

Potentialities of infrared thermography to assess damage in bonding between concrete and GFRP

Potencialidades da termografia infravermelha na avaliação de danos na aderência entre concreto e PRFV



M. M. CALDEIRA^a
marimartino@gmail.com

I. J. PADARATZ^b
padaratz@gmail.com

Abstract

This paper demonstrates the application of the active infrared thermography to detect damage in bonding between concrete and glass fiber reinforced polymer (GFRP). Specimens of concrete and mortar with GFRP externally bonded were prepared and at their interfaces were inserted polystyrene discs to simulate damages. The samples were divided into two groups. In group 1, one sample was correctly bonded by a GFRP plate to the concrete, but in the other three were inserted polystyrene discs which had different diameters to simulate damages in bonding. In group 2, all of the samples contained identical polystyrene discs at their interfaces, but the total thickness of each specimen was different, because the objective was to evaluate the ability of the camera to capture the simulated damage in depth. The experimental procedure was divided into two stages. In the first stage, four types of heating were used to heat samples of group 1: incandescent lamp, kiln, blended lamp and fan heater. Thus, it was possible to detect the damage and to observe its format and length. It was noticed that the infrared images are different depending on the heat source incident on the specimen. Therefore, group 2 was tested only for the more efficient heating (incandescent lamp). In the second stage, the infrared equipment was tested. Some of the parameters that must be inserted in the camera were varied in order to understand their influence on image formation. The results show the effectiveness of infrared thermography to assess adherence in GFRP/concrete interface. In the present work, the best results were obtained when the image is captured towards GFRP/concrete and using incandescent lamp. It was observed that the image and measured temperature suffer significant distortion when a false value was inserted for the parameter emissivity.

Keywords: infrared thermography, non destructive test, concrete, frp, debonding.

Resumo

Para demonstrar a potencialidade da aplicação da técnica da termografia infravermelha ativa para detecção de danos na aderência entre concreto e polímero reforçado com fibra de vidro (PRFV), são utilizados neste trabalho corpos de prova de concreto e argamassa colados externamente com PRFV, em cuja interface foram inseridos discos de EPS (poliestireno expandido) para simular danos. Os corpos de prova foram divididos em dois grupos. No grupo 1, em uma das amostras, a chapa de PRFV estava totalmente aderida ao concreto, nas outras três foram inseridos discos de EPS de diferentes diâmetros para simulação de regiões com falha de aderência. No grupo 2, todos os corpos de prova continham idênticos discos de EPS na interface, porém a espessura total de cada corpo de prova era diferente, pois o objetivo foi avaliar a capacidade da câmera em alcançar o dano simulado. O procedimento experimental dividiu-se em 2 etapas. Na primeira, foram utilizados 4 tipos de aquecimento para o grupo 1: lâmpada incandescente, estufa, lâmpada de mercúrio de alta pressão e termoventilador. Assim, foi possível detectar o dano e observar seu formato e extensão. Notou-se uma diferenciação das imagens devido à fonte de calor incidente no corpo de prova e por isso, o grupo 2 foi testado apenas para o aquecimento mais eficiente (lâmpada incandescente). Na segunda etapa, a câmera termográfica foi posta em evidência. Alguns dos parâmetros de ajuste que devem ser nela inseridos foram variados a fim de entender suas influências na formação da imagem e consequentemente na identificação do dano. Os resultados revelam a eficiência da termografia infravermelha para avaliar a aderência na interface concreto/PRFV. Neste trabalho, os melhores resultados foram obtidos quando a imagem foi captada para uma amostra aquecida no sentido PRFV/Concreto por lâmpada incandescente e para quando são inseridos na câmera infravermelha os parâmetros corretos, especialmente a emissividade térmica.

Palavras-chave: termografia infravermelha, ensaios não destrutivos, concreto, polímero reforçado com fibras, danos na aderência.

^a Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil (PPGEC), Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis-SC, Brasil;

^b Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), padaratz@gmail.com, Florianópolis-SC, Brasil.

1. Introdução

A combinação de Polímero Reforçado com Fibras (PRF) e concreto, incluindo o Polímero Reforçado de Fibra de Vidro (PRFV), tem ganhado bastante destaque na Engenharia Civil por aliar leveza e resistência [1]. A aplicação dessa composição tem sido muito utilizada principalmente na execução de reforços estruturais [2].

Um dos principais fatores que influencia a resistência total desse arranjo é a aderência adequada na interface entre esses dois materiais, pois a solidarização correta entre PRF e concreto permite que funcionem como uma unidade [3]. Por isso, é preciso garantir a qualidade da aderência nessa interface e caso se identifique uma falha deve-se localizá-la bem como caracterizá-la [4].

A falha na aderência pode aparecer após a colagem do polímero ao concreto. Logo, torna-se necessário adotar uma técnica de inspeção que permita identificá-la através do PRF. Uma solução possível, prática e rápida é a utilização do ensaio não destrutivo da termografia infravermelha [5] [6].

Portanto, o principal objetivo do presente artigo consiste na avaliação de defeitos na interface entre PRF e concreto utilizando a termografia infravermelha ativa. Para isto, será feita uma análise qualitativa comparando diferentes excitações térmicas, diferentes profundidades de localização do defeito e por fim pretende-se ainda avaliar o comportamento das imagens térmicas quando a inserção dos parâmetros da câmera não é correta.

Em relação a este tema, ainda há escassez de pesquisas, sendo assim, este artigo pretende contribuir com novos resultados experimentais e compará-los com trabalhos precedentes.

2. Termografia infravermelha e detecção de danos na aderência entre PRF e concreto por excitação térmica

Já existem estudos que indicam a termografia infravermelha como uma técnica eficiente para avaliação de danos na interface PRF/concreto. Um deles [7] faz uma simulação de descolamentos preenchidos por ar e por água, em vários tamanhos, na camada entre o polímero e o concreto. Estes corpos de prova foram aquecidos por dois aquecedores convectivos (em torre) durante 70 segundos. Alguns minutos após o aquecimento, as imagens foram captadas. Os resultados mostram os danos artificiais bastante evidentes nas áreas com temperaturas mais altas indicadas nas imagens ("hot-spots") comprovando a eficácia do método.

Em outro artigo [8], na interface PRF/concreto foram inseridos diferentes tipos de danos artificiais tais como: madeira, aço, teflon e cortiça. Os testes foram realizados para dois tipos de excitação térmica. Para o primeiro tipo utilizaram-se dois *flashes* do tipo fotográfico em pulsos de 10 milissegundos para frequência de 22 Hz e para o segundo utilizaram-se duas lâmpadas halógenas que aqueceram a área durante 10, 30 e 60 segundos. Comparando os tipos de aquecimento, nota-se que o contraste térmico nas imagens para quando ocorre a excitação térmica por pulsos é fraco. Segundo os autores, isso poderia ser melhorado se a superfície do corpo de prova fosse tratada de forma a obter-se uma maior homogeneidade em sua emissividade térmica. Por outro lado, o aquecimento por área com lâmpadas halógenas produziu um contraste mais forte, já que mais energia térmica foi fornecida à superfície da amostra do que na excitação anterior.

Pode-se citar ainda outro estudo [9], no qual também foram avaliados diferentes tipos de excitação térmica para aplicação da termografia infravermelha. Neste caso, amostras individuais de material compósito foram submetidas à termografia infravermelha para detecção de danos internos quando submetidas a impacto. Concluiu-se que o aquecimento convectivo mostrou resultados mais eficazes do que aquele que empregou lâmpadas incandescentes. A exemplo dos artigos citados anteriormente, percebe-se a importância da escolha do tipo de aquecimento em inspeções por termografia infravermelha ativa utilizada em Polímeros Reforçados com Fibras e por isso é um dos assuntos que será tratado neste trabalho.

3. Formação da imagem térmica e influência dos parâmetros de inserção na câmera infravermelha

A influência dos parâmetros que devem ser inseridos na câmera infravermelha é outro fator muito importante e que também interfere na formação da imagem, uma vez que são estes dados que possibilitam o cálculo de temperatura e ajuste da imagem térmica obtida [10]. Portanto, é necessário entender melhor como funciona este equipamento para melhor estudar os parâmetros de sua calibração.

A câmera infravermelha restringe-se à utilização da banda espectral de infravermelhos e fundamenta-se na detecção e captação da radiação infravermelha emitida pelos corpos, o que forma, conseqüentemente, a "imagem térmica". Nota-se que a câmera capta apenas energia radiante recebida da superfície do objeto e não sua luz visível refletida, o que significa que as imagens térmicas podem ser obtidas mesmo em total escuridão. A câmera ao ser apontada a um objeto recebe radiações emitidas pela superfície do próprio objeto bem como do meio adjacente. Ambas as radiações são, em parte, atenuadas pela atmosfera na trajetória de medição. A estas, se junta uma terceira contribuição de radiações emitidas pela própria atmosfera, como está ilustrado pela Figura 1.

A Figura 1 ilustra a potência total de radiação que a câmera recebe (W_{tot}).

Sendo:

$$W_{tot} = \varepsilon \tau W_{obj} + (1 - \varepsilon) \tau W_{refl} + (1 - \tau) W_{atm} \quad (1)$$

W_{tot} : potência total [W]

W_{obj} : potência da radiação emitida pelo objeto [W]

W_{refl} : potência da radiação emitida pelo meio adjacente [W]

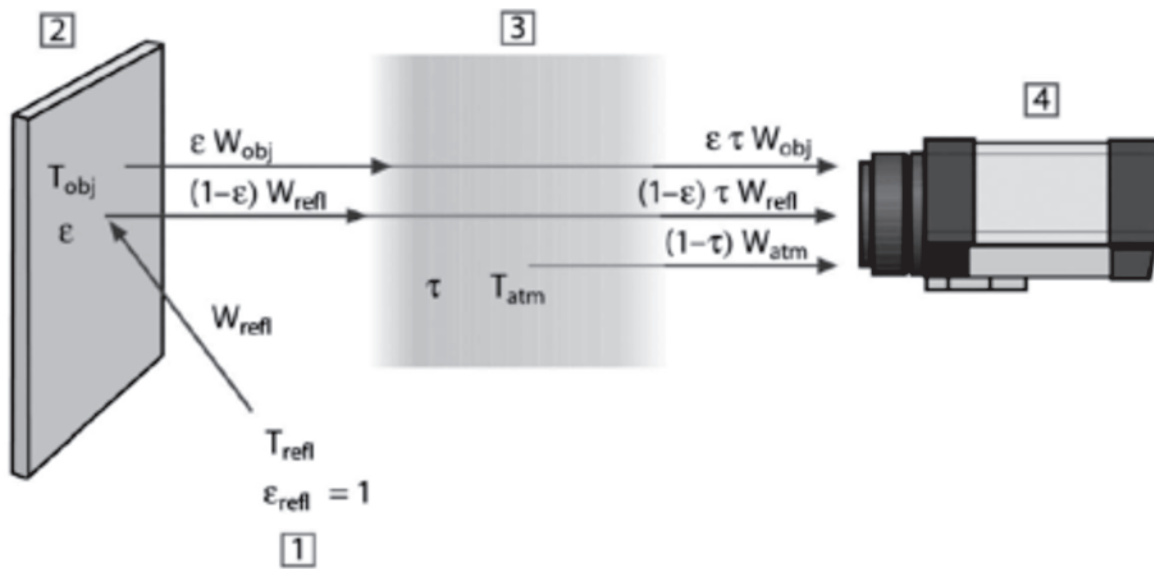
W_{atm} : potência da radiação emitida pela atmosfera [W]

ε : emitância do objeto [sem unidade]

τ : transmitância da atmosfera [sem unidade]

Percebe-se, portanto, que para compreender melhor as inspeções feitas por termografia infravermelha para avaliação de danos na interface PRF/concreto, é necessária uma análise da inserção de alguns parâmetros na câmera tais como: emissividade térmica, distância da lente ao objeto, temperatura e umidade do ambiente. Em relação a este assunto, os estudos científicos estão mais

Figura 1 - Representação esquemática da situação da medição termográfica geral.
 1) meio adjacente, 2) objeto, 3) atmosfera, 4) câmera. T_{obj} : temperatura do objeto, T_{refl} : temperatura refletida, T_{atm} : temperatura da atmosfera. W_{obj} : potência da radiação emitida pelo objeto, W_{refl} : potência da radiação emitida pelo meio adjacente, W_{atm} : potência da radiação emitida pela atmosfera (17)



voltados para avaliação da emissividade térmica. Em um desses estudos [11], houve a preocupação em se pesquisar qual a me-

lhor técnica de medição da emissividade térmica, uma vez que os valores tabelados muitas vezes não são válidos para inserção em câmera infravermelha e ainda sobre como a precisão da medição da emissividade térmica afeta a precisão da medição de temperatura. Outro autor [12] observou que a emissividade térmica é uma das principais causas da diferença entre resultados teóricos e experimentais, quando tratou da detecção de defeitos em materiais cerâmicos utilizando a termografia infravermelha.

Os artigos científicos anteriormente citados demonstram a relevância do estudo dos parâmetros que devem ser inseridos na câmera infravermelha. Entretanto, cabe ressaltar que, apesar de extensas pesquisas bibliográficas, não foram encontrados estudos paramétricos tal como propõe o presente trabalho. Portanto, este artigo apresenta-se também como uma contribuição inédita para o estudo dos parâmetros a serem inseridos na câmera infravermelha, auxiliando na extensão e aprofundamento desse assunto.

4. Materiais e programa experimental

4.1 Características das amostras

Para a realização do experimento, as amostras foram divididas em dois diferentes grupos: grupo 1 e grupo 2.

O grupo 1 é formado por 4 corpos de prova, todos de dimensões iguais: 26,0 x 13,0 cm e 9,0 cm de espessura. Foram moldados em concreto e na metade de uma das faces foi colada, no momento da concretagem, uma chapa de PRFV de dimensões 15,0 x 13,0 cm e 0,635 cm de espessura. Um dos corpos de prova teve a chapa de PRFV totalmente aderida ao concreto e

Figura 2 - Corpos de prova do grupo 1 (medidas em cm)

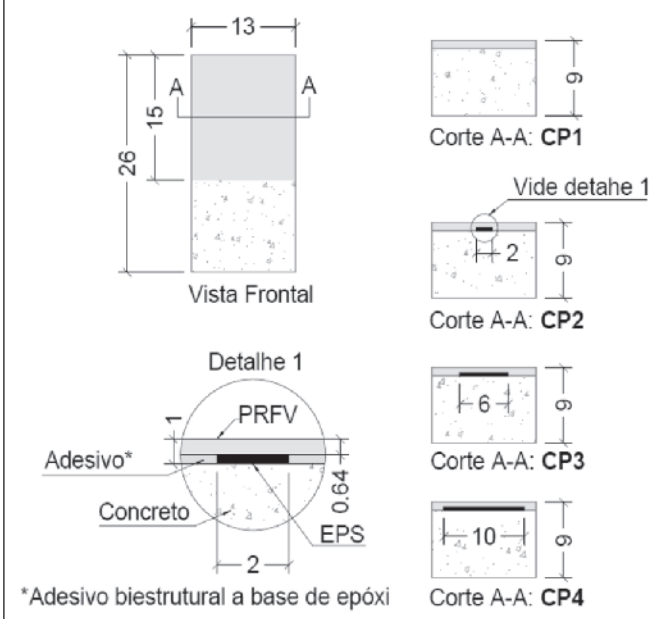
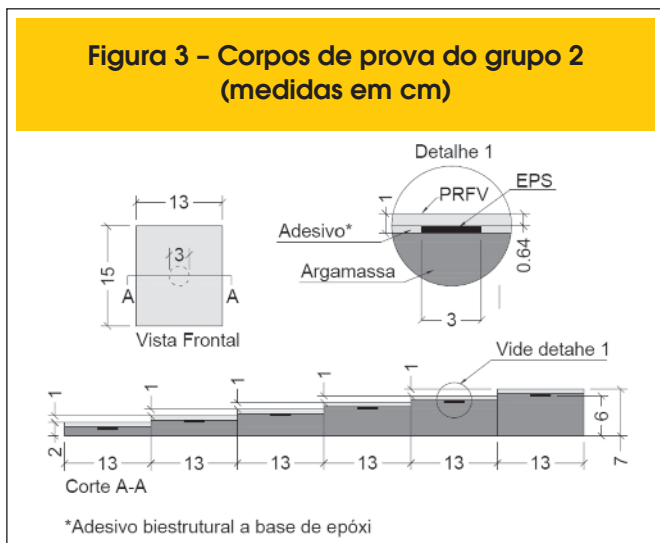


Figura 3 – Corpos de prova do grupo 2 (medidas em cm)



nos outros 3 foram inseridos discos de EPS de diferentes diâmetros na interface PRFV/concreto, de 2, 6 e 10 cm, conforme Figura 2.

O grupo 2 é formado por 6 corpos de prova de argamassa com dimensões em planta de 15,0 x 13,0 cm, porém com diferentes espessuras: 7, 6, 5, 4, 3 e 2 cm. Em cada um deles foi colada uma chapa de PRFV de 15 x 13 cm e 0,635 cm de espessura em cuja interface foi inserido um disco fino de EPS de 3 cm de diâmetro como mostra a Figura 3.

Para obter a aderência do PRFV às amostras, em ambos os grupos, foi empregado um adesivo estrutural bicomponente à base de resina epóxi. Todas as amostras apresentavam, na ocasião dos ensaios, idade superior a 180 dias, idade em que o calor de hidratação não influencia em suas temperaturas [13].

Tabela 1 – Valores reais medidos dos parâmetros estudados

Parâmetros	Valores medidos
Temperatura	17°C
Umidade	64%
Emissividade térmica	0,96
Distâncias lente-objeto	1m
	5m

Tabela 2 – Valor real e variações da temperatura ambiente

Temperatura ambiente (°C)					
Variações					
0%	30%	60%	100%	150%	200%
17	22,1	27,2	34,0	42,5	51,0

Tabela 3 – Valor real e variações da emissividade térmica

Emissividade térmica			
Variações			
0%	-30%	-60%	-90%
0,96	0,7	0,4	0,1

4.2 Aquecimento das amostras

As amostras foram submetidas a aquecimento prévio antes de serem captadas as imagens infravermelhas e os tipos de aquecimento utilizados foram: estufa, lâmpada incandescente de 200 Watts, lâmpada de mercúrio de alta pressão de 250 Watts e termoventilador (1500 Watts).

Na estufa os corpos de prova permaneceram durante 24 horas a 32°C. No caso de aquecimento por lâmpada, para os dois tipos de lâmpadas (incandescente e mercúrio de alta pressão), o aquecimento ocorreu durante 5 minutos com o posicionamento perpendicular da lâmpada em relação à face frontal do corpo de prova no ponto onde havia o dano, distanciados de 12 cm a partir da ponta da lâmpada. O termoventilador foi posicionado 14 cm distante da face frontal do corpo de prova que foi aquecido durante 6 minutos. Salienta-se que o termoventilador não ficou perpendicularmente centralizado ao ponto do dano simulado, pois se percebeu que a concentração de calor não ocorre na parte central do aparelho. Para cada novo aquecimento, aguardou-se um período de 24 horas para os corpos de prova atingirem sua condição de equilíbrio térmico com o ambiente e assim serem novamente submetidos ao aquecimento de outra fonte de calor.

As amostras dos dois grupos possuem uma das faces frontais colada com uma chapa de PRFV, porém, enquanto os corpos de prova do grupo 1 tiveram a superfície do PRFV aquecida, os corpos de prova do grupo 2 foram aquecidos na face oposta de argamassa. As imagens foram captadas 1 minuto após a retirada da fonte de calor em todos os casos.

Após os testes com os diferentes tipos de aquecimento para o grupo 1, observou-se que a lâmpada incandescente de 200 Watts apresentou maior eficácia, sendo então adotada para testar as amostras do grupo 2.

As imagens dos ensaios foram obtidas com a utilização da câmera infravermelha da marca FLIR da série específica para inspeções em edificações (Infrared Camera for Building), tipo B400, disponível no Grupo de Pesquisa em Ensaios não Destrutivos (GPEND) da Universidade Federal de Santa Catarina.

4.3 Estudos dos parâmetros da câmera infravermelha

Para testar a influência de parâmetros que devem ser inseridos na câmera, adotou-se apenas o grupo 1 com aquecimento por lâmpada incandescente. Neste caso, a temperatura ambiente e a umidade relativa foram ajustadas de acordo com a previsão meteorológica da cidade de Florianópolis-SC, Brasil, no dia e na hora do início do ensaio, conforme mostra a Tabela 1.

Tabela 4 – Valor real e variações de umidade relativa

Umidade relativa (%)				
Variações				
0%	+30%	-30%	-60%	-90%
64	83	45	26	6

Para efetuar a medição da emissividade térmica, foi adotado um dos procedimentos sugeridos pelo manual do fabricante da câmera.

Como a emissividade térmica dos materiais deste experimento é relativamente alta e o ambiente não está submetido a fontes de radiação intensa, o parâmetro de “Temperatura aparente refletida” não exerce influências no resultado final e por isso não necessita de ajustes. Sendo assim, inseriu-se um valor de referência 20°C.

A Tabela 1 expõe ainda os valores medidos dos parâmetros estudados nesta pesquisa, ou seja, os valores existentes de temperatura ambiente, umidade do ar, distância lente-objeto e emissividade. Os valores medidos serão denominados “valores reais” ou “parâmetros reais”.

O próximo passo foi a definição da variação dos parâmetros que serão inseridos na câmera para que assim pudesse ser observada qual será a diferença entre imagens e/ou temperaturas produzidas com a inserção de parâmetros reais e parâmetros falsos.

As Tabelas de 2 a 5 mostram como os parâmetros foram variados e quais valores foram inseridos na câmera, em cada caso. Observa-se que a distância da lente ao objeto é o único parâmetro que permite uma variação do considerado real e, por isso, foi tomada para duas situações reais diferentes: 1m e 5m.

Enquanto um parâmetro era variado, os outros permaneciam

Tabela 5 – Valores reais e variações da distância da lente ao objeto

Distância lente-objeto (m)				
Real	Variações			
0%	+30%	-30%	-60%	-90%
1	2	5	10	15
5	1	2	10	15

ajustados para as medidas reais. No caso da distância da lente ao objeto, foi tomada como padrão a distância de 1 metro.

As imagens infravermelhas foram captadas para cada um dos quatro corpos de prova do grupo 1, para cada situação, após serem aquecidos na superfície de PRFV por lâmpada de 200 Watts, distante 12 cm da peça, durante 5 minutos. Utilizou-se a função da câmera que permite marcar a temperatura de um ponto no corpo de prova. O ponto escolhido para leitura de temperatura foi onde se simulou a falta de aderência entre concreto e PRFV. Variando-se um parâmetro, espera-se que haja um comportamento diferente na imagem infravermelha, porém é preciso uma análise cuidadosa. Sabe-se que, para qualquer objeto, logo após cessar o aquecimento, há uma tendência natural de queda de temperatura no corpo de prova, pois se inicia um equilíbrio térmico com o ambiente. Sendo assim, deve-se ter o cuidado de não atribuir a diminuição natural de temperatura do corpo de prova, registrada pela câmera infravermelha, à inserção de parâmetros falsos. Por isso, realizou-se a captura das imagens com a seguinte sequência: primeiramente, registrou-se a imagem com os parâmetros reais, em seguida as imagens eram captadas para os parâmetros falsos e, por último, captava-se novamente a imagem com parâmetros reais.

Apesar do curto período de tempo entre a primeira e a última

Figura 4 – CP1, grupo 1, aderência completa, aquecido por lâmpada incandescente

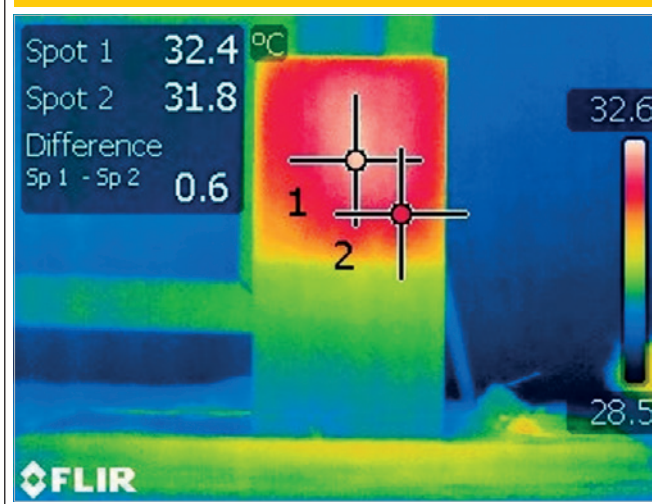


Figura 5 – CP2, grupo 1, EPS D=2 cm, aquecido por lâmpada incandescente

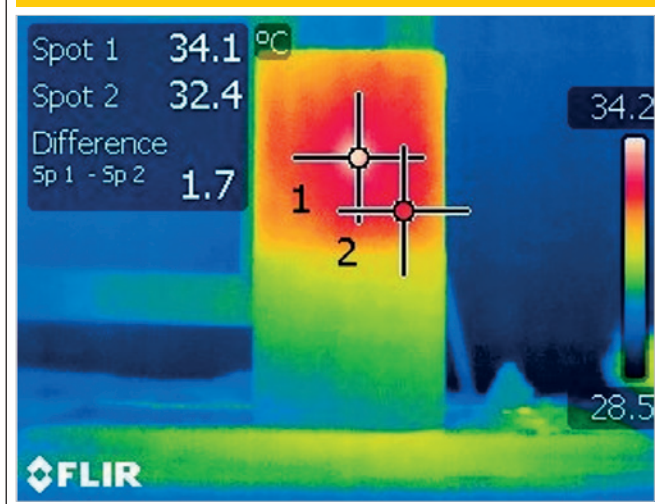


Figura 6 – CP3, grupo 1, EPS D=6 cm, aquecido por lâmpada incandescente

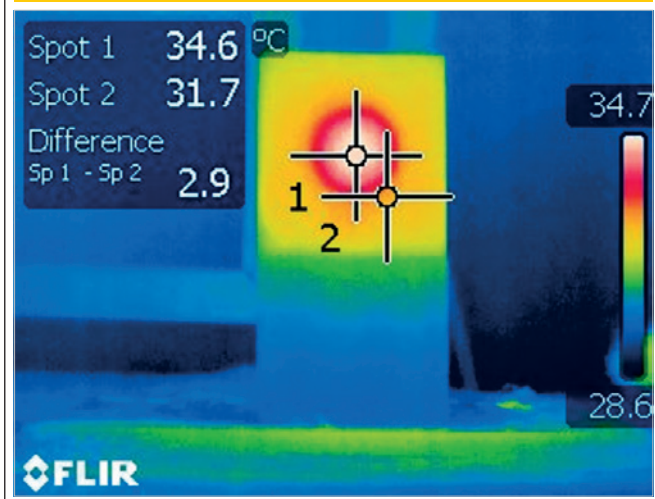
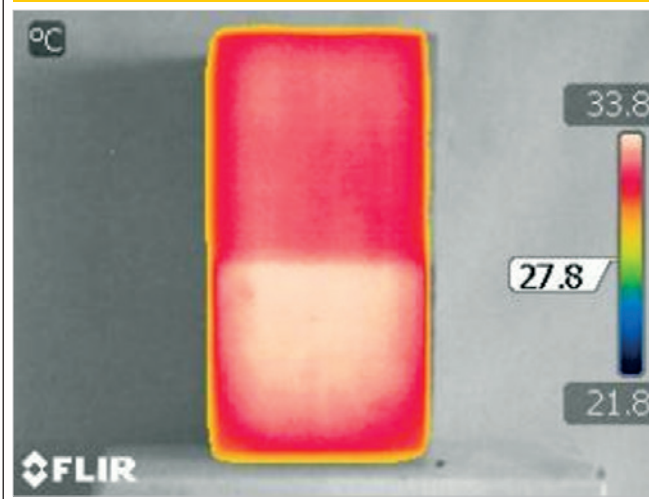


Figura 8 – CP1, grupo1, aderência completa, estufa, em fusão, temperaturas mais altas



medição (menos de um minuto) há uma rápida perda de calor do corpo de prova para o ambiente devido a suas propriedades térmicas. Logo, registrar a imagem infravermelha em uma mesma configuração no início e no final visa observar qual a queda de temperatura durante o período de ajuste dos parâmetros e, assim, pode-se perceber se a variação da temperatura está ou não relacionada à alteração destes.

Diversos estudos científicos já comprovam a eficácia da termografia infravermelha na detecção de danos na interface PRF e concreto [14] [15] [16]. Entretanto, esta pesquisa se aprofunda neste tema fornecendo resultados de uma avaliação para diferentes tipos de aquecimento e ainda avaliando o comportamento da imagem infravermelha em diferentes situações, como será mostrado a seguir.

5. Resultados e discussões

5.1 Amostras do grupo 1

As imagens infravermelhas captadas para o grupo 1, empregando aquecimento com lâmpada incandescente (Figuras de 4 a 7), mostram com clareza a localização e o formato do dano. Um ponto importante a ser destacado é que a diferença de temperatura entre o local do dano e outro mais distante, aumenta quanto maior for sua extensão.

Utilizando o aquecimento em estufa, observou-se certa dificuldade de observação dos danos com a função comum infravermelha da câmera. Então, foi necessário utilizar duas de suas funções

Figura 7 – CP4, grupo 1, EPS D=10 cm, aquecido por lâmpada incandescente

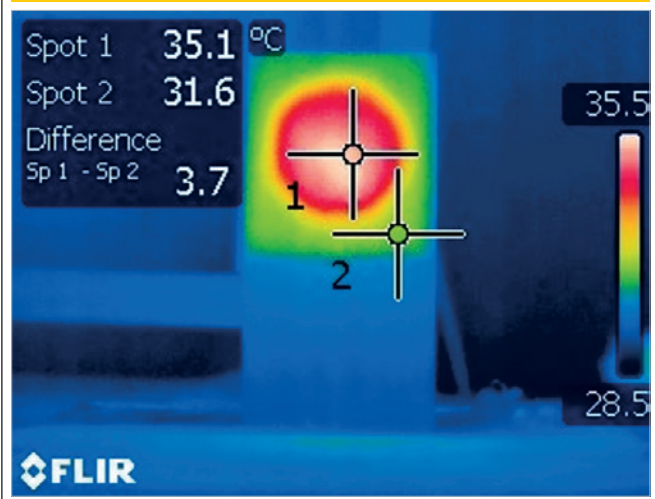


Figura 9 – CP1, grupo1, aderência completa, estufa, em fusão, temperaturas mais baixas

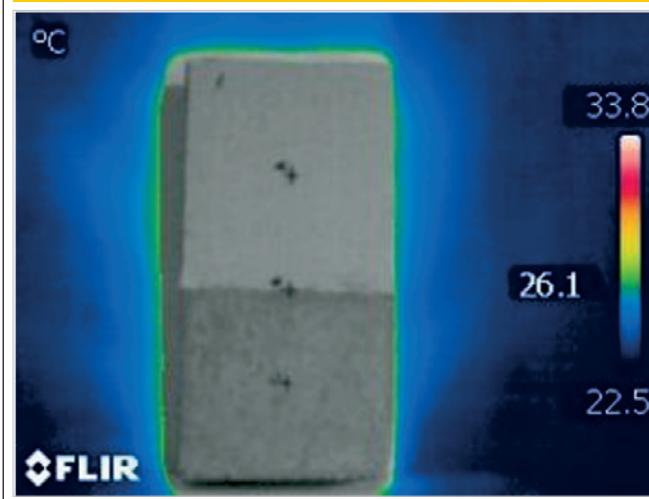


Figura 10 - CP2, grupo1, EPS D = 2 cm, estufa, em fusão para temperaturas mais altas

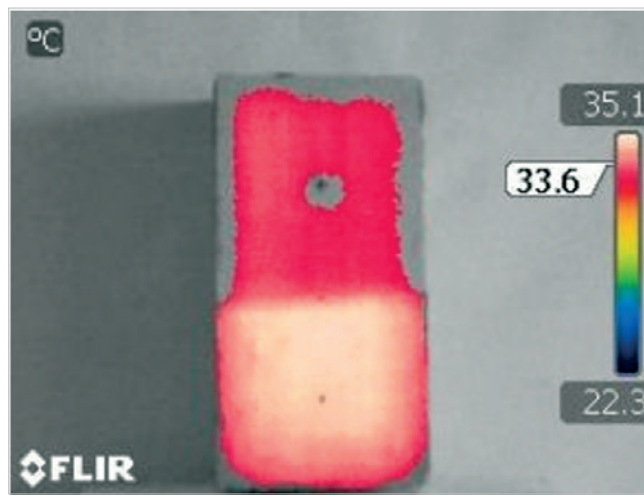


Figura 13 - CP3 grupo1, EPS D = 6 cm, estufa em fusão, temperaturas mais baixas

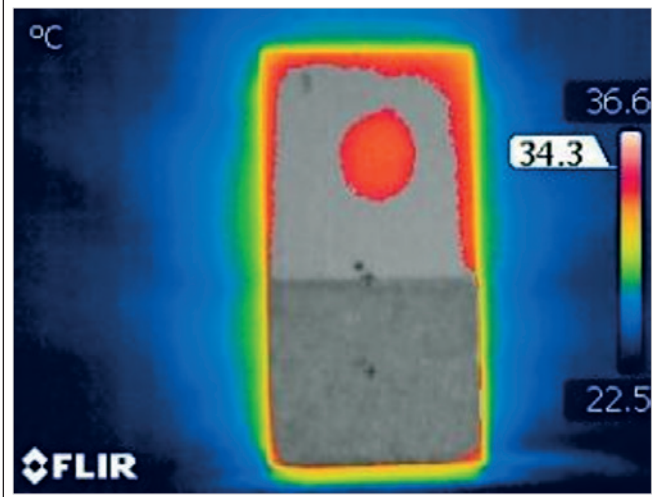


Figura 11 - CP2, grupo1, EPS D = 2 cm, estufa, em fusão para temperaturas baixas

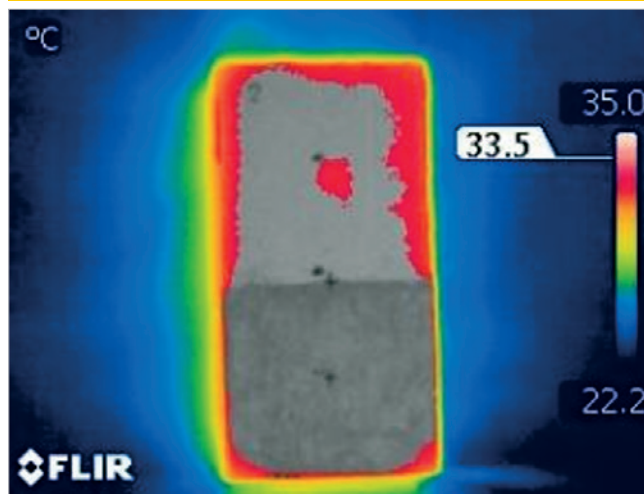


Figura 14 - CP4, grupo1, EPS D = 10 cm, estufa, em fusão, temperaturas mais altas

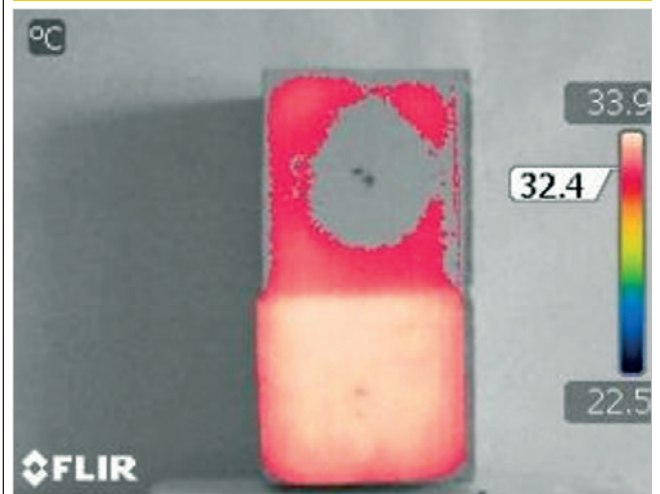


Figura 12 - CP3, grupo1, EPS D = 6 cm, estufa, em fusão, temperaturas mais altas

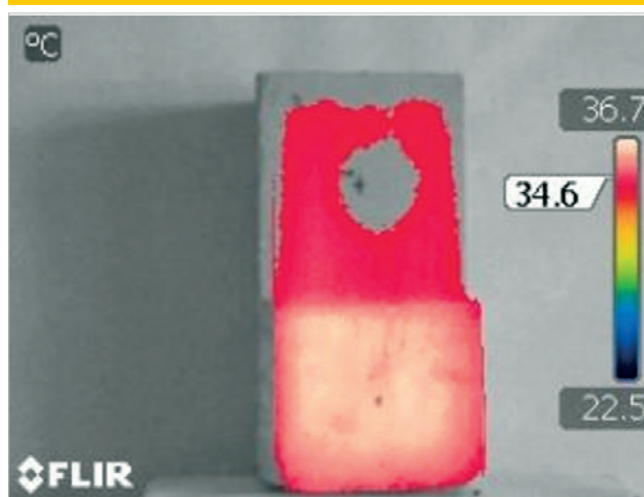


Figura 15 - CP4, grupo1, EPS D = 10 cm, estufa, em fusão, temperaturas mais baixas

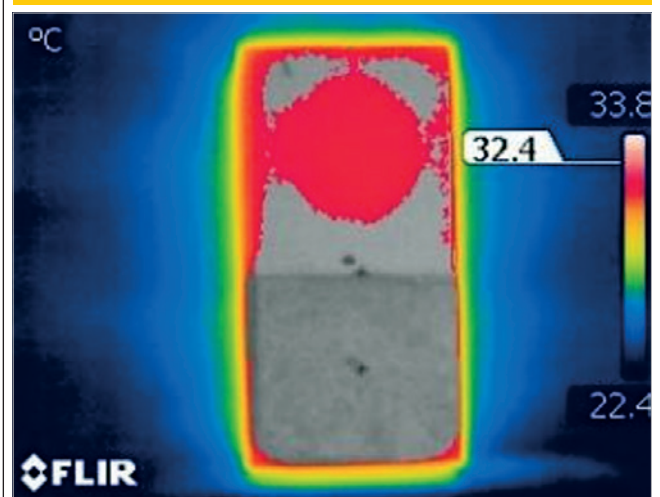


Figura 16 - CP1, grupo 1, aderência completa, aquecido por termoventilador

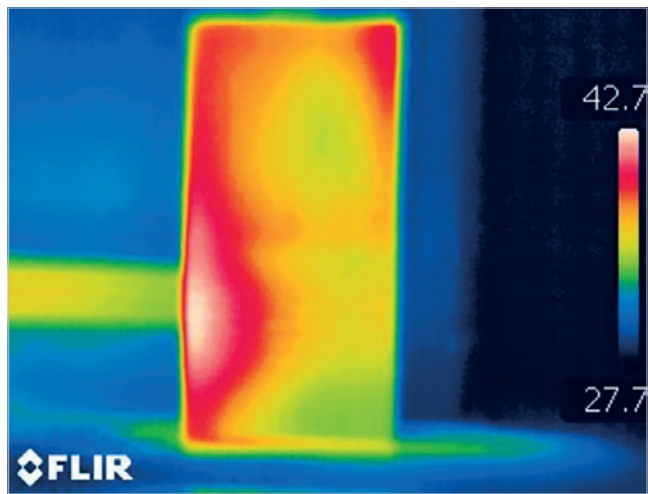


Figura 19 - CP4, grupo 1, EPS D = 10 cm, aquecido por termoventilador

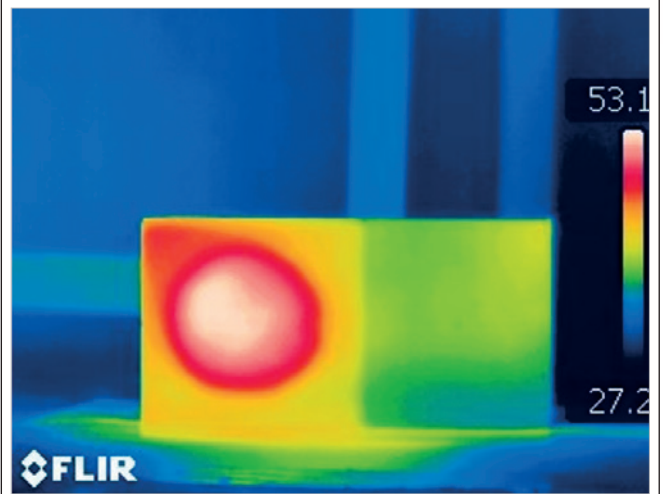


Figura 17 - CP2, grupo 1, EPS D = 2 cm, aquecido por termoventilador

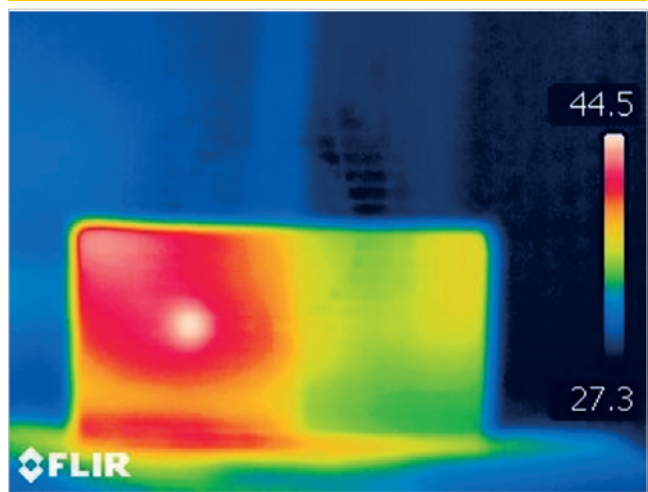


Figura 20 - CP1, grupo 1, aderência completa, aquecido por lâmpada mista



Figura 18 - CP3, grupo 1, EPS D = 6 cm, aquecido por termoventilador

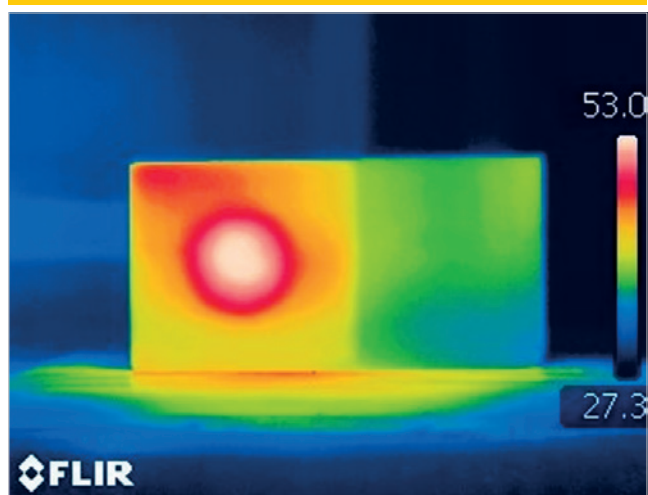


Figura 21 - CP2, grupo 1, EPS D = 2 cm, aquecido por lâmpada mista

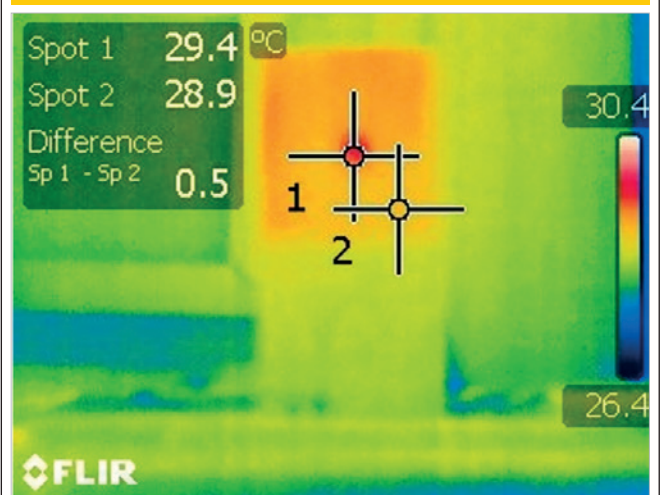


Figura 22 - CP3, grupo 1, EPS D = 6 cm, aquecido por lâmpada mista

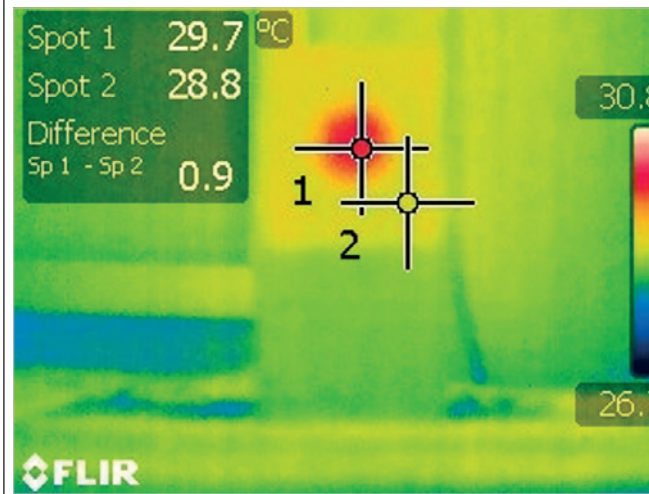


Figura 25 - CP2, grupo 2, altura 3 cm

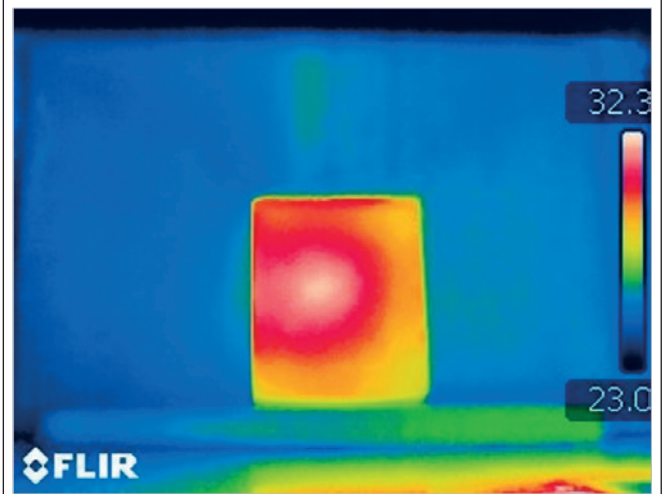


Figura 23 - CP4, grupo 1, EPS D = 10 cm, aquecido por lâmpada mista

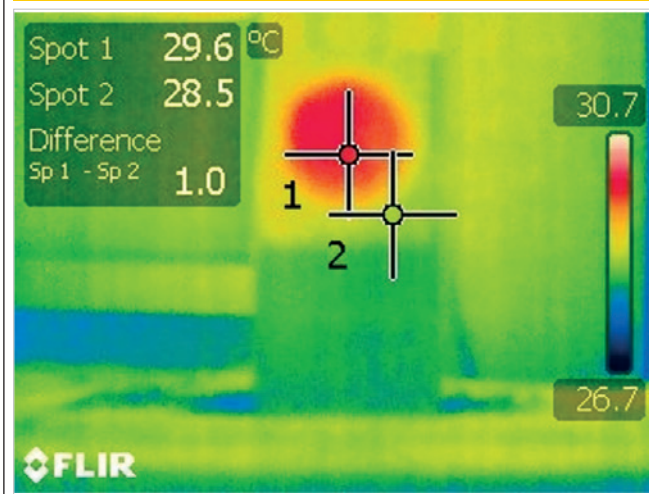


Figura 26 - CP3, grupo 2, altura 4 cm

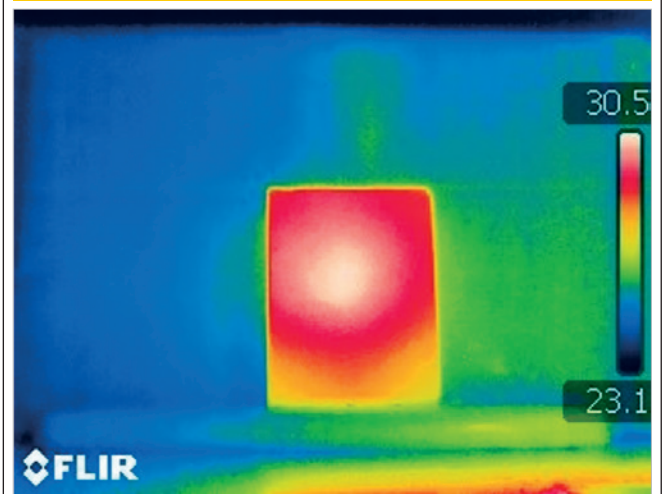


Figura 24 - CP1, grupo 2, altura 2 cm

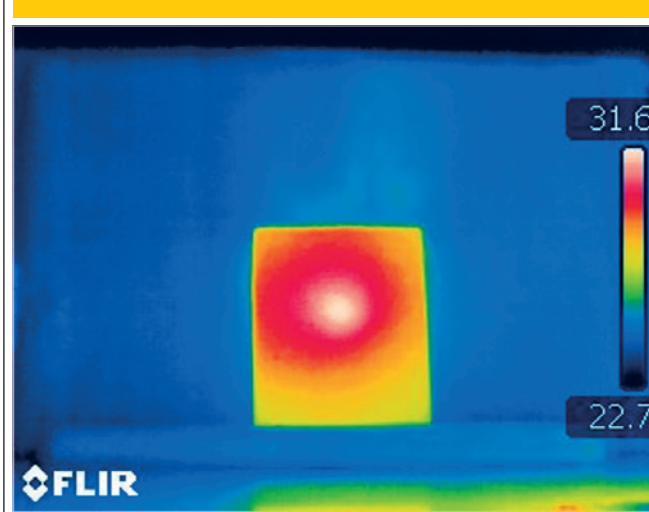
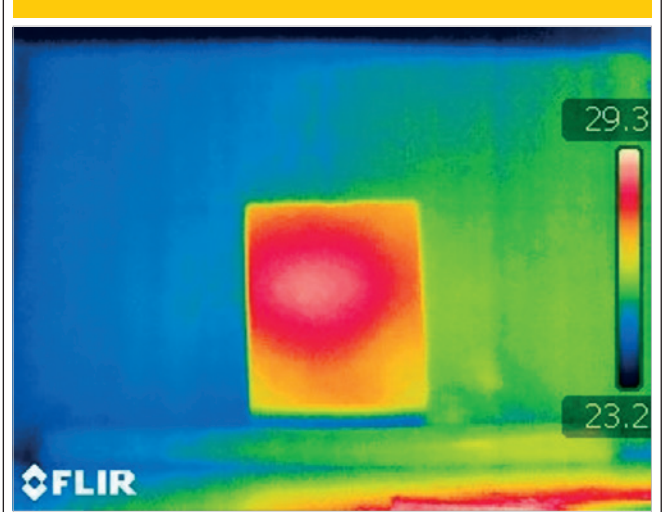


Figura 27 - CP4, grupo 2, altura 5 cm



especiais, chamadas “above” e “below”. No momento da retirada dos corpos de prova da estufa, foram captadas duas imagens para o mesmo corpo de prova: a primeira mostra em imagem infravermelha apenas as temperaturas mais altas (“above”) em relação àquela marcada no balão à direita da imagem, já a segunda imagem captada apresenta as temperaturas mais baixas (“below”), conforme mostram as Figuras de 8 a 15.

Nota-se que é possível visualizar o dano, porém o contorno não é tão nítido quanto ao observado nas imagens em que os corpos de prova foram aquecidos por lâmpada incandescente.

A próxima situação avaliada foi o aquecimento das amostras do grupo 1 com termoventilador (Figuras de 16 a 19).

Este equipamento mostrou grande potencial em aquecer as amostras, o que faz com que o dano possa ser visualizado com clareza. Contudo, o aquecimento se deu de forma desigual, o que pode induzir a erros na interpretação da imagem. Por exemplo, poder-se-ia inferir que há um dano na parte inferior esquerda do CP1 (Figura 16). Nas demais imagens o canto superior esquerdo também mostra pontos de maior aquecimento, o que, talvez, poderia ser considerado como um dano menor, porém sabe-se que isso não representa a realidade. Entretanto, pode-se afirmar que quanto

maior o dano, posicionando-se essa fonte da maneira correta na área analisada, melhor o resultado, já que nas Figuras 18 e 19 o contorno do disco de EPS aparece melhor delineado e o acúmulo de aquecimento do lado esquerdo superior é menos visível.

Finalmente, os testes para o aquecimento com lâmpada mista de mercúrio de alta pressão, são apresentados nas Figuras de 20 a 23.

Neste caso, a diferença de temperatura entre o ponto onde há o dano e o ponto externo a ele é pequena, mas aumenta conforme aumenta o dano na amostra. Além disso, como sua emissão de calor não é muito alta, a imagem do dano perde um pouco de nitidez se comparada às imagens obtidas para as outras fontes de calor estudadas.

Dentre os quatro tipos de aquecimento utilizados nas amostras do grupo 1, percebeu-se uma melhor resolução na observação dos danos nas imagens captadas mediante aquecimento realizado com lâmpada incandescente. Pelos resultados obtidos, adotou-se então para o grupo 2 apenas este tipo de aquecimento, já que o objetivo na etapa seguinte era descobrir qual a maior profundidade que a câmera infravermelha poderia alcançar para detectar determinado dano.

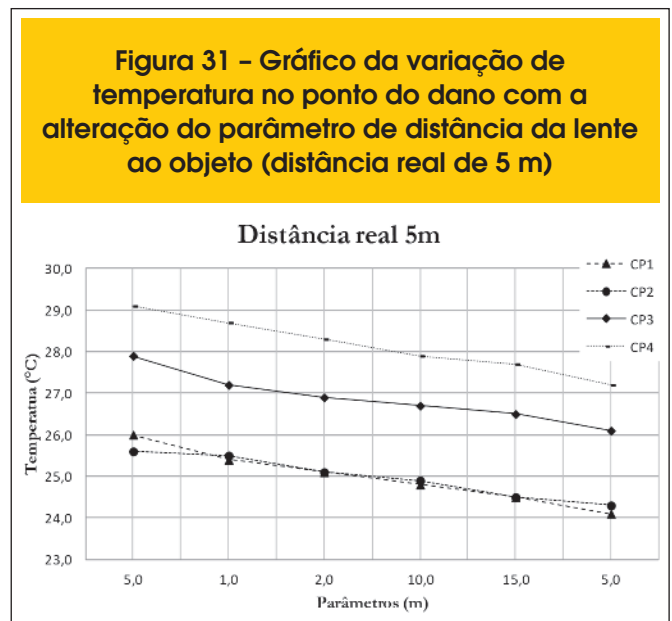
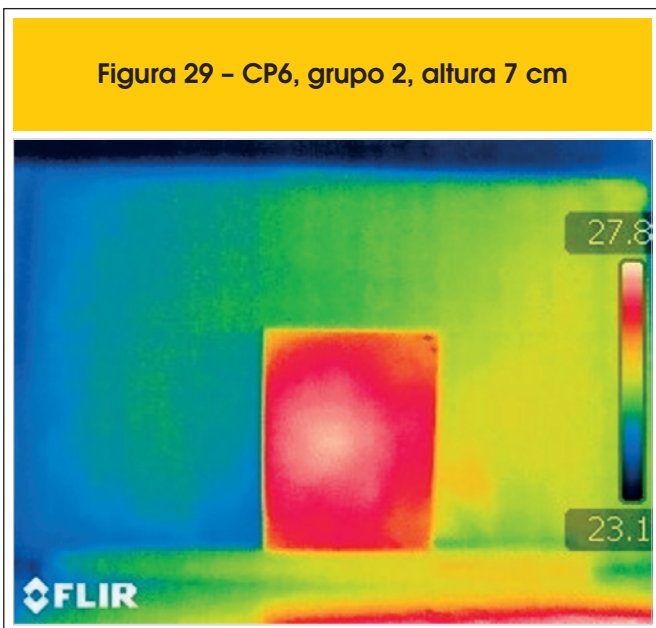
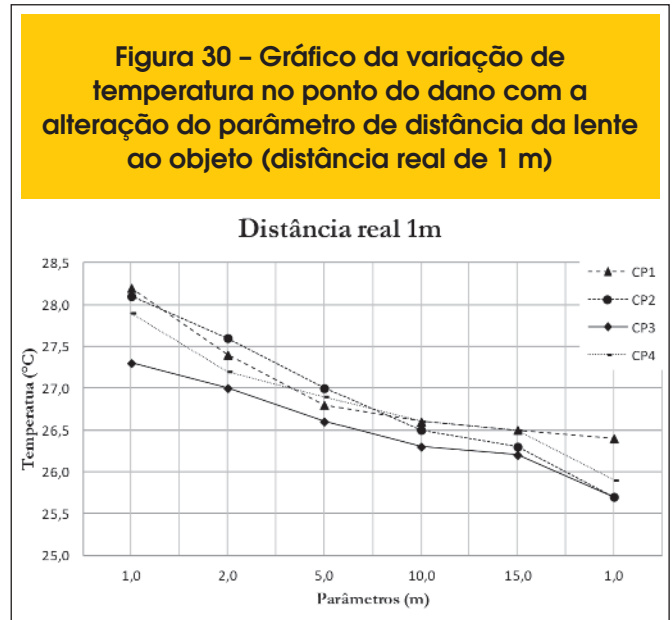
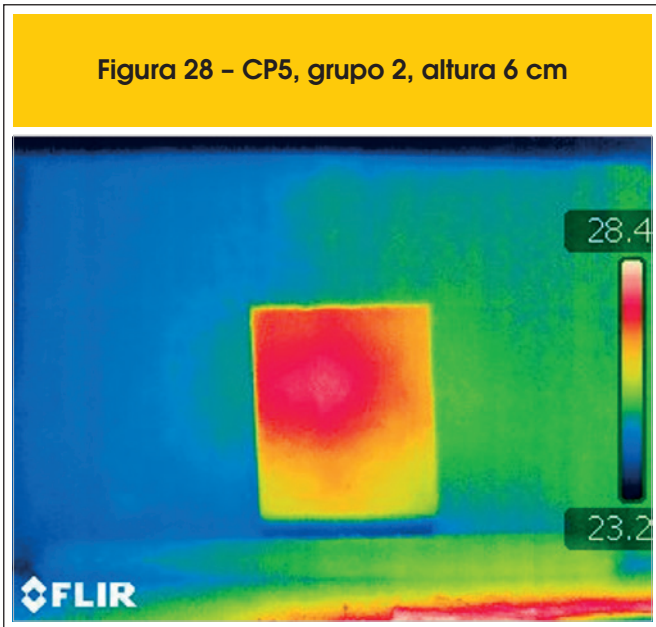


Figura 32 – Gráfico da variação de temperatura no ponto do dano com a alteração do parâmetro de umidade relativa (umidade relativa real de 64%)

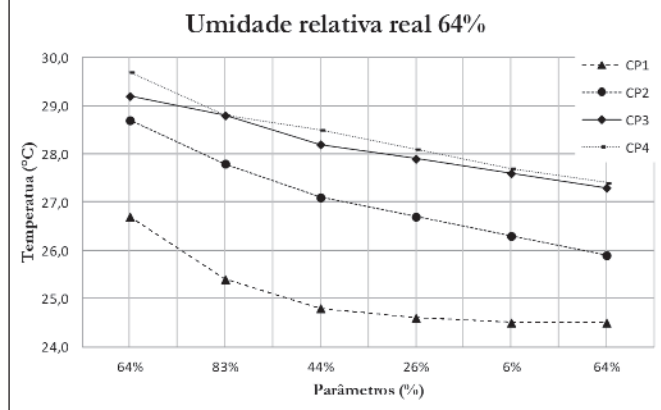
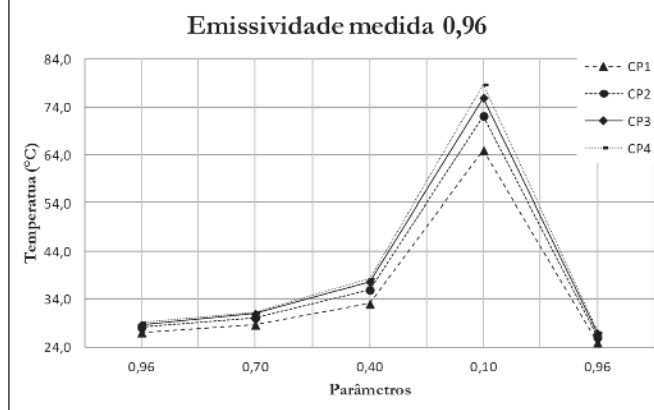


Figura 34 – Gráfico da variação de temperatura no ponto do dano com a alteração do parâmetro de emissividade térmica (emissividade térmica medida 0,96)



5.2 Amostras do grupo 2

Para o grupo 2, os resultados estão expostos nas Figuras de 24 a 29. Observou-se que a partir da espessura efetiva de 4 cm (Figura 26) de argamassa (ou 5 cm de altura total do corpo de prova), a imagem revelou-se menos nítida que as anteriores e esta falta de nitidez cresceu com o aumento da camada de argamassa (ou profundidade do dano).

Entretanto, cabe ressaltar que este resultado é válido para as condições do experimento: aquecimento com lâmpada incandescente e período de aquecimento. Para um tempo de aquecimento maior, por exemplo, pode-se inferir que a imagem infravermelha mostrasse o dano em uma profundidade ainda maior. Contudo, isso não significa que se pode aumentar o tempo de

aquecimento de maneira indiscriminada esperando-se alcançar a profundidade de visualização desejada, pois um aquecimento excessivo pode acarretar, por exemplo, danos ao sistema PRFV, prejudicando a aderência bem como a resistência desse material e, conseqüentemente, enfraquecendo ou anulando sua função estrutural [17].

5.3 Parâmetros de uso da câmera

Considerando-se o aquecimento por lâmpada incandescente para as amostras do grupo 1, avaliou-se qual a alteração nas imagens termográficas e na definição de temperatura da câmera, quando alguns dos parâmetros são erroneamente inseridos no equipamento. Analisando primeiramente um aumento da distância lente-objeto inserida na câmera, observa-se pela Figura 30 que, apesar de haver uma pequena queda nos valores da temperatura no ponto do dano, não se pode afirmar que isto seja um efeito da inserção dos falsos parâmetros, pois a diminuição de temperatura ocorre entre a primeira e a última medição, que possuem idênticos parâmetros inseridos. Portanto, atribui-se a este fato apenas a condição natural de equilíbrio térmico do corpo. Logo, para a câmera posicionada a 1 metro do objeto, a inserção de valores de configuração maiores não exercerá influência na medição de temperatura do corpo utilizando a câmera infravermelha.

Para a distância real de 5 metros, foram obtidos os resultados conforme mostra a Figura 31. Novamente, observa-se que a queda na temperatura se dá de forma gradual mesmo entre a primeira e última medição que simulam uma situação idêntica e, portanto, a variação desse parâmetro quando a câmera é posicionada a 5 metros do corpo de prova também não apresenta grandes influências nos resultados.

Similarmente ao caso anterior, as imagens também não demonstraram diferenças significativas de contraste.

Entretanto, tirando por um momento o foco da atenção para a variação dos parâmetros e observando agora apenas as diferenças de temperaturas entre os corpos de prova, percebe-se que, para uma

Figura 33 – Gráfico da variação de temperatura no ponto do dano com a alteração da temperatura ambiente (temperatura real de 17°C)

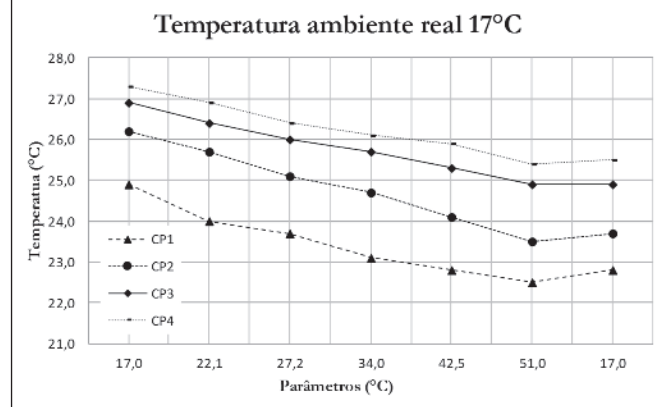
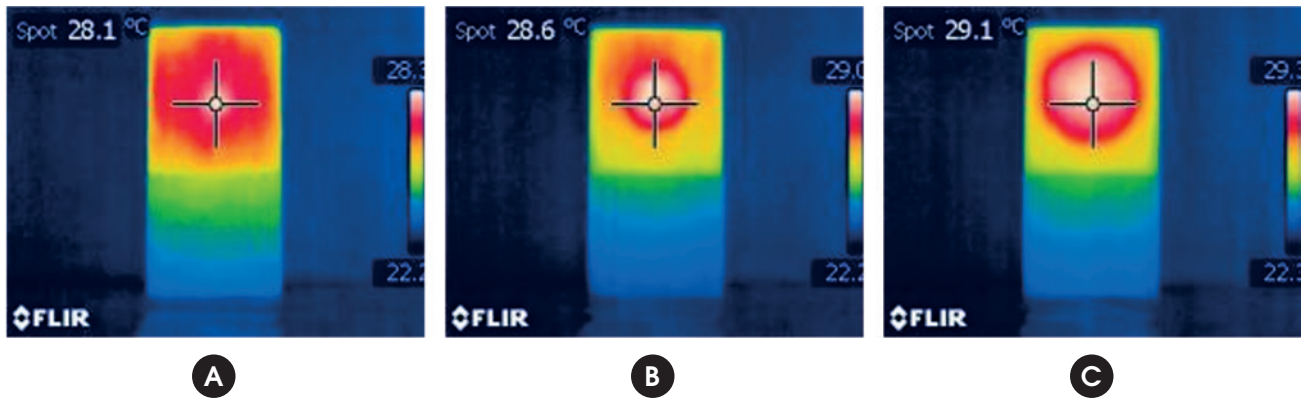


Figura 35 – Imagens infravermelhas registrando temperatura no ponto do dano, inserida emissividade térmica 0,96 (1ª medição): (a) CP2, (b) CP3, (c) CP4



distância lente-objeto de 5 metros, existe uma relação entre o tamanho da falha de aderência e a temperatura. Pela Figura 31, nota-se que quanto maior o dano, maior a temperatura registrada pela câmera infravermelha no ponto do dano o que é tão evidente na Figura 30. Na Figura 31, a temperatura obtida no ponto do dano do CP2, que simula uma falha de aderência de apenas 2 cm, fica muito próxima à temperatura do CP1, que não apresenta falha. Porém, fica bastante claro que a temperatura no dano de CP3 é maior que a de CP1 e CP2 e, conseqüentemente, menor que a de CP4, que apresenta a simulação de maior dano. Portanto, infere-se que a medição da temperatura de pequenas falhas por câmera infravermelha fica um pouco prejudicada quando o equipamento está mais distante do alvo.

As Figuras 32 e 33 mostram as respostas da variação dos parâmetros de umidade relativa e temperatura ambiente, respectivamente. Pode-se observar na Figura 32 que existe uma influência do parâmetro de inserção de temperaturas falsas uma vez que, de acordo com o fenômeno do equilíbrio térmico, era esperado que o ponto da última medição também caísse, no entanto há uma ligeira as-

cessão. Nota-se, porém, que é uma elevação de menos de 0,5°C após a inserção de valores bem acima do real. Assim, conclui-se que a inserção de falsa temperatura ambiental para avaliar danos pode demonstrar valores ligeiramente abaixo do real.

Porém, a influência do fator umidade relativa do ar, na Figura 33, não demonstra uma anormalidade de decaimento da curva, podendo-se atribuir seu comportamento ao equilíbrio térmico.

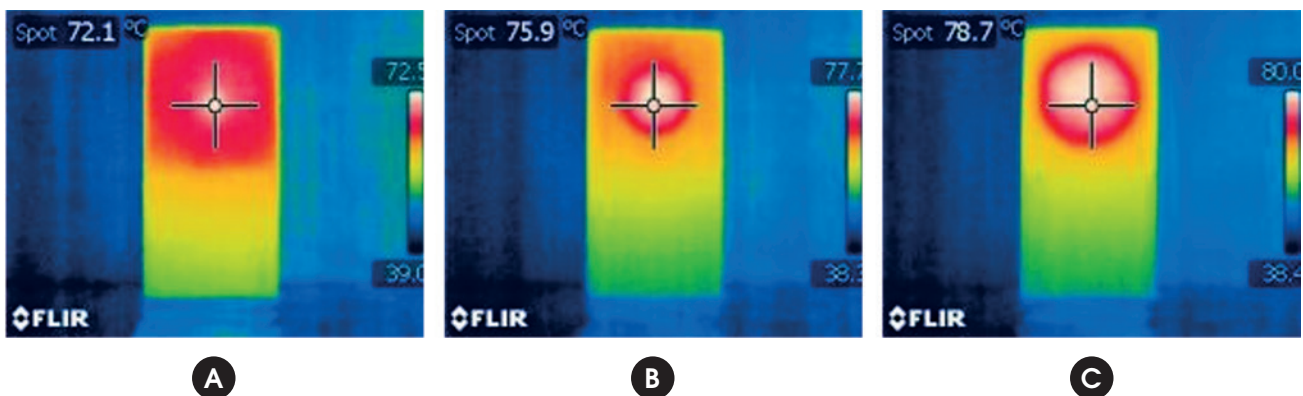
A Figura 34 indica com clareza que a variação da emissividade térmica influencia definitivamente na captação da temperatura na imagem infravermelha, aumentando-a significativamente, quanto menor for a emissividade térmica inserida.

Nas Figuras 35 e 36, observa-se que em relação ao contraste térmico das imagens, não foram observadas diferenças visuais.

6. Conclusões

Comparando os diferentes tipos de aquecimento, observou-se que a lâmpada incandescente é a que melhor identifica a falta de

Figura 36 – Imagens infravermelhas registrando temperatura no ponto do dano, inserida emissividade térmica 0,1 (4ª medição): (a) CP2, (b) CP3, (c) CP4



aderência simulada. No entanto, deve-se fazer uma análise cautelosa na hora de escolher o tipo de aquecimento.

Apesar de apresentar imagens infravermelhas mais nítidas quando utilizada como fonte de calor, a lâmpada incandescente apresenta a desvantagem de consumir muita energia e ter uma menor durabilidade, ao contrário da lâmpada mista de mercúrio, que é mais econômica.

Porém, tudo depende de como e onde o ensaio será realizado. Em ambientes com temperaturas controladas, ou seja, de temperaturas constantes, sem vento, sem interferências de outras fontes de calor (como em túneis, por exemplo), a lâmpada mista de mercúrio pode ser a melhor opção, pois apesar das imagens serem menos nítidas a identificação do dano é notável.

Neste experimento, os resultados obtidos com aquecimento por termoventilador não demonstraram precisão e confiabilidade, ao contrário do que mostram os estudos [7] e [9]. Entretanto, diferentemente da presente pesquisa, o aquecimento convectivo das citadas fontes foi feito por fluxo controlado de ar. Isto demonstra que não apenas o tipo de aquecimento influencia na avaliação termográfica, mas principalmente como o fluxo de calor incidirá sobre a amostra e, portanto, percebe-se que é um fator relevante nas avaliações.

A alteração individual dos parâmetros de umidade relativa e distância da lente ao objeto não indicaram anormalidades nem na medição de temperatura e nem mesmo na delimitação das imagens infravermelhas, já a alteração da temperatura ambiente demonstrou que uma falsa inserção pode acarretar em resultados de temperatura no dano um pouco abaixo do real.

O parâmetro da emissividade térmica, por sua vez, produziu erros expressivos na medição de temperatura pela câmera infravermelha e também prejudicou ligeiramente a imagem, fornecendo menos detalhes. Tais erros eram esperados já que a emissividade térmica mostra ser um dos parâmetros de aplicação mais complexos e que mais chama a atenção dos pesquisadores, como por exemplo, nos estudos [11] e [12]. Estes dois autores também concluíram que a utilização de uma emissividade térmica que não corresponde à emissividade térmica real pode produzir erros significativos de temperatura, trazendo dificuldades de interpretação das imagens na prática.

Contudo, constatou-se neste trabalho que não houve grandes problemas em relação à identificação visual do dano simulado na interface concreto/PRF, mesmo adotando uma emissividade térmica bem fora da real, visto que o contorno do disco de EPS continuou bastante visível, como é possível observar pela comparação das figuras 35 e 36. Logo, como a visualização do dano foi pouco comprometida, percebe-se que a provisão de diagnóstico deste ensaio não destrutivo não fica totalmente invalidada, mesmo em situações adversas.

Sugere-se como, análise futura, a alteração combinada dos parâmetros e não apenas de maneira individual, uma vez que em campo estes valores podem sofrer alterações também em conjunto. O projeto de pesquisa em andamento deverá contemplar esta alternativa. Por fim, ressalta-se que este trabalho ratifica em parte resultados de experimentos realizados por outros pesquisadores, que comprovam a aplicabilidade do método de termografia infravermelha para a verificação de danos na interface PRF/concreto, contribuindo com novos resultados e indicando a necessidade de estudos adicionais para esclarecer alguns questionamentos levantados na pesquisa.

7. Referências bibliográficas

- [1] Bloch J, Miller K. Bridge to the future?. Bangor Daily News, Bangor, 2009, p.5-7.
- [2] Realfonzo R, Martinelli E, Napoli A, Nunziata B. Experimental investigation of the mechanical connection between FRP laminates and concrete. *Compos. Part B Eng.*, v. 45, n. 1, 2013, p. 341–355.
- [3] Cho K, Park SY, Kim ST, Cho JR, Kim BS. Shear connection system and performance evaluation of FRP-concrete composite deck. *KSCE J. Civ. Eng.*, v. 14, n. 6, 2010, p. 855–865.
- [4] Bengar HA, Maghsoudi AA. Experimental investigations and verification of debonding strain of RHSC continuous beams strengthened in flexure with externally bonded FRPs. *Mater. Struct.*, v. 43, n. 6, 2010, p. 815–837.
- [5] Sohn H, Kim SD, In CW, Cronin KE, Harries K. Debonding monitoring of CFRP strengthened RC beams using active sensing and infrared imaging. *Smart Struct. Syst.*, v. 4, n. 4, 2008 pp. 391–406.
- [6] Ghosh KK, Karbhari V M. Use of infrared thermography for quantitative non-destructive evaluation in FRP strengthened bridge systems. *Mater. Struct.*, v. 44, n. 1, 2011, p. 169–185.
- [7] HALABE, U.B., DUTTA S.S., GANGARAO H.V.S. NDE of FRP Wrapped Columns Using Infrared *In: Quantitative Non-destructive Evaluation*, 34°, 2008, Anais, vol. 975, n. 1, p. 1387–1394.
- [8] DUMOLIN J., IBARRA-CASTANEDO C., QUIERTANT M., TAILLADE F., BENDADA A., MALDAGUE X. Evaluation of FRP Gluing on Concrete Structures by Active Infrared Thermography. *In: Conference on Qualitative InfraRed Thermography*, 10°, 2010, pp. 1–9.
- [9] DE ALMEIDA E. G. Inspeção Termográfica de Danos por Impacto em Laminados Compósitos Sólidos de Matriz Polimérica Reforçada com Fibras de Carbono, São Carlos, 2010, Dissertação (mestrado)- Universidade de São Paulo, São Carlos, 111 p.
- [10] Titman D. Applications of thermography in non-destructive testing of structures. *NDT E Int.*, v. 34, n. 2, 2001, p. 149–154.
- [11] MADDING R. P. Emissivity Measurement and Temperature Correction Accuracy Considerations *In: Thermosense XXI*, 21°, 1999, v. 3700, p. 393–401.
- [12] RODRÍGUES F. de J. L. Detecção de Defeitos em Materiais Cerâmicos Usando Termografia., Florianópolis, 2010, Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, 150 p.
- [13] Lothenbach B, Winnefeld F. Thermodynamic modelling of the hydration of Portland cement. *Cem. Concr. Res.*, v. 36, 2006, p. 209–226.
- [14] SHIN P. H., WEBB S. C., PETERS K. J., "Nondestructive inspection in adhesive-bonded joint CFRP using pulsed phase thermography. *In: Thermosense: Thermal Infrared Applications XXXV*, 35°, 2013, v. 8705, p. 87050Q–1 87050Q–9.
- [15] GHIASSI B., SILVA S. M., OLIVEIRA D. V., LOURENÇO P. B., BRAGANÇA L. Assessment of the Bond Quality Degradation in FRP-strengthened Masonry using IR Thermography Technique. *In: International Symposium on Fiber Reinforcement Polymers for Reinforced Concrete Structures*, 11°, Guimarães, 2013, p. 1–9.

- [16] Lai WL, Kou SC, Poon CS, Tsang WF, Ng SP, Hung YY. Characterization of Flaws Embedded in Externally Bonded CFRP on Concrete Beams by Infrared Thermography and Shearography. *J. Nondestruct. Eval.*, v. 28, n. 1, 2009, p. 27–35.
- [17] M. Robert and B. Benmokrane, "Behavior of GFRP Reinforcing Bars Subjected to Extreme Temperatures," *J. Compos. Constr.*, vol. 14, no. 4, pp. 353–360, 2010.
- [18] FLIR Systems, Manual do Utilizador FLIR B series FLIR T series, 2010, p. 274.