



INVESTIGAÇÃO E ANÁLISE DE DEFORMAÇÕES EM ESTRUTURA DE CONCRETO ATRAVÉS DE PROVA DE CARGA E APLICAÇÃO DA CORRELAÇÃO DIGITAL DE IMAGENS

Investigation and analysis of deformations in concrete structure through load proof and application of digital correlation of images

Luis Anderson C. da SILVA (1); Fábio B. SANTOS (1); Mário Henriques A. COSTA (1) (P); Alexandre Araújo BERTINI (2); Antônio Eduardo B. CABRAL (2) Marcelo S. Medeiros JUNIOR (2).

(1) Mestrando, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza - CE, Brasil.

(2) Dr. Prof., Universidade Federal do Ceará, Fortaleza - CE, Brasil.

Email para Correspondência: mariohenriquesac@gmail.com; (P) Apresentador

Resumo: Esse trabalho tem por finalidade utilizar relógios comparadores a fim de se obter medições de deformação de forma precisa em uma viga submetida à prova de carga em estrutura de concreto armado e comparar com a metodologia de correlação digital de imagens (CDI). As medições foram obtidas através de extensômetros analógicos no meio e nos terços do vão para uma prova de carga progressiva em cima da viga. O carregamento foi realizado por meio de carga de água dentro de uma forma modelada para este fim. Após os carregamentos, a viga foi fotografada de maneira estratégica e, utilizando o software Autodesk Recap 360®, foi obtida modelagem 3D e calculado seus deslocamentos. A viga escolhida também foi modelada no Ftool® e no SAP2000® a fim de se obter seus deslocamentos pelo Método dos Deslocamentos (MD) e pelo Método dos Elementos Finitos (MEF). Os resultados obtidos pelos ensaios são bastante semelhantes aos obtidos computacionalmente. No entanto a metodologia de correlação de imagens foi menos precisa que os métodos de medição com extensômetros.

Palavras chaves: *Extensômetros; Prova de carga; Construção Civil.*

Abstract: The aim of this work is to use comparator clocks to accurately measure deformation in a beam subjected to load test in reinforced concrete structure and compare with the methodology of digital image correlation (DIC). Measurements were obtained through analog strain gauges in the middle and in the thirds of the span for a progressive load test on top of the beam. Loading was carried out by means of loading water into a shape modeled for this purpose. After loading, the beam was strategically photographed and, using Autodesk Recap 360® software, 3D modeling was obtained and its displacements calculated. The chosen beam was also modeled in Ftool® and SAP2000® in order to obtain its displacements by the Displacement Method (DM) and the Finite Elements Method (FEM). The results obtained by the assays are quite similar to those obtained by computationally. However, the image correlation methodology was less precise than the measurement methods with strain gauges.

Keywords: *Extensometers, Load test, Civil Construction.*

1. Introdução

É sabido que, sob a ação de forças exteriores, os corpos sólidos se deformam. Entre o estado de deformação e o regime de tensões de um corpo, existem parâmetros elásticos que determinam a relação entre a tensão e a deformação do material. Dessa forma, pode-se determinar um deles, pelo conhecimento do outro.

Conforme observa Timoshenko e Goodier (1980), as relações lineares entre as componentes de tensão e as componentes de deformação são conhecidas geralmente como lei de Hooke e é expressa pela seguinte relação:

$$\sigma = E\varepsilon \quad (1)$$

onde ε é a deformação, σ é a tensão e E é o módulo de elasticidade do material.

Assim, as medidas de tensões não são feitas diretamente nos elementos testados, o que se faz é a medição da deformação e posteriormente a conversão desta, em tensão, tendo o módulo de elasticidade conhecido. Em face disso, os ensaios de prova de carga são baseados em medidas de deformações.

A seleção dos tipos de instrumentos dependerá do propósito do trabalho, das condições de projeto, e das variáveis que serão monitorados. Uma diversidade de instrumentos variando no grau de sofisticação está disponível no mercado. A seguir serão mostrados alguns instrumentos frequentemente utilizados nos ensaios.

1.1 Prova de carga em estruturas

Um dos testes mais eficientes para verificar a segurança de uma estrutura concluída é uma prova de carga. Quando existem dúvidas quanto à estabilidade de uma estrutura, devido a fatores, dentre outros, como qualidade dos materiais de construção, utilização ou manutenção inadequada ou até mesmo uma nova utilização da edificação, diferente daquela inicialmente prevista no projeto, uma prova de carga é recomendada (OLIVEIRA, 2006).

A NBR 9607 (ABNT, 2013) define prova de carga como sendo o conjunto de atividades destinadas a analisar o desempenho de uma estrutura através da medição e controle de efeitos causados pela aplicação de ações externas de intensidade e natureza previamente estabelecidas.

Por abranger, na maioria das vezes, especialidades e trabalhos diversos, a execução da prova de carga deve envolver profissionais relacionados com projeto estrutural, execução da obra, controle dos materiais e laboratórios. A execução de prova de carga em uma estrutura deve estar sempre associada a uma finalidade específica, da qual decorrem os critérios de carregamento e de aceitação a serem observados.



Existem dois tipos de prova de carga: a prova de carga estática, que consiste na observação estática da estrutura mediante a aplicação de um carregamento, sendo esse, estático ou móvel e a prova de carga dinâmica, que consiste na oscilação da estrutura e observação de seu comportamento quando vibrada e também na análise de estruturas, quando sobre elas trafegam altas massas animadas de velocidade. O escopo deste trabalho se limitará à prova de carga estática.

De acordo com a norma NBR 6118 (ABNT, 2014), o ensaio de aceitação visa a confirmar que o desempenho global da estrutura está em conformidade com as prescrições do projeto. A carga é aplicada até um valor máximo entre o valor característico e o valor de projeto para o Estado Limite Último (ELU). Podem ser estabelecidos requisitos para os deslocamentos, o grau de não linearidade e as deformações residuais, após o ensaio.

O carregamento de prova de carga pode ser feito com materiais de alta densidade, água, macacos hidráulicos e outros tipos de carregamento. Rocha et al. (1999), observam que com a utilização de água para gerar a sobrecarga, se consegue uma boa precisão na intensidade do carregamento aplicado, uma vez que o controle é feito através do nível da água, permitindo também um carregamento e descarregamento praticamente estático. Além disso, proporciona uma maior economia, considerando a facilidade de utilização de um elemento impermeabilizante de custo reduzido, no caso a lona plástica, também conhecida simplesmente como plástico preto.

Algumas considerações devem ser analisadas antes da realização dos ensaios de uma prova de carga:

- a) Objetivo dos testes;
- b) Intensidade dos carregamentos;
- c) Acessibilidade da área a ser carregada;
- d) Tipo de carregamento (concentrado ou distribuído);
- e) Exigências de carregamento, como proporção de carga, repetições ou ambos;
- f) Profissionais experientes;
- g) Segurança dos observadores;

As estruturas de concreto armado, durante sua vida útil, estão sujeitas às mais variadas situações que podem comprometer sua segurança, tais como: incêndios, abalos sísmicos, abandono, desconhecimento do projeto para o uso previsto, ambientes agressivos, etc. Frequentemente, se torna oportuno uma avaliação da segurança estrutural (OLIVEIRA, 2006).

Segundo Oliveira (2006), um ensaio de prova de carga é direcionado a atender as seguintes finalidades: verificação do comportamento global de edifícios, verificação



do comportamento estático de pontes e viadutos, verificação do comportamento dinâmico, verificação da resistência de estruturas sob novos carregamentos, aceitação de estruturas especiais e para fins de pesquisas.

1.2 Correlação digital de imagens (CDI)

A Correlação digital de imagens (CDI) é uma técnica eficiente que se destina a correlacionar dois segmentos de imagens e determinar a semelhança entre elas (MUDASSAR; BUTT, 2016). A imagem de correlação é formada com o que chamamos de ‘Pico de correlação’. Se dois segmentos de imagens são identificados e correlacionados eles são identificados e comparados automaticamente. Ao contrário, se os segmentos detectados não têm correlação entre si é descoberta a falta de correlação.

A CDI é calculada de pixel a pixel para o subconjunto de referências e os subconjuntos de testes. Uma imagem de correlação é formada na qual o pico de correlação é identificado (MUDASSAR; BUTT, 2016). Softwares de computador são utilizados para a análise de correlação de imagens de maneira rápida e prática.

Esta técnica óptica pode ser utilizada para determinação de campos de deslocamentos e deformações sem a necessidade de contato. Tal metodologia requer um sistema óptico de captura das superfícies das imagens da peça que se queira analisar antes e depois de sofrer os esforços. As imagens são então processadas, utilizando-se o algoritmo de correlação de imagem, onde é possível obter os campos de deformação e deslocamento (BARRETO JUNIOR, 2008). Tal técnica é rápida para obtenção de modelagem computacional e dos resultados de deslocamentos, e pode ser utilizada em avaliações e perícias estruturais se aplicada corretamente.

2. Metodologia

2.1 Materiais

Para este ensaio de prova de carga foram utilizados três relógios comparadores Mitutoyo®, com 0,01 mm de precisão, com suas respectivas bases metálicas magnéticas, dez metros de cabo de aço para segurar corpos de prova que servirão de peso para as medições, três corpos de prova de concreto, seis ganchos metálicos, três buchas para fixação dos ganchos na viga, e uma forma de madeira para viga com as dimensões de 0,2m x 0,7m x 7,0m, modelada para receber a carga de água com uma lona para impedir seu vazamento (Figura 01).

A Correlação Digital de Imagens (CDI) foi obtida com software Autodesk RECAP360®. As imagens ópticas foram obtidas com equipamento fotográfico digital.



Figura 01 – Materiais utilizados

2.2 Métodos

O ensaio de prova de carga é elaborado segundo a NBR 9607 (ABNT, 2013) para o estudo do comportamento da estrutura. A estrutura trata-se de um edifício residencial composto por pavimento térreo e mais 03 pavimentos tipo. São 02 (dois) apartamentos por andar, totalizando 06 (seis) apartamentos com 56m² de área para cada unidade. O edifício é localizado na Rua Doutor Expedito Mendes Chaves 145, Fortaleza-CE. A Figura 02 representa a planta baixa do primeiro pavimento e a Figura 03 mostra os estágios atuais da obra.

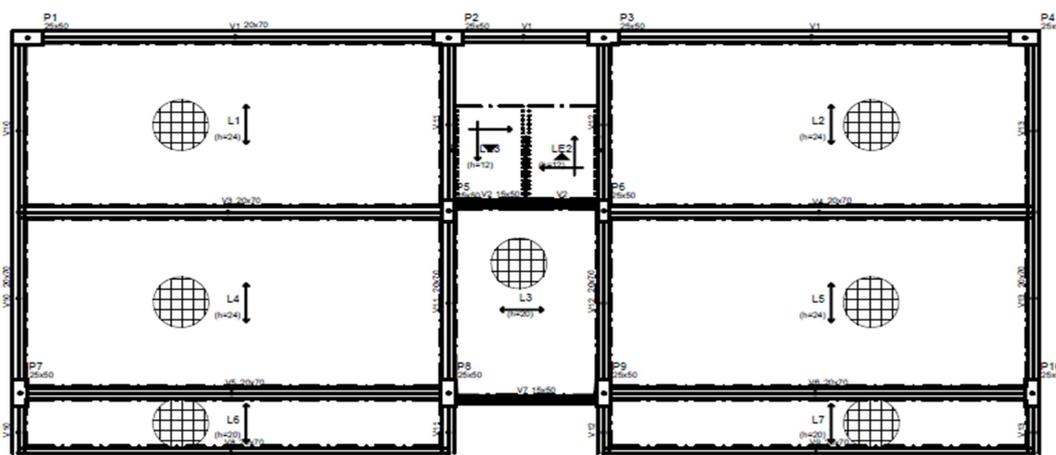


Figura 02 – Planta baixa do primeiro pavimento do edifício - Projectus Engenharia (2017)



**Figura 03 – Estágios da obra: (a) Concretagem da segunda laje (15/10/2017)
 (b) Concretagem da quarta laje (07/12/2017)**

O elemento adotado para o estudo é a viga V3 em virtude de ser a que possui maior solicitação, segundo indicação dos projetos estruturais disponibilizados. Seu detalhamento está exposto na Figura 04.

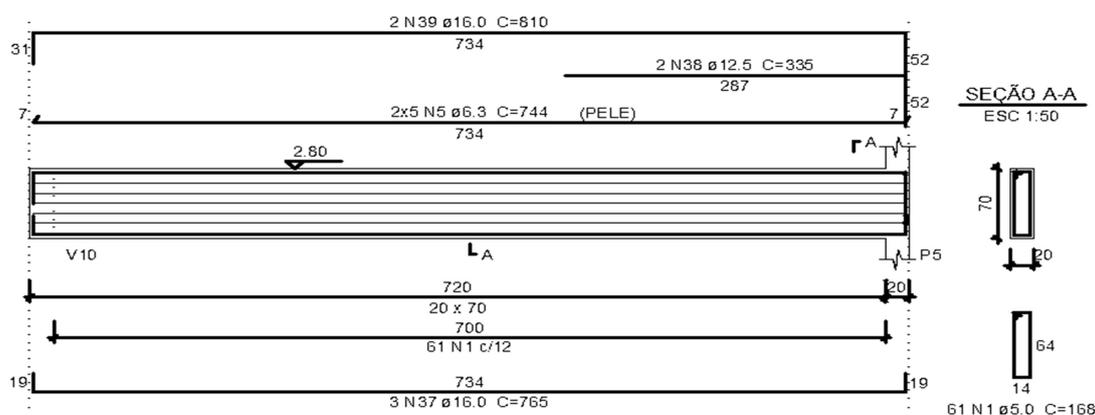


Figura 04 – Detalhamento da viga V3. Projectus Engenharia (2017)

O carregamento de prova é estático quanto à natureza; é rápido quanto à permanência, obtendo deformações imediatas; é básico quanto à magnitude das deformações, por tratar-se de um estudo do comportamento da estrutura, conforme a NBR 9067 (ABNT, 2013).

2.2.1 - Métodos computacionais

Foi realizada a medição dos deslocamentos pelos softwares Ftool® e SAP2000® a fim de se obter uma referência e possibilitar a comparação desse resultado com os obtidos em campo, por meio dos extensômetros. O primeiro se utiliza do Método dos Deslocamentos (MD), enquanto que o segundo utiliza o Método dos Elementos Finitos (MEF) com elementos de barra.

2.2.2 - Ensaio de prova de carga

Primeiramente, são fixados os relógios comparadores embaixo da viga ensaiada. São realizadas três medições, sendo uma no meio do vão e as outras duas nos terços do vão. Os relógios comparadores são fixados em seus respectivos suportes, apoiados em base magnética. Essas bases são apoiadas em um maciço de areia, a fim de evitar as irregularidades do piso, conforme Figura 05.



Figura 05 – Relógio comparador em base magnética apoiada em maciço de areia

As pontas dos relógios ficam em contato com o corpo de prova de concreto que está ligado à viga por meio de um cabo de aço preso a um gancho fixado na viga por meio de uma bucha de plástico. Os pontos de cada medição são dados na Figura 06.



Figura 06 – Posição de cada medição

O carregamento da viga ensaiada é realizado por meio de carga de água inserida na forma de uma viga moldada especificamente para este ensaio. Essa forma tem as mesmas dimensões de base e comprimento da viga e comporta 59 cm de coluna de água (Figura 07).



Figura 07 – Forma montada para recebimento da carga de água

Inicialmente, preenche-se a forma com 10 cm de água, equivalente a uma carga de 0,2KN/m, e descarrega-se em seguida a fim de obter a acomodação inicial da viga. Isso faz com que a primeira medição seja a medição 0 (zero). Em seguida, a forma é novamente preenchida com 10 cm de água. Após 15 minutos, anota-se a medida no defletômetro, que passa a ser a medida 1 (um). Feito isso, repete-se o processo a cada 10 cm até 50 cm, equivalente à última medição. O mesmo procedimento de medição é realizado para o descarregamento, que consiste no processo inverso, ou seja, retirando-se a água por meio de torneiras. Ao final, obtêm-se as flechas para cada carga aplicada, tanto no carregamento quanto no descarregamento.

2.2.3 - Modelo de Correlação Digital de Imagens (CDI)

A viga analisada foi fotografada antes e depois do carregamento de prova de carga. Foram tiradas 15 fotos em sequência, a uma distância de 50 cm da viga, de um apoio até o outro, em cada fase do carregamento. Após a obtenção das imagens as deformações foram analisadas no software Autodesk RECAP360 ®.

O método CDI não necessita de iluminação especial e requer apenas uma câmera digital de alta resolução. A textura do concreto ajuda na correlação de imagens antes e depois da deformação. O aspecto da textura é suficiente para indicar um número de pontos unitários e suas localizações precisas em cada imagem, com isso o campo de deslocamento pode ser estabelecido.

Uma grade de pontos é estabelecida no software com a imagem de referência e o deslocamento ao longo de todo o campo é mapeado em relação aos outros pontos. Os cálculos envolvidos no processo de correlação são feitos no nível do ponto.

3. Resultados e discussão

3.1 Carregamento de projeto da viga

O carregamento de projeto da viga foi obtido de acordo com o projeto estrutural fornecido pelo calculista da obra (memorial de cálculo), como mostra a Tabela 01.

Tabela 01 – Memorial de cálculo da viga V3 - Projectus Engenharia (2017)

Resultados da Viga V3	
fck = 35.00 MPa	Ecs = 29.00 MPa
Cobrimento = 3.00 cm	Peso específico = 25.00 kN/m ³
Seção: 20x70 cm	<u>Carga Permanente distribuída: 6kN/m</u>
	Carga Acidental: 0kN/m

3.2 Inspeção visual da viga

A inspeção visual é o primeiro ensaio não destrutivo aplicado a qualquer tipo de peça. Pode ser executado de maneira direta ou indireta, ou seja, um profissional experiente simplesmente observando a estrutura de concreto pode tirar conclusões sobre suas condições. A análise também pode ser realizada com aproveitamento de instrumentos auxiliares, como espelhos, lupas, binóculos, câmeras ou fibras óticas que transmitem as imagens para monitores.



Figura 08 – Imagens da viga V3

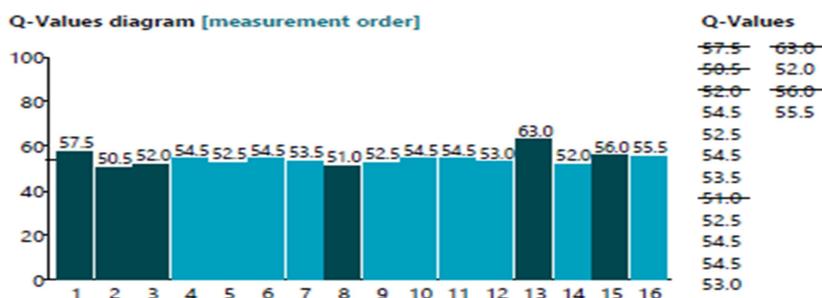
A viga (conforme a Figura 08) apresenta algumas micro fissuras e pequenas imperfeições inerentes ao processo de desforma da peça, não acarretando problemas para o presente diagnóstico.

3.3 Esclerometria

Foi realizado o ensaio de dureza superficial (esclerometria) para estimar a resistência do concreto da viga e compará-lo com a resistência prevista em projeto. O procedimento para utilização do esclerômetro e, conseqüentemente, realização do ensaio é apresentado na ABNT NBR 7584:2012. Os resultados obtidos estão na Tabela 02:

Tabela 02 – Ensaio de Esclerometria

ESCLEROMETRIA			
Valores (Q)		N	16
57,5	52,5	Outliers	6
50,5	54,5	Média (Q)	53,5
52	54,5	Média (Mpa)	30,5
54,5	53	s (Q)	1,2
52,5	63	s (Mpa)	1,3
54,5	52		
53,5	56		
51	55		



A resistência à compressão do concreto obtido no ensaio foi de 30,5 MPa. Esta resistência é menor que a resistência de projeto que é de 35 MPa. Porém, a esclerometria é um ensaio complementar para obtenção da resistência da estrutura. De acordo com Mehta e Monteiro (2008), os valores obtidos neste ensaio não são precisos já que dependem da uniformidade da superfície, das condições de umidade, da carbonatação superficial e da rigidez do elemento estrutural, mesmo se corrigindo a localização do êmbolo.

Em longo prazo, a maneira usual de se inspecionar e fazer diagnósticos do desempenho das estruturas de concreto está relacionado com ensaios de resistência à compressão em testemunhos extraídos da própria estrutura. Porém, esse procedimento nem sempre é recomendado devido à geometria dos elementos estruturais, que muitas vezes não

permitem extrair testemunhos com as dimensões padronizadas para os ensaios, bem como os próprios riscos e danos que o seccionamento de estruturas pode causar. A utilização de ensaios não destrutivos, ora restritos à avaliação da uniformidade da resistência mecânica do concreto, passa a ser então uma alternativa atraente, uma vez que os métodos se modernizaram, aumentando a precisão de análise pela combinação de métodos e detalhamento de outras características.

3.4 Modelagem Computacional

A Tabela 03 mostra os resultados de flecha imediata devido ao carregamento de água na viga V3 em seu quarto e em sua metade pelo MD (Ftool®) e pelo MEF (SAP2000®).

Tabela 03 – Deslocamentos previstos na viga pelo Ftool® e SAP2000®

DESLOCAMENTOS (mm)				
CARGA (kN/m)	1/3 DA VIGA		1/2 DA VIGA	
	FTOOL	SAP	FTOOL	SAP
5	0.92	0.94	1.06	1.08
6	1.10	1.13	1.27	1.29
DIFERENÇA	0.184	0.192	0.211	0.210

Os valores para o carregamento de 5 kN/m se referem ao peso próprio da viga e da laje já concretada, enquanto o acréscimo de 1 kN/m (carga complementar de projeto referente às alvenarias do pavimento que ainda não foram executadas) se refere ao peso da água na fôrma com largura de 20cm e altura de 50cm, aproximadamente correspondente ao que foi calculado para a alvenaria que será construída. O carregamento totaliza 6 kN/m, em observância ao projeto estrutural do edifício (memorial de cálculo). A diferença entre esses deslocamentos fornece o deslocamento imediato devido ao peso da água.

3.5 Resultados da Prova de Carga

Segundo a NBR 9607 (ABNT 2013), para efetivação de uma prova de carga é necessário o conhecimento das reais condições da obra em todos os seus aspectos, como projeto, materiais, controle de execução e estado de conservação e utilização.

De posse destes parâmetros e dos resultados computacionais, é possível compará-los aos obtidos em campo pela prova de carga estática, presentes na Tabela 04.

Tabela 04 – Deslocamentos obtidos na viga no carregamento

$h_{\text{água}}$	CARREGAMENTO		
	PONTO		
	1	2	3
0cm	14.14	18.95	5.79
10cm	14.18	18.99	5.82

20cm	14.2	19.02	5.85
30cm	14.24	19.07	5.88
40cm	14.27	19.11	5.93
50cm	14.32	19.17	5.98
δ (mm)	0.18	0.22	0.19

Os valores referentes às alturas de água são os observados no extensômetro, enquanto que δ se refere ao deslocamento total observado devido ao carregamento. Nota-se que esses resultados são bastante condizentes com os encontrados na Tabela 03. É possível observar essa proximidade na Figura 09, que relaciona todos os deslocamentos.

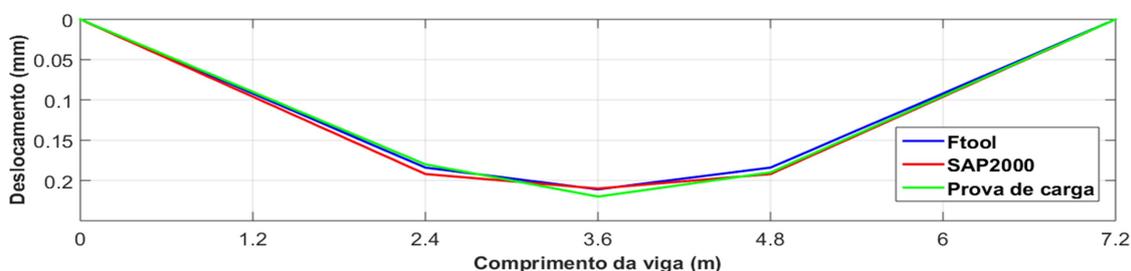


Figura 09 – Deslocamentos ao longo da viga pelos métodos computacionais e medidos in loco

Os resultados obtidos para o descarregamento estão presentes na Tabela 05. O gráfico na Figura 10 expressa esses resultados comparados aos resultados do carregamento.

Tabela 05 – Deslocamentos obtidos na viga no descarregamento

$h_{\text{água}}$	DESCARREGAMENTO		
	PONTO		
	1	2	3
50cm	14.32	19.17	5.98
40cm	14.29	19.13	5.95
30cm	14.27	19.1	5.92
20cm	14.24	19.07	5.89
10cm	14.21	19.04	5.86
0cm	14.19	19.01	5.84
δ (mm)	0.13	0.16	0.14

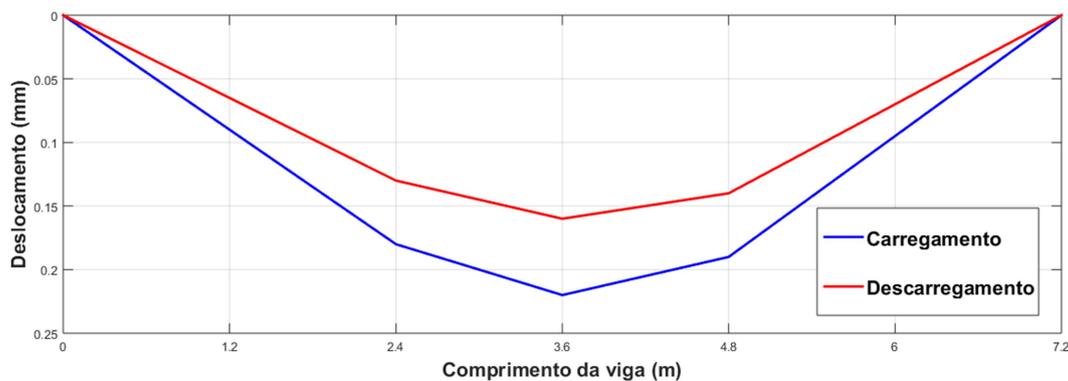


Figura 10 – Deslocamentos para carregamento e deslocamento medidos in loco

Nota-se que, decorrido o tempo para acomodação após o descarregamento, os deslocamentos analisados foram menores. Embora bem pequenos, persistem deslocamentos permanentes na peça que, mesmo após ser descarregada, não volta à medição original.

3.6 Resultados da Correlação Digital de Imagens (CDI)

As sequências de 12 fotos para cada fase do carregamento (05 fases de carregamento estático) foram processadas no software Autodesk Recap360®. Foram 05 modelos obtidos após processamento, conforme ilustra a Figura 11.



Figura 11 – Correlação Digital de Imagens (CDI)



A correlação de imagens, para este ensaio, não conseguiu detectar diferenças de deslocamentos nas 05 fases de carregamento da prova de carga. As deformações imediatas, que são medidas na prova de carga realizada, foram muito pequenas e foram detectadas apenas com a utilização dos três relógios comparadores utilizados.

Este método de correlação de imagens também é bastante exigente com relação à quantidade de imagens, posicionamento das câmeras e resolução de imagens. Neste estudo, seriam necessárias mais fotos e melhores resoluções de imagens, além de uma melhor padronização das distâncias de foco, para que após a sobreposição dos pontos da correlação, as diferenças sejam detectadas com maior precisão. O software no momento de carregar as imagens e processar já é capaz de detectar quantas fotos são necessárias para analisar a peça. Neste caso, o software sugeriu mais de 20 fotos para cada correlação. Mas isto só é analisado e detectado no momento do processamento das imagens.

A CDI também pode ser útil se quisermos simplesmente modelar estruturas e gerar maquetes eletrônicas, mas isto requer grande planejamento, treinamento e prática, além de equipamentos potentes para a captura de imagens.

4. Considerações finais

Pode-se concluir que a viga, sujeita aos carregamentos previstos em projeto e seu dimensionamento, está suportando bem às solicitações da estrutura. As deformações obtidas no ensaio estão condizentes com projeto e dentro da normalidade. Além disso, o ensaio obteve grande precisão na medida dos deslocamentos.

A partir do MD e do MEF é possível estimar o comportamento da linha elástica da viga e seus deslocamentos. Os resultados obtidos “in loco” são bastante parecidos com os estimados antes da medição. Devido à precisão do defletômetro, foi possível medir fielmente o deslocamento, ainda que bastante pequeno, da viga.

A correlação digital de imagens (CDI), neste ensaio, não foi capaz de detectar os deslocamentos obtidos com a prova de carga estática devido às posições de captura de imagem, resolução de imagens e quantidade de fotos. Além disso, a carga aplicada gerou deslocamentos muito pequenos, e isto já era esperado.

Para trabalhos futuros, sugere-se a utilização de outros tipos de defletômetro para utilização em provas de carga, e também a utilização de outros softwares de CDI para análise de estruturas.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7584: Concreto endurecido – avaliação da dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão – método de ensaio. Rio de Janeiro. 2012.



ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto - procedimento. Rio de Janeiro. 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9067: Concreto endurecido - prova de carga em estruturas de concreto armado e protendido. Rio de Janeiro. 2013.

BARRETO JUNIOR, Erly. Utilização do método de correlação digital de imagens na caracterização de materiais metálicos e poliméricos. 2008. 121 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, PGMEC, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2008.

DALLY, J. W.; RILEY, W. F. Experimental stress analysis. [S.l.]. 1965.

MEHTA, Kumar; MONTEIRO, Paulo J. M. Concreto: estrutura, propriedades e materiais. 3. ed. São Paulo: IBRACON, 2008.

MOERMAN, W. et al. Application of optical fiber sensors for monitoring civil engineering structures. Structural Concrete, n. 2, p. 63-71, Junho 2001.

MUDASSAR, Asloob Ahmad; BUTT, Saira. Improved Digital Image Correlation method. Optics And Lasers In Engineering, Islamabad, Paquistão, v. 87, p.156-167, 2016.

OLIVEIRA, Clayton Reis de. Prova de carga em estruturas de concreto. 2006. 142 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas - Sp, 2006.

PRACTICAL Strain-Gages Measurement - Ômega. [S.l.]: Agilent Technologies, 1999.

ROCHA, S. F. et al. A flexibilidade de monitorização das provas de carga utilizando-se água. 41 Congresso IBRACON. Salvador. 1999.

STARRET. Metrologia dimensional. Catálogo. São Paulo. 2004.

TAKEYA, T. Análise experimental de estruturas. Notas de aula - EESCUSP. São Paulo. 2003.

TIMOSHENKO, S. P.; GOODIER, J. N. Teoria da elasticidade. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1980.