



A: XXXIX-0000

## AVALIAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DE FRC POR MEIO DA CORRELAÇÃO DIGITAL DE IMAGENS (DIC)

### EVALUATION OF THE MODULUS OF ELASTICITY OF FRC USING DIGITAL IMAGE CORRELATION (DIC)

Tobias Pigatto Ottoni (A) (1); Danielle Airão Barros (1); Lucas Alexandre Reginato (3); Américo Campos Filho (4); Paula Manica Lazzari (5); Luiz Carlos Pinto da Silva Filho (4)

- (1) Engenheiro Civil, Doutorando em Engenharia Civil - Estruturas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil.
- (2) Professor doutor, Universidade de Santa Cruz do Sul, Santa Cruz do Sul, Brasil.
- (4) Professor doutor, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil.
- (5) Professora doutora, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil.

Endereço para correspondência: engenhariaottoni@gmail.com; (A) Apresentador

**Área temática:** Métodos Experimentais.

#### Resumo

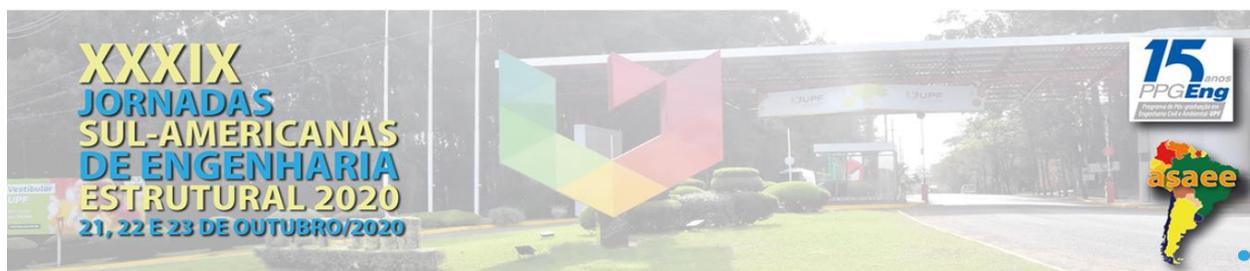
Este trabalho tem por objetivo avaliar o módulo de elasticidade à compressão de corpos de prova de concreto reforçado com fibras (FRC) através de duas diferentes metodologias de captura de dados de deslocamento. Os deslocamentos verticais foram medidos por meio de transformador diferencial variável linear (LVDT) e correlação digital de imagem - DIC (*Digital Image Correlation*). Para a utilização da metodologia DIC, a superfície das amostras é preparada para posterior análise em software de correlação digital de imagem. A partir dos resultados obtidos, observou-se que eles foram compatíveis, demonstrando a viabilidade do uso da metodologia DIC para captura de deslocamentos, desde que os procedimentos necessários para a preparação dos corpos de prova e captura de imagem sejam garantidos. Este resultado torna-se importante, pois reforça a possibilidade de utilização de outras metodologias para captura de dados, em especial a DIC, por ser um método barato e de fácil execução quando comparada com a metodologias tradicionais.

*Palavra-Chave: Módulo de elasticidade, deslocamento, correlação digital de imagem*

#### Abstract

This work aims to evaluate the compression modulus of fiber reinforced concrete (FRC) specimens using two different displacement data capture methodologies. Vertical displacements were measured using a linear variable differential transformer (LVDT) and digital image correlation - DIC (*Digital Image Correlation*). For the application of digital image correlation, the surface of the samples is prepared for further analysis in DIC software. From the results obtained, it was observed that they were compatible, demonstrating the feasibility of using the DIC methodology to capture displacements, provided that the necessary procedures for the preparation of specimens and image capture are guaranteed. This result is important because it reinforces the possibility of using other methodologies for data capture, especially DIC, as it is a cheap and easy-to-execute method when compared to traditional methodologies.

*Key-words: Young's Modulus, displacement, digital image correlation*



## 1. INTRODUÇÃO

A correta determinação do módulo de elasticidade do concreto é de grande importância para o desenvolvimento de um projeto, pois o seu valor é determinante para o cálculo das deformações da estrutura, sendo decisivo para um dimensionamento eficiente e que atenda aos requisitos de segurança de projeto, sobretudo em situações em que as estruturas são mais esbeltas e com vãos maiores.

Segundo Helene (1997), o módulo de elasticidade do concreto é uma propriedade mecânica difícil de ser medida e que apresenta uma grande variabilidade em seus resultados, sendo dependente de vários fatores além da resistência à compressão. De acordo com Mehta e Monteiro (2014), alguns desses fatores são: proporção volumétrica, tamanho, forma e módulo dos agregados, consistência da mistura, condições de cura, idade do concreto e os parâmetros adotados durante a realização do ensaio.

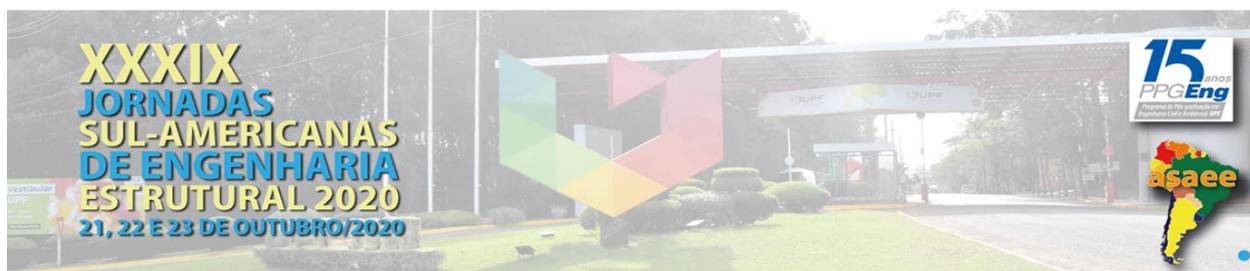
No Brasil, a ABNT NBR 8522 (2021) especifica uma metodologia de ensaio para definição dessa propriedade mecânica. Contudo, a forma de obtenção dos parâmetros do ensaio depende de diferentes aparelhos de instrumentação, considerados tradicionais para a medição dos deslocamentos, podendo ser elétricos ou mecânicos.

Alternativamente aos medidores tradicionais de deslocamento, existe a técnica de correlação de imagem digital (DIC), classificada como uma técnica óptica sem contato, que pode determinar o deslocamento de superfície completo por pós-processamento de imagens digitais. A superfície de interesse fotografada é coberta com padrões de manchas artificiais e então realiza-se a comparação entre a situação inicial e final, após a deformação sofrida pela amostra. (Peters; Ranson, 1982; Gencturk et al., 2014). O uso desta técnica atingiu seu ápice nos últimos anos, devido ao rápido e bem-sucedido desenvolvimento de diferentes equipamentos eletrônico, como as câmeras fotográficas digitais e os *softwares* especializados para processamento de imagens. Este fato pode ser comprovado pelo aumento do número de publicações que tratam desta metodologia e de diferentes aplicações da DIC.

Considerando esta nova perspectiva, este trabalho buscou determinar o módulo de elasticidade estático do concreto, seguindo a orientações da ABNT NBR 8522 (2021), comparando os resultados do ensaio utilizando a metodologia tradicional de medição, por meio de LVDT's, com os resultados obtidos utilizando a correlação digital de imagem (DIC).

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para a determinação do módulo de elasticidade do concreto, considerou-se a dosagem de um concreto reforçado com fibras (FRC) e para a produção do material, priorizou-se a escolha de materiais disponíveis localmente, que foram: o cimento tipo Portland de alta resistência inicial (CP V-ARI), a adição de cinza de casca de arroz (CCA) com queima controlada da Silcca Nobre, areia



fina com dimensão máxima igual a 0,3mm, escória de alto forno (GGBF) com dimensão máxima igual a 1,2mm como substituinte parcial da areia fina, água e aditivo superplastificante Tecflow8000. As fibras utilizadas foram as microfibras de polipropileno de alta tenacidade fornecidas e fabricadas pela Brasilit. A Tabela 1 mostra a dosagem do concreto estudada.

Tabela1 – Dosagem do concreto (kg/m<sup>3</sup>)

Cimento	CCA	Água	Areia Fina	GGBF	Fibra	% Aditivo
706,41	197,61	348,55	613,77	202,92	17,90	0,40

Seguindo as orientações da ABNT NBR 8522 (2021) para a determinação do módulo de elasticidade, foram moldados 5 corpos de provas cilíndricos, de dimensões 10cm x 20cm, conforme as orientações descritas na ABNT NBR 5738 (2015). Sobre o processo de moldagem, o material foi produzido em um misturador vertical com volume máximo de 70 litros, onde inicialmente misturou-se o material seco, até ficar uniforme, por aproximadamente 5 minutos. Posteriormente, adicionaram-se a água de amassamento e o aditivo superplastificante, até obter uma pasta extremamente fluida e, finalmente, adicionaram-se as fibras, de forma gradual e contínua, mantendo a rotação por mais 5 minutos, até sua completa dispersão. Após a moldagem, os corpos de prova foram armazenados na câmara úmida, com temperatura e umidade relativa do ar controladas.

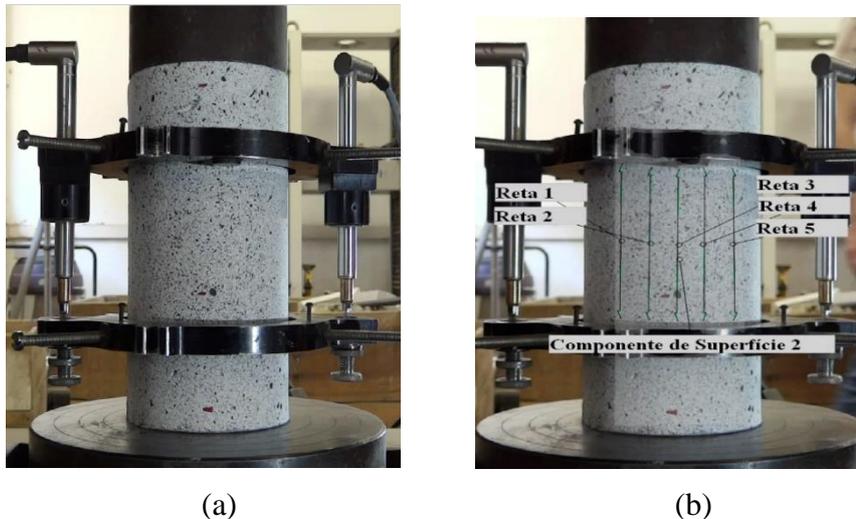
Para a determinação do módulo de elasticidade, de acordo com a ABNT NBR 8522 (2021), o primeiro passo deste ensaio é determinar a resistência à compressão do concreto ( $f_c$ ), conforme as orientações da ABNT NBR 5739 (2018), onde foram utilizados dois corpos de prova com  $f_c$  determinado a partir da média dos resultados obtidos. Para o ensaio de módulo, foram utilizados os outros 3 corpos de prova, sendo adotada a metodologia de tensão fixa. Neste caso, o corpo de prova é carregado até uma força correspondente à tensão limite superior ( $\sigma_b$ ), que é igual a 30% de  $f_c$ , e mantida nesse nível de carga por 60s. Posteriormente, o corpo de prova é descarregado até uma carga correspondente à tensão de 0,5MPa ( $\sigma_a$ ) e mantido nesse nível de carga por 60 s. Esse procedimento é repetido de forma que ocorram 4 ciclos de carga e 3 ciclos de descarga.

Os corpos de prova foram ensaiados com idade de  $28 \pm 1$  dia, numa prensa hidráulica da marca Shimadzu, com capacidade de carga de 2000 kN, definindo-se uma velocidade de carregamento de  $0,45 \pm 0,15$  MPa/s. A medida das deformações dos corpos de prova foi por meio de dois LVDT's da marca HBM com um curso de  $\pm 2$  mm e a aquisição de dados foi realizada pelo programa *Catman Easy*, a partir do equipamento *QuantumX*, também da marca HBM, com frequência de aquisição de dados igual a 10 Hz. Dois anéis foram fixados rigidamente ao corpo de prova, onde os LVDT's foram posicionados lateralmente.

Para este ensaio, além da metodologia tradicional descrita em norma, foi utilizada a correlação digital de imagem para a determinação do módulo de elasticidade. Neste caso, os corpos de prova passaram por uma preparação da superfície para criar o padrão de pontos aleatórios necessários para a aplicação da DIC de forma que este padrão possa ser identificado e avaliado pelo *software* no pós-processamento da imagem. Essas etapas são, inicialmente, a limpeza e



pintura dos corpos de prova com duas demãos de pintura na cor branca. Após completa secagem da superfície, foi realizado o espraçamento com *spray* fosco preto, com o objetivo de produzir uma pintura com contraste, que é o padrão estocástico. A Figura 1 mostra um corpo de prova finalizado para a aplicação da DIC (a) e o processamento da imagem (b).



Fonte: os autores.

Figura 1 – (a) Amostra preparada para a aplicação da DIC no ensaio de módulo de elasticidade (b) Posicionamento das retas para obtenção dos deslocamentos, durante o processamento da imagem.

Para a filmagem do ensaio, foram utilizadas duas câmeras digitais, do modelo Cyber-Shot, marca Sony, full HD, capazes de capturar 30 quadros por segundo, posicionadas de forma a estarem a  $90^\circ$  da região do centro do prisma, em ambas as faces, buscando sempre reduzir a interferência da incidência da luz externa, efeitos de vibrações e ruídos externos. Os corpos de prova foram iluminados com refletores de LED de cor branca, posicionados próximos a cada uma das faces de filmagem, de maneira a obter uma melhor qualidade da imagem e eliminar possíveis sombras. O *software* utilizado para o processamento da imagem e geração do padrão de deformação do corpo de prova foi o *Gom Correlate*.

Cabe ressaltar que as duas metodologias de medição do deslocamento adotadas ocorreram de forma simultânea durante a realização do ensaio de módulo de elasticidade, permitindo então a comparação dos seus resultados. A Figura 2 mostra o *layout* adotado para o ensaio.



Fonte: Os autores.

Figura 2 – *Layout* adotado para o ensaio.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados do ensaio de módulo de elasticidade ( $E_{ci}$ ) obtidos aos 28 dias estão apresentados na Tabela 2, considerando os valores obtidos com a aplicação das duas metodologias de medição dos deslocamentos. O valor do módulo de elasticidade ( $E_{ci}$ ), conforme a ABNT 8522 (2021), considerando a metodologia de tensão fixa, pode ser calculado conforme a equação 1:

$$E_{ci} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} 10^{-3} = \frac{\sigma_b - 0,5}{\varepsilon_b - \varepsilon_a} 10^{-3} \quad 1$$

Onde:

$\sigma_b$ : a maior tensão ( $\sigma_b = 0,3f_c$ );

0,5 é a tensão básica, expressa em MPa;

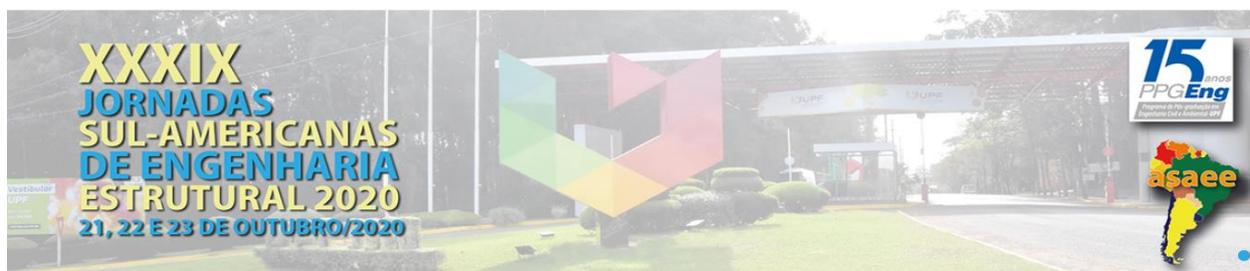
$\varepsilon_b$ : deformação específica média dos corpos de prova sob a maior tensão;

$\varepsilon_a$ : deformação específica média dos corpos de prova sob a tensão básica;

Tabela 2 – Resultados do Módulo de Elasticidade

CP	$f_c$ (MPa)	$E_{ci}$ (GPa) Ensaio	$E_{ci}$ médio (GPa) Ensaio	Coefficiente de Variação (%)	$E_{ci}$ (GPa) GOM
1		25,47			12,65*
2	67,10	25,39	25,60	1,14	25,18
3		25,93			24,83

\* Amostra desprezada.

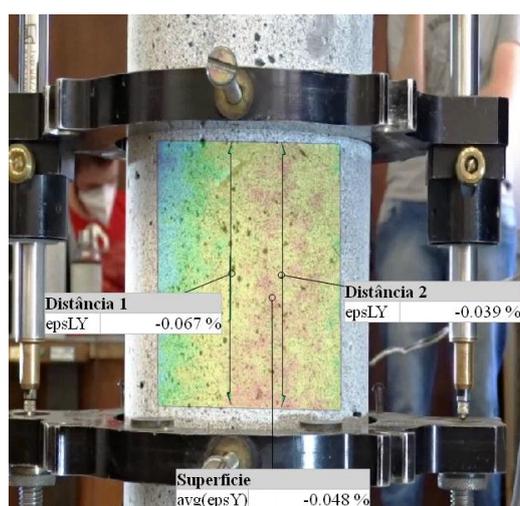


Examinando os resultados de módulo de elasticidade, observa-se que o  $E_{ci}$  médio obtido com a aplicação da metodologia tradicional foi 25,60 GPa, enquanto o  $E_{ci}$  médio obtido por meio da aplicação da DIC foi 25,00 GPa. Neste último caso, excluiu-se o resultado do corpo de prova 1, por ele ser divergente dos outros. A diferença entre os dois resultados médios foi 0,60 GPa (2,34%), mostrando que os resultados obtidos pelas duas metodologias de medição estão próximos.

Sobre o resultado divergente do corpo de prova 1, entende-se que ele pode ter ocorrido por efeitos externos, como vibrações e ruídos, já que o ensaio de módulo é muito sensível e os deslocamentos medidos são muito pequenos. Mesmo com essa diferença, entende-se que o resultado não pode ser invalidado.

Como a DIC é uma metodologia de medição nova para a área de engenharia civil, ainda não são conhecidos todos os fatores que impactam nos resultados, porém sabe-se que a qualidade do padrão de pintura adotado, os ruídos externos, a variação de luz incidente sobre a superfície da amostra e a qualidade dos materiais empregados são alguns dos fatores que podem impactar na captura das imagens.

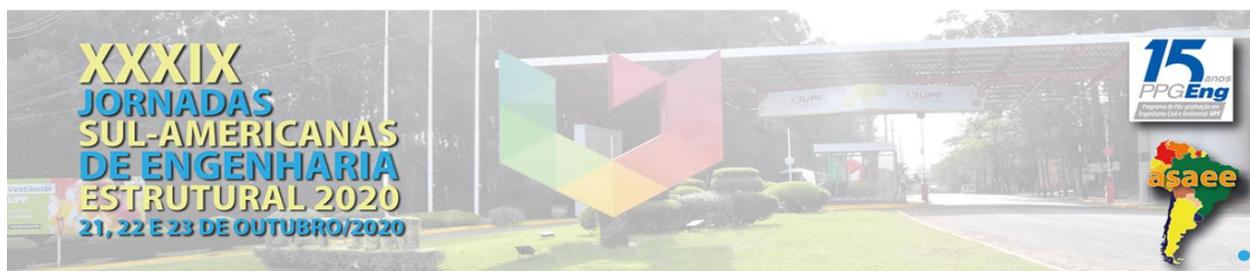
Uma grande vantagem da metodologia DIC é que através do processamento das imagens é possível gerar um diagrama da superfície da amostra, através de um mapeamento em cores, onde é possível observar o comportamento do material, avaliando onde estão as maiores deformações, durante todo o ensaio. A Figura 3 apresenta a deformação medida na superfície de um dos corpos de prova ensaiados, na parte entre os anéis metálicos, objeto de interesse.



(a)

Fonte: os autores.

Figura 3 – Deformação específica média medida na superfície da amostra.



#### 4. CONCLUSÕES

Comparando as respostas obtidas com a aplicação da metodologia de medição de deslocamentos consideradas tradicionais, por meio dos LVDT's, e a correlação digital de imagem (DIC), para a determinação do módulo de elasticidade do concreto, observa-se que os resultados foram semelhantes. A diferença que teve na medição de um dos corpos de prova foram por fatores externos que impactaram no resultado.

Conclui-se que a aplicação da DIC pode ser considerada apropriada e com uso promissor, desde que se tome os cuidados necessários no processo de preparação dos corpos de prova e captura das imagens. Além de ser um método de fácil aplicação e de baixo custo, ela apresenta ainda a vantagem de conseguir descrever o comportamento do corpo de prova durante o ensaio, com o processamento de imagens.

#### AGRADECIMENTOS

Agradecemos às instituições que financiaram esta pesquisa em especial: Brasilit e GCP pela doação das fibras de polipropileno e aditivo superplastificante, respectivamente, Vtech Consulting Ltda pela consultoria no uso do programa *GomCorrelate*, a CAPES pela bolsa de estudos, PROPESQ/UFRGS pelo suporte financeiro na aquisição de materiais para a pesquisa, e ao LEME pela infraestrutura oferecida para a realização dos ensaios.

#### REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMA TÉCNICAS. **ABNT NBR 5738**: Concreto - Procedimentos para moldagem e cura dos corpos de prova, Rio de Janeiro, ABNT, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMA TÉCNICAS. **ABNT NBR 5739**: Ensaio de compressão simples de corpos de prova cilíndricos, Rio de Janeiro, ABNT, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMA TÉCNICAS. **ABNT NBR 8522**: Concreto - determinação do módulo estático de elasticidade à compressão, Rio de Janeiro, ABNT, 2021.

GENCTURK, B.; HOSSAIN, K.; KAPADIA, A.; LABIB, E.; MO, Y-L. Use of digital image correlation technique in full-scale testing of prestressed concrete structures. **Measurement: Journal of the International Measurement Confederation**, v. 47, n. 1, p. 505–515, 2014.

GOM. **GOM Correlate**, 2019. Disponível em: <https://www.gom.com/3d-software/gom-correlate.html>

HELENE, P. R. . **Estudo da variação do módulo de elasticidade do concreto com a composição**



**e características do concreto fresco e endurecido.** Relatório Técnico, 1997.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais.** São Paulo: IBRACON, 2014.

PETERS, W. H.; RANSON, W. F. Digital imaging techniques in experimental stress analysis. **Optical Engineering**, 21(3), 427-431, 1982.