referem-se ao raio (distância ao eixo polar), coordenada axial e ângulo de rotação (em radianos), respectivamente.

Apesar de sua pouca utilização na engenharia civil, o método se destaca ainda por sua portabilidade e capacidade de realizar obtenção de dados em verdadeira grandeza além de permitir análise de campos de deformações em tempo real (AMYOT, PICKWORTH, *et al.*, 2019).

Neste trabalho, os dados provenientes do DIC 3D foram utilizados para traçar as relações entre a carga aplicada com o aumento perimetral (dR) médio de toda a seção a partir do ponto de carga de pico atingida, desta forma, ancorando todos os resultados a um mesmo referencial e descartando variações prévias que possam ter ocorrido por conta da acomodação do cilindro no equipamento. Posteriormente, os dados obtidos de aumento diametral dR originários do DIC 3D foram comparados com os de TCOD obtidos pela conversão analítica do EDP. Para isto, os dados obtidos do ensaio foram alinhados pelo tempo com o de análise de imagens a partir do ponto de fissuração.

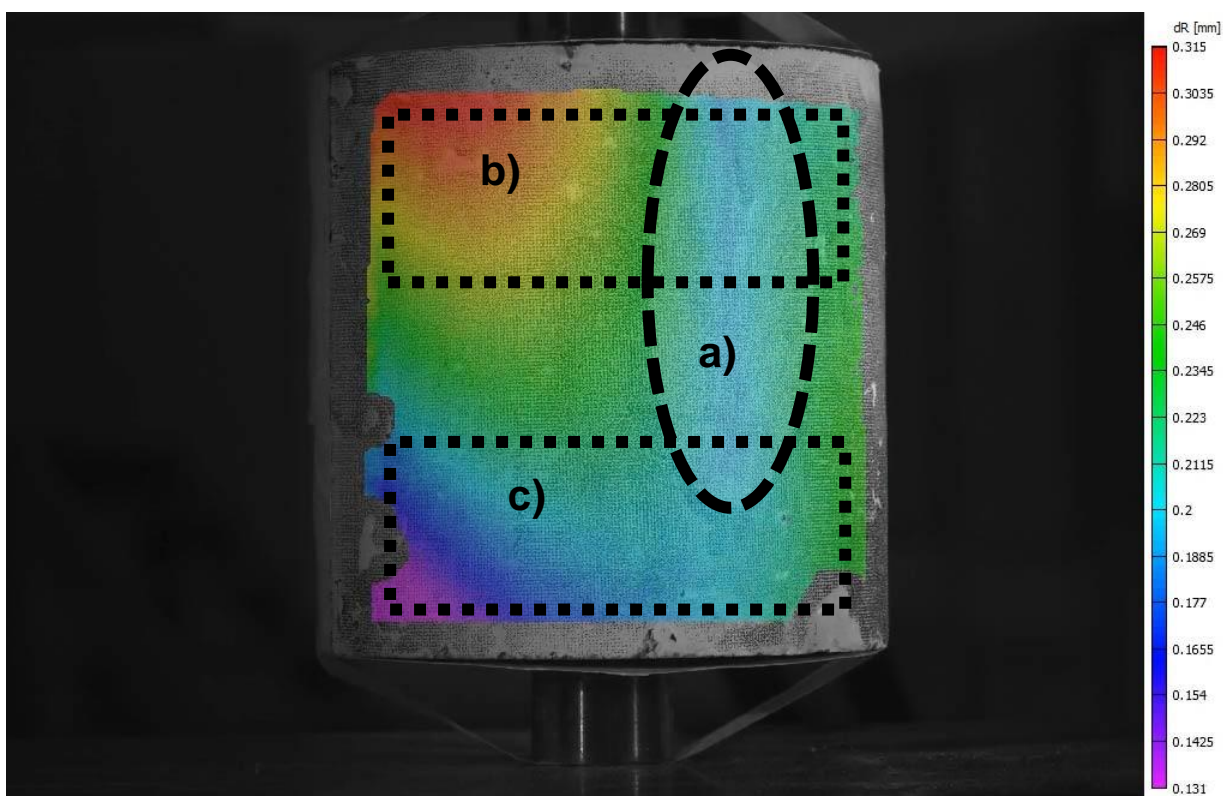
Tomando proveito ainda da versatilidade do DIC 3D, foi realizada a análise dos incrementos diametraes separadamente nas porções superiores e inferiores dos corpos de prova, além da avaliação perimetral simulada por um extensômetro de circunferência

no centro do cilindro. As Figura 14 e Figura 15 ilustram os dados monitorados durante os ensaios, sendo S0 e S1 as porções superiores e inferiores, respectivamente, e E0 o extensômetro virtual utilizado.

Figura 14 – Referência dos monitoramentos realizados nos cilindros: S0, S1 and E0.



Figura 15 – Correlação de imagens 3D. a) Região de origem da fissura radial; b) Seção superior com maior incremento perimetral; c) Seção inferior com menor incremento perimetral.

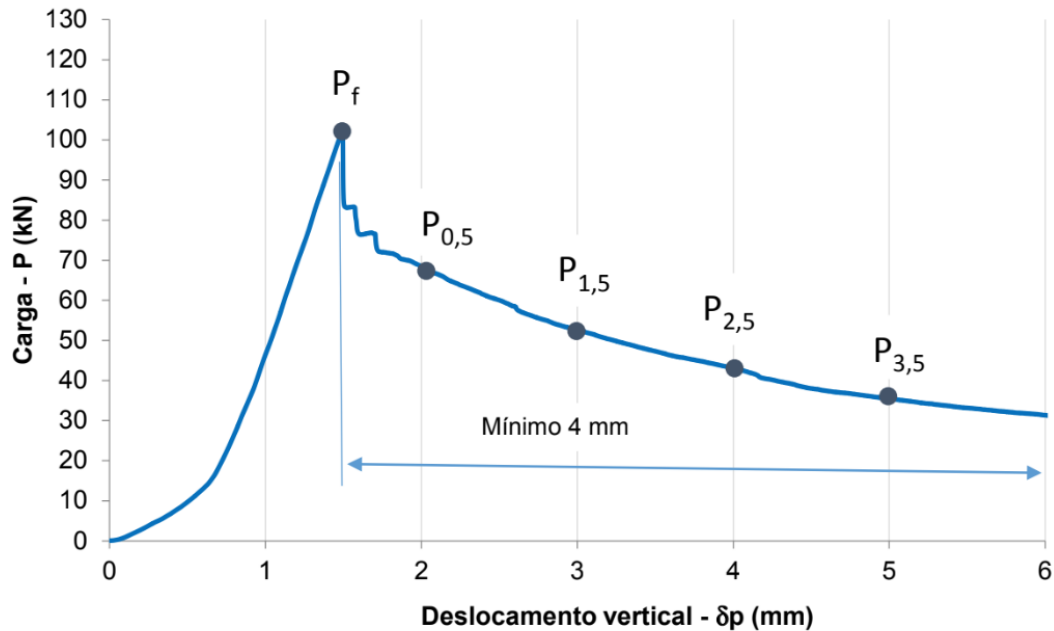


3.3.2. Ensaio de duplo puncionamento

Para a realização dos EDP's, foram seguidos os procedimentos da norma ABNT NBR 16939 (ABNT:NBR16939, 2021). Os testes foram realizados em uma máquina de ensaio universal servo controlada SHIMADZU com capacidade de 200 tf e configuração de ciclo fechado, o que é importante para reduzir a influência na determinação das resistências pós fissuração por instabilidades pós-pico (SIMÃO, NOGUEIRA, *et al.*, 2019). Seguindo as diretrizes, a carga residual foi controlada prioritariamente nos pontos de 0,5; 1,5; 2,5 e 3,5 mm[‡] de incremento no deslocamento axial em relação ao ponto de fissuração (P_f), respectivamente $P_{0,5}$, $P_{1,5}$, $P_{2,5}$ e $P_{3,5}$ conforme Figura 16.

[‡] Esses valores de controle de deslocamento são aplicados indistintamente aos corpos de prova com 10 ou 15 cm de diâmetro.

Figura 16 – Representação da carga por deslocamento axial (ABNT NBR16939).



A carga foi aplicada uniformemente com velocidade de descida de 0,5 mm/min. Os discos de carga possuíam um diâmetro de 1/4 do diâmetro da amostra e altura de 1/5 da altura da amostra e são dispostos no centro das faces superior e inferior do cilindro.

A resistência à tração do concreto reforçado com fibras foi calculada pela equação (2) abaixo. A Figura 17 ajuda a visualizar os parâmetros que são utilizados no cálculo

$$f_t = \frac{4 \times P_f}{9 \times \pi \times a \times H} \quad (1)$$

Onde:

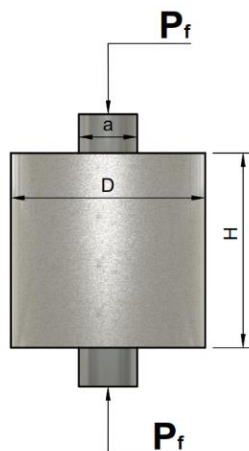
f_t = Carga de tração, em MPa;

P_f = Carga de fissuração, em N;

a = diâmetro do disco de carga, em mm;

H = altura da amostra, em mm.

Figura 17 - Diagrama do EDP e suas designações



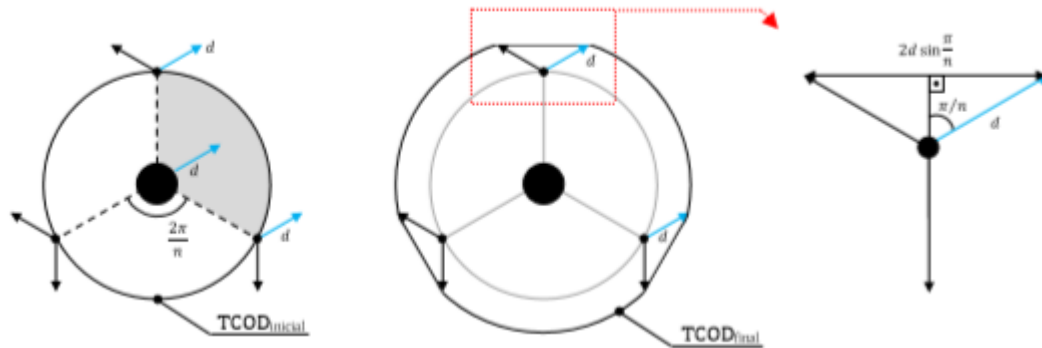
O mecanismo de fratura, frequentemente ocorre por três, ou em alguns casos, quatro ou duas fraturas radiais (MOLINS, AGUADO e SALUDES, 2009), como ilustrado na Figura 18. Vale ressaltar que esta característica serve também como dado de entrada para conversão analítica de deslocamento axial para TCOE e foi devidamente observada na realização dos ensaios.

Figura 18 - Mecanismos de fratura ocorridos presentes a campanha de ensaios. a) 2 fissuras radiais; b) 3 fissuras radiais; c) 4 fissuras radiais.



A altura dos cones formados durante o carregamento e formação de fissuras podem ser estimados ou medidos. Neste estudo, eles foram estimados considerando o ângulo de atrito de 65° (BLANCO, PUJADAS, *et al.*, 2014; MONTE, DE LA FUENTE, *et al.*, 2016). A Figura 19 ilustra o raciocínio desenvolvido para a conversão analítica, assim como as equações (3), (4) e (5) resultantes.

Figura 19 - Ilustração da dedução da conversão de deslocamento axial em deformação circunferencial.



Fonte: Reproduzido de (Pujadas, 2013)

$$TCOD = 0 \quad \delta < \delta_{cr} \quad (2)$$

$$TCOD = n * \frac{a * \delta_{R,0}}{2 * l_{cunha}} * \sin \frac{\pi}{n} * \left(1 - \frac{F}{F_{CR}} \right) \quad \delta_{cr} < \delta < \delta_{R,0} \quad (3)$$

$$TCOD = n * \frac{a}{2 * l_{cunha}} * \sin \frac{\pi}{n} * \left[\delta - \delta_{CR} + \delta_{R,0} * \left(1 - \frac{F_{R,0}}{F_{CR}} \right) \right] \quad \delta \geq \delta_{R,0} \quad (4)$$

Onde,

n = número de fissuras radiais, mecanismo de fraturação

a = diâmetro do disco de carga;

lcunha = comprimento da cunha formada;

Fcr, $\delta_{p,cr}$ = força e deslocamento no ponto de carga máxima;

FR,0, $\delta_{R,0}$ = força e deslocamento no ponto de carga máxima.

Para cálculo da capacidade resistente residual (f_{TCODx}), a mesma equação (2) também funciona para descrição nos diferentes níveis de deformação circunferencial ($TCODx$) - substituindo de forças de tração (f_t) por resistência residual (f_{TCODx}) e carga de fissuração (P_f) por carga equivalente a deformação circunferencial (P_{TCODx}).

Para a análise resistência a tração TCOD, foi levado em consideração um racional de dimensionamento considerando como pontos de referência e suas respectivas cargas associadas ao ELS e ELU. Embora não haja um parâmetro absoluto por se tratar de um racional de dimensionamento sujeito a interpretações, a seguinte lógica foi adotada: Para o ELS, foi considerado o início do estágio com uma abertura de fissura de 0,5 mm que, considerando o mecanismo de fratura mais frequente de três fissuras radiais, representa um TCOD = 1,5 mm. Ponto este, que ultrapassa os trechos de maior instabilidade do

EDP e corresponde também a um estágio anterior prévio ao máximo desempenho das fibras. O valor limite ELU foi considerado na fase de abertura de fissura de 1,5 mm que resulta em um TCOD = 4,5 mm. Isto está de acordo com as recomendações do fib model code (FIB, 2013) para considerações de modos de falha no ELU e também corresponde ao estado de plastificação das fibras.

Ainda, para caracterizar cada ensaio executado, assumiu-se um comportamento linear para as resistências residuais associadas às condições de serviço e última.

Por fim, foi realizado o dimensionamento do tamanho da amostra necessária para a determinação das tensões residuais nos dois diâmetros analisados, a fim de verificar a quantidade mínima de testemunhos necessários para obtenção de um resultado médio representativo. Este dimensionamento foi realizado para uma distribuição t de Student, seguindo a equação (5):

$$n = \frac{Z^2 * DP^2}{(CV * Média)^2} \quad (5)$$

Sendo:

Z = o valor obtido da tabela de distribuição normal no ANEXO C;

DP = o desvio padrão encontrado nos resultados;

CV = o coeficiente de variação entre os resultados;

Média = Média das cargas encontradas nos ensaios.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Apresentação dos resultados do método indutivo

Os resultados de indutância individuais obtidos podem ser encontrados no Apêndice 2 deste trabalho, com o propósito de auxiliar em futuros estudos de abordagem por modelo numérico, por se tratarem de um dado de entrada relevante.

A primeira avaliação realizada nos testemunhos foi a referente ao teor de fibras realmente incorporado pelo método indutivo. A partir das interpolações apresentadas em 3.3.1, foi possível traçar uma estimativa dos teores médios que são apresentados na Tabela 5 e demonstram não haver diferença significativa entre os diferentes cilindros. O coeficiente de variação encontrado foi inferior a 8%, o que representa uma boa acurácia para o método, considerando os volumes de concreto medidos e que parte desta variabilidade é ainda proveniente da heterogeneidade do próprio compósito.

<i>Tabela 5 - Teores médios de fibra e respectivos desvios padrões.</i>	<i>Teor médio (kg/m³)</i>	<i>Desvio Padrão (kg/m³)</i>	<i>Coeficiente de variação (%)</i>
<i>10 cm</i>	38,6	3,0	7,8
<i>15 cm</i>	38,3	2,7	7,0
Média	38,5	2,8	7,4

4.2. Análise de imagens DIC-3D

Os resultados médios ao longo da altura completa do cilindro dR e em suas porções superiores dR S0 e dR S1 estão apresentados individualmente no Apêndice 3 deste trabalho, juntamente com os resultados obtidos para o extensômetro virtual E0. Apesar de haverem diferenças entre os dR de S0 e S1, não ficam evidentes quaisquer padrões que possam reforçar alguma hipótese quanto a possíveis variações nos teores de reforço ao longo do cilindro, estas divergências nos resultados ocorrem de maneira não ordenada. Quanto aos resultados obtidos pelos extensômetros virtuais E0, no geral, demonstraram boa correlação entre os monitoramentos, indicando que o monitoramento

médio de dR ao longo da altura do cilindro é compatível com o controle das deformações na linha central do mesmo. O monitoramento dos resultados médios de dR na porção completa dos cilindros é, portanto, mais representativo para o EDP.

Os resultados de comparação de dR por DIC 3D frente ao TCOD obtido analiticamente, apresentaram uma regressão linear de $R^2=0,99$. As Figura 20 e Figura 21 mostram esta correlação entre a conversão analítica e o método de fotogrametria considerando as deformações específicas (dR/diâmetro e TCOD/perímetro). Destaca-se também a distância entre os pontos durante as primeiras deformações, isso acontece porque durante a fase de transição do EDP (momento logo após as cargas de fissuração, onde há um aumento abrupto do diâmetro) há menos dados capturados, uma vez que as fotos são tomadas em intervalos regulares. O TCOD obtido analiticamente corresponde aos resultados de dR médios independentemente de maiores incrementos diametrais nas regiões inferiores ou superiores.

Uma observação que deve ser feita quanto aos resultados do DIC3D é quanto a sua não representação quantitativa do EDP no caso deste trabalho. A melhor aplicação e identificação de pontos de referências de medidas poderia resultar em dados com representatividade quantitativa.

Figura 20 – Correlação entre o TCOD obtido pela conversão analítica e o aumento perimetral obtido pelos DIC 3D para os corpos de prova de 10 cm.

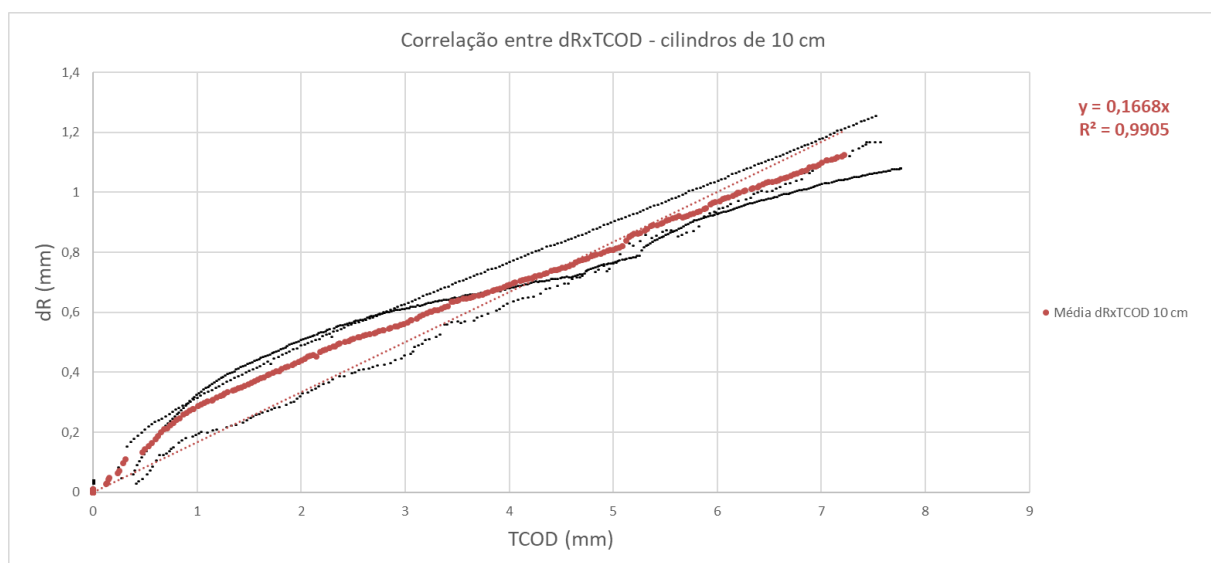
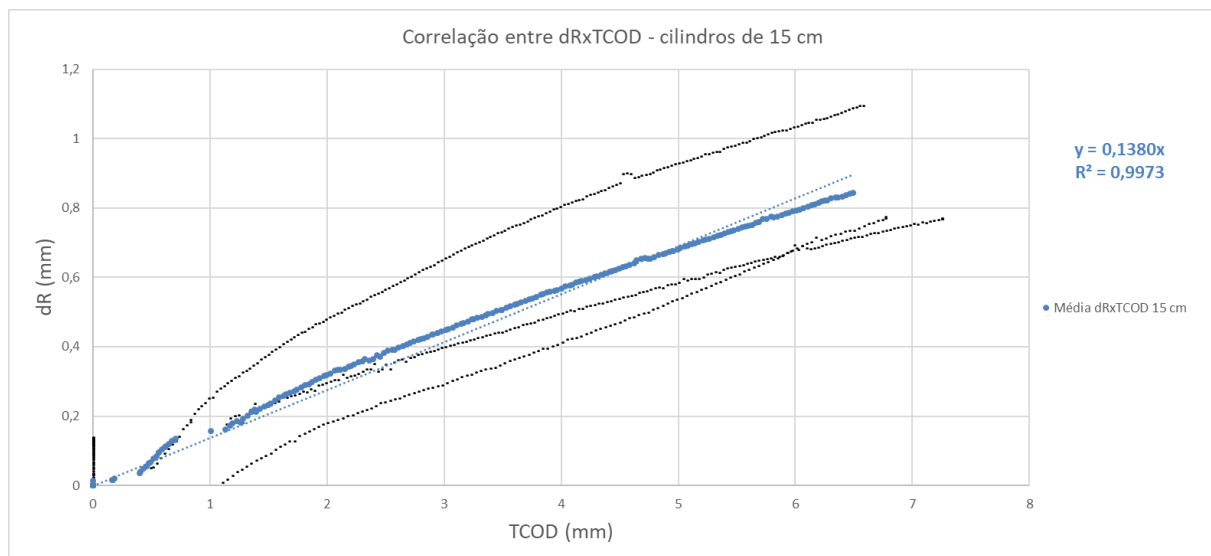


Figura 21 – Correlação entre o TCOD obtido pela conversão analítica e o aumento perimetral obtido pelos DIC 3D para os corpos de prova de 15 cm.



4.3. Ensaio de duplo puncionamento

4.3.1. Carga por deslocamento axial

Os resultados em termos de carga por deslocamento axial são apresentados nas Figura 22 e Figura 23 para os corpos de prova de 10 cm e 15 cm, respectivamente. Os deslocamentos associados às cargas de pico ou de ruptura (F_{cr}) são equivalentes a carga máxima devido ao comportamento de “softening” pós-fissuração. O trecho de instabilidade referente a fase de transição pode ser identificado pela queda abrupta na capacidade resistente residual dos corpos de prova (SIMÃO, NOGUEIRA, *et al.*, 2019; NOGUEIRA, SIMÃO, *et al.*, 2020). Apesar do equipamento utilizado possuir um sistema de controle fechado na velocidade de deslocamento, o mesmo não é eficaz quando o controle da deformação realizado por um extensômetro adequado não é aplicado (SIMÃO, NOGUEIRA, *et al.*, 2019). Ou seja, o controle interno da máquina não é capaz de eliminar as instabilidades que ocorrem após a carga de pico. Essa instabilidade é um comportamento típico observado em ensaios de concretos reforçados com baixo teor de fibras onde a diferença entre F_{cr} e a resistência residual se torna maior (SIMÃO, NOGUEIRA, *et al.*, 2019).

Seguindo os parâmetros de controle propostos pela norma ABNT NBR 16939 (ABNT:NBR16939, 2021), no Apêndice 4 deste texto, encontram-se os resultados individuais obtidos nos ensaios.

Figura 22 - Carga aplicada x Deslocamento vertical para os corpos de prova de 10 cm de diâmetro

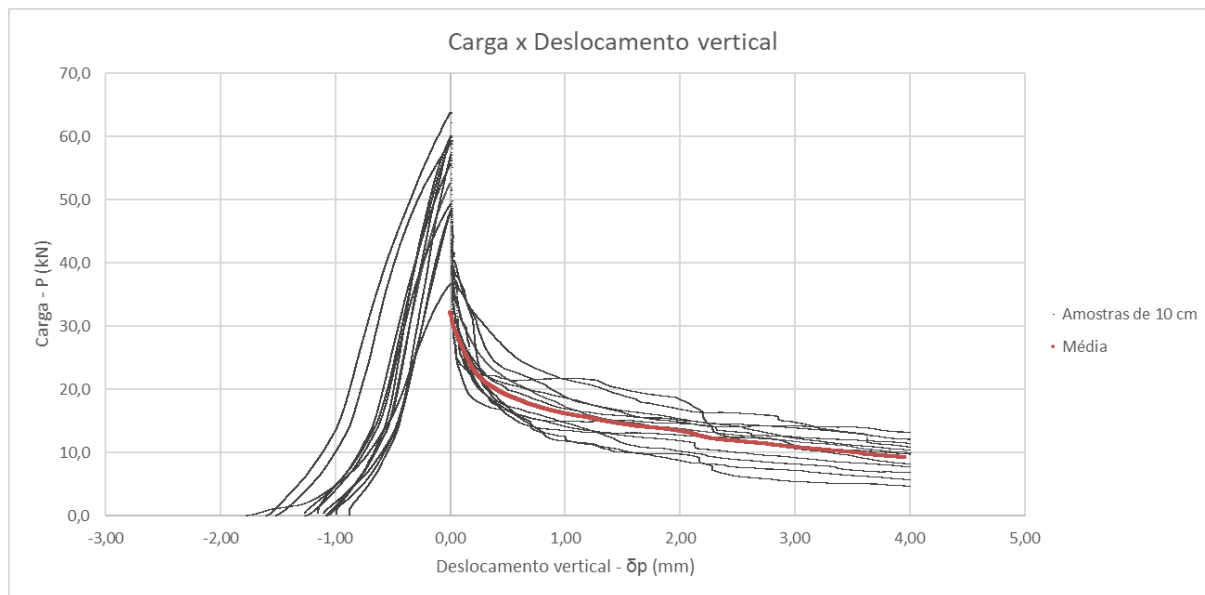
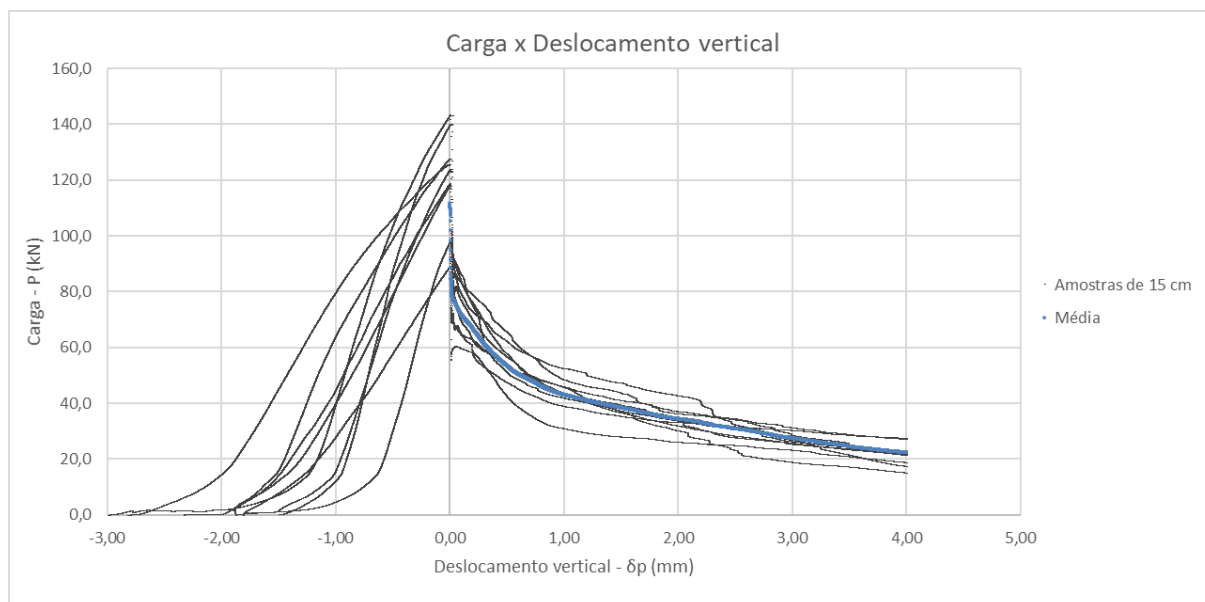


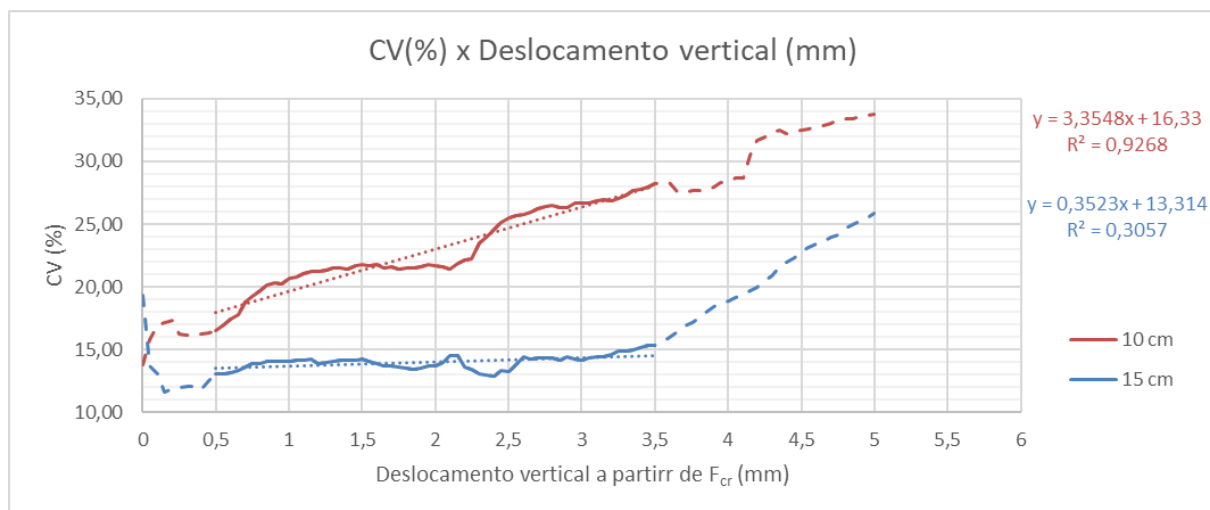
Figura 23 - Carga aplicada x Deslocamento vertical para os corpos de prova de 15 cm de diâmetro



Dentro dos resultados apresentados, a dispersão fica melhor visualizada quando se é considerada a avaliação do coeficiente de variação (CV) por deslocamento axial, como mostrado na Figura 24. Vale ressaltar as diferenças dos CVs entre os diâmetros,

principalmente durante o intervalo em que se orienta o monitoramento – 0,5 mm até 3,5 mm de deslocamento vertical.

Figura 24 – Coeficiente de variação versus deslocamento vertical após a carga de pico.



Assumindo uma equivalência pressuposta entre os dois diâmetros, por conta de serem derivados dos mesmos painéis de CPRF, a correlação entre as cargas nos deslocamentos verticais para os diferentes diâmetros apresentou um coeficiente de $R^2=0,97$. Todavia, esta correlação nos resultados não implica em que os deslocamentos verticais correspondam exatamente aos mesmos pontos de abertura de fissuras e TCODs nos diferentes diâmetros e a hipótese desta suposição pode ser considerada rasa dado a complexidade do EDP. Portanto, a análise individualizada por monitoramento de TCOD é justificável para o melhor entendimento das discrepâncias encontradas nos coeficientes de variação.

4.3.2. Resistência residual por TCOD

De acordo com os procedimentos descritos em 2.3.2 pelas Equações (1) a (4), os resultados das Figura 25 e Figura 26 são apresentados como resistência residual (MPa) versus TCOD (mm). Considerando os pontos de referência de 1,5 mm - 4,5 mm de TCOD e suas respectivas cargas associadas ao início de ELS e ELU, as médias dos valores para $f_{1,5}$ e $f_{4,5}$ são 0,93 MPa e 0,59 MPa com 19,5% e 28,9% de coeficiente de variação

para os testemunhos de 10 cm e de 1,29 MPa e 0,65 MPa com 13,1% e 14,4% de CV para os de 15 cm.

Figura 25 – Tensão x TCOD para os corpos de prova de 10 cm de diâmetro.

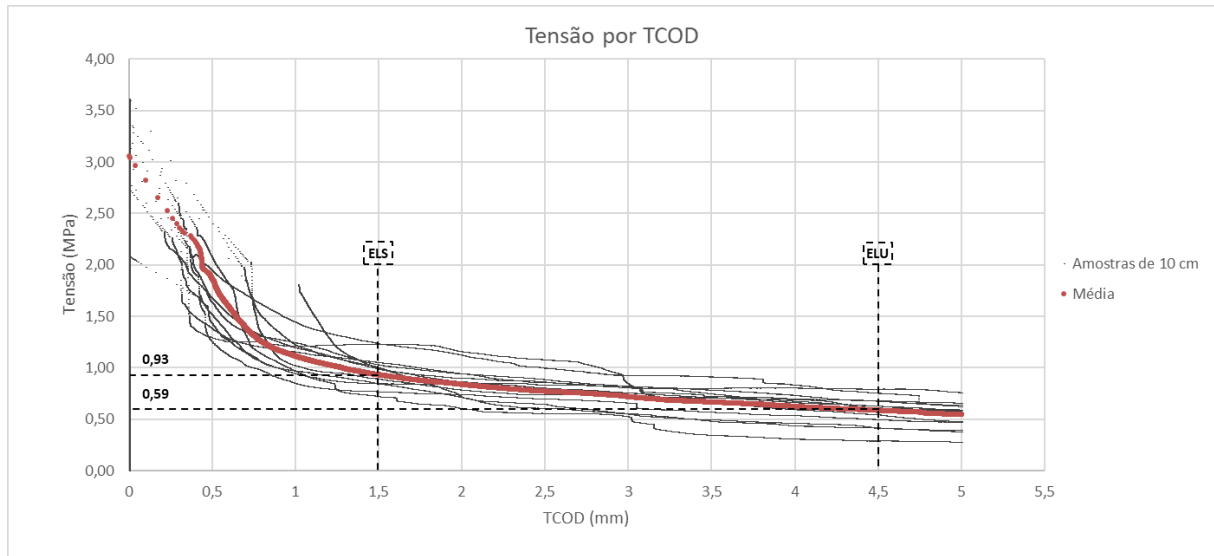
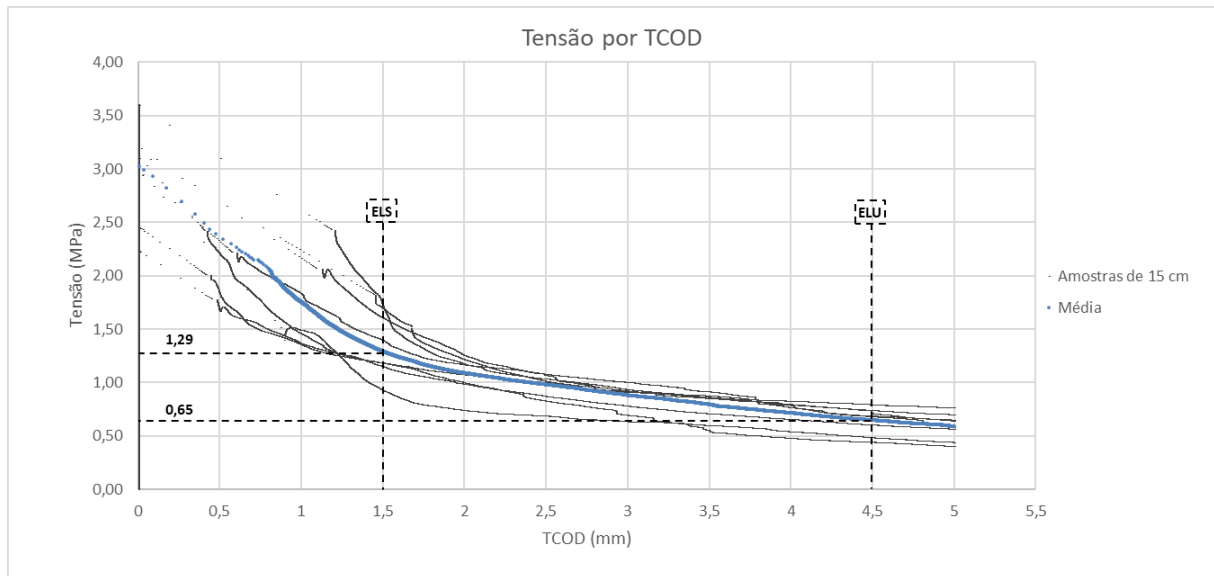


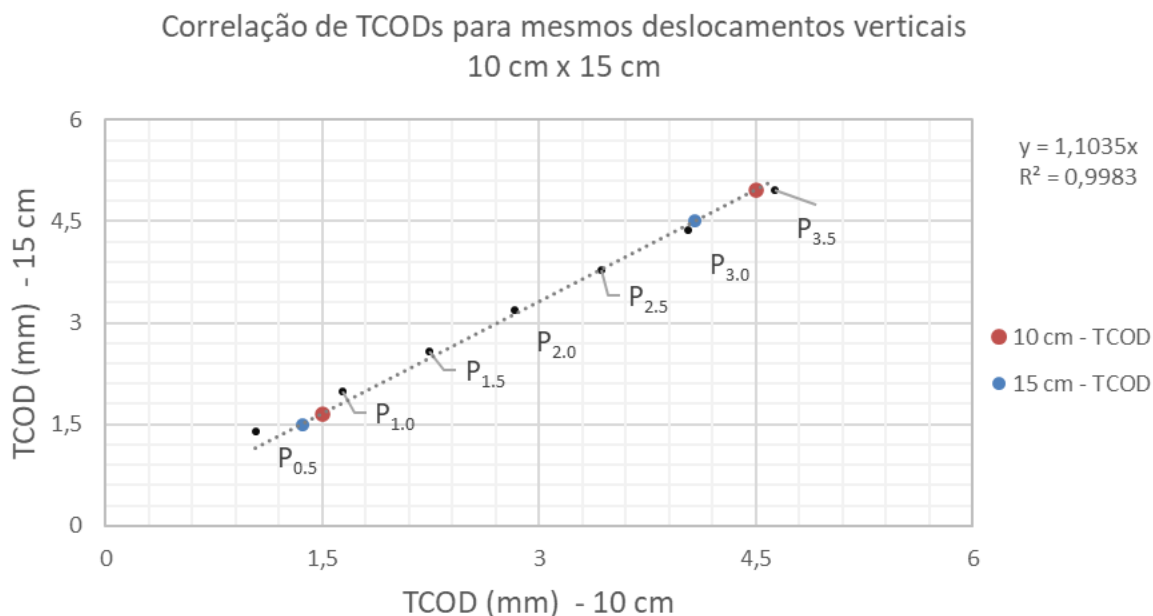
Figura 26 – Tensão x TCOD para os corpos de prova de 15 cm de diâmetro.



Quando é traçada a correlação entre os pontos de controle dos deslocamentos verticais ($P_{0,5}$, $P_{1,5}$, $P_{2,5}$ e $P_{3,5}$) e seus respectivos TCOD para os dois diâmetros, é possível verificar que os pontos correspondentes entre deslocamentos axiais e TCOD não são os mesmos para os dois diâmetros. Isso deve ser levado em consideração durante um programa de

controle de qualidade. A Figura 27 apresenta as medidas de TCOD de cada diâmetro para os pontos de controle de deslocamentos verticais.

Figura 27 – Correlação entre os TCODs para os dois diâmetros e os pontos de controle de deslocamento vertical.

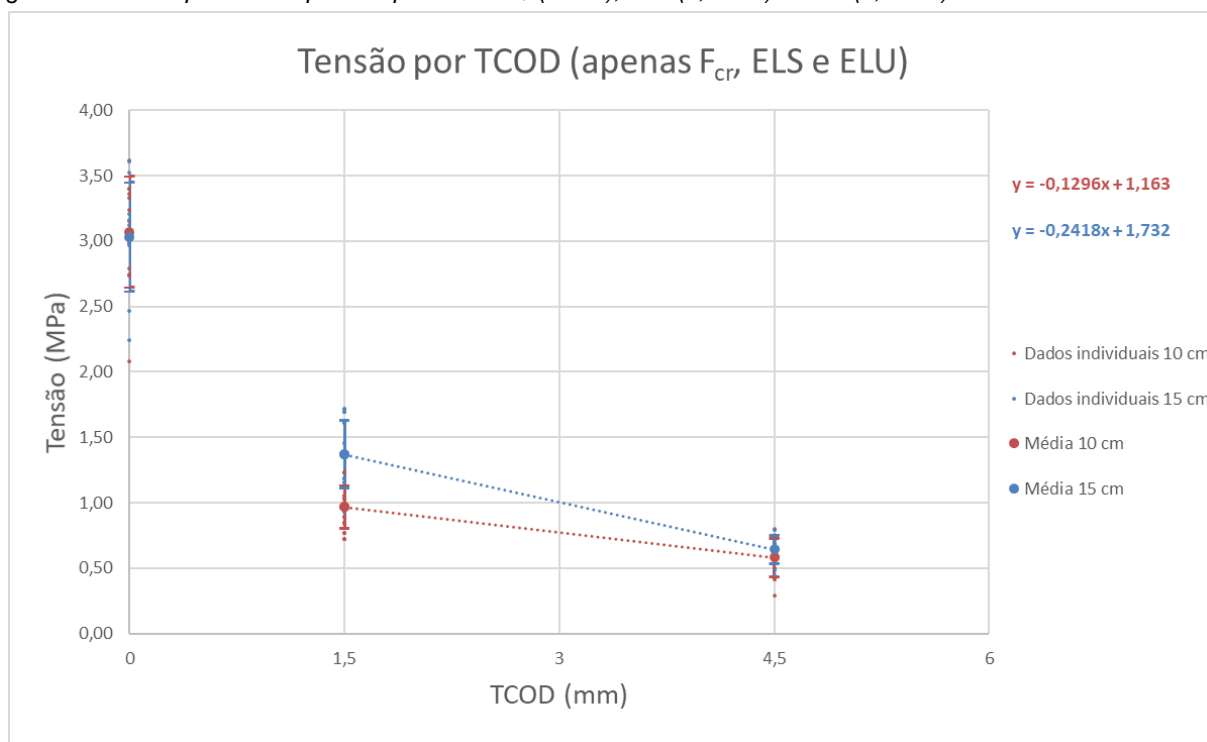


Ainda, quando são avaliados isoladamente os pontos de TCOD dos diferentes estados limites e suas tensões residuais, fica exposto que os valores obtidos com corpos de prova de diferentes diâmetros correspondentes ao ELU e F_{cr} são equivalentes se sobrepondo em termos de distribuição e com uma diferença entre os valores médios de 10,5% e 1,3%, respectivamente. Por outro lado, as tensões residuais associadas ao ELS apresentaram diferenças estatisticamente significativas, como demonstra o teste t para amostras emparelhadas apresentados no Apêndice 4, e a faixa de dispersão de resultados dos valores individuais assim como o desvio padrão das médias apresentam mínima sobreposição. Estas constatações estão demonstradas graficamente pela Figura 28 e em formato de tabela no Apêndice 4 - Tabela 10, Tabela 11 e Tabela 12.

É importante frisar que a diferença do teor de fibras de aço encontrada nos corpos de prova através do ensaio indutivo não foi significativa dado que os testemunhos de diferentes diâmetros foram extraídos das mesmas placas. Dessa forma, é possível descartar que a diferença no resultado obtido para a resistência residual pós-fissuração possa ser associada a uma possível variação no teor de fibras.

Porém, vale ressaltar que, apesar de o processo de extração dos testemunhos não representar aparente interferência nas cargas de ruptura, que se equivalem nos diferentes diâmetros ($F_{cr\ 10cm} = 3,07\text{ MPa}$; $F_{cr\ 15cm} = 3,03\text{ MPa}$), não é possível descartar a hipótese de que a extração dos testemunhos ocasione um efeito de borda que resulta em uma proporção menor de fibras ativas nos cilindros de 10 cm, já que a relação de área superficial/volume é maior.

Figura 28 – Destaque isolado para os pontos de F_{cr} (0 mm), ELS (1,5 mm) e ELU (4,5 mm) com Tensão x TCOD.



4.3.3. Dimensionamento amostral para TCOD

A partir dos resultados obtidos, foi realizado o cálculo amostral para tensões residuais nos testemunhos com os dois diâmetros analisados de acordo com a equação. Para este procedimento foi considerada a confiabilidade de 95% e uma distribuição t de Student (10 cm: $Z = 2.201$, 15 cm: $Z = 2.306$). O coeficiente de variação adotado para a equação de dimensionamento foi de 20%, que corresponde a aproximadamente a média obtida durante a fase de resistência residual deste trabalho e também apresentada por outras referências.

Os resultados de amostragem obtidos evidenciam algumas diferenças para o comportamento resistente como é apresentado na Tabela 6. Os testemunhos de 15 cm apresentam vantagem representativa principalmente por conta do menor CV durante os ensaios. A amostragem necessária para mesma representatividade com o diâmetro de 15 cm é relativamente menor, principalmente quando se considera resistências residuais associadas ao ELU.

Tabela 6 - Resultados dos cálculos amostrais.

<i>Resistência residual nos pontos de referência</i>	Amostras de 10 cm Confiabilidade 95%			Amostras de 15 cm Confiabilidade 95%		
	Média (kN)	Desv Pad (kN)	Qtd. (n)	Média (kN)	Desv Pad (kN)	Qtd. (n)
F_{cr}	3,07	0,42	3	3,03	0,44	3
SLS - $F_{1,5}$	0,97	0,16	4	1,37	0,27	5
$F_{2,5}$	0,80	0,16	5	0,98	0,15	3
$F_{3,5}$	0,66	0,16	8	0,79	0,14	4
ULS - $F_{4,5}$	0,58	0,15	9	0,64	0,12	4

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho focou na avaliação da adequabilidade do controle do concreto projetado reforçado com fibras a partir do ensaio de duplo puncionamento de modo a obter uma melhor compreensão da dinâmica do ensaio. Neste sentido, o estudo experimental empregou um controle de TCOOD por conversão dos deslocamentos verticais conforme os modelos apresentados na literatura e sua verificação de sua correspondência com o auxílio de um sistema de DIC 3D. Esta aferição mostrou que a metodologia de controle de deslocamentos é aplicável, uma vez que, as equações de conversão dos deslocamentos em TCOOD são fidedignas (PUJADAS, 2013). Dessa forma, a obtenção de equações constitutivas para caracterização do CPRF a partir dos resultados obtidos no EDP pode ser considerada viável.

No entanto, neste trabalho experimental foi analisado o efeito de escala dos corpos de prova preparados a partir de testemunhos extraídos nos parâmetros estruturais do CPRF. Neste sentido, foram utilizadas duas dimensões de corpos de prova, sendo 10 cm e 15 cm para diâmetro e altura dos cilindros utilizados nos ensaios. Apesar de a dimensão de 10 cm ter sido utilizada em importantes trabalhos que antecedem a este (GALOBARDES, SILVA, *et al.*, 2019; MONTEIRO e SILVA, 2020) e serem permitidos pelas normas Espanhola (AENOR:UNE83515, 2010) e Brasileira (ABNT:NBR16939, 2021) especialmente no que se refere a testemunhos extraídos, foi verificado que esta menor dimensão compromete diretamente os resultados obtidos, especialmente quando são consideradas as resistências residuais pós pico em níveis mais baixos de TCOOD associados ao ELS. Dessa forma, a adoção de testemunhos de menor dimensão acaba por comprometer a determinação da resistência residual associada ao início do ELS, subestimando este valor. Esta constatação pode estar associada a um nível maior na instabilidade pós pico durante a realização do ensaio em corpos de prova com menores dimensões, conforme o avaliado em estudos anteriores sobre esse tema (SIMÃO, NOGUEIRA, *et al.*, 2019; MONTEIRO e SILVA, 2020), uma vez que ficou comprovado que não houve diferença significativa quanto ao teor de fibras efetivamente incorporado CPRF comparando-se as amostras com os diferentes diâmetros.

Além disso, o tamanho da amostra necessária para um mesmo nível de confiabilidade é maior quando testemunhos de 10 cm são utilizados. Este aspecto faz com que programas de controle de qualidade sejam prejudicados pela necessidade de extração de um número maior de testemunhos para avaliação. De acordo com o exposto, fica evidente que a utilização de testemunhos de 15 cm de diâmetro e altura são mais eficazes e confiáveis para avaliação do CPRF.

5.1. Recomendações para revisão de norma ABNT NBR 16939

Apresentadas as conclusões deste trabalho, destacam-se alguns pontos como recomendações para revisão da norma brasileira vigente para a execução do EDP, especialmente no que se refere ao seu uso específico para o controle do CPRF:

- Deve ser recomendado explicitamente que o diâmetro adotado não se altere durante as extrações em um programa de controle de qualidade. Ou, ao alterar-se o diâmetro, este seja correlacionado a ensaios que caracterizem o CPRF;
- Apresentar em sua estrutura, no setor referente a expressão dos resultados, um subcapítulo com as instruções para a conversão analítica dos deslocamentos axiais em TCOD e, conseqüentemente, um subitem com estes resultados para elaboração de relatório. Somente após a associação do material ensaiado à análise de cargas por TCOD, pode ser realizado o controle apenas pelos deslocamentos verticais;
- Apresentar em suas recomendações para elaboração do relatório de ensaio um subitem que faça referência a associação das aberturas de TCOD relacionadas ao racional de ELS e ELU seria um diferencial interessante.

5.2. Sugestões para trabalhos futuros

O EDP apresenta inúmeras vantagens práticas que justificam sua aplicabilidade como método de controle corriqueiro para o CPRF. Porém, uma de suas características mais limitantes fica por conta da fase de transição entre o rompimento e a capacidade residual, sendo uma região de grande instabilidade. Seria interessante que houvesse alternativas

complementares ao procedimento experimental do EDP de modo a permitir o controle efetivo da abertura de fissuras nos primeiros estágios do ELS minimizando o nível de instabilidade através de um sistema fechado eficaz.

No que diz respeito ao monitoramento por equipamento DIC 3D, é importante ressaltar que a análise realizada pelo software, pode apresentar resultados também interessantes no campo de deformações quando se opta pela comparação incremental (como foi verificado pelo autor durante a colaboração e publicação de outros trabalhos), apesar do conseqüente acúmulo de erros que ocorre por esta opção. Uma vez que o comportamento pseudo-dúctil do CRF tem a característica de apresentar deslocamentos juntamente com o surgimento de fissuras e, durante o monitoramento por DIC, estas regiões dos “*subsets*” podem muitas vezes terem o monitoramento interrompido por conta da perda de referência das imagens. Sugere-se que, para estudos futuros que utilizem monitoramento por DIC, sempre que possível sejam adotados os cálculos dos resultados pelos dois tipos de referência de imagens (referencial e incremental), apesar do acúmulo de erros advindo pela escolha. Podendo ainda ser aplicada uma solução mista, onde os dados serão obtidos incrementalmente somente após o surgimento das fissuras. Isso resultará com que o monitoramento possa sofrer menos interferências.

Neste estudo não foi possível aplicar a modelagem computacional de maneira eficaz para a avaliação da dinâmica do ensaio. No entanto, os resultados experimentais aqui obtidos poderão ser utilizados futuramente para a validação desses modelos e, dessa forma, aprimorar ainda mais a compreensão da dinâmica do ensaio de duplo puncionamento utilizado para a caracterização do concreto projetado reforçado com fibras de aço. Fica como uma sugestão para trabalhos futuros o desenvolvimento de modelo numérico que consiga representar o EDP. Isso significaria um grande avanço nas condições de previsibilidade dos testes e do compósito.

6. REFERÊNCIAS

- ABNT:NBR13070. **Moldagem de placas para ensaio de argamassa e concreto projetados**. Rio de Janeiro, RJ. 2012.
- ABNT:NBR15530. **Fibras de aço para concreto**. Rio de Janeiro, RJ. 2019.
- ABNT:NBR16935. **Projeto de estruturas de concreto reforçado com fibras — Procedimento**. Rio de Janeiro, RJ. 2021.
- ABNT:NBR16939. **Concreto reforçado com fibras — Determinação das resistências à fissuração e residuais à tração por duplo puncionamento — Método de ensaio**. Rio de Janeiro, RJ. 2021.
- AENOR:UNE83515. **Fibre reinforced concrete. Determination of crackng strength, ductility and residual tensile strength**. Madrid. 2010.
- ALFERES FILHO, R.S. *et al.* Evaluation of steel fiber orientation in slab elements induced during casting with self-compacting concrete. **Matéria**, v. 24, n. 2, p. e-12340, 2019.
- AMYOT, C.-O. *et al.* **3D Digital Image Correlation: The Ultimate Tool for Displacements And Strains Testing**. San Jose, CA, USA: International Medical Device Conference. 2019.
- ARMELIN, H. S. **Rebound and toughening mechanisms in steel fiber reinforced dry-mix shotcrete**. Ottawa: PhD Thesis, University of British Columbia, 1997. 225 p. p.
- BERNARD, E. S.; THOMAS, A. H. Fibre reinforced sprayed concrete for ground support. **Tunnelling and Underground Space Technology**, v. 99, p. 103-302, 2020.
- BITENCOURT JR., L. A. G. **Modelagem do processo de falha em materiais cimentícios reforçados com fibras de aço**. São Paulo. 2014.
- BITENCOURT JR., Luís Antônio G. *et al.* Numerical modeling of steel fiber reinforced concrete with a discrete and explicit representation of steel fibers. **International Journal of Solids and Structures**, v. 159, p. 171-190, 2019.
- BLANCO, A. *et al.* Constitutive model for fiber reinforced concrete based on the Barcelona test. **Cement & Concrete Composites**, v. 53, p. 327-340, 2014.
- CÁCERES, A. R. E. *et al.* Alternative small-sclae tests to characterize the structural behavior of fibre-reinforced sprayed concrete. **Construction and Building Materials**, v. 296, p. 123-168, 2021.

CÁCERES, A. R. E.; CAVALARO, S. H. P.; FIGUEIREDO, A. D. Evaluation of steel fiber-reinforced sprayed concrete by energy absorption tests. **Journal of Materials in**, v. 33, n. 9, p. 04021252, 2021.

CAVALARO, S. H. P. *et al.* Improved assessment of fibre content and orientation with inductive method in SFRC. **Materials and Structures**, p. 1859–1873, 2015.

CERVERA, M.; OLIVER, J.; MANZOLI, O. L. A rate-dependent isotropic damage model for the seismic analysis of concrete dams. **Earthquake Engineering and Structural Dynamics**, v. 25, n. 9, p. 987-1010, 1996.

EFNARC:EN14488-3. **Testing sprayed concrete - Part 3: Flexural strengths (first peak, ultimate and residual) of fibre reinforced beam specimens.** [S.I.]. 2004.

EFNARC:EN14488-5. **Testing sprayed concrete - Part 5: Determination of energy absorption capacity of fibre reinforced slab specimens.** [S.I.]. 2006.

EFNARC:EN14488-7. **Testing sprayed concrete - Part 7: Fibre content of fibre reinforced concrete.** [S.I.]. 2006.

FIB, FÉDÉRATION I. D. B. –. **Fib model code for concrete structures 2010.** Switzerland. 2013.

FIGUEIREDO, A. D. *et al.* Prática recomendada - Concreto projetado reforçado com fibras. **ABMS - Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica**, n. 1, p. 54p., 2020.

FIGUEIREDO, A. D. Rheological behavior of dry-mix shotcrete. **American Concrete Institute, ACI Special Publication**, v. 186, p. 113-128, 1999.

FIGUEIREDO, A. D. **Concreto reforçado com fibras.** Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2011.

FIGUEIREDO, A. D.; NETO, P. J. C.; FARIA, H. M. A nova normalização brasileira sobre fibras de aço. **Concreto & Construções**, v. 36, n. 50, p. 67-75, 2008.

GALOBARDES, Isaac *et al.* Alternative quality control of steel fibre reinforced sprayed concrete (SFRSC). **Construction and Building Materials**, p. 1008-1015, 2019.

GINOUSE, N.; JOLIN, M.; BISSONNETTE, B. Effect of equipment on spray velocity distribution in shotcrete applications. **Construction and Building Materials**, v. 70, p. 362-369, 2014.

ITA. Permanent sprayed concrete linings. **The International Tunneling and Underground Space Association**, v. ITA Working Group no 12 - ITAtech Report no 24, p. 55p., 2020.

KAUFFMAN, Josef *et al.* Rebound and orientation of fibers in wet sprayed concrete. **Construction and Building materials**, p. 15-22, 2013.

LARIVE, C.; BOUTEILLE, S.; BERTHOZ, N. Z. S. Fiber-reinforced sprayed concrete as a permanent tunnel lining. **Structural Engineering International**, v. 30, n. 4, p. 1-8, 2020.

LÓPEZ, R. **Determinación de cuantía y orientación de fibras en HRFA por inducción manética: mejora de un método existente e implantación para probetas cilíndricas.** Barcelona. 2013.

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, p. 415-425, 2009.

MONTE, R. *et al.* Barcelona Test as an Alternative Method to Control and Design Fiber-Reinforced Concrete Pipes. **Structural Journal**, v. 113, n. 6, p. 1175-1184, 2016.

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

MONTEIRO, V. M. A.; SILVA, F. A. The use of the Barcelona test as quality control of fiber reinforced shotcrete for underground mining. **Construction and Building Materials**, v. 262, p. 120719, 2020.

NOGUEIRA, A. B. *et al.* Evaluation of the repeatability and reproducibility of the double punch test. **Construction and Building Materials**, v. 268, p. 121-145, 2020.

PUJADAS. **Caracterización y diseño del hormigón reforzado con fibras plásticas.** Barcelona, p. 285p. 2013.

SIMÃO, L. C. R. *et al.* Influence of the instability of the double punch test on the post-crack response of fiber-reinforced concrete. **Construction and Building Materials**, v. 217, p. 185-192, 2019.

SUTTON, M. A.; ORTEU, J. J.; SCHREIER, H. **Image correlation for shape, motion and deformation measurements.** [S.l.]: Springer, 2009.

TORRENTS, Josep M. *et al.* Inductive method for assessing the amount and orientation of steel fibers in concrete. **Materials and Structures**, 2012.

VANDEWALLE, M. **Tunnelling the World**. Bélgica: N. V.BEKAERT S. A., 1997.

Apêndice 1 – Resultados individuais de indutância observados.

Tabela 7 - Resultados individuais de indutância.

CP	Teor (kg/m ³)	Massa (g)	h (mm)	d(base) (mm)	d(topo) (mm)	ΔLz (mH)	ΔL0° (mH)	ΔL45° (mH)	ΔL90° (mH)
10_1	39,3	32,3	104,1	100,4 100,3	100,3 100,4	0,515	1,129	1,090	1,086
10_2	34,2	27,7	102,4	100,5 100,2	100,3 100,3	0,608	0,874	0,715	0,858
10_3	33,8	28,0	104,7	100,3 100,4	100,3 100,4	0,560	0,874	0,947	0,929
10_4	36,0	29,1	102,1	100,4 100,4	100,3 100,4	0,579	0,923	0,989	0,956
10_5	41,0	34,6	106,5	100,4 100,3	100,5 100,4	0,609	1,193	1,188	1,122
10_6	36,6	30,4	105,2	100,4 100,4	100,1 100,3	0,405	1,128	1,026	1,038
10_7	42,1	33,9	101,5	100,4 100,5	100,4 100,4	0,674	1,001	1,077	1,186
10_8	37,6	29,5	99,3	100,3 100,3	100,3 100,3	0,459	1,106	1,068	0,927
10_9	39,3	30,9	99,5	100,2 100,4	100,4 100,4	0,575	0,965	1,009	1,072
10_10	41,3	32,0	97,6	100,4 100,3	100,6 100,4	0,413	1,073	1,167	1,145
10_11	39,8	32,0	101,4	100,4 100,6	100,4 100,7	0,481	1,182	1,159	0,970
10_12	42,4	34,6	102,6	100,6 101,0	100,5 100,6	0,717	1,172	0,960	0,958
15_1	39,1	110,4	151,1	154,1 154,3	154,5 154,4	2,253	3,606	2,753	3,229
15_2	33,6	92,2	147,2	154,2 154,2	154,1 154,2	1,551	3,283	3,047	2,759
15_3	42,2	116,7	148,0	154,4 154,1	154,2 154,1	1,228	5,447	3,339	2,930
15_4	35,1	100,3	153,4	154,1 154,1	154,1 154,2	1,322	3,718	3,655	3,219
15_5	40,1	117,0	155,8	155,1 154,3	154,2 154,1	2,051	3,516	3,470	4,065
15_6	37,9	109,9	155,0	154,5 154,4	154,2 154,6	1,653	3,617	3,779	3,776
15_7	39,2	114,9	156,8	154,1 154,2	154,3 154,2	1,842	3,872	3,757	3,738
15_8	37,6	105,7	149,7	154,1 154,2	155,4 155,1	1,800	3,340	3,623	3,559
15_9	40,1	112,2	149,3	154,7 154,2	154,5 154,6	1,467	4,086	4,187	3,682

Apêndice 2 – Resultados individuais de carga aplicada por aumento perimetral (dR) – DIC 3D

As Figura 29 à Figura 34 mostram a relação entre a carga aplicada em (KN) versus o aumento de diâmetro em milímetros (dR). As imagens apresentam um mapa de calor de dR medido pelo DIC 3D enquanto os dados representados graficamente mostram os resultados médios na altura completa do cilindro (dR) e em suas porções superiores (dR S0) e inferiores (dR S1).

Figura 29 - Carga aplicada por aumento perimetral (dR) – Testemunho 10_10.

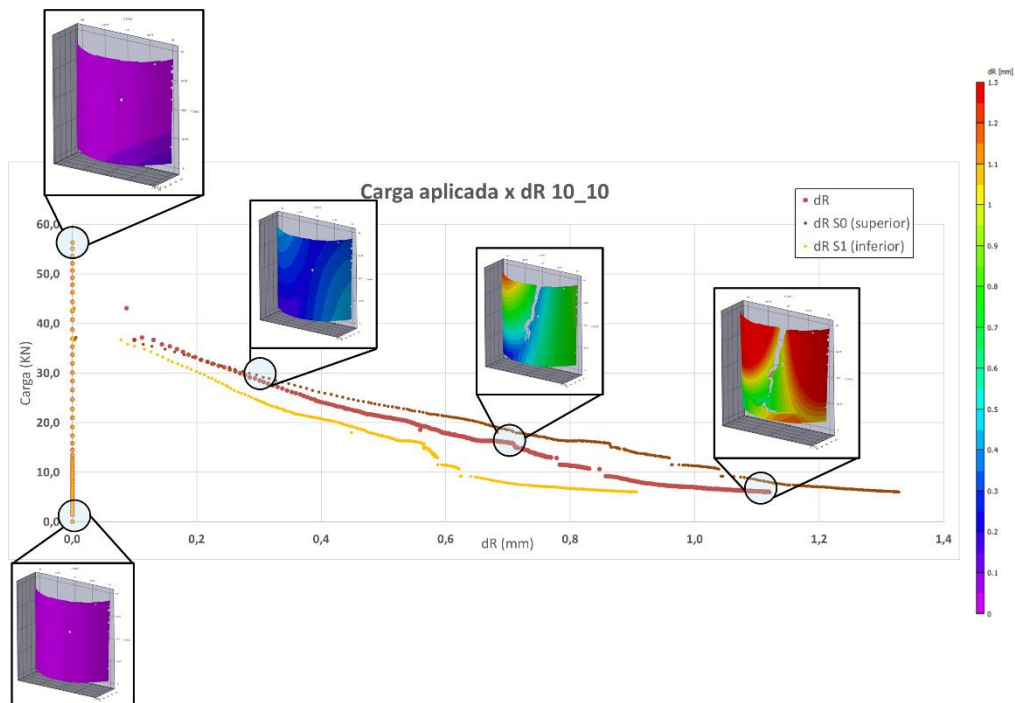


Figura 30 - Carga aplicada por aumento perimetral (dR) – Testemunho 10_11.

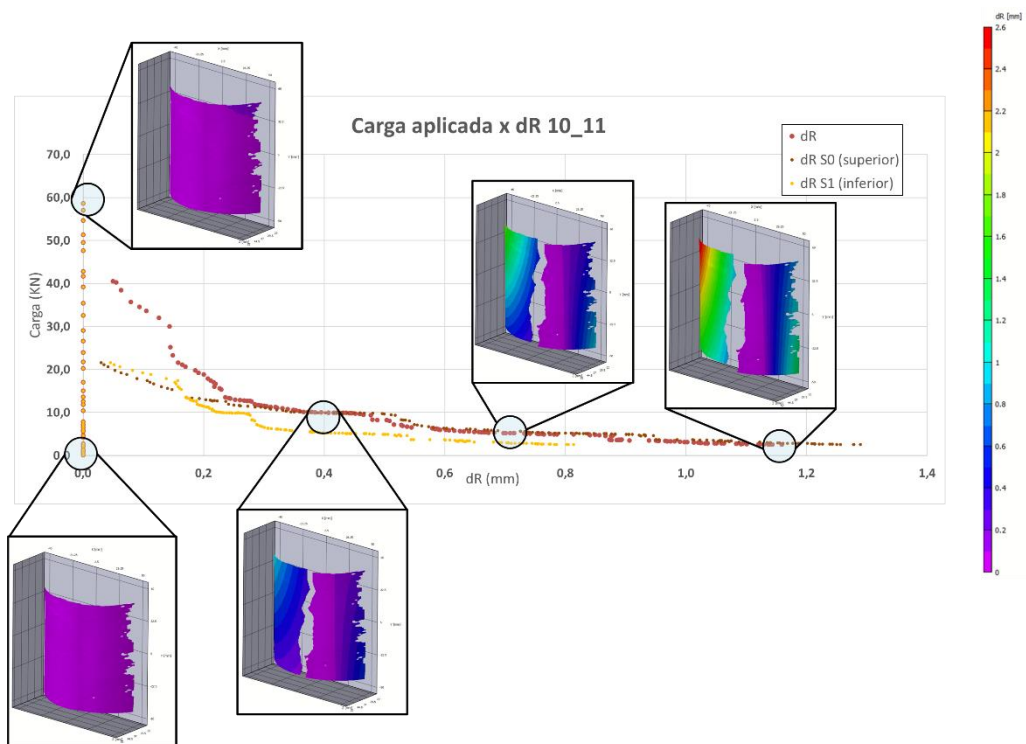


Figura 31 - Carga aplicada por aumento perimetral (dR) – Testemunho 10_12

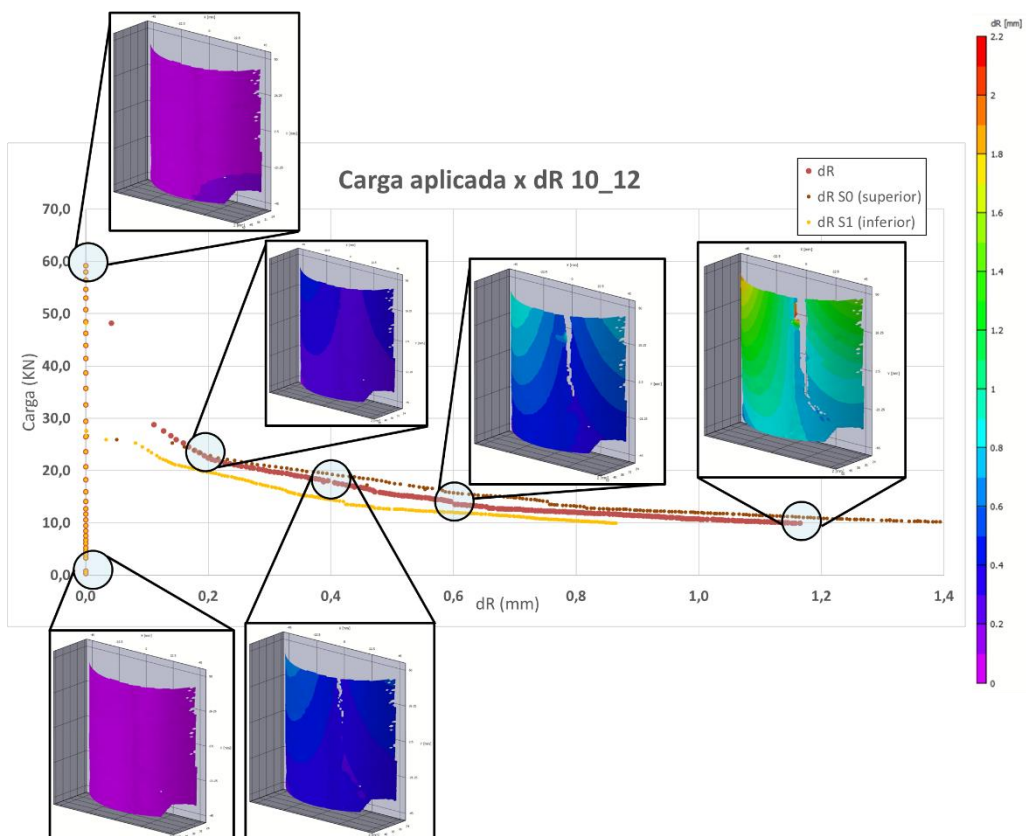


Figura 32 - Carga aplicada por aumento perimetral (dR) – Testemunho 15_7.

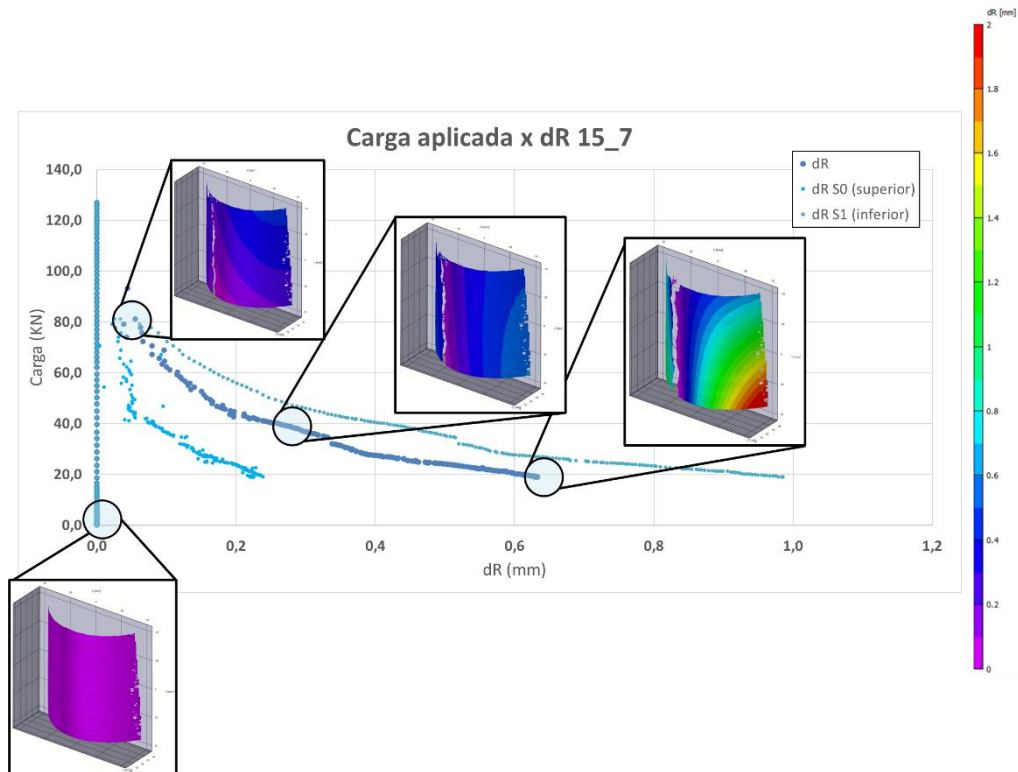


Figura 33 - Carga aplicada por aumento perimetral (dR) – Testemunho 15_8.

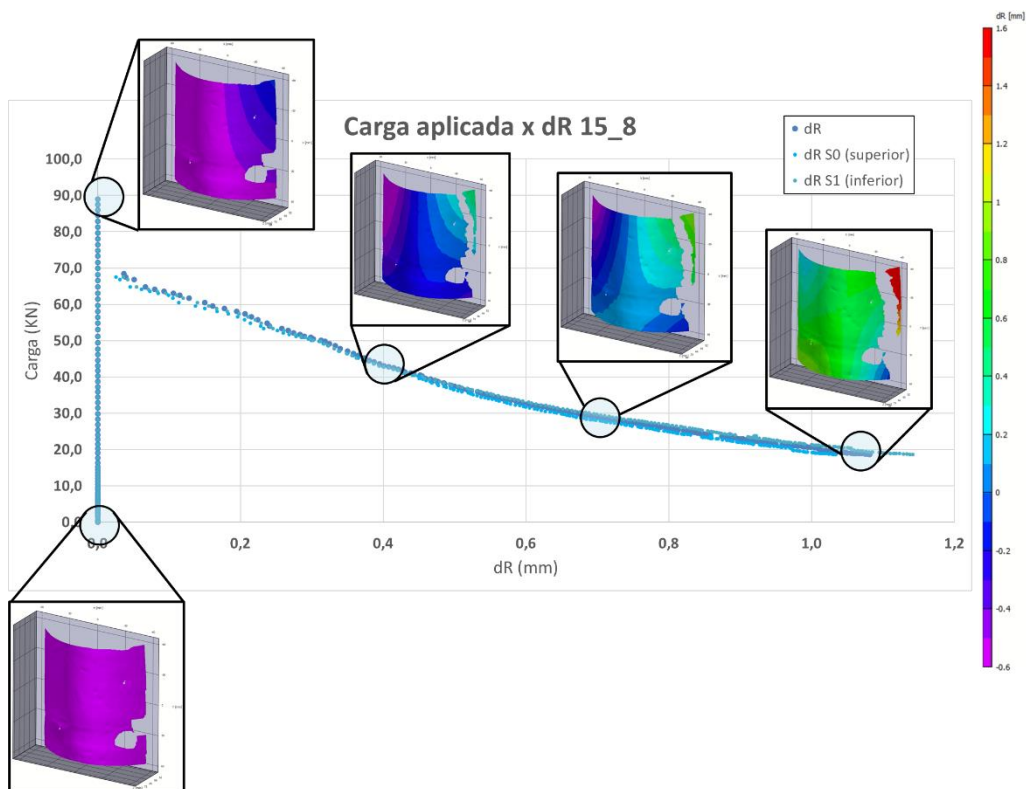
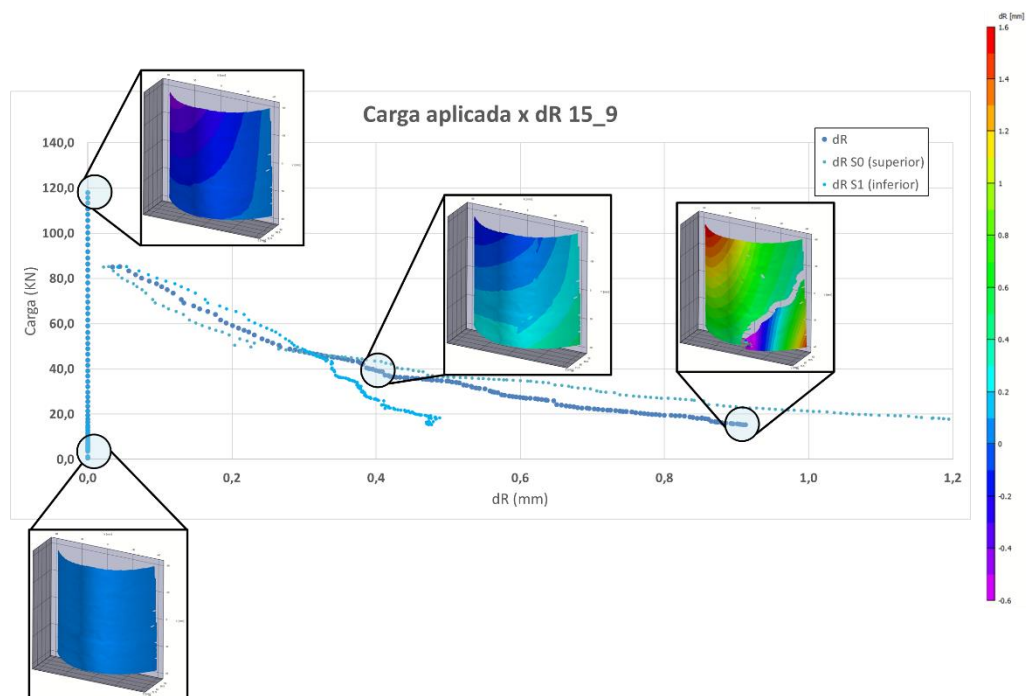


Figura 34 - Carga aplicada por aumento perimetral (dR) – Testemunho 15_9



Os resultados obtidos a partir da simulação de um extensômetro virtual E0 são apresentados nas Figura 35 e Figura 36 em correlação com os dados individuais e médios de dR. No geral, os resultados demonstraram boa correlação entre as medidas, indicando que o monitoramento médio de dR ao longo da altura do cilindro é compatível com o controle das deformações na linha central do mesmo.

Figura 35 – Comparação entre perímetro medido por extensômetro virtual E0 (dL) e incremento de diâmetro dR para os corpos de prova de 10 cm.

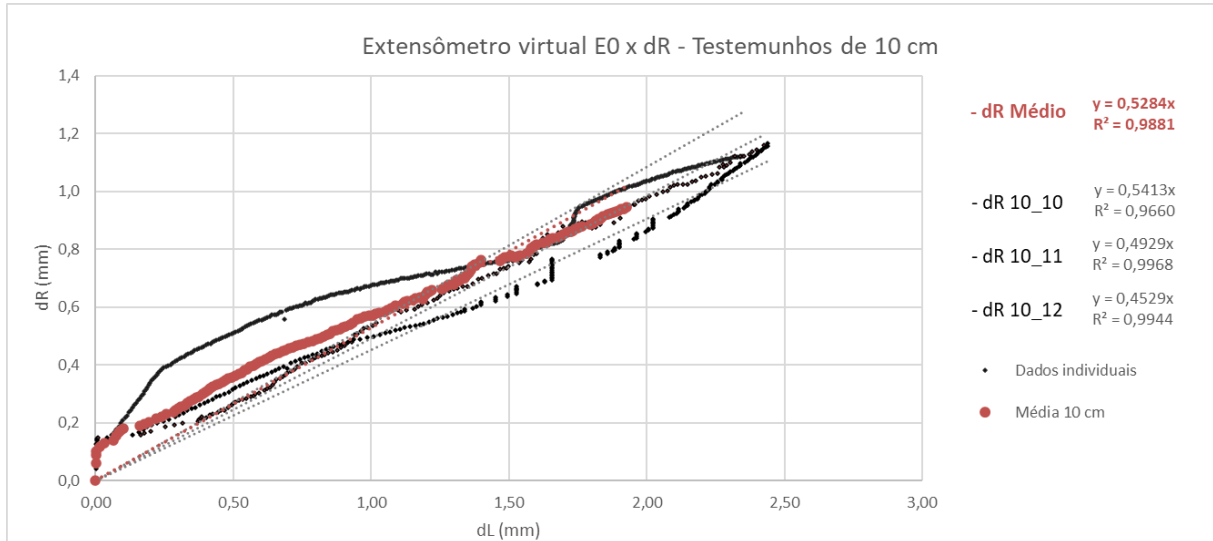
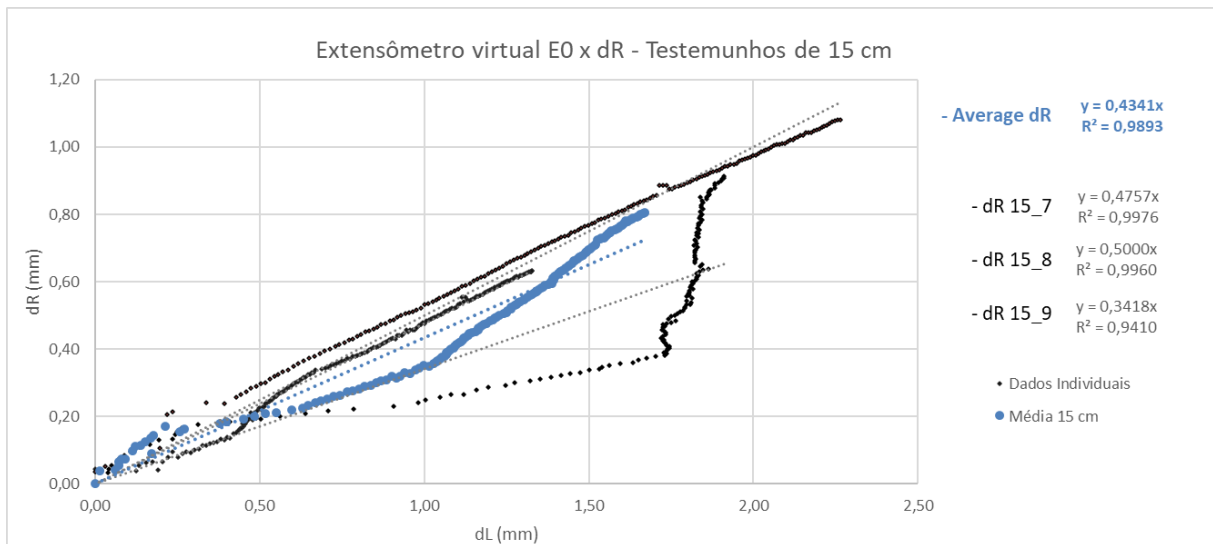


Figura 36 – Comparação entre perímetro medido por extensômetro virtual E0 (dL) e incremento de diâmetro dR para os corpos de prova de 15 cm.



Apêndice 3 – Resultados individuais e médios dos EDP para deslocamentos verticais - apresentados a partir da carga de ruptura a cada 0,05 mm, até 4 mm.

Dos resultados apresentados, considerando o pareamento dos resultados médios, a hipótese de não existência de correlação linear pode ser descartada estatisticamente, com valor-p = $3,31E^{-53}$ para esta observação de amostras.

Tabela 8 - Resultados individuais de carga (kN) por deslocamento vertical (mm) – Corpos de prova de 10 cm.

Deslocamento Vertical (mm)	10_1	10_2	10_3	10_4	10_5	10_6	10_7	10_8	10_9	10_10	10_11	10_12	Média	Desv. Pad.	CV
0	52,7	36,8	59,4	49,4	48,5	63,9	58,8	55,8	48,3	57,2	60,1	60,2	54,3	7,5	13,8%
0,05	33,9	28,6	28,6	33,5	38,0	30,3	24,4	24,9	35,8	36,8	39,0	28,1	31,8	5,0	15,8%
0,1	30,6	24,7	25,9	27,7	36,3	27,4	21,5	23,7	30,7	35,1	35,6	26,3	28,8	4,9	16,9%
0,15	28,6	22,8	23,2	25,8	33,3	25,9	19,4	22,9	27,5	33,5	32,9	25,2	26,8	4,6	17,2%
0,2	27,0	21,5	21,2	23,7	31,6	24,6	18,4	22,5	21,8	32,1	29,2	23,9	24,8	4,3	17,4%
0,25	25,5	20,4	20,0	21,9	28,9	23,4	18,0	22,2	20,3	31,0	23,3	22,9	23,1	3,8	16,3%
0,3	24,4	19,3	19,2	20,2	26,6	22,4	17,4	22,2	19,2	30,0	20,7	22,2	22,0	3,6	16,2%
0,35	23,5	18,5	18,3	19,1	25,1	21,5	17,1	22,2	18,0	28,9	19,6	21,8	21,1	3,4	16,3%
0,4	22,8	17,8	17,7	18,2	24,2	21,0	16,9	22,1	17,5	27,9	18,8	21,4	20,5	3,3	16,2%
0,45	22,1	17,2	17,2	17,7	23,5	20,6	16,8	21,8	16,7	27,0	17,9	21,1	20,0	3,3	16,3%
0,5	21,6	16,7	16,7	17,4	23,1	19,9	16,6	21,6	15,9	26,1	17,2	20,8	19,5	3,2	16,5%
0,55	21,0	16,3	16,1	17,1	22,8	19,7	16,2	21,4	15,3	25,3	16,3	20,6	19,0	3,2	16,9%
0,6	20,7	16,0	15,5	16,9	22,5	19,4	16,0	21,5	14,8	24,6	15,7	20,4	18,7	3,2	17,4%
0,65	20,3	15,7	14,9	16,6	22,1	19,0	15,8	21,5	14,4	24,1	15,3	20,1	18,3	3,3	17,8%
0,7	19,8	15,4	14,5	16,3	21,8	18,6	15,5	21,6	14,2	23,6	13,9	19,8	17,9	3,4	18,8%
0,75	19,3	15,3	13,8	16,1	21,3	18,4	15,3	21,6	14,0	23,2	13,4	19,7	17,6	3,4	19,3%
0,8	18,8	15,2	13,1	15,9	20,9	18,0	15,1	21,7	13,8	22,9	13,2	19,5	17,3	3,4	19,7%
0,85	18,5	15,0	12,4	15,6	20,3	17,7	14,8	21,7	13,7	22,5	13,0	19,3	17,0	3,4	20,1%
0,9	18,2	15,0	12,1	15,3	19,8	17,4	14,6	21,7	13,7	22,2	12,9	19,1	16,8	3,4	20,3%
0,95	17,7	15,0	12,0	15,0	19,3	17,1	14,4	21,7	13,5	21,8	12,7	18,9	16,6	3,4	20,3%
1	17,2	15,0	11,8	14,7	18,8	17,0	14,1	21,8	13,5	21,6	12,0	18,7	16,4	3,4	20,7%
1,05	16,9	15,0	11,8	14,5	18,4	16,8	13,9	21,7	13,5	21,4	11,8	18,5	16,2	3,4	20,8%
1,1	16,7	14,9	11,7	14,2	18,1	16,6	13,8	21,7	13,4	21,2	11,6	18,3	16,0	3,4	21,0%
1,15	16,3	14,9	11,6	13,9	17,9	16,5	13,6	21,7	13,3	21,0	11,4	18,0	15,8	3,4	21,2%
1,2	16,0	14,9	11,5	13,6	17,7	16,4	13,5	21,6	13,2	20,8	11,3	17,7	15,7	3,3	21,3%
1,25	15,8	15,0	11,3	13,4	17,5	16,3	13,4	21,5	13,2	20,5	11,2	17,5	15,5	3,3	21,3%
1,3	15,5	15,0	11,0	13,1	17,3	16,1	13,3	21,2	13,2	20,3	10,9	17,2	15,3	3,3	21,5%
1,35	15,3	15,0	10,9	12,7	17,1	16,0	13,2	20,8	13,1	20,0	10,6	17,0	15,1	3,3	21,5%
1,4	15,2	15,0	10,7	12,4	17,0	16,0	13,2	20,5	13,0	19,6	10,3	16,8	15,0	3,2	21,4%
1,45	15,1	15,1	10,6	11,9	16,8	15,9	13,2	20,3	12,9	19,3	10,2	16,6	14,8	3,2	21,7%
1,5	15,0	15,1	10,3	11,5	16,7	15,9	13,1	20,1	12,7	19,0	10,1	16,3	14,7	3,2	21,8%
1,55	14,8	15,1	10,2	11,3	16,5	15,8	13,2	19,9	12,7	18,8	10,0	16,0	14,5	3,2	21,7%
1,6	14,7	15,1	10,0	11,1	16,4	15,6	13,2	19,7	12,5	18,5	10,0	15,8	14,4	3,1	21,8%
1,65	14,6	15,0	9,9	10,9	16,3	15,6	13,2	19,5	12,4	18,0	10,0	15,6	14,2	3,1	21,5%
1,7	14,4	14,8	9,7	10,8	16,2	15,5	13,1	19,4	12,4	17,9	9,9	15,5	14,1	3,0	21,6%
1,75	14,3	14,8	9,6	10,8	16,1	15,5	13,1	19,2	12,3	17,8	9,9	15,3	14,1	3,0	21,5%

Tabela 8 - Resultados individuais de carga (kN) por deslocamento vertical (mm) – Corpos de prova de 10 cm.

Deslocamento Vertical (mm)	10_1	10_2	10_3	10_4	10_5	10_6	10_7	10_8	10_9	10_10	10_11	10_12	Média	Desv. Pad.	CV
1,8	14,1	14,8	9,4	10,8	16,0	15,5	13,0	19,1	12,3	17,6	9,9	15,2	14,0	3,0	21,5%
1,85	14,1	14,7	9,3	10,7	15,8	15,5	13,0	19,0	12,2	17,4	9,9	15,2	13,9	3,0	21,5%
1,9	14,0	14,7	9,1	10,6	15,7	15,4	12,9	18,9	12,1	17,2	9,9	15,1	13,8	3,0	21,6%
1,95	13,9	14,7	8,9	10,4	15,5	15,3	12,9	18,8	12,0	17,1	9,9	14,9	13,7	3,0	21,8%
2	13,8	14,6	8,7	10,2	15,3	15,2	12,8	18,4	11,9	16,9	9,8	14,9	13,5	2,9	21,7%
2,05	13,7	14,6	8,6	10,1	15,2	15,0	12,7	18,0	11,8	16,7	9,7	14,8	13,4	2,9	21,6%
2,1	13,6	14,6	8,4	10,0	15,0	15,0	12,6	17,4	11,6	16,5	9,5	14,6	13,2	2,8	21,4%
2,15	13,5	14,4	8,3	9,9	14,9	14,9	12,6	16,9	10,7	16,5	9,3	14,5	13,0	2,9	21,9%
2,2	13,4	14,3	8,3	9,7	14,8	14,8	12,6	15,5	10,6	16,4	8,3	14,4	12,7	2,8	22,2%
2,25	13,3	14,2	8,2	9,4	14,7	14,7	12,5	14,4	10,5	16,3	8,1	14,2	12,6	2,8	22,2%
2,3	13,2	14,1	8,2	9,3	14,6	14,6	12,5	13,2	10,4	16,4	7,1	14,1	12,3	2,9	23,5%
2,35	13,1	14,1	8,1	9,2	14,5	14,6	12,5	12,8	10,3	16,4	6,8	13,5	12,2	2,9	23,9%
2,4	13,0	14,1	7,9	9,1	14,4	14,6	12,5	12,6	10,2	16,4	6,6	13,4	12,1	3,0	24,6%
2,45	12,9	14,1	7,8	9,0	14,3	14,6	12,5	12,4	10,1	16,3	6,4	13,4	12,0	3,0	25,1%
2,5	12,8	14,2	7,7	8,9	14,2	14,5	12,4	12,2	10,0	16,3	6,3	13,3	11,9	3,0	25,5%
2,55	12,7	14,2	7,7	8,8	14,0	14,5	12,4	12,0	10,0	16,2	6,2	13,2	11,8	3,0	25,7%
2,6	12,6	14,2	7,6	8,8	13,7	14,4	12,4	11,9	9,9	16,2	6,1	13,1	11,7	3,0	25,8%
2,65	12,6	14,2	7,6	8,7	13,5	14,4	12,3	11,7	9,7	16,1	6,0	12,8	11,6	3,0	26,0%
2,7	12,4	14,3	7,5	8,6	13,4	14,3	12,3	11,6	9,7	16,0	5,9	12,8	11,6	3,0	26,3%
2,75	12,4	14,2	7,4	8,5	13,2	14,3	12,2	11,4	9,6	16,0	5,9	12,7	11,5	3,0	26,4%
2,8	12,2	14,3	7,4	8,5	13,0	14,2	12,1	11,3	9,5	15,9	5,8	12,7	11,4	3,0	26,5%
2,85	12,1	14,3	7,4	8,4	12,8	14,1	12,0	11,1	9,5	15,3	5,7	12,6	11,3	3,0	26,3%
2,9	12,0	14,2	7,3	8,3	12,6	14,1	11,8	10,9	9,4	15,0	5,6	12,6	11,2	2,9	26,3%
2,95	11,9	14,3	7,3	8,3	12,4	14,0	11,4	10,8	9,3	15,0	5,5	12,6	11,1	2,9	26,6%
3	11,8	14,2	7,2	8,2	12,3	13,9	11,2	10,7	9,2	14,8	5,5	12,5	11,0	2,9	26,7%
3,05	11,7	14,2	7,2	8,2	12,2	13,9	11,0	10,5	9,1	14,6	5,4	12,4	10,9	2,9	26,7%
3,1	11,6	14,2	7,0	8,1	12,1	13,8	10,9	10,4	9,1	14,4	5,4	12,4	10,8	2,9	26,9%
3,15	11,5	14,2	6,9	8,1	12,0	13,7	10,8	10,4	9,0	14,2	5,4	12,3	10,7	2,9	26,9%
3,2	11,5	14,1	6,9	8,0	11,9	13,6	10,7	10,3	8,9	13,9	5,3	12,3	10,6	2,9	26,9%
3,25	11,4	14,1	6,8	8,0	11,7	13,6	10,7	10,2	8,8	13,8	5,3	12,2	10,5	2,8	27,0%
3,3	11,4	14,1	6,7	7,9	11,6	13,5	10,6	10,0	8,7	13,7	5,2	12,2	10,5	2,9	27,3%
3,35	11,2	14,1	6,6	7,7	11,5	13,4	10,6	9,9	8,6	13,5	5,1	12,2	10,4	2,9	27,6%
3,4	11,2	14,1	6,5	7,5	11,4	13,3	10,5	9,8	8,5	13,4	5,2	12,1	10,3	2,9	27,8%
3,45	11,1	14,1	6,5	7,3	11,3	13,2	10,5	9,7	8,5	13,3	5,2	12,1	10,2	2,9	28,0%
3,5	10,9	14,1	6,4	7,2	11,2	13,1	10,4	9,5	8,4	13,2	5,1	12,0	10,1	2,9	28,2%
3,55	10,8	14,0	6,3	7,2	11,1	13,0	10,4	9,3	8,4	13,1	5,1	12,0	10,1	2,8	28,3%
3,6	10,6	14,0	6,3	7,1	11,1	12,9	10,3	9,1	8,4	13,0	5,1	11,9	10,0	2,8	28,3%
3,65	10,5	13,9	6,2	7,1	11,0	12,8	10,2	9,0	8,2	11,6	5,1	11,9	9,8	2,7	27,6%
3,7	10,5	13,7	6,2	7,0	10,9	12,6	10,2	8,8	8,2	11,5	5,1	11,8	9,7	2,7	27,5%
3,75	10,4	13,6	6,1	7,0	10,8	12,5	10,1	8,7	8,2	11,4	5,0	11,8	9,6	2,7	27,6%
3,8	10,3	13,5	6,0	7,0	10,7	12,4	10,0	8,6	8,1	11,3	4,9	11,8	9,5	2,6	27,7%
3,85	10,2	13,3	5,9	7,0	10,6	12,3	10,0	8,5	8,0	11,2	4,9	11,7	9,5	2,6	27,7%
3,9	10,2	13,3	5,9	6,9	10,6	12,2	9,9	8,4	7,9	11,1	4,8	11,6	9,4	2,6	28,0%
3,95	10,1	13,3	5,8	6,9	10,5	12,2	9,8	8,3	7,8	11,0	4,8	11,6	9,3	2,6	28,3%
4	10,0	13,3	5,7	6,9	10,4	12,1	9,8	8,2	7,8	10,9	4,7	11,5	9,3	2,6	28,4%

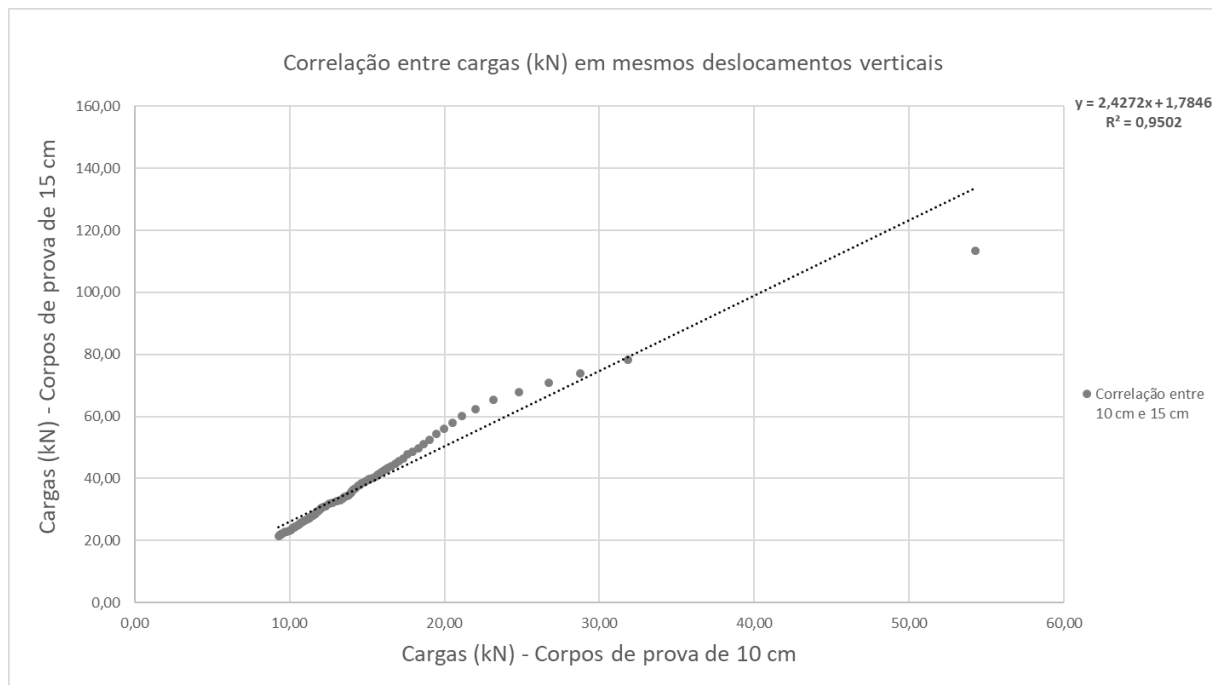
Tabela 9 - Resultados individuais de carga (kN) por deslocamento vertical (mm) – Corpos de prova de 15 cm.

Deslocamento Vertical (mm)	15_1	15_2	15_3	15_4	15_5	15_6	15_7	15_8	15_9	Média	Desv. Pad.	CV
0	98,0	92,1	140,1	88,6	143,4	124,1	127,6	89,2	118,1	113,4	21,9	19,3%
0,05	76,1	60,5	84,8	67,2	88,8	90,0	81,9	68,0	86,1	78,2	10,7	13,7%
0,1	69,1	59,6	78,9	64,4	83,0	85,9	76,5	64,8	83,1	73,9	9,7	13,1%
0,15	66,4	58,8	75,0	62,1	78,8	78,9	73,0	63,6	80,6	70,8	8,2	11,6%
0,2	62,3	58,1	72,7	57,2	74,6	75,9	69,6	62,7	78,7	68,0	8,1	11,9%
0,25	60,1	56,0	71,0	54,6	70,0	72,5	66,5	60,8	76,8	65,4	7,8	12,0%
0,3	58,6	53,1	69,5	52,9	60,9	68,8	64,0	59,1	74,9	62,4	7,5	12,1%
0,35	57,5	50,6	67,2	51,4	57,4	65,3	62,0	57,7	72,7	60,2	7,3	12,1%
0,4	56,3	47,9	65,0	50,1	54,9	62,5	59,9	56,2	69,1	58,0	6,9	11,8%
0,45	54,9	44,8	63,6	48,6	53,0	59,6	58,2	54,4	67,1	56,0	7,0	12,5%
0,5	53,3	42,2	62,2	47,4	51,0	57,6	56,6	53,2	65,4	54,3	7,1	13,1%
0,55	51,9	40,1	60,3	46,3	49,4	55,4	55,1	52,1	62,3	52,6	6,9	13,0%
0,6	50,8	38,6	59,1	45,1	48,4	53,1	53,4	51,2	60,4	51,1	6,7	13,1%
0,65	50,1	37,0	58,1	44,1	47,4	51,4	51,4	50,4	58,7	49,8	6,7	13,4%
0,7	49,4	35,8	57,2	43,2	46,2	50,1	49,4	49,8	57,1	48,7	6,6	13,6%
0,75	48,7	34,5	56,2	42,4	45,5	49,3	48,1	48,7	55,9	47,7	6,6	13,9%
0,8	48,1	33,4	55,2	41,5	44,1	48,4	46,9	47,3	53,4	46,5	6,5	13,9%
0,85	47,6	32,4	54,3	40,6	43,4	47,8	46,2	46,1	52,0	45,6	6,4	14,1%
0,9	47,1	31,8	53,5	39,9	42,9	47,1	45,3	44,8	50,5	44,8	6,3	14,1%
0,95	46,5	31,3	52,9	39,4	42,4	46,4	44,4	43,8	49,4	44,1	6,2	14,1%
1	45,9	31,0	52,5	38,9	41,9	45,7	43,7	42,9	48,5	43,5	6,1	14,0%
1,05	45,3	30,5	52,2	38,6	41,4	45,0	43,1	42,3	47,7	42,9	6,1	14,1%
1,1	44,6	30,1	51,7	38,3	41,1	43,7	42,6	41,7	47,2	42,3	6,0	14,1%
1,15	44,1	29,7	51,3	37,9	40,6	42,5	42,2	41,0	46,7	41,8	5,9	14,2%
1,2	43,7	29,4	50,0	37,5	40,2	41,7	41,8	40,4	46,2	41,2	5,7	13,9%
1,25	43,2	29,1	49,5	37,0	39,7	40,8	41,4	39,6	45,8	40,7	5,7	14,0%
1,3	42,8	28,8	48,9	36,6	39,3	40,1	40,9	39,0	45,5	40,2	5,6	14,0%
1,35	42,4	28,5	48,4	36,3	38,9	39,2	40,6	38,3	45,2	39,8	5,6	14,2%
1,4	41,8	28,3	47,9	36,0	38,4	38,4	40,3	37,7	44,8	39,3	5,6	14,2%
1,45	41,4	28,2	47,6	35,8	37,7	37,8	39,9	37,1	44,4	38,9	5,5	14,2%
1,5	41,1	28,0	47,3	35,4	37,2	37,0	39,4	36,7	43,7	38,4	5,5	14,2%
1,55	40,8	27,8	46,5	35,1	36,8	36,3	39,0	36,2	43,2	38,0	5,3	14,1%
1,6	40,6	27,7	46,0	34,8	36,5	35,6	38,7	35,8	42,3	37,6	5,2	13,9%
1,65	40,3	27,6	45,6	34,6	36,2	34,0	38,2	35,2	40,4	36,9	5,1	13,7%
1,7	39,9	27,5	45,0	34,3	35,8	33,3	37,8	34,6	39,9	36,5	5,0	13,7%
1,75	39,6	27,3	44,6	34,0	35,5	32,7	36,8	34,2	39,4	36,0	4,9	13,6%
1,8	38,5	27,1	44,2	33,8	35,1	32,1	36,5	33,7	38,9	35,5	4,8	13,6%
1,85	38,2	26,8	43,8	33,6	34,7	31,7	36,2	33,3	37,2	35,1	4,7	13,4%
1,9	37,9	26,4	43,4	33,4	34,4	31,3	35,7	32,7	36,8	34,7	4,7	13,6%
1,95	37,4	26,2	43,1	33,3	34,0	30,7	35,1	32,3	36,6	34,3	4,7	13,7%
2	37,1	26,1	42,8	33,2	33,8	30,2	34,7	31,9	36,4	34,0	4,7	13,7%
2,05	36,9	26,0	42,4	33,1	33,5	29,8	32,0	31,6	36,1	33,5	4,7	13,9%
2,1	36,7	25,9	42,0	33,0	33,2	28,0	31,6	31,1	36,0	33,0	4,8	14,6%

Tabela 9 - Resultados individuais de carga (kN) por deslocamento vertical (mm) – Corpos de prova de 15 cm.

Deslocamento Vertical (mm)	15_1	15_2	15_3	15_4	15_5	15_6	15_7	15_8	15_9	Média	Desv. Pad.	CV
2,15	36,4	25,8	41,6	32,8	32,8	27,6	31,2	30,7	35,7	32,7	4,8	14,6%
2,2	36,0	25,6	39,5	32,7	32,4	27,2	30,6	30,3	35,6	32,2	4,4	13,7%
2,25	35,8	25,4	38,5	32,5	32,1	26,9	30,1	30,0	35,4	31,8	4,3	13,4%
2,3	35,1	25,2	36,1	32,3	31,8	25,4	29,4	29,7	35,3	31,1	4,1	13,0%
2,35	34,8	25,1	35,2	32,2	31,5	25,0	28,8	29,3	35,2	30,8	4,0	13,0%
2,4	34,6	25,2	34,2	32,1	31,3	24,6	28,4	28,9	35,0	30,5	3,9	12,9%
2,45	34,5	25,1	33,6	32,0	30,9	23,7	28,0	28,6	34,7	30,1	4,0	13,3%
2,5	34,1	25,0	32,3	31,7	30,7	23,2	27,7	28,3	34,5	29,7	3,9	13,3%
2,55	33,9	24,9	31,9	31,5	30,4	22,2	27,5	28,1	34,1	29,4	4,1	13,8%
2,6	33,7	24,7	31,4	31,3	30,1	21,2	27,3	27,8	33,9	29,0	4,2	14,5%
2,65	33,4	24,5	31,0	31,2	29,9	20,9	27,1	27,6	32,8	28,7	4,1	14,2%
2,7	33,0	24,2	30,5	31,1	29,6	20,5	27,0	27,3	32,2	28,4	4,1	14,4%
2,75	32,8	24,0	30,0	31,0	28,2	20,2	26,7	27,1	31,7	28,0	4,0	14,4%
2,8	32,6	23,9	28,6	30,9	27,8	20,0	26,5	26,8	31,5	27,6	4,0	14,3%
2,85	32,5	23,7	28,0	30,7	27,5	19,7	26,3	26,5	30,3	27,2	3,9	14,2%
2,9	32,3	23,6	27,6	30,6	26,9	19,4	26,1	26,3	29,9	27,0	3,9	14,4%
2,95	31,5	23,4	27,2	30,5	26,6	19,2	25,5	26,1	29,5	26,6	3,8	14,3%
3	31,3	23,3	26,8	30,4	26,3	18,9	25,4	25,8	28,5	26,3	3,7	14,2%
3,05	31,0	23,1	26,5	30,3	26,1	18,7	25,2	25,5	28,1	26,1	3,7	14,3%
3,1	30,7	22,9	26,0	30,1	25,9	18,4	25,0	25,3	27,8	25,8	3,7	14,4%
3,15	30,6	22,7	25,4	29,9	25,7	18,3	24,8	25,0	27,5	25,5	3,7	14,5%
3,2	30,3	22,3	24,9	29,7	25,5	18,2	24,6	24,7	27,3	25,3	3,7	14,6%
3,25	30,0	21,9	23,7	29,5	25,2	18,0	24,5	24,5	27,0	24,9	3,7	14,9%
3,3	29,7	21,7	23,2	29,2	25,0	17,8	24,4	24,3	26,8	24,7	3,7	14,9%
3,35	29,5	21,5	22,8	29,0	24,9	17,7	24,2	24,1	26,6	24,5	3,7	15,0%
3,4	29,3	21,3	22,4	29,0	24,6	17,6	24,1	23,8	26,3	24,3	3,7	15,2%
3,45	29,1	21,2	21,9	28,8	24,5	17,5	23,9	23,6	26,0	24,0	3,7	15,4%
3,5	28,9	21,0	21,5	28,6	24,3	17,2	23,7	23,4	24,2	23,6	3,6	15,3%
3,55	28,6	20,7	21,1	28,4	24,1	17,0	23,5	23,2	23,9	23,4	3,7	15,6%
3,6	28,5	20,4	20,6	28,3	24,0	16,8	23,3	23,1	23,5	23,2	3,7	16,0%
3,65	28,3	20,3	20,0	28,2	23,9	16,6	23,1	22,9	23,1	22,9	3,8	16,4%
3,7	28,3	20,0	19,6	28,1	23,7	16,4	22,7	22,7	22,8	22,7	3,8	16,9%
3,75	28,0	19,9	19,2	28,0	23,6	16,2	22,6	22,5	22,6	22,5	3,9	17,2%
3,8	27,8	19,6	18,8	27,9	23,4	16,0	22,5	22,3	22,4	22,3	3,9	17,5%
3,85	27,6	19,4	18,3	27,8	23,3	15,8	22,3	22,2	22,1	22,1	4,0	18,0%
3,9	27,5	19,2	18,0	27,7	23,1	15,5	22,2	22,0	21,9	21,9	4,0	18,4%
3,95	27,3	19,0	17,7	27,7	22,9	15,3	22,0	21,8	21,7	21,7	4,1	18,7%
4	27,1	18,9	17,5	27,5	22,6	15,2	21,8	21,7	21,4	21,5	4,1	18,9%

Figura 37 – Correlação entre as cargas (kN) para os dois diâmetros com os mesmos deslocamentos verticais.



**Apêndice 4 – Resultados individuais e médios dos EDP para os TCODs -
apresentados a partir da ruptura a cada 0,5 mm, até 4,5 mm.**

As tabelas abaixo apresentam os dados de tensões (Mpa) nos respectivos pontos de TCOD calculados por conversão analítica, assim como a diferença proporcional nos pontos estabelecidos de F_{cr} , ELS e ELU para os diferentes diâmetros.

Tabela 10 - Tensão de tração calculada (MPa) nos TCODs para os corpos de prova de 10 cm.

	10_1	10_2	10_3	10_4	10_5	10_6	10_7	10_8	10_9	10_10	10_11	10_12	Média	Desv. Pad.	Coef. Var.
F_{cr}	2,98	2,08	3,36	2,79	2,74	3,62	3,33	3,16	2,73	3,24	3,40	3,40	3,07	0,42	13,8%
F_{0,5}	1,68	1,43	2,45	1,51	1,63	2,47	2,54	1,29	1,25	1,94	2,07	1,38	1,80	0,48	26,4%
F_{1,0}	1,20	0,95	1,82	0,97	1,25	1,22	1,02	1,21	0,85	1,45	0,97	1,16	1,17	0,26	22,5%
F_{1,5}	1,00	0,85	1,00	0,85	1,03	0,99	0,89	1,23	0,77	1,24	0,72	1,05	0,97	0,16	16,8%
F_{2,0}	0,87	0,85	0,72	0,71	0,94	0,90	0,79	1,16	0,74	1,13	0,61	0,95	0,86	0,17	19,1%
F_{2,5}	0,81	0,84	0,65	0,61	0,89	0,86	0,74	1,08	0,70	1,00	0,56	0,86	0,80	0,16	19,4%
F_{3,0}	0,76	0,81	0,56	0,55	0,82	0,82	0,73	0,85	0,66	0,93	0,53	0,81	0,74	0,13	17,9%
F_{3,5}	0,71	0,80	0,48	0,50	0,75	0,79	0,71	0,67	0,57	0,92	0,35	0,72	0,66	0,16	24,1%
F_{4,0}	0,66	0,81	0,44	0,46	0,68	0,74	0,69	0,60	0,54	0,83	0,31	0,70	0,62	0,16	25,3%
F_{4,5}	0,63	0,80	0,42	0,42	0,63	0,68	0,61	0,55	0,50	0,76	0,29	0,68	0,58	0,15	25,8%

Tabela 11 - Tensão de tração calculada (MPa) nos TCODs para os corpos de prova de 15 cm.

	15_1	15_2	15_3	15_4	15_5	15_6	15_7	15_8	15_9	Média	Desv. Pad.	Coef. Var.
F_{cr}	2,46	2,99	3,52	3,16	3,61	3,12	3,21	2,24	2,97	3,03	0,42	13,8%
F_{0,5}	1,83	2,32	2,56	2,92	3,42	2,21	2,85	1,67	2,33	2,46	0,52	21,0%
F_{1,0}	1,36	1,49	1,78	2,25	2,77	1,46	2,17	1,37	1,83	1,83	0,45	24,8%
F_{1,5}	1,19	0,93	1,45	1,70	1,72	1,18	1,61	1,15	1,40	1,37	0,26	18,9%
F_{2,0}	1,08	0,74	1,31	1,22	1,17	1,00	1,26	0,99	1,17	1,10	0,16	14,9%
F_{2,5}	1,00	0,69	1,19	1,01	1,04	0,83	1,08	0,87	1,07	0,98	0,14	14,7%
F_{3,0}	0,92	0,64	1,09	0,92	0,94	0,70	1,00	0,78	0,91	0,88	0,14	15,6%
F_{3,5}	0,85	0,60	0,89	0,86	0,86	0,55	0,92	0,71	0,88	0,79	0,13	16,3%
F_{4,0}	0,79	0,54	0,76	0,83	0,80	0,48	0,77	0,66	0,79	0,71	0,12	16,5%
F_{4,5}	0,74	0,49	0,64	0,80	0,71	0,44	0,69	0,61	0,68	0,64	0,11	16,9%

Tabela 12 - Diferenças proporcionais para a média entre tensões nos pontos de TCOD.

F_{cr}	1,3%
F_{0,5}	30,6%
F_{1,0}	43,8%
F_{1,5}	34,3%
F_{2,0}	24,4%
F_{2,5}	19,8%
F_{3,0}	17,6%
F_{3,5}	17,6%
F_{4,0}	13,6%
F_{4,5}	10,5%

Figura 38 - Teste t para amostras emparelhadas de 10 e 15 cm. Cálculos realizados no software "Jamovi" <https://www.jamovi.org>

Teste t para amostras emparelhadas

			estatística	gl	p
10 cm - F _{cr}	15 cm - F _{cr}	t de Student	-0.260	8.00	0.802
10 cm - F _{0.5}	15 cm - F _{0.5}	t de Student	-2.881	8.00	0.020
10 cm - F _{1.0}	15 cm - F _{1.0}	t de Student	-3.465	8.00	0.009
10 cm - F _{1.5}	15 cm - F _{1.5}	t de Student	-3.774	8.00	0.005
10 cm - F _{2.5}	15 cm - F _{2.5}	t de Student	-2.042	8.00	0.075
10 cm - F _{3.5}	15 cm - F _{3.5}	t de Student	-1.650	8.00	0.138
10 cm - F _{4.5}	15 cm - F _{4.5}	t de Student	-0.865	8.00	0.412
10 cm - F _{5.0}	15 cm - F _{5.0}	t de Student	-1.085	8.00	0.310

