

2015

Instituto Politécnico de Coimbra

INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE COIMBRA

Análise de Ligações com Betão Estrutural de Agregados Leves por Processamento de Imagem

**MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL,
ESPECIALIZAÇÃO EM CONSTRUÇÃO URBANA**

AUTOR | Nuno Gonçalo da Silva Gregório

ORIENTADOR | Prof. Doutor Hugo Sérgio Sousa Costa
Prof. Doutor Jónatas Miguel de Almeida Valença

Coimbra, dezembro 2015

Análise de Ligações com Betão Estrutural de Agregados Leves por Processamento de Imagem

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em
Engenharia Civil – Especialidade de Construção Urbana

Autor

Nuno Gonçalo da Silva Gregório

Orientadores

Prof. Doutor Hugo Sérgio Sousa Costa

Prof. Doutor Jónatas Miguel de Almeida Valença

Instituto Superior de Engenharia de Coimbra

Coimbra, março de 2016

AGRADECIMENTOS

É com todo o apreço que expresso o meu agradecimento a todos e a cada um que, direta ao indiretamente, contribuíram para a concretização deste trabalho.

No entanto não posso deixar de particularizar o meu especial agradecimento:

- Aos meus Orientadores Prof. Doutor Hugo Sérgio Sousa Costa e Prof. Doutor Jónatas Miguel de Almeida Valença, pelo empenho, interesse e contributo demonstrado;
- A todos os Professores, que ao longo da minha formação académica, me transmitiram os seus conhecimentos e ensinamentos;
- Aos meus pais, pelas condições que sempre me proporcionaram, pela educação e saberes, e todo o apoio prestado;
- Aos amigos *noctívagos*, por estes anos de camaradagem e pelas sugestões dadas ao longo da realização desta dissertação;
- À Catarina, por toda a ajuda na revisão da dissertação, todo o apoio incondicional e especialmente pela dedicação, paciência e compreensão;

RESUMO

A utilização de Betão Estrutural de Agregados Leves (BEAL) no reforço de estruturas e na indústria da pré-fabricação é, frequentemente, uma solução bastante competitiva. Em ambos os casos, o comportamento estrutural das ligações betão-BEAL tem uma elevada importância, pois afeta não só a resistência, mas também a rigidez dos elementos estruturais.

Com o objetivo de otimizar a análise do valor de deslocamentos e das deformações em provetes laboratoriais com ligações betão-BEAL, pretende-se aplicar técnicas de fotogrametria associando um *software* de processamento de imagem, já desenvolvido. Este estudo pretende avaliar detalhadamente o comportamento estrutural das referidas ligações, sendo que, para o efeito, serão analisados ensaios de corte direto.

Os provetes escolhidos, com um betão do substrato, diferentes tipos de betão adicionado e diferentes tipos de rugosidade do substrato, foram analisados ao nível das zonas das interfaces, do topo do elemento central e das extremidades, pelo método da Fotogrametria.

Por fim, com o estudo experimental, será validado o método de ótico-digital (Técnica de Fotogrametria), comparativamente ao método tradicional (LVDT's), segundo a comparação de quatro parâmetros: (i) estimativa dos Módulos de Elasticidade ao nível das interfaces e da parte de aplicação da carga, por análise das deformações; (ii) análise da dilatação ao nível da interface; (iii) análise da deformação ao nível das interfaces; (iv) análise dos deslocamentos nas interfaces.

Palavras-chave:

Betão leve; corte; interface; fotogrametria, monitorização, deslocamento, deformação.

ABSTRACT

The use of Lightweight Aggregate Concrete (LWAC) in structural reinforcement and in precast industry is usually a highly competitive solution. In both cases, the structural behavior of the concrete-LWAC interfaces is of high importance, affecting the strength as well as the stiffness of the structural elements.

In order to optimize the analysis of the displacements and the deformations values in laboratorial specimens with concrete-LWAC interfaces, it is intended to apply photogrammetry techniques, using an already developed image processing software. This study aims to evaluate in detail the structural behavior of those interfaces, which in this case will be analyzed using direct shear tests.

The chosen specimens, with one type of substrate concrete, different types of added concrete and different types of substrate roughness, were analyzed in terms of the interface areas, the top of the central element and of the edges, by the method of Photogrammetry.

Finally, with the experimental study, optical - digital method (Photogrammetry technology) will be validated and compared to the traditional method (LVDT's), according to a comparison of four parameters: (i) estimating the values of the elastic modulus at the level of interfaces and the loaded area, through deformation analysis; (ii) analysis of the dilatancy at the interfaces; (iii) analyzing the deformation at the level of the interfaces; (iv) analysis of the interface displacements.

Keywords:

Lightweight aggregate concrete; shear; interface; photogrammetry; monitoring; displacement; deformation.

ÍNDICE

1.	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Enquadramento	1
1.2	Objetivos.....	3
1.3	Estrutura da Dissertação	4
2.	AVALIAÇÃO E MONITORIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL EM ELEMENTOS DE BETÃO.....	5
2.1	Monitorização Tradicional.....	5
2.1.1	Lupa/ Régua Graduadas.....	6
2.1.2	Alongâmetros	6
2.1.3	LVDT's.....	7
2.1.4	Células de Carga.....	8
2.2	Monitorização Ótico-digital.....	9
2.2.1	Fotogrametria	10
2.2.2	Processamento de Imagem	10
2.2.3	Homografia.....	11
2.3	Quantificação da Resistência ao Corte da Interface	12
2.3.1	Enquadramento.....	12
2.3.2	Parâmetros	12
2.3.3	Abordagem dos Códigos de Dimensionamento	12
3.	METODOLOGIA.....	14
3.1	Provetes BEAL	14
3.1.1	Produção dos Provetes.....	14
3.1.2	Equipamento e Preparação do Ensaio	15
3.1.3	Descrição do Ensaio	16
3.2	Procedimento Fotogramétrico.....	17
3.2.1	Preparação da superfície do provete.....	17
3.2.2	Deteção e Identificação das Miras.....	19
3.2.3	Homografia.....	23

3.2.4	Avaliação do Erro	25
3.3	Parâmetros Estudados	25
4.	PROCESSAMENTO DE DADOS E ANÁLISE DE RESULTADOS.....	26
4.1	Aquisição de Imagens do Ensaio	26
4.2	Pontos de Análise.....	27
4.3	Definição da Curva Carga/Tempo de Ensaio.....	29
4.4	Deslocamentos	31
4.5	Estimativa do Valor de Módulo de Elasticidade Transversal (G) ao Nível das Interfaces	47
4.6	Dilatância	49
4.6.1	Extremidades	50
4.6.2	Interfaces	53
4.7	Evolução média do Ângulo de Deformação Teta (θ) ao nível das Interfaces..	58
4.8	Extensão (zona superior dos provetes)	62
5.	CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	64
5.1	Conclusões	64
5.2	Desenvolvimentos Futuros	65
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	66

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma de Organização da Tese	4
Figura 2 – Lupa graduada (Valença, J. (2011))	6
Figura 3 – Régua graduada ou de espessuras padrão (Valença, J. (2011))	6
Figura 4 - Alongâmetro (Brito, J., (2004))	7
Figura 5 – LVDT’s (Website G.W. Lisk Company, United Kingdom).....	7
Figura 6 – Célula de Carga (Revere Transducers Model CSP-M Compression Load Cell).....	8
Figura 7 – Dimensões (mm) do provete de ensaio de duplo corte da interface (Costa, 2012)	15
Figura 8 – Provete N2.4-G-H1.9-0Mpa - fotografias cedidas por Costa, (2012) e Valença (2011)	18
Figura 9 – Provete N2.4-G-N2.4-0Mpa - fotografias cedidas por Costa, (2012) e Valença (2011)	18
Figura 10 – Provete N2.4-L-N2.4-0Mpa - fotografias cedidas por Costa, (2012) e Valença (2011).....	19
Figura 11 – Ensaio N2.4-G-H1.9-0Mpa: deteção (a) e identificação (b) dos alvos.....	20
Figura 12 – Ensaio N2.4-G-N2.4-0Mpa: deteção (a) e identificação (b) dos alvos.....	21
Figura 13 – Provete N2.4-L-N2.4-0Mpa: deteção (a) e identificação (b) dos alvos.....	22
Figura 14 – Evolução (primeira e última fase) do Provete N2.4-G-H1.9-0MPa (fotografias de Costa, 2012, e de Valença, 2011)	26
Figura 15 – Evolução (primeira e última fase) do Provete N2.4-G-N2.4-0MPa (fotografias de Costa, 2012, e de Valença, 2011)	27
Figura 16 – Evolução (primeira e última fase) do Provete N2.4-L-N2.4-0MPa (fotografias de Costa, 2012, e de Valença, 2011)	27
Figura 17 – Gráfico Carga/Tempo de Ensaio do Provete N2.4-G-H1.9-0MPa	29
Figura 18 – Gráfico Carga/Tempo de Ensaio do Provete N2.4-G-N2.4-0Mpa	30
Figura 19 – Gráfico Carga/Tempo de Ensaio do Provete N2.4-L-N2.4-0MPa	30
Figura 20 – Gráfico de Evolução de Deslocamentos (mm)-Provete N2.4-G-H1.9-0MPa	32
Figura 21 – Gráfico de Evolução de Deslocamentos (mm)-Provete N2.4-G-N2.4-0MPa	33
Figura 22 – Gráfico de Evolução de Deslocamentos(mm)-Provete N2.4-L-N2.4-0MPa	34
Figura 23 – Conjuntos de miras escolhidas de cada provete	37
Figura 24 - Identificação dos alvos das zonas das interfaces analisados em cada provete	47
Figura 25 – Identificação dos alvos das zonas das extremidades e das interfaces analisados em cada provete	50
Figura 26 – Gráfico de Evolução da Dilatância nas extremidades do Provete N2.4-G-H1.9-0Mpa	51
Figura 27 – Gráfico de Evolução da Diltância nas extremidades do Provete N2.4-G-N2.4-0MPa.....	52

Figura 28 - Gráfico de Evolução da Dilatância nas interfaces do Provete N2.4-G-H1.9-0Mpa.....	55
Figura 29 - Gráfico de Evolução da Dilatância nas interfaces do Provete N2.4-G-N2.4-0MPa.....	57
Figura 30 – Identificação dos alvos das zonas das interfaces analisados em cada provete	58
Figura 31 – Gráfico de Evolução média do Ângulo θ ao nível da Interface do Provete N2.4-G-H1.9-0Mpa.....	59
Figura 32 - Gráfico de Evolução média do Ângulo θ ao nível da Interface do Provete N2.4-G-N2.4-0Mpa.....	60
Figura 33 – Identificação da zona dos provetes sujeita a maior valor de tensão	62

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Coordenadas em <i>pixels</i> da primeira fase de ensaio de cada provete	23
Tabela 2 – Matriz Homografia do Provete N2.4-G-H1.9-0Mpa	24
Tabela 3 – Transformação de coordenadas em <i>pixels</i> para milímetros do Provete N2.4-G-H1.9-0Mpa....	24
Tabela 4 – Pontos de Análise do Ensaio N2.4-G-H1.9-0MPa.....	28
Tabela 5 – Pontos de Análise do Ensaio N2.4-G-N2.4-0MPa.....	28
Tabela 6 – Pontos de Análise do Ensaio N2.4-L-N2.4-0MPa	28
Tabela 7 – Valores de Evolução de Deslocamentos (mm)-Provete N2.4-G-H1.9-0MPa.....	32
Tabela 8 – Valores de Evolução de Deslocamentos (mm)-Provete N2.4-G-N2.4-0MPa.....	33
Tabela 9 – Valores de Evolução de Deslocamentos (mm)-Provete N2.4-L-N2.4-0MPa	34
Tabela 10 – Valores dos Deslocamentos (mm) medidos pelos LVDT's no Provete N2.4-G-H1.9-0MPa	36
Tabela 11 – Valores dos Deslocamentos (mm) medidos pelos LVDT's no Provete N2.4-G-N2.4-0MPa	36
Tabela 12 – Valores dos Deslocamentos (mm) medidos pelos LVDT's no Provete N2.4-L-N2.4-0MPa.	36
Tabela 13 – Valores dos Deslocamentos determinados através do método da Fotogrametria no Provete N2.4-G-H1.9-0MPa	38
Tabela 14 – Valores dos Deslocamentos determinados através do método da Fotogrametria no Provete N2.4-G-N2.4-0MPa	40
Tabela 15 – Valores dos Deslocamentos determinados através do método da Fotogrametria no Provete N2.4-L-N2.4-0MPa.....	42
Tabela 16 – Comparação de deformações ϵ_d - Fotogrametria vs LVDT's no Provete N2.4-G-H1.9-0MPa.....	45
Tabela 17 – Comparação de deformações ϵ_d - Fotogrametria vs LVDT's no Provete N2.4-G-N2.4-0MPa.....	45
Tabela 18 – Comparação de deformações ϵ_d - Fotogrametria vs LVDT's no Provete N2.4-L-N2.4-0MPa.....	45
Tabela 19 – Módulo de Elasticidade G das interfaces do provete N2.4-G-H1.9-0MPa	48
Tabela 20 – Módulo de Elasticidade G das interfaces do provete N2.4-G-N2.4-0Mpa	48
Tabela 21 – Valores de Evolução da Dilatância nas extremidades do Provete N2.4-G-H1.9-0Mpa.....	51
Tabela 22 – Valores de Evolução da Diltância nas extremidades do Provete N2.4-G-N2.4-0MPa	52
Tabela 23 – Valores de Evolução da Dilatância nas interfaces do Provete N2.4-G-H1.9-0Mpa	53
Tabela 24 – Valores de Evolução da Dilatância nas interfaces do Provete N2.4-G-N2.4-0MPa	55
Tabela 25 – Valores de Evolução média do Ângulo θ ao nível da Interface do Provete N2.4-G-H1.9-0MPa	59

Tabela 26 – Valores de Evolução média do Ângulo θ ao nível da Interface do Provete N2.4-G-N2.4-0Mpa.....	60
Tabela 27 – Valores da Extensão no Provete N2.4-G-H1.9-0MPa	63

SIMBOLOGIA

F_a – força aplicada nos provetes, em kN

F_n – força normal medida nos provetes, em kN

δ - deslocamento/ flecha;

ε - extensão;

\varnothing - diâmetro do varão;

Θ – angulo teta

ΔL - variação dimensional;

EI – rigidez de flexão;

F - força aplicada;

L - distância entre miras;

X - abcissa de um ponto;

Y - ordenada de um ponto;

Z - coordenada Z de um ponto

LVDT - transdutor de deslocamento elétrico (Linear Variable Differential Transducer);

RMS - erro médio quadrático (*Root Mean Square*);

BEAL - Betão Estrutural de Agregados Leves

BDN - Betão de Densidade Normal

1. INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento

A nível mundial, considera-se que o betão é o material mais utilizado na construção civil, o qual é sempre composto por uma mistura de material ligante, agregados granulares, água e adições. O betão já é utilizado desde o tempo Greco-Romano, tendo sofrido alterações ao longo dos séculos. A partir do séc. XIX o betão foi fortemente aplicado e estudado, tendo sofrido uma grande evolução, com a implementação de armaduras de reforço, o que originou melhorias quer ao nível da sua constituição e resistência, quer a nível estético e funcional.

De modo a diminuir o peso total de uma estrutura de betão-armado, foi criado e desenvolvido o betão estrutural de agregados leves (BEAL), isto é, betão constituído por uma mistura de material ligante, com agregados de diferentes granulometrias, sendo os grossos total ou maioritariamente leves. Os primeiros indícios de produção de BEAL remontam também ao tempo Greco-Romano, durante o qual este tipo de material era usado recorrendo a agregados leves naturais de origem vulcânica. Com o evoluir dos séculos, houve também um declínio de conhecimento relativo à produção e utilização deste betão, sendo que, a partir do século XX, existiu uma evolução da utilização de BEAL, recorrendo à produção de agregados leves artificiais.

Atualmente, e face à evolução tecnológica na produção de betão, os elementos de BEAL têm como principais características a reduzida densidade e a elevada resistência. Além das características de elevado desempenho, o BEAL apresenta maior resistência ao fogo, maior durabilidade e melhores propriedades térmicas e acústicas, pelo que, embora o custo unitário médio de produção seja mais elevado, comparativamente ao betão de densidade normal (BDN) com resistência equivalente, considera-se o BEAL uma solução construtiva competitiva, principalmente nas áreas da reabilitação e reforço.

No entanto, como o BEAL depende significativamente das características intrínsecas dos agregados leves que o compõem e dos parâmetros da matriz ligante, considera-se necessário aprofundar o estudo das propriedades e características do BEAL, nomeadamente a análise do comportamento estrutural das ligações entre BDN-BEAL e BEAL-BEAL, no que diz respeito à resistência à tração e ao corte longitudinal das interfaces, confrontando os resultados com trabalhos científicos publicados e com as previsões dos principais códigos de análise e dimensionamento de estruturas de betão.

De modo a monitorizar o comportamento estrutural de um elemento de betão, existem várias técnicas que permitem a quantificação dos efeitos resultantes da aplicação de

cargas, sendo essencial determinar algumas propriedades e grandezas de comportamento, nomeadamente: deslocamentos; tensões e extensões; mecanismo de rotura, padrão de fissuração e caracterização da largura e extensão das fendas.

Atualmente e de modo a quantificar as grandezas acima referidas, a monitorização e avaliação é efetuada essencialmente segundo dois métodos: (i) tradicionais; (ii) ótico-digitais.

Neste trabalho, foi realizada a análise de ligações betão-betão por processamento de imagem, recorrendo-se aos resultados obtidos através de monitorização Ótico-digital, especificamente com recurso a Fotogrametria e a Processamento de Imagem. Na análise, compararam-se resultados com os obtidos pela monitorização tradicional.

As situações estudadas correspondem a ensaios laboratoriais de duplo corte direto, em provetes compósitos de betão, com interfaces BDN-BEAL, considerando vários tipos de rugosidade e diferentes propriedades dos betões, para diferentes níveis de tensão normal e taxas de armadura de ligação na interface (Costa, 2012).

A análise dos resultados permite quantificar as grandezas que afetam direta e indiretamente a resistência e a rigidez dos elementos estruturais compósitos com BEAL, tais como dilatação, ângulo de atrito, deslocamentos e extensões. De salientar que estas grandezas foram determinadas através da fotogrametria, realçando o potencial dos métodos ótico-digitais, comparativamente aos métodos tradicionais.

1.2 Objetivos

Para o desenvolvimento da presente dissertação, foram estabelecidos os seguintes objetivos:

- Avaliar o comportamento estrutural das interfaces entre BDN-BEAL e BEAL-BEAL, através de caracterização experimental de provetes em laboratório;
- Analisar os ensaios pelas técnicas de monitorização tradicional e ótico-digital, no sentido de se fazerem as análises comparativas e complementares.
- Aplicar o método ótico-digital já desenvolvido por Valença (2011) na avaliação do comportamento estrutural de interfaces entre elementos de betão, aferindo a sua precisão, em cada caso estudado, comparativamente aos métodos tradicionais habitualmente aplicados.
- Aprofundar a análise dos ensaios, e respetivos resultados da monitorização tradicional, apresentados no âmbito do estudo desenvolvido por Costa (2012), relativo ao estudo do comportamento mecânico em interfaces de betão, com variação do tipo e resistência do betão adicionado, variação da tensão normal e da armadura de ligação na interface.
- Recorrer a técnicas de fotogrametria e adequar o respetivo *software* de processamento de imagem desenvolvido aos ensaios laboratoriais de duplo corte em interfaces de elementos compósitos de betão.

1.3 Estrutura da Dissertação

A presente dissertação está dividida em cinco capítulos, organizados sequencialmente pela ordem de trabalhos executados, conforme esquematizado no fluxograma (Figura 1).

No Capítulo 1 apresenta-se o tema desenvolvido, fazendo o enquadramento do desenvolvimento do betão estrutural ao longo dos séculos, bem como da implementação do BEAL, identifica-se também o caso de estudo, os principais objetivos da dissertação e a metodologia utilizada para cumprir os objetivos definidos, bem como a estrutura da dissertação.

No Capítulo 2 apresenta-se uma pesquisa bibliográfica sobre o Estado da Arte atual e a sua evolução desde as primeiras abordagens científicas, no que diz respeito a técnicas de monitorização tradicionais e ótico-digitais, as quais permitem, em ensaios de carga em obra ou laboratoriais, avaliar e caracterizar o comportamento estrutural de elementos de betão armado.

O caso de estudo e a metodologia do ensaio laboratorial são explicados no Capítulo 3, no qual se faz a caracterização dos provetes utilizados, a descrição detalhada dos ensaios de corte direto, dos métodos de monitorização utilizados e a identificação dos principais parâmetros estudados.

No Capítulo 4 efetua-se o resumo do processamento de dados e da análise dos resultados, sendo as principais conclusões e desenvolvimentos futuros apresentados no Capítulo 5.

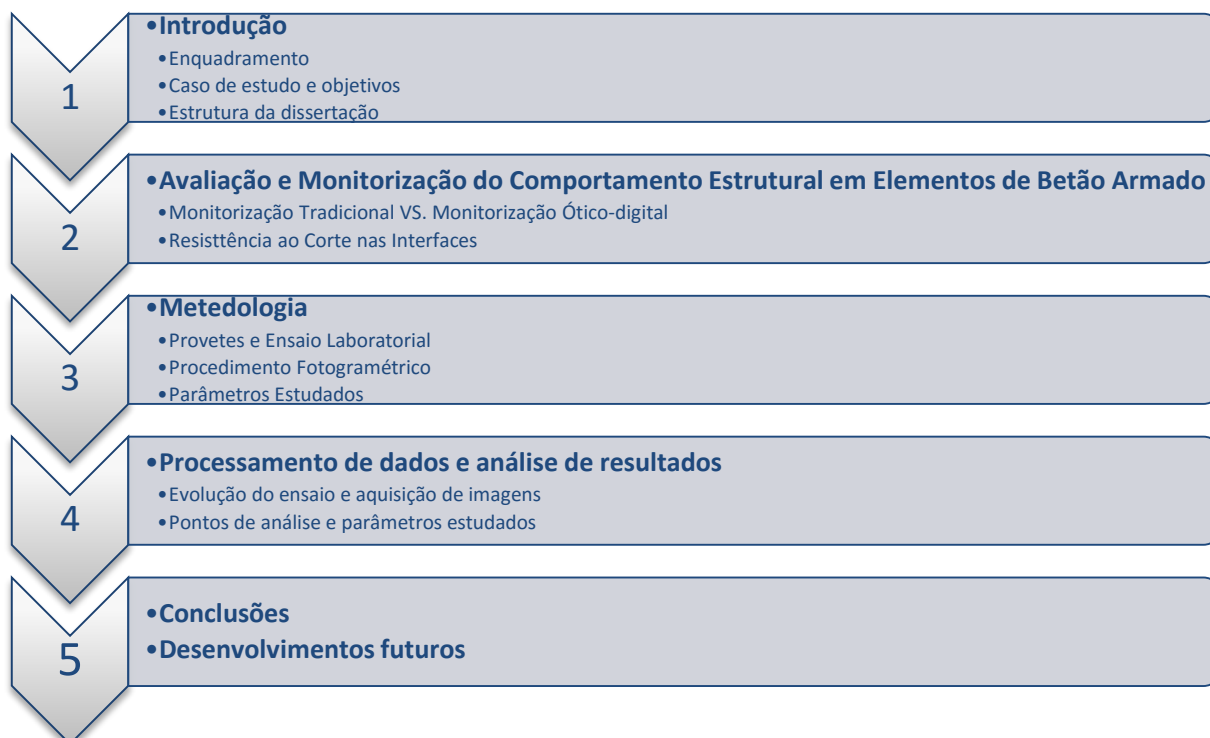


Figura 1 - Fluxograma de Organização da Tese

2. AVALIAÇÃO E MONITORIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL EM ELEMENTOS DE BETÃO

2.1 Monitorização Tradicional

Os métodos tradicionais têm sido utilizados durante várias décadas com o intuito de quantificar, entre outros, o comportamento estrutural de elementos de betão armado, quando sujeitos a carregamentos durante a vida útil.

Na generalidade, recorre-se à utilização de instrumentos de medição tradicionais, tais como, lupa ou régua graduadas para medição de largura de fendas e caracterização do padrão de fissuração, alôngametros, LVDT's e células de carga, para quantificação de deslocamentos, rotações e nível de carga (Gomes, 2013).

No entanto, a utilização destes instrumentos apresenta algumas limitações e restrições, relativamente ao número de dispositivos disponíveis vs. necessários, à colocação e espaço ocupado pelos mesmos, ao elevado custo inerente aos equipamentos e respetivo *software*, e à necessidade de recursos humanos.

A estas desvantagens acresce o facto de os resultados obtidos estarem fortemente dependentes do erro humano, da baixa precisão de algumas medições e ao extremamente moroso processo de tratamento de dados (Dias-da-Costa *et al.*, 2010).

Assim, pode afirmar-se que, embora sejam de fácil utilização e sejam utilizados há várias décadas, os métodos tradicionais são trabalhosos, morosos e, muitas vezes, apresentam resultados subjetivos, pelo que, as diversas restrições apresentadas pelos métodos tradicionais motivaram a procura de processos alternativos, que conseguissem diminuir e/ou eliminar as referidas desvantagens.

De seguida, apresentam-se alguns dos instrumentos de medição tradicionais frequentemente utilizados na monitorização estrutural, quer em ensaios laboratoriais quer *in situ*, para obtenção da evolução das grandezas físicas ao longo do ensaio.

2.1.1 Lupa/ Régua Graduadas

A lupa e a régua graduadas (Figura 2 e Figura 3) podem ser classificadas como equipamentos de medição da largura de fendas, de utilização manual.

O procedimento de utilização consiste na colocação do equipamento sobre a fenda da face do elemento de betão, de modo a medir a respetiva largura, de acordo com a escala apresentada no equipamento.

Ambos os equipamentos são utilizados em ambiente laboratorial e *in situ*, apresentando como vantagens a sua utilização fácil e rápida, e o facto de serem reutilizáveis e de custo reduzido.

Têm associadas também algumas desvantagens, tais como, exatidão e precisão reduzidas e limitadas e serem vulneráveis aos erros inerentes à intervenção humana.



Figura 2 – Lupa graduada (Valença, J. (2011))



Figura 3 – Régua graduada ou de espessuras padrão (Valença, J. (2011))

2.1.2 Alongâmetros

O alongâmetro (Figura 4) é um dispositivo mecânico usado para medição com precisão, de pequenos deslocamentos em superfícies de betão.

O modo de aplicação deste equipamento, baseia-se na medição de distâncias entre dois pontos pré-definidos (bases metálicas com 5,0 mm de diâmetro, coladas na superfície do elemento de betão), através de uma barra-padrão, denominada por invar, que tem a função de corrigir os valores obtidos devido a variações de temperatura no instrumento e/ou esforços a que possa ser sujeito durante o ensaio.

Assim, o alongâmetro pode ser caracterizado como um equipamento intrusivo, dado que têm de ser coladas bases metálicas na estrutura, podendo ser de utilização laboratorial e/ou *in situ*, utilizado para deteção, avaliação, levantamento e monitorização de fendas, fissuras e juntas, cuja análise das leituras e das distâncias ao longo do tempo, permite estabelecer uma tendência do movimento ou da deformação do elemento de betão, bem

como, determinar o valor da largura das fendas e estabelecer relações causa-efeito com as ações a que o elemento está sujeito (Brito, J., (2004)).



Figura 4 - Alongômetro (Brito, J., (2004))

2.1.3 LVDT's

O LVDT (Figura 5) sigla utilizada para Transformador Diferencial de Variável Linear (*Linear Variable Differential Transformer*), pode ser definido como um equipamento mecânico, transdutor eletromagnético de medição de deslocamento linear, que converte o movimento linear de um objeto (sinal de entrada), em uma resposta elétrica proporcional ao movimento (sinal de saída) que depois é transmitida para um equipamento que faz o processamento e armazenamento dos dados (Campilho, 2000).

Este equipamento pode ser utilizado em ensaios laboratoriais e/ou *in situ*, para determinar os valores de deslocamento durante o ensaio.



Figura 5 – LVDT's (Website G.W. Lisk Company, United Kingdom)

2.1.4 Células de Carga

As células de carga (Figura 6) são dispositivos mecânicos transdutores de força, com a capacidade de se deformar no regime elástico e que permitem medir de forma indireta a força aplicada no elemento de betão ao longo do tempo.

Este equipamento é de utilização laboratorial e/ou *in situ*, e baseia-se na medição da deformação do elemento ensaiado, através de extensómetros, fixados ao “corpo da célula de carga”, para gerar um sinal correspondente à intensidade da carga aplicada.

A célula de carga caracteriza-se também por ser um instrumento meticuloso e complexo e de elevado custo (Campilho, 2000)).



Figura 6 – Célula de Carga (Revere Transducers Model CSP-M Compression Load Cell)

2.2 Monitorização Ótico-digital

Ao longo dos últimos anos e muito devido ao elevado desenvolvimento de métodos e ferramentas noutras áreas do conhecimento, foi possível ultrapassar as limitações dos métodos tradicionais, criando métodos de monitorização e de análise de superfícies e estruturas, com vista ao acompanhamento pormenorizado e eficaz da evolução do comportamento estrutural (Valença, 2011).

Os métodos de monitorização ótico-digital utilizam técnicas de Fotogrametria e Processamento de Imagem, para otimizar a quantificação dos efeitos resultantes da aplicação de cargas em elementos de betão, em ensaios laboratoriais e em ensaios *in situ*.

Assim, as técnicas inovadoras de fotogrametria e pós-processamento de dados, conferem à monitorização ótico-digital a capacidade de ultrapassar muitas das limitações registadas nos dispositivos tradicionais, bem como obter uma quantidade incomparavelmente superior de resultados, num curto período de tempo e com menores custos associados (Dias-da-Costa *et al.*, 2010).

Especificamente, a monitorização ótico-digital tem como principais valências:

1. Possibilidade de monitorizar um número virtualmente ilimitado de pontos pré-definidos, em qualquer instante;
2. Economia de recursos, tendo em conta que se recorre a equipamentos de baixo custo (máquina fotográfica digital não profissional e computador, respetivamente para aquisição e tratamento de dados);
3. Processamento rápido e automatizado de toda a informação;
4. Obtenção em qualquer instante do ensaio, de forma rápida, fiável e automática, os campos de deslocamento e de deformação;
5. Precisão do processo.

Atualmente a aplicação destas técnicas na avaliação do estado de conservação e na monitorização do comportamento mecânico de estruturas de betão encontra-se em elevado desenvolvimento, sendo que estes métodos digitais têm sido desenvolvidos em instrumentos de precisão e micro-precisão, com a finalidade de contribuírem para verificar e avaliar, em tempo real, a estabilidade das estruturas e assim programar a respetiva manutenção (Valença, 2011).

2.2.1 Fotogrametria

A Fotogrametria (*Photogrammetry*), palavra derivada das palavras gregas, *photos* (luz), *gramma* (descrição) e *metron* (medidas), é entendida como a técnica de obter através de fotografias, as coordenadas e respectivas características geometrias, dos elementos pretendidos, presentes na zona da imagem, isto é, pode ser descrita de uma forma simples como uma técnica para extrair, a partir de fotografias, as formas, as dimensões e as posições de objetos nelas contidas (Valença, 2006).

Especificamente, esta técnica fornece as coordenadas tridimensionais do objeto, a partir do conjunto de imagens captados, através do procedimento sequencial de aquisição, processamento e análise das imagens.

Todavia inerente a este procedimento, estão associados alguns fatores que têm de ser considerados, antes da captação das imagens, de modo a tornar viáveis os resultados obtidos pelo processamento e análise das imagens, nomeadamente a calibração da câmara, orientação da imagem e também a distorção da lente da câmara (Valença, 2011).

Neste sentido, a aplicação de técnicas de Fotogrametria na monitorização laboratorial e *in situ* de elementos de betão sujeitos a carregamentos, permite uma completa e total análise do objeto, isto porque, para além do levantamento geométrico preciso, permite a avaliação de coordenadas e assim, a avaliação de deslocamentos e rotações num número praticamente ilimitado de pontos pré-definidos do elemento de betão.

2.2.2 Processamento de Imagem

As técnicas de Processamento Digital de Imagem visam o melhoramento da perceção das imagens captadas e para tal, aplicam operações de modo a corrigir distorções geométricas, eliminar ruído e realçar objetos.

O processo recorre essencialmente ao uso do computador digital, tendo sofrido maior evolução ao longo das décadas, com a aplicação da técnica nos campos da Medicina e Astronomia.

O método do Processamento consiste na sequência de três de fases de processamento, nomeadamente:

1. Processamento de baixo nível consiste na aplicação de operações simples e básicas de redução do ruído, realce do contraste e da nitidez, em que o *input* e *output* do processo são imagens;
2. Processamento de nível médio desenvolve operações de divisão da imagem captada, com o objetivo de reduzir os objetos da imagem à forma desejada, para aplicar o processamento pretendido e a classificação do objetos, de modo a obtermos os contornos e identificação dos objetos;

3. Processamento de alto nível aplica operações de interpretação dos objetos identificados na fase anterior.

2.2.3 Homografia

A Homografia é entendida como um processo de transformação linear, que define que entre dois elementos (que não têm obrigatoriamente de ser paralelos), um ponto de um elemento só pode corresponder a um só ponto do outro elemento e vice-versa.

Dado que os alvos têm coordenadas inicialmente conhecidas, as suas posições são utilizadas como pontos fixos virtuais durante o ensaio. Assim sendo, definem-se matrizes de transformação de coordenadas na fase inicial utilizando uma homografia, as quais são utilizadas para as restantes fases. Esta transformação é utilizada para orientar e escalar o modelo em qualquer dos instantes fotografados (Gomes, 2013).

2.3 Quantificação da Resistência ao Corte da Interface

2.3.1 Enquadramento

Um qualquer elemento de betão armado pode estar sujeito a solicitações de carregamento, o que na prática, se pode traduzir em quatro tipos diferentes de esforços externos (axial, transverso, momento fletor e momento torsor), os quais originam esforços internos no elemento de betão, que por sua vez, se diferem ao longo do elemento.

Com o aumento crescente dos esforços externos, dá-se um aumento dos esforços internos, até ao ponto em que a tensão principal de tração atinge o valor da tensão resistente à tração do betão, originando a fissuração na direção das tensões principais de tração/compressão.

A força de corte caracteriza-se por uma carga, constante ou não, aplicada ao longo de um elemento de betão armado.

2.3.2 Parâmetros

O cálculo da resistência ao corte (longitudinal) das interfaces em elementos de betão armado tem sofrido algumas alterações ao longo das últimas décadas, devido aos trabalhos desenvolvidos por diversos autores, os quais elaboraram expressões lineares e não lineares.

Estas mesmas expressões dependem principalmente de parâmetros como (Costa, 2012):

- Resistência à tração do betão;
- Rugosidade do substrato;
- Retração diferencial;
- Existência de armadura de ligação;
- Adoção ou não de ligantes na composição do betão.

2.3.3 Abordagem dos Códigos de Dimensionamento

Os regulamentos de estruturas de betão armado apresentam expressões que se baseiam na Teoria de corte-atrito e em quatro parâmetros fundamentais (Costa, 2012):

- Resistência do betão fresco;
- Tensão normal à interface;
- Armadura de ligação que atravessa a interface;
- Rugosidade da superfície do substrato.

De referir que as expressões utilizadas para BEAL são semelhantes às expressões utilizadas para betões de densidade normal, sendo apenas acrescidas de coeficientes específicos.

Também de notar que o ACI não tem em conta a parcela resistente da coesão, bem como a do atrito devido à tensão normal na interface, pode concluir-se que a comparação deve ser mais realista utilizando a expressão apresentada pelo EC2 e o MC10 (Costa, 2012).

2.3.3.1 EC2 –Euro Código 2 e MC10

O valor da resistência ao corte longitudinal da interface entre elementos de betão de diferentes idades, pode ser calculado de acordo com a expressão (1), a qual é apresentada no Euro Código 2 (EN 1992-1-1, 2010) e no MC10 de forma idêntica e dependente dos mesmos parâmetros, isto é, das propriedades intrínsecas à resistência do material com menor resistência, da tensão normal e dos coeficientes de rugosidade (coesão e atrito).

$$v_x = c \cdot f_{ct} + \mu \cdot \sigma_n + \rho_s \cdot f_{ct} \cdot (\mu \cdot \sin \alpha + \cos \alpha); \quad v_x \leq 0,5 \cdot v \cdot f_{ct} \quad (1)$$

2.3.3.2 ACI – American Concrete Institute

A expressão presente no regulamento do ACI depende do coeficiente de atrito, o qual é determinado em função da rugosidade da interface e do coeficiente λ , não sendo contabilizados os valores da resistência por coesão e da tensão normal da interface no atrito. O coeficiente λ assume valores de 0,75 a 0,85, consoante se usam areias leves e normais ou se usam apenas areias de densidade normal.

Por outro lado, a rugosidade da superfície do substrato é avaliada de forma qualitativa, baseada apenas na inspeção visual, originando assim uma classificação dividida em quatro classes, designadas por, muito lisa; lisa, rugosa e indentada (ou muito rugosa) (Costa, 2012).

$$v_x = \rho_s \cdot f_{ct} \cdot (\mu \cdot \sin \alpha + \cos \alpha) \quad (2)$$

3. METODOLOGIA

3.1 Provetes BEAL

3.1.1 Produção dos Provetes

Neste trabalho os provetes analisados foram produzidos e ensaiados em laboratório, anteriormente, no âmbito do trabalho realizado por Costa (2012). De acordo com o disposto nesse estudo, os provetes para o ensaio de duplo corte foram produzidos em duas fases. Primeiro, preparou-se a cofragem para produzir as partes exteriores, de cada provete, com o betão de substrato. Montaram-se cofragens metálicas modulares e efetuou-se a betonagem até à respetiva cota, tendo sido efetuado o tratamento para a rugosidade rotulada por “R”, produzindo sulcos na superfície do betão fresco, 10 minutos após a betonagem. O tratamento das partes com rugosidade rotulada por “G” foi efetuado em estado endurecido, 21 dias após a sua produção. A situação sem tratamento foi rotulada por “L” correspondente a superfície lisa. No presente estudo foram analisados apenas os provetes com as interfaces L e G (Costa, 2012).

A produção final dos provetes foi efetuada através da betonagem final com o respetivo betão adicionado, 28 dias após a produção das partes de substrato. A preparação e a montagem dos provetes foram efetuadas em série, em cofragem metálica, sendo colocados elementos de madeira e de poliestireno extrudido, com dimensões de $50 \times 100 \times 200 \text{ mm}^3$, de modo a criar o desnível de 50mm entre as três partes de cada provete. Após a preparação da cofragem, com a colocação rigorosa das partes de substrato, humedeceu-se a interface do substrato e efetuou-se a betonagem final, obtendo-se os provetes nas condições especificadas. Os provetes foram desmoldados às 48 horas e armazenados em laboratório até ao dia de ensaio (Costa, 2012).

Em suma, os provetes são constituídos por três partes, com dimensões iguais de $100 \times 250 \times 200 \text{ mm}^3$, das quais, as partes exteriores são constituídas por BDN no substrato (N2.4) e a parte central constituída por betão adicionado, BDN ou BEAL, betonada 28 dias após as o substrato. Apesar de, no trabalho referido, se ter variado a densidade e a resistência do BEAL adicionado, no presente estudo utilizou-se apenas o BDN referido com N2.4 e o BEAL referido como HC1.9.

A parte central está colocada entre as duas partes exteriores, desfasada verticalmente 50mm, produzindo assim uma interface de $200 \times 200 \text{ mm}^2$, com cada uma das faces das partes laterais, com uma rugosidade superficial devido à utilização de betão fresco.

A interface analisada foi produzida com os dois tipos de rugosidade (L-superfície lisa, G-superfície tratada com jato de granalha) já mencionados; nos ensaios do estudo original

foram definidos e utilizados três níveis de tensão normal, σ_n , na interface (0 Mpa, 3 Mpa e 6 Mpa), e variação da taxa de armadura na interface. No presente estudo, apenas foram analisadas situações sem armadura na interface e sem aplicação de tensão normal inicial.

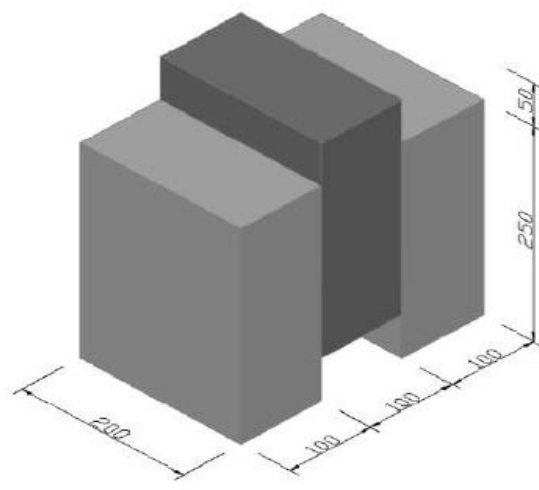


Figura 7 – Dimensões (mm) do provete de ensaio de duplo corte da interface (Costa, 2012)

Em suma, utilizou-se na análise deste estudo apenas um tipo de betão de substrato (N2.4), com dois tipos de betão adicionado (N2.4, H1.9), combinado com dois tipos de rugosidade (L, G), e um nível de tensão normal na interface (0Mpa), o que resulta nos seguintes provetes estudados:

- N2.4-G-N2.4-0MPa
- N2.4-G-H1.9-0MPa
- N2.4-L-N2.4-0MPa
- N2.4-L-H1.9-0MPa (não foi possível fazer a análise desta situação por erro na aquisição de imagem)

3.1.2 Equipamento e Preparação do Ensaio

Os provetes foram ensaiados à compressão, ensaio de duplo corte direto até à rotura, sendo utilizada uma prensa metálica com 500 *tf* de capacidade, equipada com dois pratos rígidos, inferior e superior, nos quais foram colocados em cada canto LVDT's, com 25mm de curso, para monitorização dos deslocamentos durante o ensaio.

De modo a ser possível obter os melhores resultados na aquisição das imagens para posterior análise, foram criadas condições de luz homogénea e difusa no espaço de ensaio

laboratorial e a superfície dos provetes a ensaiar, foi pintada com uma grelha regular de alvos, com secção circular e de cor vermelha, espaçados entre si 10 mm horizontal e verticalmente (Figura 8).

Para aquisição das imagens, utilizou-se uma câmara digital de baixo custo, com uma lente de 28mm de distância focal, instalada sobre um tripé, a sensivelmente 90 cm da superfície dos provetes, sendo o disparo autorizado através de um disparador remoto de infravermelhos (Valença, 2012).

Todas as imagens foram obtidas com a resolução de 3872x2592 *pixels* (qualidade máxima).

3.1.3 Descrição do Ensaio

Os ensaios de corte direto (DST) até à rotura foram realizados pelo carregamento vertical dos provetes, através da imposição controlada de deslocamento do prato inferior da prensa, produzindo uma compressão vertical e ascendente, de todo o provete, a velocidade constante de 0,01 mm/s (Costa, 2012).

De modo a uniformizar a aplicação e distribuição da tensão normal na interface, no estudo de Costa (2012), foram utilizados quatro varões roscados “*Dywidag*” $\phi 16$ mm e duas placas de aço furadas e assim foi possível a distribuição da tensão normal, sem concentração de tensão, conforme ilustrado nas Figura 9, Figura 10 e Figura 11. Contudo, no presente estudo, apenas se analisaram situações com tensão normal aplicada na interface de valor nulo.

Todo o processo de ensaio foi monitorizado, recorrendo ao método tradicional (registo de dados por LVDT's e células de carga adquiridos pelo *Datalooger*) e recorrendo ao método ótico-digital (aquisição de imagens e pós-processamento de dados), de modo a validar/comprovar que este método inovador de monitorização permite obter um completo conhecimento do comportamento estrutural do provete em todas as fases do ensaio (Costa, 2012).

3.2 Procedimento Fotogramétrico

O método aplicado para a análise dos provetes referidos, desenvolvido e apresentado em Valença, (2011), baseia-se nas seguintes etapas:

1. Preparação da superfície de betão, com marcação de uma grelha regular, com miras circulares, na superfície do provete;
2. Aquisição sequencial de fotografias ao longo do tempo de ensaio, considerando também a aquisição de dez imagens imediatamente antes do início do ensaio;
3. Pré-processamento de imagem de forma automática;
4. Detecção dos alvos em cada fase de monitorização (imagens captadas);
5. Orientação e escala do modelo nas diferentes fases de ensaio (instantes fotografados), através de matrizes de transformação de coordenadas, obtidas na fase inicial utilizando uma homografia;
6. Cálculo do campo de extensões e deformações, através dos deslocamentos registados por cada um dos alvos ao longo das fases de ensaio.

Nos subcapítulos seguintes faz-se a explicação mais detalhada de cada etapa.

3.2.1 Preparação da superfície do provete

A superfície do tardo de cada provete foi pintada com alvos circulares vermelhos, formando uma grelha regular com espaçamento entre grelhas de 10mm, nas direções horizontal e vertical.

Assim definiu-se uma grelha de 540 alvos, isto é, 27 colunas (direção vertical) e 20 linhas (direção horizontal).

Nas figuras seguintes, (Figuras 8, 9 e 10) apresenta-se a imagem inicial de cada ensaio, ilustrando a marcação das miras circulares na superfície dos provetes, bem como os varões roscados “*Dywidag*” ϕ 16mm e as placas de aço furadas (referenciadas em 3.1.3).

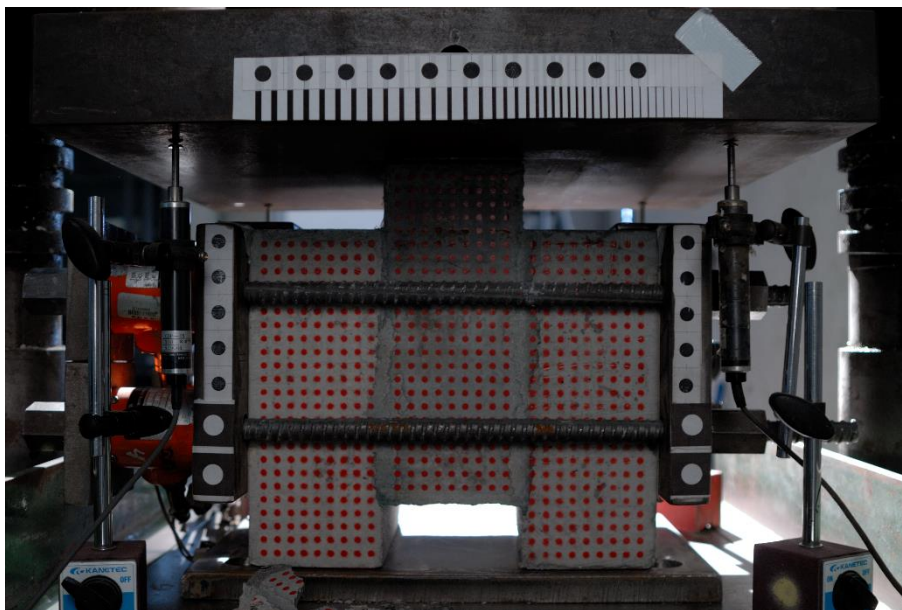


Figura 8 – Provete N2.4-G-H1.9-0Mpa - fotografias cedidas por Costa, (2012) e Valença (2011)

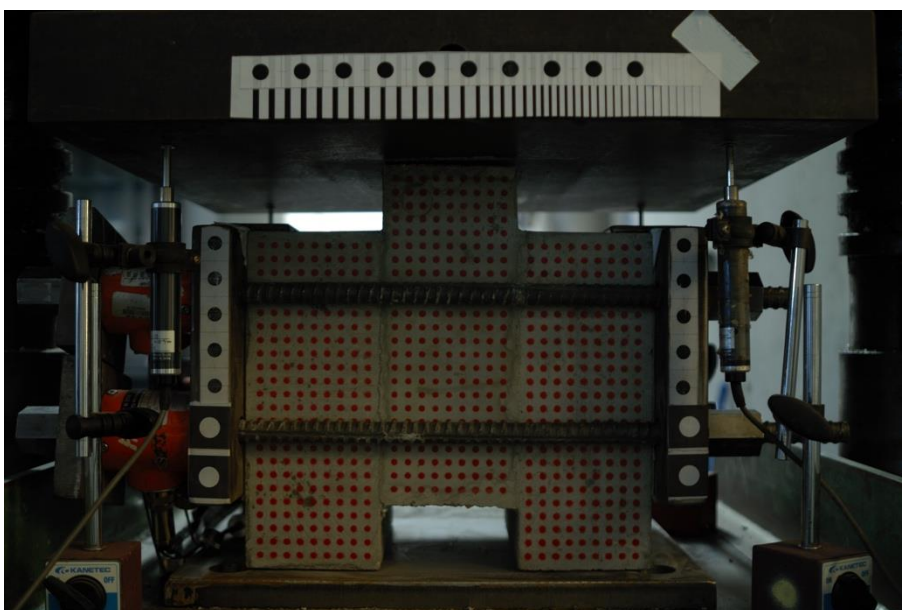


Figura 9 – Provete N2.4-G-N2.4-0Mpa - fotografias cedidas por Costa, (2012) e Valença (2011)

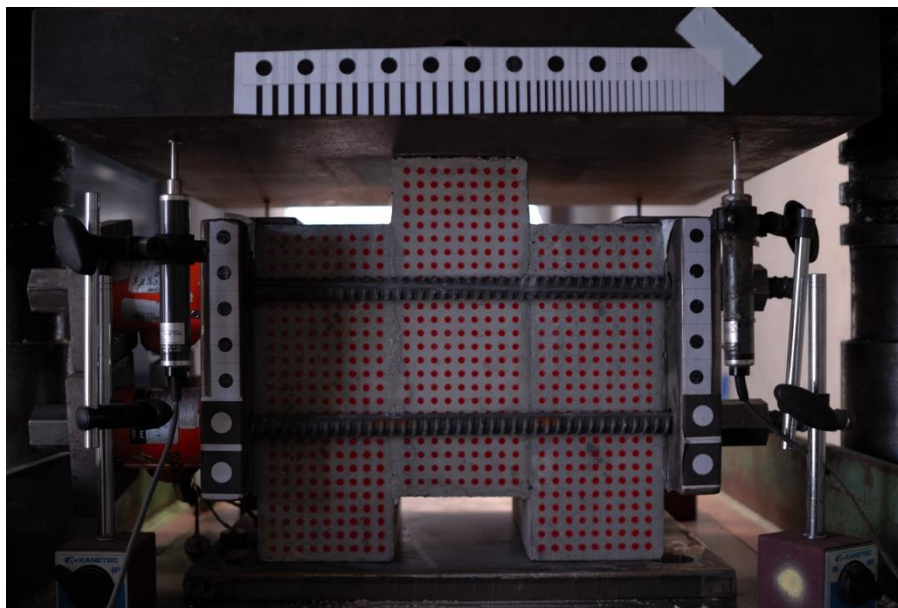


Figura 10 – Provete N2.4-L-N2.4-0Mpa - fotografias cedidas por Costa, (2012) e Valença (2011)

3.2.2 Detecção e Identificação das Miras

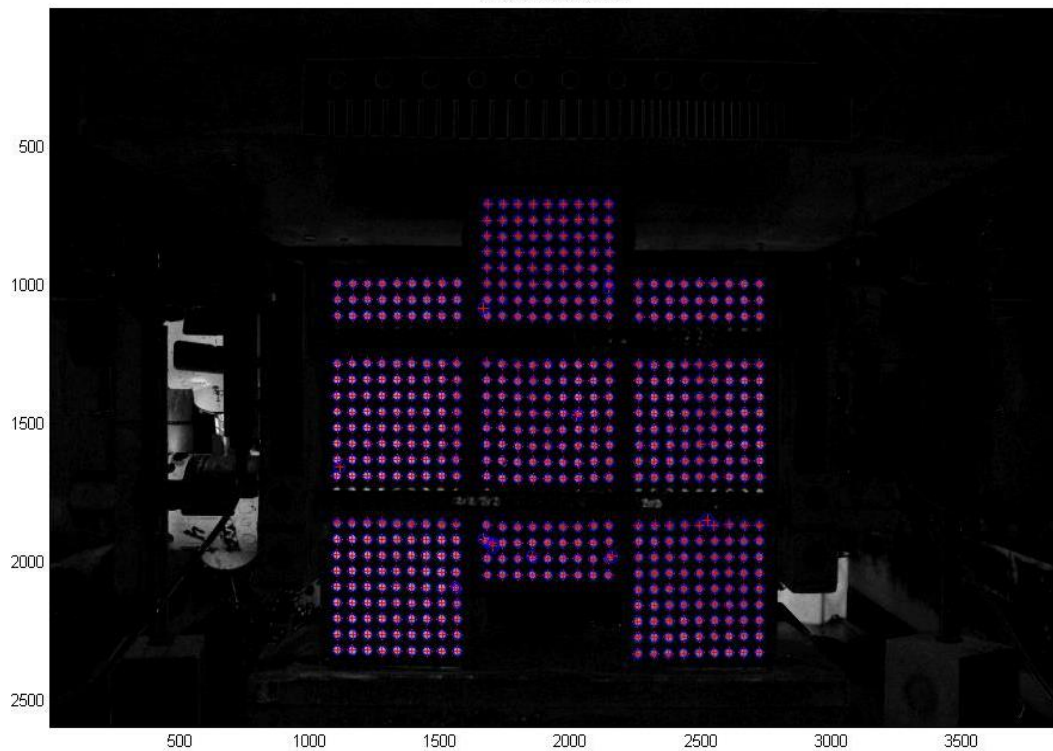
Tal como referido anteriormente, a máquina fotográfica manteve-se imóvel, durante todo o ensaio, de modo a ser possível obter resultados no mesmo sistema de coordenadas locais (x,y) em todas as fotografias do mesmo ensaio.

Aplicou-se o método desenvolvido em *Matlab* (Valença, 2012), executando-se a rotina ao longo dos seguintes passos:

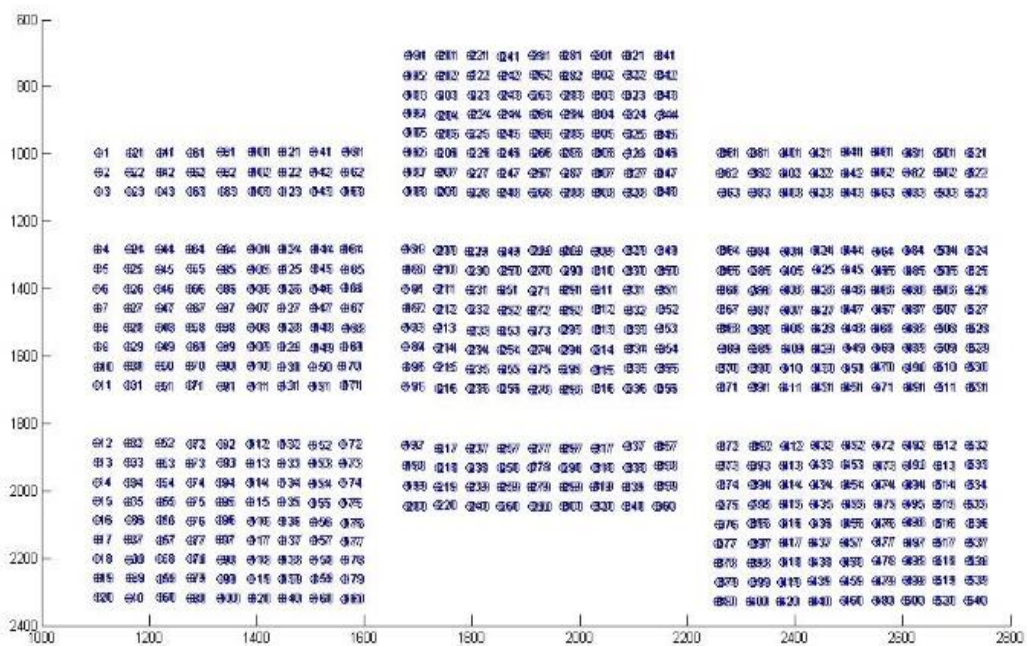
1. Importação da imagem e introdução da foto da fase do ensaio que se pretende analisar;
2. Introdução do raio médio das miras (unidade de medida *pixels*);
3. Introdução da variação do raio (unidade de medida *pixels*).
4. Seleção e deteção das miras;
5. Transformação através da matriz de homografia, das unidades *pixels* para milímetros;
6. Ordenação das miras e obtenção das coordenadas *xy*.

Assim, para cada provete e em cada fase de ensaio (imagem captada) aplicaram-se as rotinas do método desenvolvido em *Matlab* (Valença, 2012), obtendo-se assim o mapeamento de todos os alvos (deteção de miras) e a ordenação dos mesmos (numeração sequencial em sentido descendente e da esquerda para a direita), conforme ilustrado nas figuras seguintes.

Final circles detected

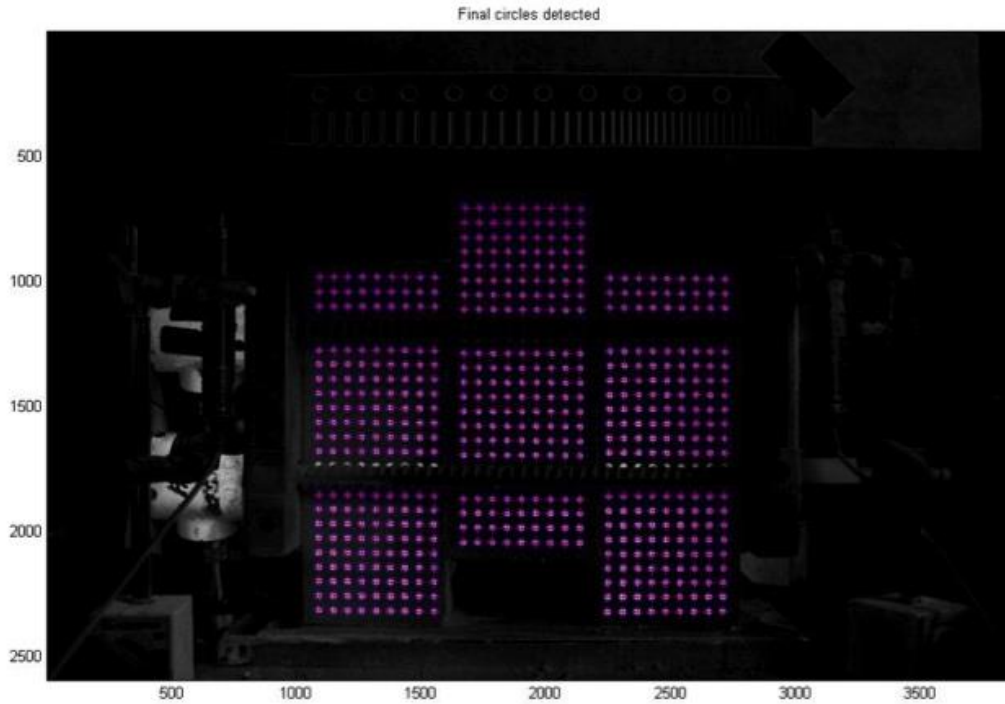


(a)

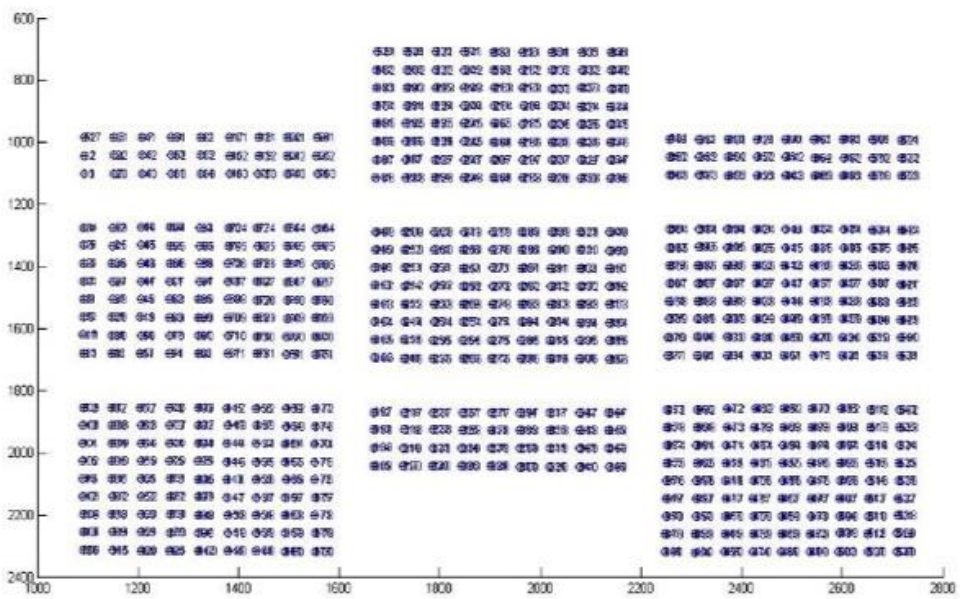


(b)

Figura 11 – Ensaio N2.4-G-H1.9-0Mpa: detecção (a) e identificação (b) dos alvos

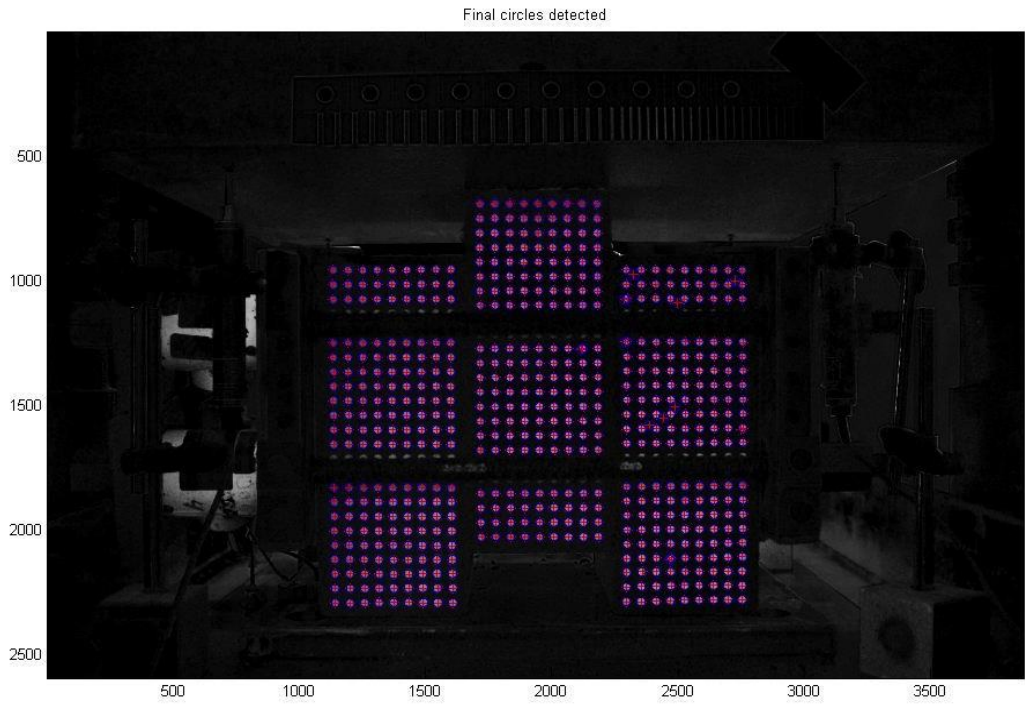


(a)

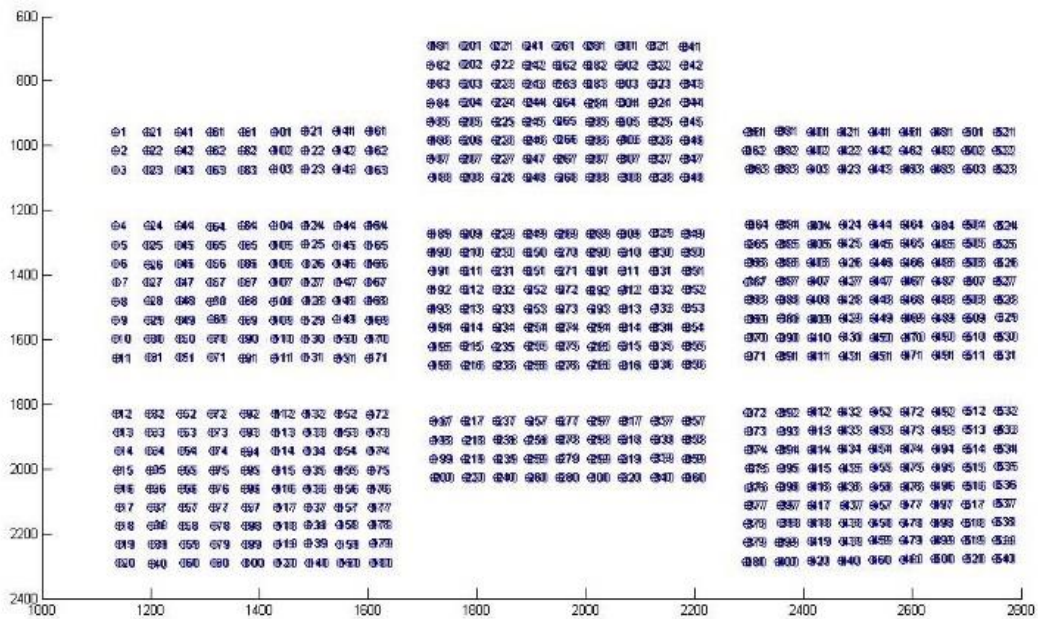


(b)

Figura 12 – Ensaio N2.4-G-N2.4-0Mpa: detecção (a) e identificação (b) dos alvos



(a)



(b)

Figura 13 – Provete N2.4-L-N2.4-0Mpa: detecção (a) e identificação (b) dos alvos

De seguida, os dados foram exportados para uma folha de *Excel* (coordenadas em *pixels* de cada fase de ensaio), para que fossem posteriormente transformadas em coordenadas em milímetros, conforme exemplificado para os primeiros vinte e cinco alvos (Tabela 1).

Tabela 1 – Coordenadas em *pixels* da primeira fase de ensaio de cada provete

Provete N2.4-G-H1.9-0Mpa Imagem 1 (DSC_0192)			Provete N2.4-G-N2.4-0Mpa Imagem 1 (DSC_0216)			Provete N2.4-L-N2.4-0MPa Imagem 1 (DSC_0110)		
Mira nº	x	y	Mira nº	x	y	Mira nº	x	y
1	1109,822	1002,003	1	1099,691	1008,919	1	1136,951	994,025
2	1108,695	1060,836	2	1099,189	1067,039	2	1137,498	1051,914
3	1108,736	1118,212	3	1098,965	1124,980	3	1137,502	1109,470
4	1107,070	1290,035	4	1098,296	1299,045	4	1135,981	1285,089
5	1105,935	1347,704	5	1097,233	1357,017	5	1136,100	1342,599
6	1105,801	1406,999	6	1097,592	1414,955	6	1136,546	1401,364
7	1106,088	1463,288	7	1096,833	1472,493	7	1136,696	1458,624
8	1107,082	1521,638	8	1096,979	1530,215	8	1137,049	1515,404
9	1105,556	1578,896	9	1096,500	1587,900	9	1137,876	1573,820
10	1106,284	1637,087	10	1095,805	1646,507	10	1138,147	1630,443
11	1105,256	1694,041	11	1096,456	1703,645	11	1138,003	1689,507
12	1105,505	1865,474	12	1095,788	1876,958	12	1140,701	1920,568
13	1104,459	1923,884	13	1095,299	1934,601	13	1139,668	1977,724
14	1104,437	1981,029	14	1094,956	1991,713	14	1140,426	2035,594
15	1104,807	2037,045	15	1095,020	2049,111	15	1142,047	2093,102
16	1104,611	2094,328	16	1094,733	2107,463	16	1142,066	2150,762
17	1105,503	2151,198	17	1094,325	2163,884	17	1142,129	2207,284
18	1105,099	2208,914	18	1094,864	2221,086	18	1142,294	2266,120
19	1105,761	2265,588	19	1095,706	2278,255	19	1143,776	2323,796
20	1106,277	2323,586	20	1095,823	2336,528	20	1195,891	993,482
21	1167,446	1002,821	21	1157,962	1008,584	21	1195,198	1052,254
22	1166,309	1061,155	22	1157,015	1066,879	22	1195,521	1109,443
23	1166,302	1117,562	23	1156,891	1125,804	23	1195,900	1284,701
24	1163,414	1289,819	24	1155,753	1299,077	24	1195,005	1343,390
25	1163,309	1348,705	25	1155,217	1356,620	25	1194,835	1400,477
(...)	(...)	(...)	(...)	(...)	(...)	(...)	(...)	(...)

3.2.3 Homografia

Como referenciado anteriormente, a matriz da homografia foi utilizada em cada fase de ensaio, utilizando-se o valor médio das coordenadas dos alvos de dez imagens adquiridas consecutivamente na fase inicial, conforme descrito no subcapítulo (2.2.3).

Assim, sabendo as coordenadas em *pixels* de cada mira (Tabela 1), foi possível transformá-las em coordenadas em milímetros, de modo a avaliar e comparar os valores de deslocamento e extensão, obtidos pelo método tradicional (Valença, 2012).

De modo a exemplificar o processo de transformação, na Tabela 2 apresenta-se a Matriz de Homografia utilizadas no provete N2.4-G-H1.9-0Mpa e na Tabela 3, os valores das primeiras vinte e cinco coordenadas das miras antes (*pixels*) e após (mm) o processo de Homografia.

Tabela 2 – Matriz Homografia do Provete N2.4-G-H1.9-0Mpa

-0,0008	5,08E-06	0,857454
1,13E-06	-0,0008	0,514538
2,35E-08	2,12E-08	-0,00472

Tabela 3 – Transformação de coordenadas em *pixels* para milímetros do Provete N2.4-G-H1.9-0Mpa

Provete N2.4-G-H1.9-0Mpa Coordenadas em <i>pixels</i> da Imagem 1 (DSC_0192)			Provete N2.4-G-H1.9-0Mpa Coordenadas em mm da Imagem 1 (DSC_0192)		
Mira nº	x	y	Mira nº	x	y
1	1109,822	1002,003	1	5,768	61,398
2	1108,695	1060,836	2	5,513	71,498
3	1108,736	1118,212	3	5,459	81,354
4	1107,070	1290,035	4	4,990	110,898
5	1105,935	1347,704	5	4,734	120,824
6	1105,801	1406,999	6	4,648	131,036
7	1106,088	1463,288	7	4,637	140,735
8	1107,082	1521,638	8	4,746	150,795
9	1105,556	1578,896	9	4,422	160,671
10	1106,284	1637,087	10	4,485	170,714
11	1105,256	1694,041	11	4,248	180,547
12	1105,505	1865,474	12	4,107	210,180
13	1104,459	1923,884	13	3,864	220,286
14	1104,437	1981,029	14	3,799	230,179
15	1104,807	2037,045	15	3,803	239,882
16	1104,611	2094,328	16	3,708	249,809
17	1105,503	2151,198	17	3,800	259,670
18	1105,099	2208,914	18	3,669	269,682
19	1105,761	2265,588	19	3,722	279,520
20	1106,277	2323,586	20	3,749	289,593
21	1167,446	1002,821	21	15,649	61,542
22	1166,309	1061,155	22	15,394	71,560
23	1166,302	1117,562	23	15,336	81,252
24	1163,414	1289,819	24	14,665	110,879
25	1163,309	1348,705	25	14,586	121,018
(..)	(..)	(..)	(..)	(..)	(..)

3.2.4 Avaliação do Erro

Foi também necessário ter em consideração o erro do algoritmo de deteção dos alvos, proveniente das diferenças de coordenadas entre os centros das miras.

Este erro foi avaliado através da precisão Erro Médio Quadrático (RMS – *Root Mean Square*), tendo-se registado um erro médio de 0,027 mm, com um mínimo de 0,011 mm e um máximo de 0,084 mm.

Quanto à homografia obteve-se um valor médio de 0,241 mm e os valores mínimo e máximo foram, respetivamente, 0,022 mm e 0,875 mm.

De notar que o erro da homografia é sistemático e afeta as coordenadas reais de cada *pixel*, no entanto, uma vez que apenas são necessários deslocamentos relativos durante as fases seguintes do método desenvolvido em *Matlab*, a precisão nos deslocamentos pode ser considerada aproximadamente igual à precisão do procedimento de deteção do alvo, ou seja, 0,027 mm (Valença, 2012).

3.3 Parâmetros Estudados

Foram utilizados, para cada provete, um conjunto de imagens captadas ao longo do ensaio laboratorial, através das quais foi possível iniciar o processo de análise.

Foram analisadas em detalhe as seguintes zonas: (i) zonas das duas interfaces; (ii) zona do topo carregado do elemento central dos provetes; zona das extremidades laterais dos provetes.

Foi considerado o estudo experimental referido (Costa, 2012), considerando um betão do substrato, dois tipos de betão adicionado e diferentes tipos de rugosidade do substrato e realizou-se uma análise estrutural em zonas específicas dos provetes, nomeadamente:

- (i) análise da deformação ao nível das interfaces e estimativa do valor do módulo de elasticidade transversal (G) ao nível das interfaces;
- (ii) determinação da extensão e do módulo de elasticidade (E) do betão adicionado na parte superior carregada do provete;
- (iii) análise da dilatação ao nível da interface;
- (iv) análise dos deslocamentos ao nível das interfaces e comparação com a medição pelos LVDT's.

4. PROCESSAMENTO DE DADOS E ANÁLISE DE RESULTADOS

4.1 Aquisição de Imagens do Ensaio

A monitorização do comportamento estrutural dos provetes foi realizada recorrendo a técnicas de monitorização tradicional e ótico-digital.

A monitorização tradicional foi realizada no âmbito do trabalho já referido (Costa, 2012), sendo os valores registados pelos LVDT's utilizados na presente dissertação.

Durante os ensaios realizados no âmbito da referida dissertação, foi realizada a monitorização ótico-digital, através da aquisição das imagens utilizando uma câmara digital de baixo custo, processo definido por Valença (2011).

Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados obtidos pela avaliação dos deslocamentos e das deformações dos provetes ensaiados por duplo corte direto, até à rotura, usando o método já desenvolvido na avaliação do comportamento estrutural de elementos de betão, associando as técnicas de fotogrametria e do *software* de processamento de imagem (Valença, 2011).

De modo a exemplificar a evolução de cada ensaio, apresentam-se as imagens captadas na primeira e na última fase de cada ensaio, através de fotografias cedidas por Costa (2012) e Valença (2011), onde é possível verificar os deslocamentos e aparecimento de fendas na junto às interfaces na superfície do tardo dos provetes, durante a ação de carregamento.

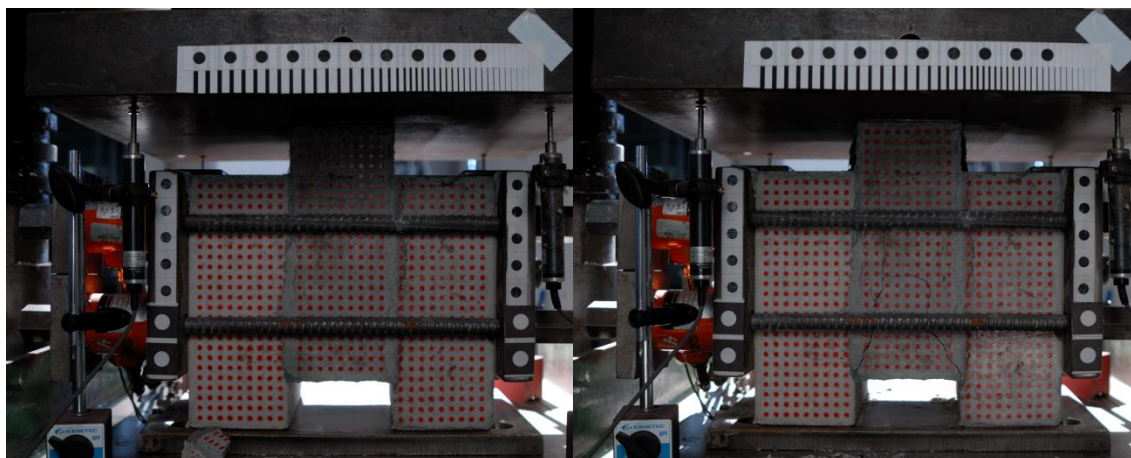


Figura 14 – Evolução (primeira e última fase) do Provete N2.4-G-H1.9-0MPa (fotografias de Costa, 2012, e de Valença, 2011)

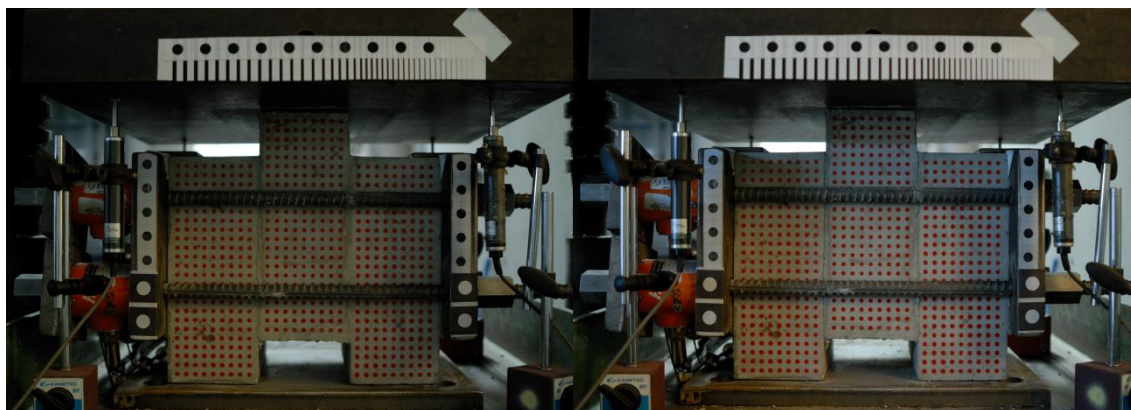


Figura 15 – Evolução (primeira e última fase) do Provete N2.4-G-N2.4-0MPa (fotografias de Costa, 2012, e de Valença, 2011)

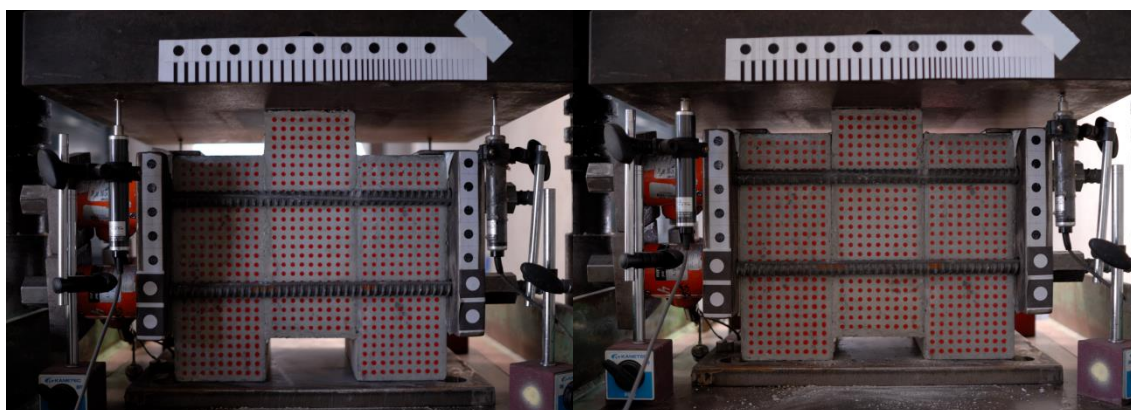


Figura 16 – Evolução (primeira e última fase) do Provete N2.4-L-N2.4-0MPa (fotografias de Costa, 2012, e de Valença, 2011)

4.2 Pontos de Análise

No sentido de atingir os objetivos definidos, foram escolhidos e analisados alguns pontos ao longo dos ensaios laboratoriais, sendo estes definidos com base na análise da curva carga-tempo de cada ensaio.

Nas tabelas seguintes (Tabelas 4, 5 e 6) são identificadas as fases dos ensaios analisadas em cada um dos três ensaios, identificando também quais as imagens captadas, correspondentes aos pontos que se pretende analisar e assim o número de fases corresponde ao número de fotografias analisadas.

É possível também, analisando as tabelas seguintes, verificar os valores da força vertical aplicada pela prensa, F_a , e qual o deslocamento médio, registado pelos LVDT's, dm , para cada fase de ensaio.

Tabela 4 – Pontos de Análise do Ensaio N2.4-G-H1.9-0MPa

Fases	Pontos			Tempo do ensaio(s)	Imagem		dm(mm)	Fa(kN)	Tempo do ensaio(s)
	Tempo	dm(mm)	Fa(KN)		Nome	Tempo			
0					DSC_0184	17:25:43			
1	17:29:03	0,581	515,5	00:02:16	DSC_0192	17:29:14	597,11	0,70	0:02:27
2	17:29:49	1,089	849,4	00:03:02	DSC_0194	17:30:11	643,04	1,61	0:03:24
3	17:29:51	1,160	663,3	00:03:04	DSC_0195	17:30:27	648,53	1,89	0:03:39
4	17:29:56	1,304	781,6	00:03:09	DSC_0196	17:31:00	613,27	2,37	0:04:13
5	17:30:07	1,539	637,9	00:03:20					
6	17:30:55	2,308	607,0	00:04:08					
					DSC_0196	19:31:00	596,42	15,67	0:12:06

Tabela 5 – Pontos de Análise do Ensaio N2.4-G-N2.4-0MPa

Fases	Pontos			Tempo do ensaio(s)	Imagem		dm(mm)	Fa(kN)	Tempo do ensaio(s)
	Tempo	dm(mm)	Fa(KN)		Nome	Tempo			
0	18:32:59	0,000	0,0	00:00:00	DSC_0216	18:32:59	0,00	0,00	00:00:00
1	18:35:01	0,189	117,4	00:02:02	DSC_0217	18:35:01	0,19	117,40	00:02:02
2	18:35:12	0,430	307,2	00:02:13					
3	18:35:16	0,468	190,2	00:02:17					
4	18:35:46	0,734	254,6	00:02:47					
5	18:35:55	0,920	184,3	00:02:56	DSC_0218	18:35:55	0,92	184,31	00:02:56
6	18:38:48	3,967	211,0	00:05:49	DSC_0219	18:38:48	3,97	210,95	00:05:49

Tabela 6 – Pontos de Análise do Ensaio N2.4-L-N2.4-0MPa

Fases	Pontos			Tempo do ensaio(s)	Imagem		dm(mm)	Fa(kN)	Tempo do ensaio(s)
	Tempo	dm(mm)	Fa(KN)		Nome	Tempo			
0	12:24:08	0,000	0,0		DSC_0110	12:23:11			
1	12:25:20	0,156	24,8	00:01:12	DSC_0113	12:24:53	0,11	16,0	0:00:45
2	12:25:23	0,260	42,9	00:01:15	DSC_0114	12:25:04	0,11	15,5	0:00:56
3	12:25:25	0,435	26,7	00:01:17	DSC_0115	12:25:29	0,46	28,0	0:01:21
4	12:25:55	0,745	47,9	00:01:47	DSC_0116	12:25:31	0,49	28,9	0:01:24
5	12:26:17	1,330	29,2	00:02:09	DSC_0117	12:28:47	5,31	33,7	0:04:39
6	12:26:38	1,698	31,3	00:02:30	DSC_0118	12:34:49	16,32	33,4	0:10:40
7	12:27:04	2,083	30,2	00:02:56	DSC_0122	12:35:04	16,80	35,2	0:10:56

4.3 Definição da Curva Carga/Tempo de Ensaio

Nesta secção são apresentadas as curvas de força aplicada em função do tempo referente aos provetes analisados, utilizando os resultados obtidos pelos LVDT's e registados pelo *Datalogger*.

Assim, nos gráficos seguintes (Figura 17, 18 e 19) estão indicados a azul todos os pontos da evolução do ensaio, através dos quais, foram determinadas as fases do ensaio a analisar. Estas fases estão definidas pelos pontos de cor laranja (Pontos escolhidos para analisar).

Depois, de todas imagens captadas ao longo do ensaio, foi necessário escolher as fotografias que mais se aproximassem do tempo das fases de ensaio definidas (Pontos definidos para análise). As fases de ensaio estipuladas para análise, estão definidas em pontos verdes nos gráficos Carga-Tempo de Ensaio do Provede.

Como é possível verificar, nos dois primeiros gráficos (Figuras 17 e 18), apenas foi possível definir quatro fases de ensaio para análise. Contrariamente, para o ensaio do Provede N2.4-L-N2.4-0MPa (Figura 19) foi possível estabelecer sete fases de ensaio, embora alguns pontos distem bastante dos pontos alvo.

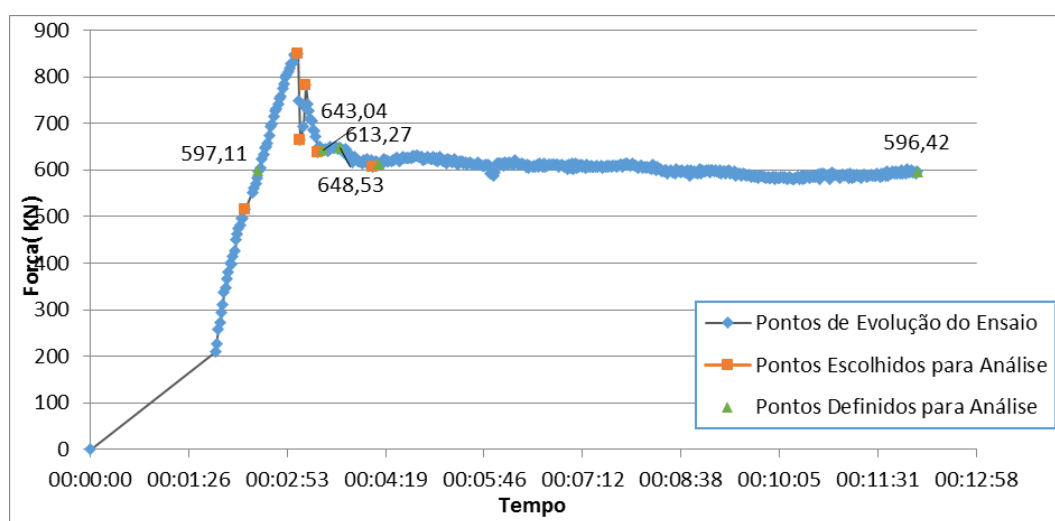


Figura 17 – Gráfico Carga/Tempo de Ensaio do Provede N2.4-G-H1.9-0MPa

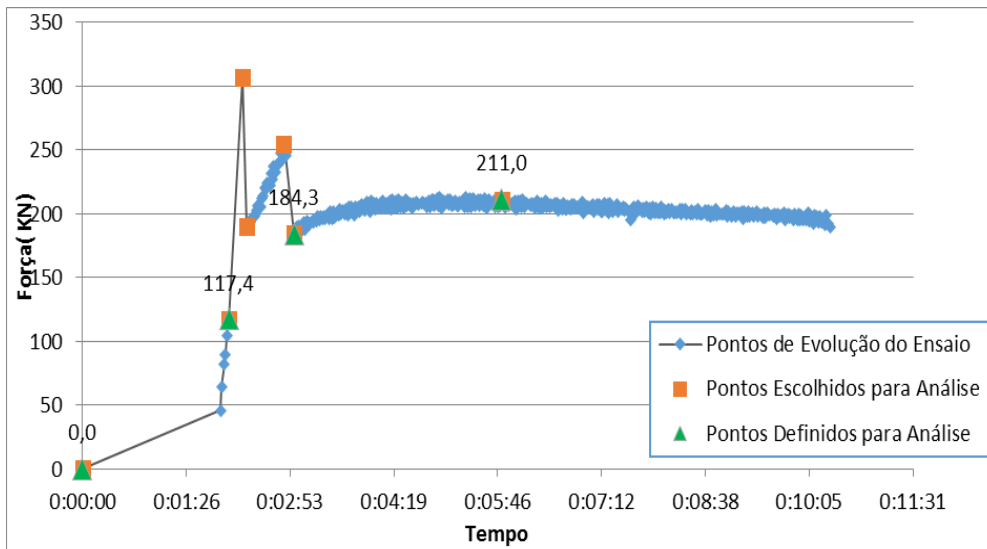


Figura 18 – Gráfico Carga/Tempo de Ensaio do Provete N2.4-G-N2.4-0Mpa

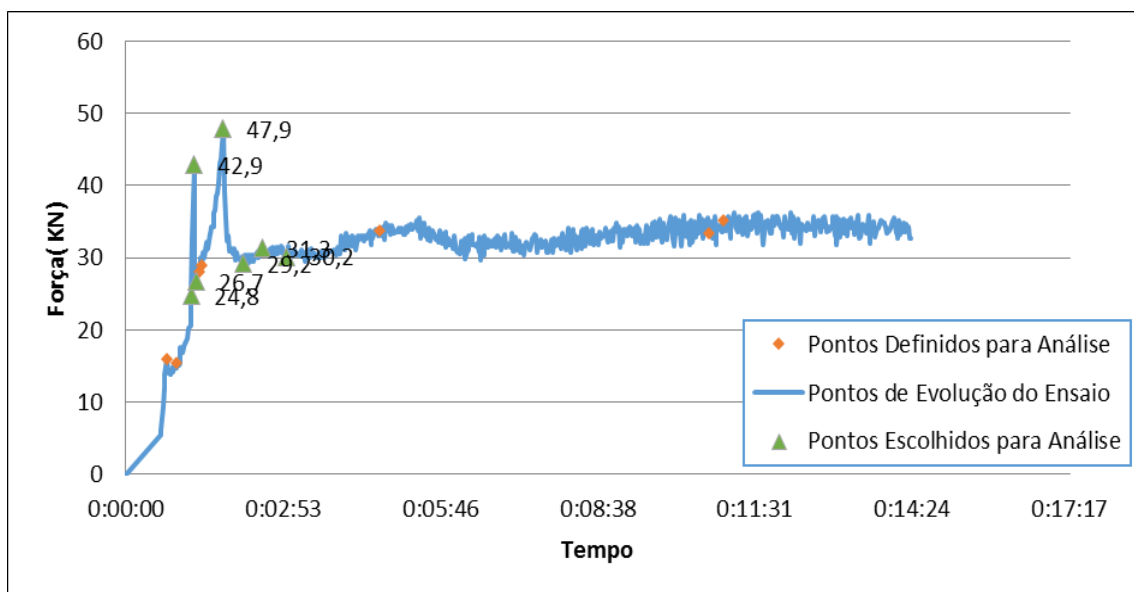


Figura 19 – Gráfico Carga/Tempo de Ensaio do Provete N2.4-L-N2.4-0MPa

4.4 Deslocamentos

Após a detecção, numeração e identificação das coordenadas (x,y) de cada alvo, foi realizada a transformação das coordenadas de *pixels* para mm, aplicando uma Homografia (matriz Homografia calculada na Secção 3.2.3) e posteriormente foi calculado o deslocamento de todos os alvos detetados, pela diferença de valores de coordenadas em milímetros de cada mira.

Com os valores de coordenadas em milímetros, para além da análise dos deslocamentos, foi realizado o estudo quanto à evolução da distância entre cada mira ($\Delta\delta = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}$) e quanto à evolução do ângulo de rotação ($\Delta\theta = \arctg(\Delta y/\Delta x)$).

De seguida, apresentam-se os valores das primeiras vinte e cinco coordenadas dos alvos, na primeira e na última fase de cada ensaio (tabelas 7, 8 e 9), de forma exemplificativa do processo e os gráficos representativos da evolução das coordenadas (Figuras 20, 21 e 22).

Tabela 7 – Valores de Evolução de Deslocamentos (mm)-Provete N2.4-G-H1.9-0MPa

Primeira Fase Imagem 1 - DSC_0192			Última Fase Imagem 5 - DSC_0196						
Mira nº	x	y	Mira nº	x	y	Δx	Δy	$\Delta \delta$	$\Delta \theta$
1	5,768	61,398	1	5,078	60,235	-0,690	-1,163	1,353	1,035
2	5,513	71,498	2	4,945	70,105	-0,567	-1,393	1,504	1,184
3	5,459	81,354	3	4,982	80,042	-0,477	-1,312	1,396	1,222
4	4,990	110,898	4	4,491	109,674	-0,499	-1,224	1,322	1,184
5	4,734	120,824	5	4,335	119,655	-0,399	-1,170	1,236	1,242
6	4,648	131,036	6	4,067	129,955	-0,581	-1,081	1,227	1,078
7	4,637	140,735	7	4,189	139,574	-0,448	-1,161	1,245	1,202
8	4,746	150,795	8	4,148	149,484	-0,598	-1,311	1,441	1,143
9	4,422	160,671	9	4,105	159,324	-0,317	-1,346	1,383	1,340
10	4,485	170,714	10	4,184	169,606	-0,301	-1,108	1,148	1,306
11	4,248	180,547	11	3,862	179,299	-0,386	-1,249	1,307	1,271
12	4,107	210,180	12	3,695	209,015	-0,412	-1,165	1,236	1,231
13	3,864	220,286	13	3,714	218,995	-0,151	-1,291	1,300	1,454
14	3,799	230,179	14	3,355	228,942	-0,444	-1,236	1,314	1,226
15	3,803	239,882	15	3,501	238,681	-0,302	-1,201	1,238	1,324
16	3,708	249,809	16	3,360	248,632	-0,348	-1,176	1,227	1,283
17	3,800	259,670	17	3,508	258,514	-0,292	-1,156	1,193	1,323
18	3,669	269,682	18	3,320	268,548	-0,349	-1,134	1,187	1,272
19	3,722	279,520	19	3,455	278,351	-0,267	-1,169	1,199	1,346
20	3,749	289,593	20	3,415	288,309	-0,334	-1,284	1,327	1,317
21	15,649	61,542	21	15,094	60,284	-0,555	-1,258	1,375	1,155
22	15,394	71,560	22	14,832	70,124	-0,562	-1,436	1,542	1,198
23	15,336	81,252	23	14,753	79,955	-0,583	-1,297	1,422	1,148
24	14,665	110,879	24	14,480	109,602	-0,184	-1,277	1,290	1,427
25	14,586	121,018	25	14,182	119,672	-0,404	-1,346	1,405	1,279
(...)	(...)	(...)	(...)	(...)	(...)	(...)	(...)	(...)	(...)

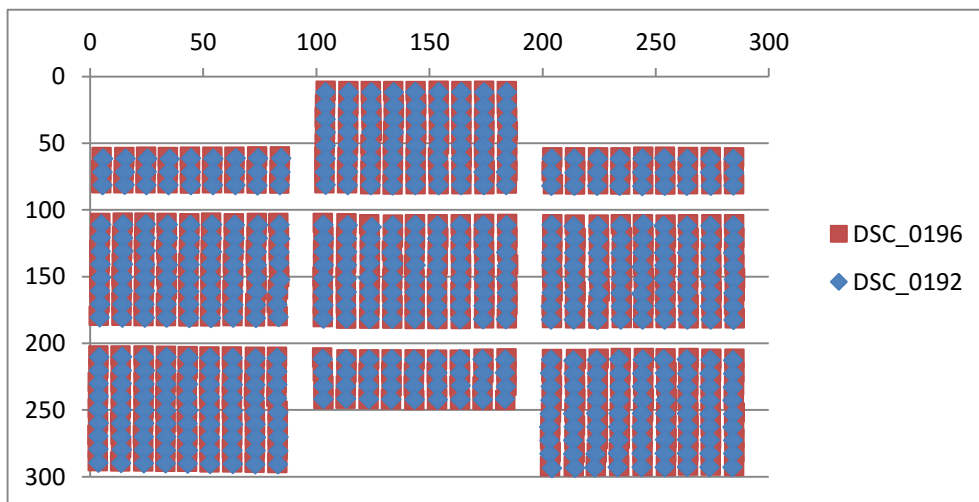


Figura 20 – Gráfico de Evolução de Deslocamentos (mm)-Provete N2.4-G-H1.9-0MPa

Tabela 8 – Valores de Evolução de Deslocamentos (mm)-Provete N2.4-G-N2.4-0MPa

Primeira Fase Imagem 1 - DSC_0216			Última Fase Imagem 4 - DSC_0219						
Mira nº	x	y	Mira nº	x	y	Δx	Δy	$\Delta \delta$	$\Delta \theta$
1	4,024	62,584	1	3,112	58,214	-0,912	-4,370	4,465	1,365
2	3,876	72,562	2	2,908	68,274	-0,968	-4,288	4,396	1,349
3	3,776	82,515	3	2,749	78,200	-1,027	-4,315	4,436	1,337
4	3,475	112,446	4	2,485	108,269	-0,990	-4,177	4,292	1,338
5	3,230	122,425	5	2,299	118,003	-0,931	-4,421	4,518	1,363
6	3,230	132,403	6	2,206	128,084	-1,024	-4,320	4,439	1,338
7	3,038	142,317	7	2,122	137,999	-0,915	-4,319	4,415	1,362
8	3,001	152,269	8	2,008	147,922	-0,993	-4,347	4,459	1,346
9	2,856	162,219	9	1,919	157,916	-0,937	-4,303	4,404	1,356
10	2,674	172,333	10	1,744	167,895	-0,930	-4,439	4,535	1,364
11	2,724	182,200	11	1,772	178,028	-0,952	-4,172	4,280	1,346
12	2,423	212,158	12	1,618	208,305	-0,805	-3,853	3,937	1,365
13	2,276	222,133	13	1,491	217,961	-0,785	-4,172	4,245	1,385
14	2,155	232,020	14	1,361	227,857	-0,795	-4,164	4,239	1,382
15	2,104	241,963	15	1,274	237,857	-0,831	-4,106	4,189	1,371
16	1,992	252,076	16	1,236	247,995	-0,756	-4,081	4,150	1,388
17	1,861	261,859	17	1,205	257,865	-0,655	-3,993	4,047	1,408
18	1,892	271,783	18	1,275	267,654	-0,617	-4,129	4,175	1,423
19	1,975	281,708	19	1,183	277,588	-0,792	-4,120	4,195	1,381
20	1,932	291,829	20	1,181	287,742	-0,751	-4,087	4,155	1,389
21	14,016	62,531	21	13,007	58,187	-1,009	-4,344	4,460	1,343
22	13,794	72,542	22	12,769	68,267	-1,025	-4,275	4,396	1,336
23	13,712	82,667	23	12,675	78,236	-1,037	-4,431	4,551	1,341
24	13,339	112,470	24	12,355	108,199	-0,985	-4,271	4,383	1,344
25	13,188	122,378	25	12,151	118,048	-1,037	-4,330	4,453	1,336
(...)	(...)	(...)	(...)	(...)	(...)	(...)	(...)	(...)	(...)

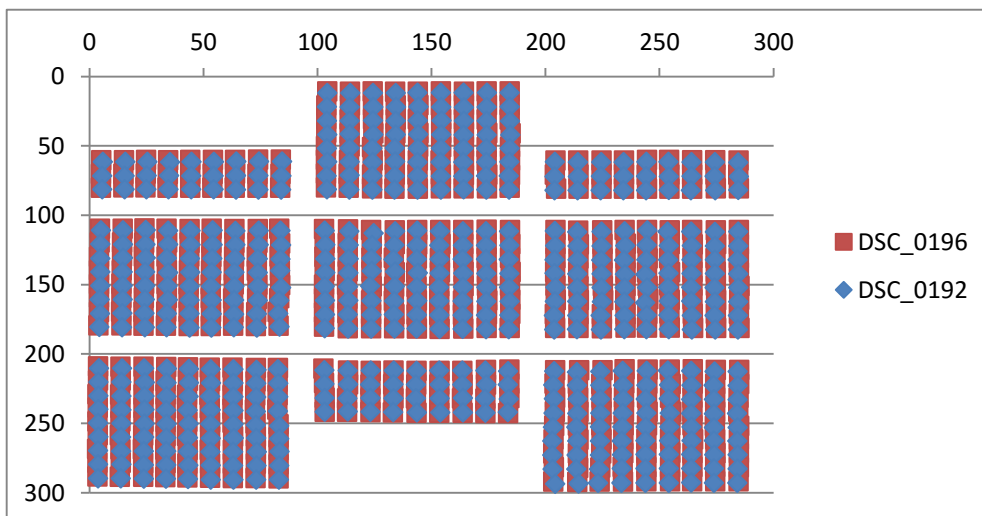


Figura 21 – Gráfico de Evolução de Deslocamentos (mm)-Provete N2.4-G-N2.4-0MPa

Tabela 9 – Valores de Evolução de Deslocamentos (mm)-Provete N2.4-L-N2.4-0MPa

Primeira Fase Imagem 1 - DSC_0110			Última Fase Imagem 8 - DSC_0123						
Mira nº	x	y	Mira nº	x	y	Δx	Δy	$\Delta \delta$	$\Delta \theta$
1	10,428	60,030	1	10,204	35,980	-0,224	-24,050	24,051	1,561
2	10,461	69,969	2	9,992	45,920	-0,470	-24,049	24,054	1,551
3	10,402	79,857	3	10,033	56,066	-0,369	-23,790	23,793	1,555
4	9,959	110,056	4	9,623	85,976	-0,336	-24,081	24,083	1,557
5	9,919	119,956	5	9,883	96,058	-0,036	-23,898	23,898	1,569
6	9,935	130,078	6	9,497	105,927	-0,437	-24,151	24,155	1,553
7	9,901	139,945	7	9,868	115,946	-0,032	-23,999	23,999	1,569
8	9,902	149,736	8	9,502	125,863	-0,400	-23,873	23,876	1,554
9	9,983	159,813	9	9,493	135,900	-0,491	-23,913	23,918	1,550
10	9,971	169,586	10	9,359	145,967	-0,612	-23,619	23,627	1,545
11	9,884	179,786	11	9,557	156,067	-0,327	-23,719	23,721	1,557
12	10,107	219,743	12	9,899	196,025	0,029	-33,613	33,613	-1,570
13	9,870	229,639	13	9,923	206,027	-0,017	-33,638	33,638	1,570
14	9,940	239,665	14	9,664	216,115	-0,496	-33,519	33,523	1,556
15	10,159	249,634	15	9,637	226,096	-0,465	-33,538	33,541	1,557
16	10,102	259,634	16	10,063	236,029	0,010	-33,412	33,412	-1,571
17	10,054	269,441	17	9,809	245,997	-0,212	-33,658	33,659	1,565
18	10,021	279,655	18	9,867	256,218	-0,350	-33,457	33,459	1,560
19	10,216	289,675	19	9,866	266,424	-10,671	206,483	206,759	-1,519
20	20,538	59,941	20	20,123	35,936	-0,237	-34,098	34,099	1,564
21	20,360	70,034	21	20,076	45,906	-0,283	-33,955	33,956	1,562
22	20,359	79,861	22	20,031	55,937	-0,219	-54,071	54,071	1,567
23	20,250	110,008	23	19,759	85,768	-0,279	-34,346	34,347	1,563
24	20,038	120,114	24	19,746	95,999	-0,205	-33,950	33,950	1,565
25	19,951	129,949	25	19,620	105,964	-0,370	-33,938	33,940	1,560
(...)	(...)	(...)	(...)	(...)	(...)	(...)	(...)	(...)	(...)

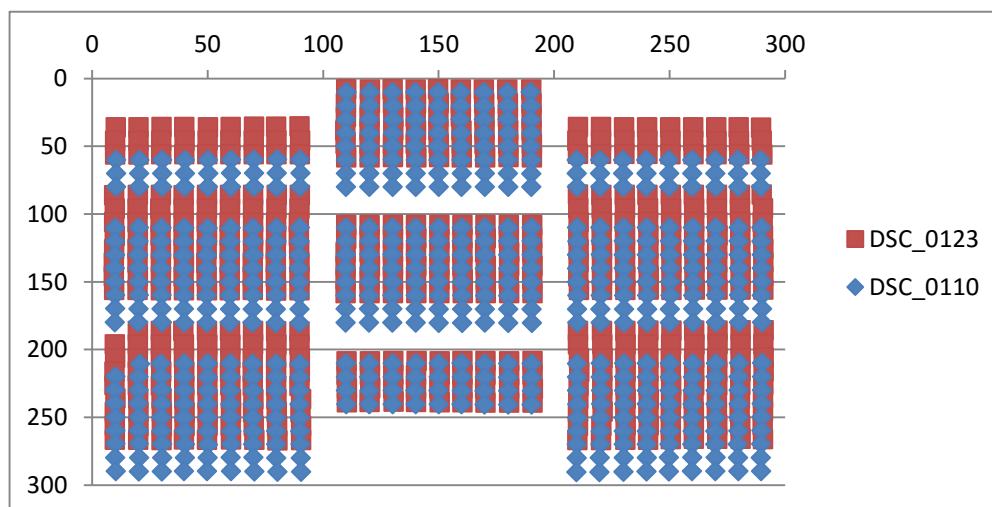


Figura 22 – Gráfico de Evolução de Deslocamentos (mm)-Provete N2.4-L-N2.4-0MPa

Conforme é possível verificar nos valores de coordenadas e nos gráficos, o provete N2.4-L-N2.4-0MPa é o que apresenta maiores diferenças nos valores das coordenadas, pois devido à superfície lisa das interfaces (L), as partes laterais do provete têm mais liberdade de movimento vertical ascendente, com reduzido atrito.

Foi realizada uma comparação da evolução dos deslocamentos obtida através de Fotogrametria e com os LVDTs, de forma a detetar possíveis erros grosseiros provenientes de possíveis movimentos de corpo rígido da câmara durante o ensaio..

Assim, com os valores obtidos pelos quatro LVDT's, colocados nos pratos da prensa de ensaio, realizou-se uma análise linear dos deslocamentos. Aplicou-se então o conjunto de equações (3), de modo a extrapolar, através da posição de cada LVDT, o valor de deslocamento em qualquer ponto do provete. As equações referem-se a uma das interfaces e procedeu-se da mesma forma para a outra interface. Refira-se que, em planta, os provetes foram centrados e os LVDT's foram colocados junto aos cantos dos pratos rígidos da prensa, afastando-se estes 400 mm em cada direção.

$$\begin{aligned}
 d_1 &= \frac{(df_d - df_e)}{400} \times 150 + df_e \\
 d_2 &= \frac{(dt_d - dt_e)}{400} \times 150 + dt_e \\
 D &= \frac{(d_1 - d_2)}{400} \times 100 + d_2
 \end{aligned} \tag{3}$$

Onde:

- d_{fe} – deslocamento registado pelo LVDT da posição frente esquerda da prensa de ensaio, medido em mm;
- d_{fd} – deslocamento registado pelo LVDT da posição frente direita da prensa de ensaio, medido em mm;
- d_{te} – deslocamento registado pelo LVDT da posição tardoz esquerda da prensa de ensaio, medido em mm;
- d_{td} – deslocamento registado pelo LVDT da posição tardoz direita da prensa de ensaio, medido em mm.
- D – deslocamento calculado para a face do provete, em mm.

Como termo de comparação de deformação, ϵ_d , em relação aos valores de deslocamentos obtidos com os LVDT's e através do conjunto de pontos da Fotogrametria, utilizou-se a expressão seguinte.

$$\frac{D}{300} = \varepsilon_d \quad (4)$$

Tabela 10 – Valores dos Deslocamentos (mm) medidos pelos LVDT's no Provete N2.4–G-H1.9-0MPa

LVDT's	df _e	df _d	dt _e	dt _d	Interface Lado Esquerdo				Interface Lado Direito			
					d ₁	d ₂	D	D/300	d ₁	d ₂	D	D/300
DSC_0192	4,670	-0,900	2,298	-1,614	2,581	0,831	1,269	0,0042	1,189	-0,147	0,187	0,0006
DSC_0194	5,876	0,304	2,918	-1,616	3,787	1,218	1,860	0,0062	2,394	0,084	0,662	0,0022
DSC_0195	6,240	0,700	3,072	-1,616	4,163	1,314	2,026	0,0068	2,778	0,142	0,801	0,0027
DSC_0196	6,756	1,258	3,486	-1,616	4,694	1,573	2,353	0,0078	3,320	0,297	1,053	0,0035

Tabela 11 – Valores dos Deslocamentos (mm) medidos pelos LVDT's no Provete N2.4–G-N2.4-0MPa

LVDT's	df _e	df _d	dt _e	dt _d	Interface Lado Esquerdo				Interface Lado Direito			
					d ₁	d ₂	D	D/300	d ₁	d ₂	D	D/300
DSC_0216	-1,480	-1,480	-1,480	-1,480	0,000	-1,480	-1,110	-0,0037	-1,480	-1,480	-1,480	-0,0049
DSC_0217	-1,291	2,778	-1,082	1,460	0,235	-0,129	-0,038	-0,0001	1,252	0,507	0,693	0,0023
DSC_0218	3,056	-0,468	1,808	-1,478	1,735	0,576	0,865	0,0029	0,854	-0,246	0,029	0,0001
DSC_0219	6,290	2,770	4,664	0,720	4,970	3,185	3,631	0,0121	4,090	2,199	2,672	0,0089

Tabela 12 – Valores dos Deslocamentos (mm) medidos pelos LVDT's no Provete N2.4–L-N2.4-0MPa

LVDT's	df _e	df _d	dt _e	dt _d	Interface Lado Esquerdo				Interface Lado Direito			
					d ₁	d ₂	D	D/300	d ₁	d ₂	D	D/300
DSC_0113	0,616	1,404	0,000	0,596	0,912	0,224	<u>0,396</u>	<u>0,0013</u>	1,109	0,373	<u>0,557</u>	<u>0,0019</u>
DSC_0114	0,622	1,432	0,000	0,594	0,926	0,223	<u>0,399</u>	<u>0,0013</u>	1,128	0,371	<u>0,561</u>	<u>0,0019</u>
DSC_0115	1,132	2,346	-0,002	0,796	1,587	0,297	<u>0,620</u>	<u>0,0021</u>	1,891	0,497	<u>0,845</u>	<u>0,0028</u>
DSC_0116	1,144	2,398	0,000	0,832	1,614	0,312	<u>0,638</u>	<u>0,0021</u>	1,928	0,520	<u>0,872</u>	<u>0,0029</u>
DSC_0117	6,256	7,862	3,930	5,358	6,858	4,466	<u>5,064</u>	<u>0,0169</u>	7,260	4,823	<u>5,432</u>	<u>0,0181</u>
DSC_0118	17,398	18,958	14,804	16,250	17,983	15,346	<u>16,005</u>	<u>0,0534</u>	18,373	15,708	<u>16,374</u>	<u>0,0546</u>

Como é possível verificar pela análise das tabelas anteriores, os valores de deslocamentos registados pelos LVDT's ao longo do ensaio são coerentes, na medida em que, o valor de

D aumenta com a evolução do ensaio, isto é, com o aumento da carga na prensa e consequentemente da tensão no provete, verificando-se ainda a assimetria da evolução da rotura nas duas interfaces.

Para as mesmas fases de ensaio, foi analisado o deslocamento em dois conjuntos de miras, junto às interfaces dos provetes, conforme esquematizado na Figura 23. Os valores da deformação em função dos deslocamentos (ϵ_d) foram calculados através da razão entre a média aritmética das diferenças dos valores de coordenadas de cada mira (F_y), obtidas pelo método ótico-digital da Fotogrametria durante o ensaio, e a distância média entre os conjuntos de miras (l_0).

$$\epsilon_d = \frac{(F_{yinf} - F_{ysup})}{l_0} \quad (5)$$

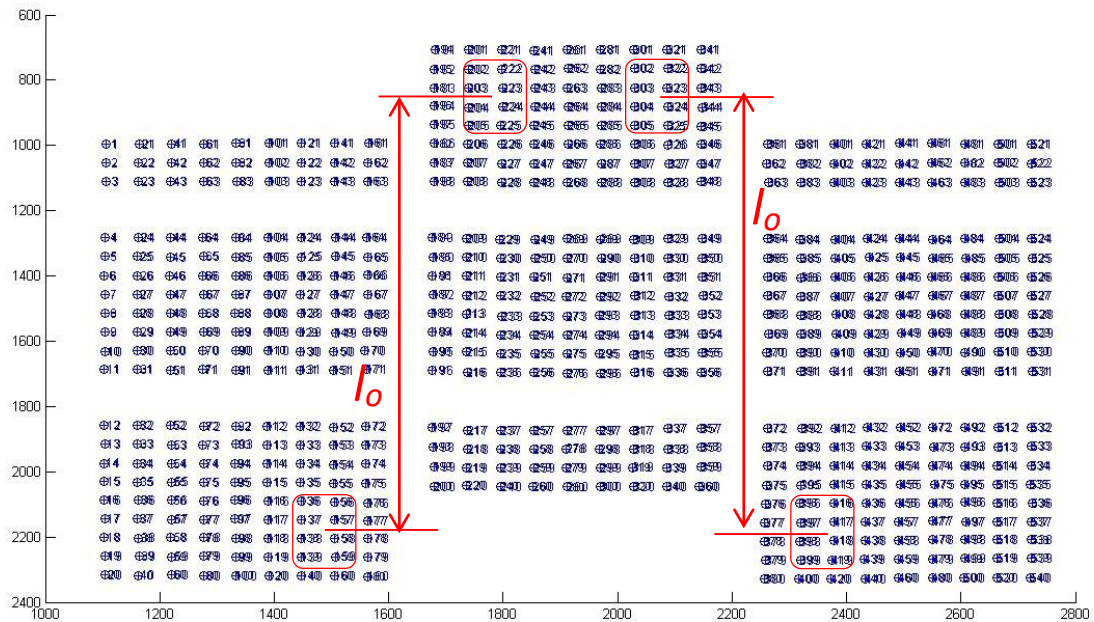


Figura 23 – Conjuntos de miras escolhidas de cada provete

Assim, nas tabelas seguintes (Tabelas 13, 14 e 15) apresentam-se os valores da deformação (ϵ_d), calculados pela equação (5), para cada fase ensaio de cada provete, nos alvos definidos na Figura 23.

Tabela 13 – Valores dos Deslocamentos determinados através do método da Fotogrametria no Provete N2.4-G-H1.9-0MPa

DSC_0194															
Interface Lado Direito					Interface Lado Esquerdo										
Miras	F _y (mm)	Média	L _o (mm)	ε _d	Miras	F _y (mm)	Média	L _o (mm)	ε _d						
136	-0,591	-0,558	230	0,0041	302	-0,930	-0,704	230	0,0054						
137	-0,598				303	-0,485									
138	-0,506				304	-0,764									
139	-0,612				305	-0,650									
156	-0,453				322	-0,831									
157	-0,541				323	-0,659									
158	-0,571				324	-0,716									
159	-0,596				325	-0,593									
202	-0,792				-0,378	230				0,0041	396	-0,601	-0,534	230	0,0054
203	-0,543										397	-0,400			
204	-0,136	398	-0,545												
205	-0,395	399	-0,440												
222	-0,933	416	-0,543												
223	0,876	417	-0,551												
224	-0,598	418	-0,541												
225	-0,504	419	-0,655												

DSC_0195															
Interface Lado Direito					Interface Lado Esquerdo										
Miras	F _y (mm)	Média	L _o (mm)	ε _d	Miras	F _y (mm)	Média	L _o (mm)	ε _d						
136	-0,800	-0,829	230	0,0066	302	-1,121	-0,872	230	0,0068						
137	-0,714				303	-0,742									
138	-0,898				304	-0,914									
139	-0,850				305	-0,786									
156	-0,750				322	-0,867									
157	-0,910				323	-0,812									
158	-0,871				324	-0,927									
159	-0,843				325	-0,811									
202	-0,933				-0,693	230				0,0066	396	-0,688	-0,690	230	0,0068
203	-0,675										397	-0,567			
204	-0,445	398	-0,578												
205	-0,718	399	-0,650												
222	-0,793	416	-0,813												
223	-0,582	417	-0,731												
224	-0,720	418	-0,704												
225	-0,682	419	-0,787												

DSC_0196										
Interface Lado Direito					Interface Lado Esquerdo					
Miras	F _y (mm)	Média	L _o (mm)	ε _d	Miras	F _y (mm)	Média	L _o (mm)	ε _d	
136	-1,215	-1,235	230	0,0095	302	-1,526	-1,167	230	0,0097	
137	-1,156				303	-0,913				
138	-1,292				304	-1,244				
139	-1,290				305	-1,169				
156	-1,048				322	-1,308				
157	-1,236				323	-1,075				
158	-1,288				324	-1,232				
159	-1,356				325	-0,870				
202	-0,968				-0,957	230				
203	-1,012	397	-0,976							
204	-0,425	398	-1,013							
205	-1,083	399	-0,893							
222	-1,225	416	-1,225							
223	-1,085	417	-1,196							
224	-0,920	418	-1,123							
225	-0,939	419	-1,116							

Tabela 14 – Valores dos Deslocamentos determinados através do método da Fotogrametria no Provete N2.4-G-N2.4-0MPa

DSC_0217									
Interface Lado Direito					Interface Lado Esquerdo				
Miras	F _y (mm)	Média	L _o (mm)	ε _d	Miras	F _y (mm)	Média	L _o (mm)	ε _d
136	-2,214	-2,262	230	0,0210	302	-2,764	-2,562	230	0,0211
137	-2,330				303	-2,464			
138	-2,214				304	-2,371			
139	-2,325				305	-2,686			
156	-2,331				322	-2,685			
157	-2,275				323	-2,710			
158	-2,171				324	-2,563			
159	-2,237				325	-2,255			
202	-2,485				-2,563	230			
203	-2,568	397	-2,315						
204	-2,490	398	-2,253						
205	-2,542	399	-2,255						
222	-2,574	416	-2,238						
223	-2,580	417	-2,290						
224	-2,539	418	-2,294						
225	-2,724	419	-2,336						

DSC_0218									
Interface Lado Direito					Interface Lado Esquerdo				
Miras	F _y (mm)	Média	L _o (mm)	ε _d	Miras	F _y (mm)	Média	L _o (mm)	ε _d
136	-2,643	2,654	230	0,0221	302	-2,609	2,488	230	0,0222
137	-2,685				303	-2,403			
138	-2,592				304	-2,340			
139	-2,714				305	-2,634			
156	-2,703				322	-2,590			
157	-2,682				323	-2,611			
158	-2,563				324	-2,495			
159	-2,646				325	-2,225			
202	-2,335				2,433	230			
203	-2,444	397	-2,654						
204	-2,346	398	-2,636						
205	-2,450	399	-2,595						
222	-2,429	416	-2,588						
223	-2,389	417	-2,619						
224	-2,469	418	-2,643						
225	-2,599	419	-2,623						

DSC_0219										
Interface Lado Direito					Interface Lado Esquerdo					
Miras	F _y (mm)	Média	L _o (mm)	ε _d	Miras	F _y (mm)	Média	L _o (mm)	ε _d	
136	-4,137	4,170	230	0,0292	302	-2,743	-2,594	230	0,0295	
137	-4,210				303	-2,513				
138	-4,137				304	-2,423				
139	-4,224				305	-2,725				
156	-4,266				322	-2,702				
157	-4,169				323	-2,757				
158	-4,074				324	-2,600				
159	-4,145				325	-2,287				
202	-2,500				2,551	230				0,0292
203	-2,564	397	-4,214							
204	-2,456	398	-4,176							
205	-2,550	399	-4,198							
222	-2,504	416	-4,159							
223	-2,546	417	-4,175							
224	-2,551	418	-4,194							
225	-2,740	419	-4,225							

Tabela 15 – Valores dos Deslocamentos determinados através do método da Fotogrametria no Provete N2.4-L-N2.4-0MPa

DSC_0113									
Interface Lado Direito					Interface Lado Esquerdo				
Miras	F _y (mm)	Média	L _o (mm)	ε _d	Miras	F _y (mm)	Média	L _o (mm)	ε _d
136	-10,648	10,552	230	0,0017	302	-11,005	10,877	230	0,0012
137	-10,259				303	-10,986			
138	-10,485				304	-10,903			
139	-10,887				305	-10,668			
156	-10,544				322	-10,949			
157	-10,208				323	-10,975			
158	-10,755				324	-10,839			
159	-10,632				325	-10,692			
202	-11,124				10,934	230			
203	-10,975	397	-10,188						
204	-10,864	398	-10,734						
205	-10,789	399	-11,112						
222	-11,320	416	-10,336						
223	-10,841	417	-10,271						
224	-10,817	418	-10,731						
225	-10,745	419	-10,978						

DSC_0114									
Interface Lado Direito					Interface Lado Esquerdo				
Miras	F _y (mm)	Média	L _o (mm)	ε _d	Miras	F _y (mm)	Média	L _o (mm)	ε _d
136	-10,850	10,841	230	0,0022	302	-11,3922	11,277	230	0,0015
137	-10,585				303	-11,3904			
138	-10,743				304	-11,2796			
139	-11,103				305	-11,118			
156	-10,815				322	-11,3985			
157	-10,517				323	-11,3195			
158	-11,197				324	-11,1795			
159	-10,918				325	-11,141			
202	-11,489				11,336	230			
203	-11,354	397	-10,4764						
204	-11,357	398	-11,0891						
205	-11,153	399	-11,4409						
222	-11,615	416	-10,7123						
223	-11,333	417	-10,5935						
224	-11,234	418	-11,0772						
225	-11,154	419	-11,3182						

DSC_0115									
Interface Lado Direito					Interface Lado Esquerdo				
Miras	F _y (mm)	Média	L _o (mm)	ε _d	Miras	F _y (mm)	Média	L _o (mm)	ε _d
136	-11,385	11,357	230	0,0016	302	-11,8515	11,762	230	0,0017
137	-11,053				303	-11,879			
138	-11,195				304	-11,8612			
139	-11,628				305	-11,5178			
156	-11,272				322	-11,8186			
157	-11,125				323	-11,8383			
158	-11,690				324	-11,7473			
159	-11,506				325	-11,5848			
202	-11,892				11,731	230			
203	-11,750	397	-10,9646						
204	-11,689	398	-11,5333						
205	-11,624	399	-11,8935						
222	-12,077	416	-11,2209						
223	-11,631	417	-11,0584						
224	-11,659	418	-11,4381						
225	-11,523	419	-11,7737						

DSC_0116									
Interface Lado Direito					Interface Lado Esquerdo				
Miras	F _y (mm)	Média	L _o (mm)	ε _d	Miras	F _y (mm)	Média	L _o (mm)	ε _d
136	-11,425	11,389	230	0,0016	302	-11,8714	11,739	230	0,0016
137	-11,031				303	-11,826			
138	-11,320				304	-11,7079			
139	-11,680				305	-11,4963			
156	-11,317				322	-11,8608			
157	-11,108				323	-11,7794			
158	-11,646				324	-11,7176			
159	-11,589				325	-11,6519			
202	-11,916				11,754	230			
203	-11,819	397	-10,94						
204	-11,754	398	-11,439						
205	-11,564	399	-11,9128						
222	-12,070	416	-11,2237						
223	-11,733	417	-11,1119						
224	-11,675	418	-11,4522						
225	-11,498	419	-11,7657						

DSC_0117									
Interface Lado Direito					Interface Lado Esquerdo				
Miras	F _y (mm)	Média	L _o (mm)	ε _d	Miras	F _y (mm)	Média	L _o (mm)	ε _d
136	-15,668	15,660	230	0,0161	302	-12,0858	11,984	230	0,0174
137	-15,327				303	-12,0942			
138	-15,508				304	-11,9506			
139	-15,888				305	-11,756			
156	-15,641				322	-12,1327			
157	-15,411				323	-12,0312			
158	-16,013				324	-11,9509			
159	-15,827				325	-11,8706			
202	-12,147				11,951	230			
203	-11,948	397	-15,5048						
204	-11,901	398	-16,1808						
205	-11,801	399	-16,4659						
222	-12,238	416	-15,7804						
223	-12,030	417	-15,707						
224	-11,789	418	-16,0675						
225	-11,757	419	-16,4053						

DSC_0118									
Interface Lado Direito					Interface Lado Esquerdo				
Miras	F _y (mm)	Média	L _o (mm)	ε _d	Miras	F _y (mm)	Média	L _o (mm)	ε _d
136	233,618	248,344	230	0,8704	302	98,0674	118,055	230	0,0021
137	243,447				303	108,1422			
138	253,279				304	117,9307			
139	263,084				305	128,071			
156	233,625				322	107,9539			
157	243,322				323	118,0686			
158	253,081				324	128,0251			
159	263,297				325	138,1816			
202	28,282				48,141	230			
203	38,241	397	112,6892						
204	48,199	398	122,5506						
205	58,162	399	132,6335						
222	38,074	416	102,4787						
223	48,162	417	112,6153						
224	57,984	418	122,4737						
225	68,024	419	132,6156						

Para cada provete, tabelou-se a comparação de valores das deformações, em função dos deslocamentos obtidos pelos dois métodos (Tabelas 16, 17 e 18).

Tabela 16 – Comparação de deformações ϵ_d - Fotogrametria vs LVDT's no Provete N2.4-G-H1.9-0MPa

	Fotogrametria	LVDT's	Fotogrametria	LVDT's
DSC_0192	0,0000	0,0042	0,0000	0,0006
DSC_0194	0,0054	0,0062	0,0041	0,0022
DSC_0195	0,0068	0,0068	0,0066	0,0027
DSC_0196	0,0097	0,0078	0,0095	0,0035

Tabela 17 – Comparação de deformações ϵ_d - Fotogrametria vs LVDT's no Provete N2.4-G-N2.4-0MPa

	Fotogrametria	LVDT's	Fotogrametria	LVDT's
DSC_0216	0,0000	-0,0037	0,0000	-0,0049
DSC_0217	0,0211	-0,0001	0,0210	0,0023
DSC_0218	0,0222	0,0029	0,0221	0,0001
DSC_0219	0,0295	0,0121	0,0292	0,0089

Tabela 18 – Comparação de deformações ϵ_d - Fotogrametria vs LVDT's no Provete N2.4-L-N2.4-0MPa

	Fotogrametria	LVDT's	Fotogrametria	LVDT's
DSC_0113	0,0012	0,0013	0,0017	0,0019
DSC_0114	0,0015	0,0013	0,0022	0,0019
DSC_0115	0,0017	0,0021	0,0016	0,0028
DSC_0116	0,0016	0,0021	0,0016	0,0029
DSC_0117	0,0174	0,0169	0,0161	0,0181
DSC_0118	0,0021	0,0534	0,8704	0,0546

O método da fotogrametria não apresentou resultados conclusivos, relativamente à determinação de deslocamentos de cada mira, pois, no primeiro ensaio (Provete N2.4-G-H1.9-0MPa) os valores apresentados não são coerentes com a evolução do ensaio, nem semelhantes aos valores dos LVDT's.

Quanto ao segundo ensaio (Provete N2.4-G-N2.4-0MPa), os valores de deslocamentos apresentados, embora sejam de valor manifestamente menor que os valores registados

pelos LVDT's, apresentam coerência, na medida em que, aumenta o valor do deslocamento ao longo do tempo de ensaio.

Relativamente ao Provete N2.4-L-N2.4-0MPa, o qual permite maiores valores de deslocamento sem dano relevante de atrito na interface, como era espectável devido à superfície lisa das interfaces (L), os valores obtidos pelos LVDT's são da mesma ordem e grandeza dos valores calculados pelo método da Fotogrametria, à exceção da fase quatro, correspondente à imagem DSC_0116, na qual, terá ocorrido um erro de detecção das miras na imagem. A análise relativa à última fase do ensaio, imagem DSC_0118, não corresponde à realidade, visto que os valores apresentados pelo método da Fotogrametria são manifestamente diferentes dos valores calculados através da medição tradicional com os LVDT's.

Em suma, quanto aos deslocamentos, no ensaio do Provete N2.4-G-N2.4-0MPa o método da fotogrametria apresentou valores da mesma ordem de grandeza dos valores registados pelos LVDT's, conforme se pode observar na Tabela 18, no entanto, nos ensaios do Provete N2.4-G-H1.9-0MPa e do Provete N2.4-G-N2.4-0MPa, não apresentou resultados conclusivos, pois embora os valores estejam coerentes com a evolução do ensaio, apresentam grande disparidade comparativamente aos valores registados pelos LVDT's.

4.5 Estimativa do Valor de Módulo de Elasticidade Transversal (G) ao Nível das Interfaces

Os módulos elasticidade são considerados parâmetros fundamentais para a engenharia e de materiais e de estruturas, pois é um parâmetro mecânico que proporciona uma medida da rigidez.

Sendo uma propriedade intrínseca de cada material, o módulo de elasticidade dependente diretamente da composição química, microestrutura e defeitos.

O módulo de elasticidade pode ser obtido pela razão entre a força, por unidade de área, aplicada sobre um material e a deformação sofrida pelo material.

Assim, fez-se a análise deste parâmetro ao longo das duas interfaces dos provetes, conforme identificado na figura seguinte, utilizando os valores das filas verticais de fronteira à interface.

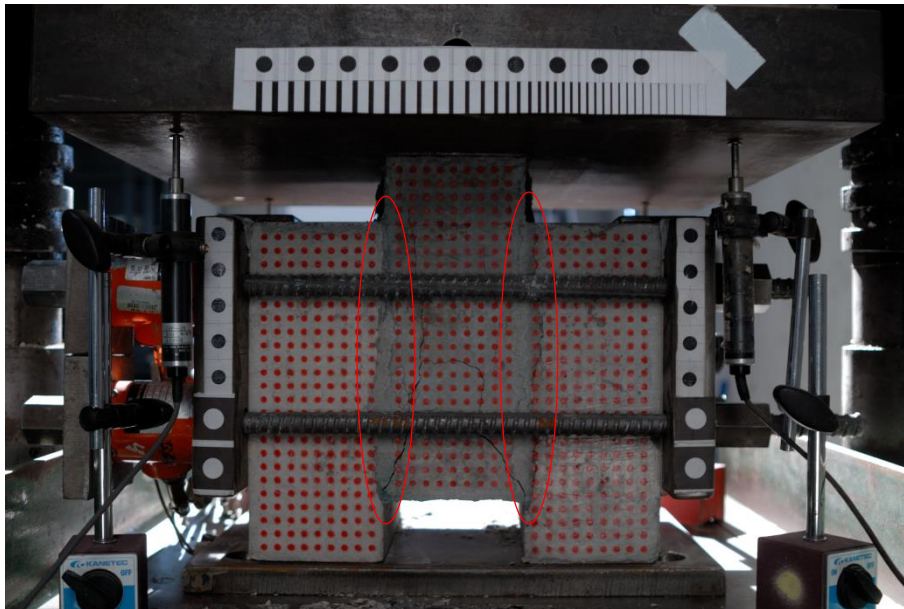


Figura 24 - Identificação dos alvos das zonas das interfaces analisados em cada provete

De modo que, para estimar o valor do Módulo de Elasticidade ao nível da interface dos provetes ensaiados, recorreu-se à seguinte equação J. F. Silva Gomes, (2010):

$$G = \frac{F/A}{\Delta l/l_0} \Leftrightarrow G = \frac{\frac{Fa}{2}/A_c}{\Delta lv/l_0} \quad (6)$$

Em que:

- F - força da prensa, medida em (kN);
- A_c - área da interface entre as duas partes do provete, medida em mm^2 ;
- Δl_v - variação do deslocamento na direção vertical dos alvos (yy), medido em mm;
- l_0 - diferença de posição entre os alvos na direção horizontal (xx), medido em mm;
- G - valor de módulo de elasticidade transversal estimando, medido em unidades GPa

Aplicou-se então a Equação (6) em todas as fases dos três ensaios, obtendo-se os seguintes conjuntos de resultados, apresentados nas Tabelas 19, 20 e 21.

Tabela 19 – Módulo de Elasticidade G das interfaces do provete N2.4-G-H1.9-0MPa

	Fa(kN)	Ac (cm ²)	(Fa/2)/Ac (kN/cm ²)	G (GPa)_Face I	G (GPa)_Face II
DSC_0192	597,11	400	0,75	-	-
DSC_0194	643,04		0,80	13,98	13,67

Tabela 20 – Módulo de Elasticidade G das interfaces do provete N2.4-G-N2.4-0Mpa

	Fa(kN)	Ac (cm ²)	(Fa/2)/Ac (kN/cm ²)	G (GPa)_Face I	G (GPa)_Face II
DSC_0216	0,00	400	0,00	-	-
DSC_0217	117,40		0,15	8,46	8,42

Como termo de comparação e validação do método, utilizou-se a Equação (7) e comparou-se os valores da estimativa do Módulo de Elasticidade (G) com o valor definido pela bibliografia para as zonas de interface, de acordo com a expressão seguinte J. F. Silva Gomes, (2010).

$$G \approx E \times 0,4 \quad (7)$$

Onde:

G - Módulo de Elasticidade Estimado (GPa);

E - módulo de elasticidade do betão (GPa).

O valor de Módulo de Elasticidade, E, do betão utilizado nos provetes é igual a 34 Gpa para o N2.4 e de 27 GPa para o H1.9, conforme indicado no estudo original (Costa, 2012) e assim, aplicando a equação, o módulo G apresenta valores de 13,6 GPa e de 11 GPa, respetivamente. Contudo, os provetes com substrato N2.4 e betão adicionado H1.9 têm uma interface compósita, podendo o valor encontrar-se entre os anteriores.

Analisando os valores de G obtidos para a fase elástica de ensaio dos três provetes, pode afirmar-se que o provete N2.4-G-H1.9-0MPa apresenta uma estimativa de valor de módulo de elasticidade nas interfaces próximo do valor definido, com um valor na primeira fase de ensaio, DSC_0194, de 13,98Gpa e 13,67GPa correspondentes às duas interfaces.

O provete N2.4-G-N2.4-0Mpa também apresenta estimativas de valores de G próximos do valor 13,6GPa, com valores de 12,51 GPa e 12,56 GPa.

Assim, relativamente ao valor do módulo de elasticidade G estabeleceu-se um valor base de relação igual a 13,6GPa, correspondente a 40% do valor de E (Módulo de Elasticidade), o provete N2.4-G-H1.9-0MPa e N2.4-G-N2.4-0Mpa apresentam valores de módulo de elasticidade nas interfaces muito próximo do valor definido, 13,98Gpa, 13,67GPa e de 12,51 GPa, 12,56 GPa, respetivamente.

4.6 Dilatância

O parâmetro da dilatância define a importância da componente normal durante o processo de carregamento dos provetes, relativamente à abertura das interfaces.

Assim, a análise da dilatância assume um papel preponderante, sendo efetuada nas zonas das interfaces dos provetes em estudo, mas também nas regiões laterais, onde assim foi possível verificar se o deslocamento era uniforme e coerente com o deslocamento ao nível das interfaces.

Na figura 25 são representadas as zonas de estudo, identificadas como os alinhamentos de miras verticais adjacentes às interfaces e os alinhamentos nas extremidades laterais dos provetes:

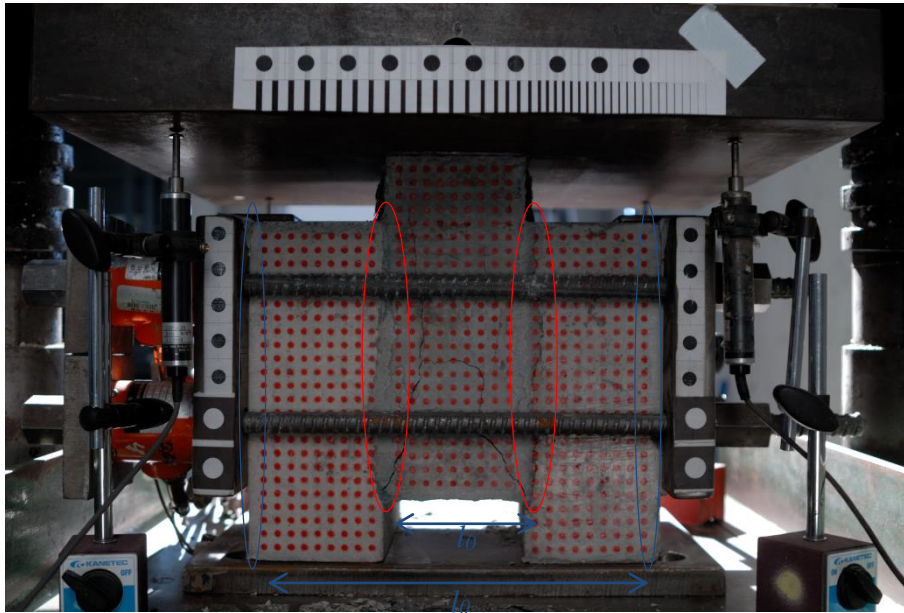


Figura 25 – Identificação dos alvos das zonas das extremidades e das interfaces analisados em cada provete

A dilatância foi calculada segundo a equação (8), apresentada J. F. Silva Gomes, (2010).

$$Dilatância = \frac{\delta_1 + \delta_2}{l_0} = \frac{\left(\sqrt{f_x^2 + f_y^2}\right)_1 + \left(\sqrt{f_x^2 + f_y^2}\right)_2}{l_0} \quad (8)$$

Em que:

- δ_1 e δ_2 - raiz quadrada da soma do quadrado da variação dos valores das coordenadas, nas direções horizontal (xx) e vertical (yy), em mm;
- f_x e f_y - variação dos valores das coordenadas, nas direções horizontal (xx) e vertical (yy), em mm;
- l_0 – distância entre miras, em mm.

4.6.1 Extremidades

Nas tabelas 21 e 22 são apresentados os valores de Dilatância para cada provete ensaiado, calculadas considerando os alinhamentos das extremidades laterais dos provetes.

Considerando que o provete tem uma fase elástica até ao pico e posteriormente uma fase pós pico, com deslocamento da interface, é esperado um comportamento diferente, uma vez que o atrito será influenciado pela rugosidade na interface. Apresentam-se nas figuras 26, 27 e 28, a evolução da dilatância em função da tensão de corte média na interface.

Tabela 21 – Valores de Evolução da Dilatância nas extremidades do Provete N2.4-G-H1.9-0Mpa

DSC_0192 & DSC_0194					DSC_0192 & DSC_0195					DSC_0192 & DSC_0196							
Mira	δ_1	Mira	δ_2	L	Dilatância	Mira	δ_1	Mira	δ_2	L	Dilatância	Mira	δ_1	Mira	δ_2	L	Dilatância
1	0,821	521	0,648	280	0,005	1	0,929	521	0,858	280	0,006	1	1,327	521	1,206	280	0,009
2	0,820	522	0,600		0,005	2	0,892	522	0,024		0,003	2	1,375	522	0,043		0,005
3	0,763	523	0,680		0,005	3	1,219	523	2,445		0,013	3	1,542	523	2,689		0,015
4	0,706	524	0,532		0,004	4	1,028	524	0,794		0,007	4	1,422	524	1,114		0,009
5	0,704	525	0,629		0,005	5	1,048	525	0,794		0,007	5	1,290	525	1,114		0,009
6	0,764	526	0,697		0,005	6	0,946	526	0,794		0,006	6	1,405	526	1,114		0,009
7	0,799	527	0,681		0,005	7	0,967	527	0,794		0,006	7	1,297	527	1,114		0,009
8	0,912	528	0,663		0,006	8	0,981	528	0,794		0,006	8	1,212	528	1,114		0,008
9	0,832	529	0,715		0,006	9	1,002	529	0,794		0,006	9	1,337	529	1,114		0,009
10	0,900	530	0,677		0,006	10	0,939	530	0,794		0,006	10	1,333	530	1,114		0,009
11	0,793	531	0,662		0,005	11	0,941	531	0,794		0,006	11	1,332	531	1,114		0,009
12	0,763	532	0,774		0,005	12	0,953	532	0,794		0,006	12	1,311	532	1,114		0,009
13	0,706	533	0,638		0,005	13	0,907	533	0,794		0,006	13	1,222	533	1,114		0,008
14	0,724	534	0,668		0,005	14	0,941	534	0,794		0,006	14	1,312	534	1,114		0,009
15	0,658	535	0,616		0,005	15	0,947	535	0,794		0,006	15	1,285	535	1,114		0,009
16	0,717	536	0,663		0,005	16	0,960	536	0,794		0,006	16	1,330	536	1,114		0,009
17	0,632	537	0,614		0,004	17	0,905	537	0,794		0,006	17	1,230	537	1,114		0,008
18	0,655	538	0,731		0,005	18	0,919	538	0,794		0,006	18	1,361	538	1,114		0,009
19	0,635	539	0,646		0,005	19	0,953	539	0,794		0,006	19	1,303	539	1,114		0,009
20	0,776	540	0,589		0,005	20	0,901	540	0,794		0,006	20	1,241	540	1,114		0,008
Média=	0,754		0,656		0,005	Média=	0,964		0,841		0,006	Média=	1,323		1,144		0,009

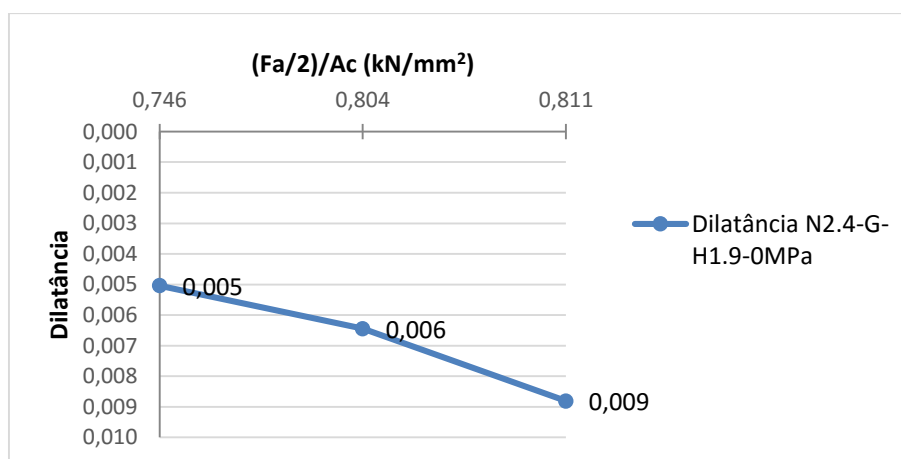


Figura 26 – Gráfico de Evolução da Dilatância nas extremidades do Provete N2.4-G-H1.9-0Mpa

Tabela 22 – Valores de Evolução da Diltância nas extremidades do Provete N2.4-G-N2.4-0MPa

DSC_0216 & DSC_0217					DSC_0216 & DSC_0218					DSC_0216 & DSC_0219							
Mira	δ_1	Mira	δ_2	L	Dilatância	Mira	δ_1	Mira	δ_2	L	Dilatância	Mira	δ_1	Mira	δ_2	L	Dilatância
1	2,468	521	2,102	280	0,016	1	2,822	521	2,498	280	0,019	1	4,465	521	4,033	280	0,030
2	2,472	522	2,822		0,019	2	2,789	522	3,188		0,021	2	4,396	522	4,811		0,033
3	2,497	523	2,753		0,019	3	2,836	523	3,087		0,021	3	4,436	523	4,672		0,033
4	2,452	524	2,295		0,017	4	2,517	524	2,637		0,018	4	4,292	524	4,284		0,031
5	2,600	525	2,538		0,018	5	2,901	525	2,959		0,021	5	4,518	525	4,517		0,032
6	2,507	526	2,434		0,018	6	2,833	526	2,815		0,020	6	4,439	526	4,436		0,032
7	2,440	527	2,523		0,018	7	2,770	527	2,931		0,020	7	4,415	527	4,492		0,032
8	2,520	528	2,457		0,018	8	2,880	528	2,875		0,021	8	4,459	528	4,473		0,032
9	2,466	529	2,557		0,018	9	2,797	529	2,949		0,021	9	4,404	529	4,532		0,032
10	2,584	530	2,433		0,018	10	2,952	530	2,823		0,021	10	4,535	530	4,417		0,032
11	2,376	531	2,523		0,017	11	2,686	531	2,875		0,020	11	4,280	531	4,512		0,031
12	2,182	532	0,000		0,008	12	2,278	532	2,488		0,017	12	3,937	532	4,113		0,029
13	2,290	533	2,316		0,016	13	2,578	533	2,721		0,019	13	4,245	533	4,291		0,030
14	2,323	534	2,335		0,017	14	2,654	534	2,761		0,019	14	4,239	534	4,375		0,031
15	2,289	535	2,351		0,017	15	2,585	535	2,812		0,019	15	4,189	535	4,356		0,031
16	2,248	536	2,363		0,016	16	2,574	536	2,846		0,019	16	4,150	536	4,382		0,030
17	2,170	537	2,484		0,017	17	2,453	537	2,914		0,019	17	4,047	537	4,454		0,030
18	2,292	538	2,279		0,016	18	2,566	538	2,711		0,019	18	4,175	538	4,270		0,030
19	2,300	539	2,276		0,016	19	2,580	539	2,711		0,019	19	4,195	539	4,282		0,030
20	2,230	540	2,306		0,016	20	2,514	540	2,749		0,019	20	4,155	540	4,318		0,030
Média=	2,385		2,307		0,017	Média=	2,678		2,818		0,020	Média=	4,298		4,401		0,031

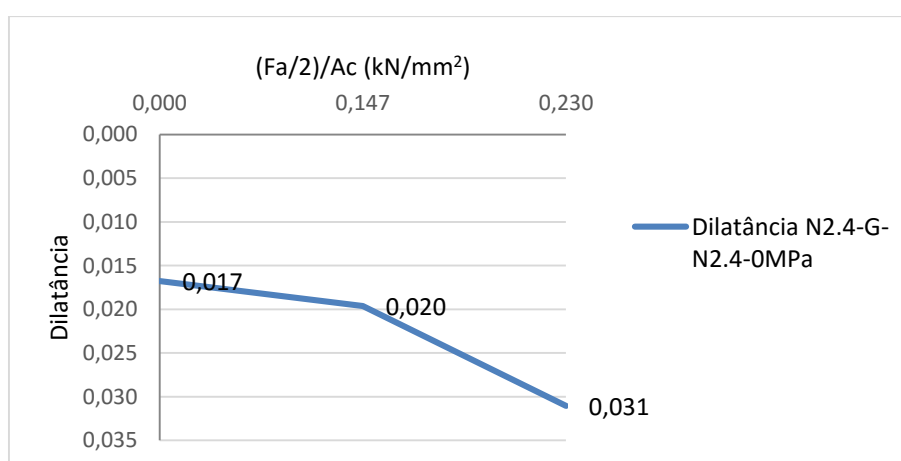


Figura 27 – Gráfico de Evolução da Diltância nas extremidades do Provete N2.4-G-N2.4-0MPa

Nos ensaios nos provetes N2.4-G-H1.9-0Mpa e N2.4-G-N2.4-0MPa obtiveram-se máximos valores de dilatação de 0,009 e 0,031. Verifica-se que, no provete com betão adicionado leve H1.9 a rotura origina uma superfície na interface mais lisa, o que resulta numa dilatação com pouco aumento relativamente à fase elástica; já no betão adicionado N2.4, a rotura resultante na interface é mais rugosa devido aos agregados grossos de calcário, originando maior atrito que provoca maior dilatação

4.6.2 Interfaces

Relativamente à interface entre as partes de cada provete, calculou-se também o valor da Dilatação, para efeitos de comparação com os resultados anteriores.

Para o efeito adoptou-se a Equação (8), nos conjuntos de vinte miras de cada lado da interface, ao longo da direção vertical (yy), sendo os resultados apresentados nas tabelas 25, 26 e 27. Nas figuras 29, 30 e 31 apresenta-se uma comparação direta entre valores da dilatação considerando as duas zonas de interface, em duas fases (elástica e pós pico).

Tabela 23 – Valores de Evolução da Dilatação nas interfaces do Provete N2.4-G-H1.9-0Mpa

DSC_0192 & DSC_0194													
Mira	$\delta 1$	Mira	$\delta 2$	L	Dilatação	Mira	$\delta 1$	Mira	$\delta 2$	L	Dilatação		
161	0,718	186	0,525	20	0,062	346	0,529	361	0,500	20	0,051		
162	0,587	187	0,756		0,067	347	0,577	362	0,776		0,068		
163	0,722	188	0,444		0,058	348	0,605	363	0,622		0,061		
164	0,647	189	0,646		0,065	349	0,715	364	0,398		0,056		
165	0,379	190	0,498		0,044	350	0,481	365	0,744		0,061		
166	0,519	191	0,756		0,064	351	0,703	366	0,494		0,060		
167	0,531	192	0,432		0,048	352	0,719	367	0,393		0,056		
168	0,958	193	0,500		0,073	353	0,578	368	0,604		0,059		
169	0,680	194	0,514		0,060	354	0,481	369	0,601		0,054		
170	0,599	195	0,599		0,060	355	0,560	370	0,734		0,065		
171	0,605	196	0,605		0,060	356	0,671	371	0,671		0,067		
172	0,572	197	0,667		0,062	357	0,801	372	0,633		0,072		
173	0,704	198	0,309		0,051	358	0,423	373	0,596		0,051		
174	0,553	199	0,582		0,057	359	0,565	374	0,558		0,056		
175	0,516	200	0,125		0,032	360	0,270	375	0,639		0,045		
Média=	0,619		0,531			0,057	Média=	0,578			0,597		0,059

DSC_0192 & DSC_0195											
Mira	$\delta 1$	Mira	$\delta 2$	L	Dilatância	Mira	$\delta 1$	Mira	$\delta 2$	L	Dilatância
161	0,975	186	0,962	20	0,097	346	0,567	361	0,683	20	0,062
162	0,893	187	0,885		0,089	347	0,598	362	0,845		0,072
163	0,989	188	0,812		0,090	348	0,713	363	0,853		0,078
164	1,037	189	0,928		0,098	349	0,741	364	0,582		0,066
165	0,987	190	0,950		0,097	350	0,798	365	0,896		0,085
166	1,183	191	1,038		0,111	351	0,811	366	0,867		0,084
167	0,374	192	0,528		0,045	352	0,868	367	0,636		0,075
168	1,789	193	0,793		0,129	353	0,777	368	0,863		0,082
169	1,080	194	0,741		0,091	354	0,740	369	0,869		0,080
170	0,756	195	0,823		0,079	355	0,692	370	0,698		0,070
171	0,569	196	0,821		0,070	356	0,758	371	0,773		0,077
172	0,723	197	0,831		0,078	357	0,952	372	0,593		0,077
173	0,896	198	0,548		0,072	358	0,860	373	0,760		0,081
174	0,953	199	0,249		0,060	359	0,919	374	0,663		0,079
175	0,668	200	0,164		0,042	360	0,202	375	1,036		0,062
Média=	0,925		0,738		0,083	Média=	0,733		0,775		0,075

DSC_0192 & DSC_0196											
Mira	$\delta 1$	Mira	$\delta 2$	L	Dilatância	Mira	$\delta 1$	Mira	$\delta 2$	L	Dilatância
161	1,538	186	1,491	20	0,151	346	0,977	361	0,926	20	0,095
162	1,417	187	1,544		0,148	347	0,866	362	1,284		0,107
163	1,414	188	1,452		0,143	348	1,257	363	1,365		0,131
164	1,568	189	1,308		0,144	349	1,030	364	0,604		0,082
165	1,385	190	1,282		0,133	350	0,973	365	1,253		0,111
166	1,885	191	1,388		0,164	351	1,136	366	1,224		0,118
167	0,105	192	1,321		0,071	352	1,186	367	0,879		0,103
168	1,852	193	1,381		0,162	353	1,077	368	1,131		0,110
169	1,755	194	1,547		0,165	354	1,091	369	1,172		0,113
170	1,364	195	1,327		0,135	355	1,000	370	1,139		0,107
171	0,755	196	1,250		0,100	356	0,892	371	1,264		0,108
172	0,997	197	1,185		0,109	357	1,125	372	0,815		0,097
173	1,232	198	0,870		0,105	358	0,916	373	1,120		0,102
174	1,305	199	0,244		0,077	359	0,727	374	1,036		0,088
175	1,088	200	0,102		0,059	360	0,653	375	1,028		0,084
Média=	1,311		1,180		0,125	Média=	0,994		1,083		0,104

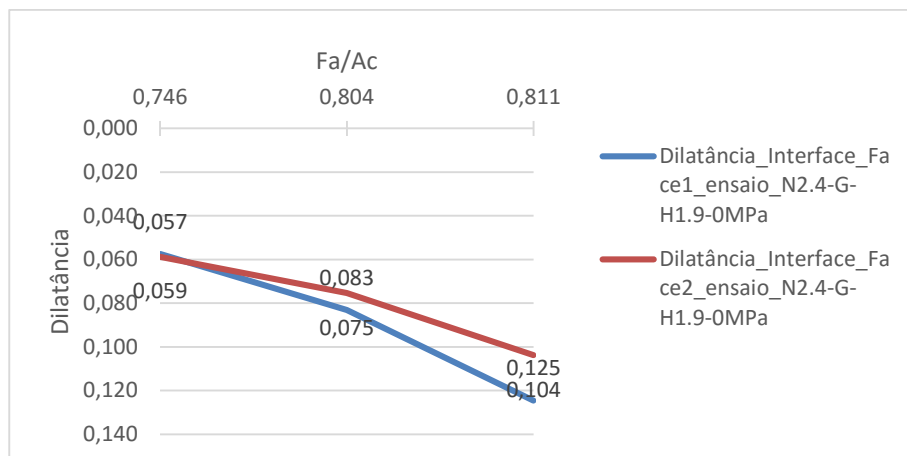


Figura 28 - Gráfico de Evolução da Dilatância nas interfaces do Provete N2.4-G-H1.9-0MPa

Tabela 24 – Valores de Evolução da Dilatância nas interfaces do Provete N2.4-G-N2.4-0MPa

DSC_0216 & DSC_0217											
Mira	δ1	Mira	δ2	L	Dilatância	Mira	δ1	Mira	δ2	L	Dilatância
161	2,691	186	2,650	20	0,267	346	2,442	361	2,400	20	0,242
162	2,584	187	2,634		0,261	347	2,703	362	2,606		0,265
163	2,666	188	2,509		0,259	348	2,469	363	2,448		0,246
164	2,398	189	2,510		0,245	349	2,467	364	2,430		0,245
165	2,631	190	2,475		0,255	350	2,498	365	2,556		0,253
166	2,394	191	2,406		0,240	351	2,478	366	2,524		0,250
167	2,658	192	2,318		0,249	352	2,512	367	2,527		0,252
168	2,441	193	2,561		0,250	353	2,448	368	2,486		0,247
169	2,353	194	2,377		0,237	354	2,487	369	2,488		0,249
170	2,335	195	2,438		0,239	355	2,342	370	2,521		0,243
171	2,221	196	2,419		0,232	356	2,343	371	2,450		0,240
172	1,955	197	2,217		0,209	357	2,127	372	2,391		0,226
173	2,609	198	2,235		0,242	358	2,271	373	2,393		0,233
174	2,450	199	2,302		0,238	359	2,376	374	2,360		0,237
175	2,299	200	2,143		0,222	360	2,267	375	2,375		0,232
Média=	2,446		2,413		0,243	Média=	2,415		2,464		0,244

DSC_0216 & DSC_0218											
Mira	δ1	Mira	δ2	L	Dilatância	Mira	δ1	Mira	δ2	L	Dilatância
161	3,159	186	2,552	20	0,286	346	2,456	361	2,718	20	0,259
162	3,085	187	2,493		0,279	347	2,684	362	2,874		0,278
163	3,109	188	2,413		0,276	348	2,408	363	2,769		0,259
164	2,680	189	2,283		0,248	349	2,438	364	2,731		0,258
165	3,096	190	2,376		0,274	350	2,509	365	2,836		0,267
166	2,786	191	2,299		0,254	351	2,457	366	2,842		0,265
167	3,079	192	2,193		0,264	352	2,492	367	2,847		0,267
168	2,930	193	2,458		0,269	353	2,402	368	2,721		0,256
169	2,831	194	2,277		0,255	354	2,454	369	2,788		0,262
170	2,765	195	2,348		0,256	355	2,277	370	2,846		0,256
171	2,673	196	2,313		0,249	356	2,289	371	2,733		0,251
172	2,226	197	1,976		0,210	357	1,990	372	2,419		0,220
173	3,015	198	2,097		0,256	358	2,251	373	2,736		0,249
174	2,871	199	2,189		0,253	359	2,373	374	2,692		0,253
175	2,760	200	2,031		0,240	360	2,310	375	2,678		0,249
Média=	2,871	Média=	2,286		0,258	Média=	2,386	Média=	2,749		0,257

DSC_0216 & DSC_0219											
Mira	δ1	Mira	δ2	L	Dilatância	Mira	δ1	Mira	δ2	L	Dilatância
161	4,737	186	2,621	20	0,368	346	2,529	361	4,344	20	0,344
162	4,646	187	2,641		0,364	347	2,770	362	4,519		0,364
163	4,647	188	2,496		0,357	348	2,499	363	4,397		0,345
164	4,309	189	2,484		0,340	349	2,503	364	4,265		0,338
165	4,646	190	2,484		0,357	350	2,554	365	4,467		0,351
166	4,392	191	2,400		0,340	351	2,548	366	4,413		0,348
167	4,630	192	2,318		0,347	352	2,562	367	4,433		0,350
168	4,527	193	2,563		0,355	353	2,501	368	4,334		0,342
169	4,389	194	2,382		0,339	354	2,545	369	4,369		0,346
170	4,355	195	2,452		0,340	355	2,400	370	4,379		0,339
171	4,211	196	2,432		0,332	356	2,368	371	4,299		0,333
172	3,851	197	2,058		0,295	357	1,994	372	4,221		0,311
173	4,600	198	2,245		0,342	358	2,355	373	4,319		0,334
174	4,411	199	2,292		0,335	359	2,438	374	4,297		0,337
175	4,275	200	2,119		0,320	360	2,363	375	4,245		0,330
Média=	4,442		2,399		0,342	Média=	2,462		4,353		0,341

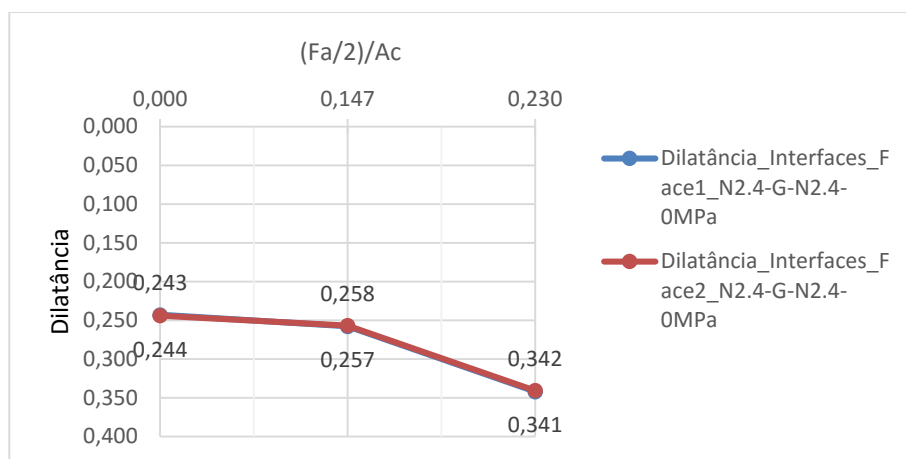


Figura 29 - Gráfico de Evolução da Dilatância nas interfaces do Provete N2.4-G-N2.4-0MPa

Os resultados da dilatação das interfaces dos ensaios N2.4-G-H1.9-0Mpa e N2.4-G-N2.4-0MPa são coerentes com os anteriores, verificando-se o mesmo tipo de comportamento em cada fase e consoante o tipo de betão adicionado.

Assim, quanto à evolução da dilatação nas extremidades e interfaces dos provetes, os valores obtidos pelo método da Fotogrametria são coerentes para os ensaios estudados, verificando-se a evolução em cada uma das interfaces e o comportamento diferenciado consoante o tipo de betão adicionado e a variação de valores da dilatação em diferentes fases (elástica e pós pico).

4.7 Evolução média do Ângulo de Deformação Teta (θ) ao nível das Interfaces

Tendo em conta os deslocamentos verticais de todas os alvos, relativamente à posição inicial (antes do carregamento), foi de todo relevante definir a evolução do ângulo θ , ao nível das interfaces de cada provete (Figura 30).

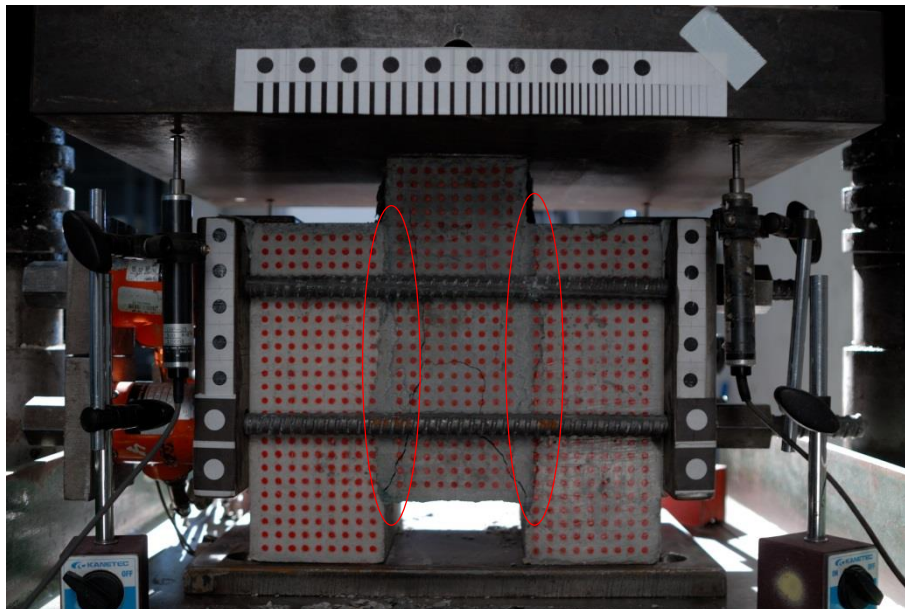


Figura 30 – Identificação dos alvos das zonas das interfaces analisados em cada provete

O ângulo θ de cada interface permite, por comparação direta, perceber ao longo de cada ensaio, qual das interfaces de cada provete sofreu maior deslocamento.

Nesta secção apresenta-se o cálculo do ângulo θ , através da Equação (9), J. F. Silva Gomes, (2010).

$$\Delta\theta = \frac{\Delta y_1 - \Delta y_2}{l_0} \quad (9)$$

Onde:

- Δy_1 e Δy_2 – diferença de coordenadas verticais (yy) dos alvos
- l_0 – distância horizontal (xx) entre alvos

Nas Tabelas 25 e 26 apresentam-se os resultados da análise da deformação θ nas interfaces, para os provetes N2.4-G-H1.9-0MPa e N2.4-G-N2.4-0MPa. Nas Figuras 33 e 34 constam as respetivas evoluções da deformação θ em função da tensão de corte média na interface.

Tabela 25 – Valores de Evolução média do Ângulo θ ao nível da Interface do Provete N2.4-G-H1.9-0MPa

DSC_0194				DSC_0195				DSC_0196			
Face I		Face II		Face I		Face II		Face I		Face II	
Mira nº	$\Delta\theta$	Mira nº	$\Delta\theta$	Mira nº	$\Delta\theta$	Mira nº	$\Delta\theta$	Mira nº	$\Delta\theta$	Mira nº	$\Delta\theta$
161/186	0,0077	346/361	-	161/186	-	346/361	0,0052	161/186	0,0033	346/361	-
162/187	-	347/362	0,0155	162/187	-	347/362	0,0213	162/187	-	347/362	0,0327
163/188	0,0181	348/363	0,0021	163/188	0,0113	348/363	0,0100	163/188	-	348/363	-
164/189	-	349/364	-	164/189	-	349/364	-	164/189	0,0093	349/364	-
165/190	0,0237	350/365	0,0153	165/190	-	350/365	0,0045	165/190	0,0020	350/365	0,0171
166/191	-	351/366	0,0010	166/191	0,0069	351/366	0,0040	166/191	0,0241	351/366	0,0079
167/192	-	352/367	-	167/192	-	352/367	-	167/192	-	352/367	-
168/193	0,0217	353/368	0,0028	168/193	0,0461	353/368	0,0085	168/193	0,0233	353/368	0,0079
169/194	0,0071	354/369	0,0050	169/194	0,0187	354/369	0,0032	169/194	0,0123	354/369	0,0006
170/195	-	355/370	0,0028	170/195	-	355/370	0,0017	170/195	0,0010	355/370	0,0056
171/196	-	356/371	0,0011	171/196	-	356/371	0,0084	171/196	-	356/371	0,0232
172/197	-	357/372	-	172/197	-	357/372	-	172/197	-	357/372	-
173/198	0,0150	358/373	0,0175	173/198	0,0144	358/373	0,0033	173/198	0,0161	358/373	0,0198
174/199	0,0107	359/374	-	174/199	0,0341	359/374	-	174/199	0,0515	359/374	0,0105
175/200	0,0173	360/375	0,0276	175/200	0,0363	360/375	0,0581	175/200	0,0579	360/375	0,0730
Média=	-	Média=	0,0005	Média=	0,0033	Média=	0,0046	Média=	0,0062	Média=	0,0095

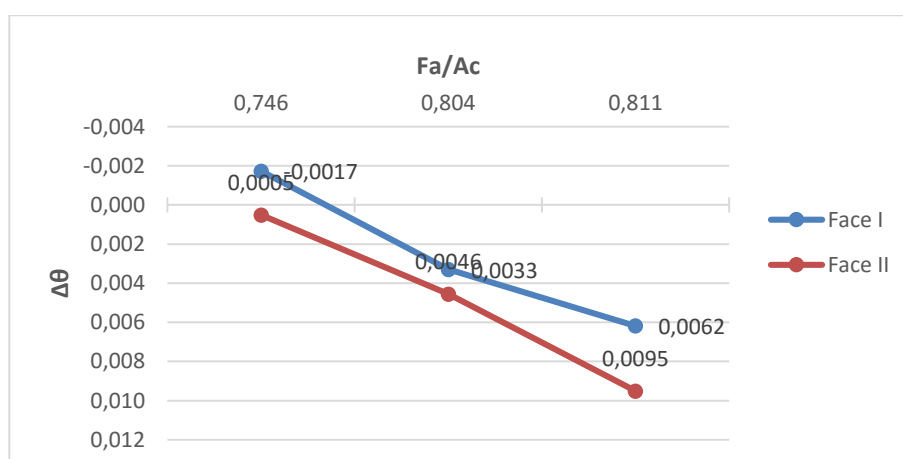


Figura 31 – Gráfico de Evolução média do Ângulo θ ao nível da Interface do Provete N2.4-G-H1.9-0Mpa

Tabela 26 – Valores de Evolução média do Ângulo θ ao nível da Interface do Provete N2.4-G-N2.4-0Mpa

DSC_0217				DSC_0218				DSC_0219			
Face I		Face II		Face I		Face II		Face I		Face II	
Mira nº	$\Delta\theta$	Mira nº	$\Delta\theta$	Mira nº	$\Delta\theta$	Mira nº	$\Delta\theta$	Mira nº	$\Delta\theta$	Mira nº	$\Delta\theta$
161/186	0,0018	346/361	- 0,0030	161/186	0,0280	346/361	0,0117	161/186	0,1027	346/361	0,0888
162/187	- 0,0032	347/362	- 0,0048	162/187	0,0260	347/362	0,0096	162/187	0,0958	347/362	0,0869
163/188	0,0078	348/363	- 0,0007	163/188	0,0330	348/363	0,0185	163/188	0,1047	348/363	0,0948
164/189	- 0,0062	349/364	- 0,0018	164/189	0,0169	349/364	0,0145	164/189	0,0879	349/364	0,0876
165/190	0,0067	350/365	0,0028	165/190	0,0326	350/365	0,0160	165/190	0,1034	350/365	0,0945
166/191	- 0,0001	351/366	0,0030	166/191	0,0229	351/366	0,0197	166/191	0,0982	351/366	0,0933
167/192	0,0166	352/367	0,0008	167/192	0,0420	352/367	0,0177	167/192	0,1124	352/367	0,0930
168/193	- 0,0072	353/368	0,0020	168/193	0,0207	353/368	0,0158	168/193	0,0940	353/368	0,0908
169/194	- 0,0020	354/369	0,0001	169/194	0,0251	354/369	0,0162	169/194	0,0960	354/369	0,0898
170/195	- 0,0048	355/370	0,0089	170/195	0,0203	355/370	0,0280	170/195	0,0935	355/370	0,0976
171/196	- 0,0088	356/371	0,0053	171/196	0,0179	356/371	0,0219	171/196	0,0881	356/371	0,0957
172/197	- 0,0141	357/372	0,0133	172/197	0,0106	357/372	0,0203	172/197	0,0862	357/372	0,1099
173/198	0,0185	358/373	0,0061	173/198	0,0446	358/373	0,0230	173/198	0,1151	358/373	0,0965
174/199	0,0058	359/374	- 0,0006	174/199	0,0314	359/374	0,0148	174/199	0,1018	359/374	0,0915
175/200	0,0071	360/375	0,0054	175/200	0,0351	360/375	0,0179	175/200	0,1046	360/375	0,0928
Média=	0,0012	Média=	0,0025	Média=	0,0271	Média=	0,0177	Média=	0,0990	Média=	0,0936

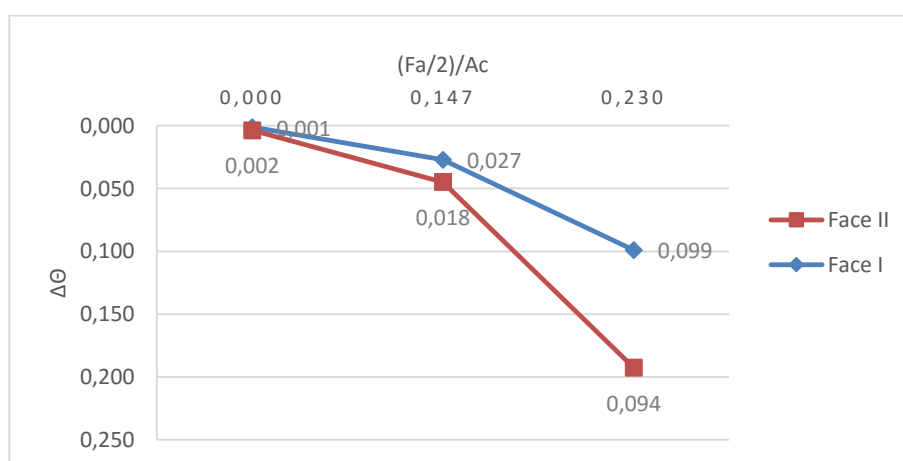


Figura 32 - Gráfico de Evolução média do Ângulo θ ao nível da Interface do Provete N2.4-G-N2.4-0Mpa

Os provetes N2.4-G-H1.9-0MPa e N2.4-G-N2.4-0MPa apresentam, ao longo de todo o ensaio, valores semelhantes da deformação θ , os quais vão aumentando à medida que o ensaio evolui, como era esperado, devido ao deslocamento entre as partes do provete.

Os valores da força máxima são maiores no provete N2.4-G-H1.9-0MPa, com valor de 648,5 kN, comparativamente com o valor de 211,0 no provete N2.4-G-N2.4-0MPa, facto que é explicado, apesar da existência da mesma rugosidade (G) nas interfaces nos dois provetes, pela diferença de comportamento do betão adicionado e da diferença de modo de rotura; a pasta mais rica e resistente do betão H1.9 contribui para o aumento da resistência da interface. Além disso, o modo de rotura do provete H1.9 origina uma superfície de rotura menos rugosa, pelo corte fácil dos agregados leves, dando origem a um comportamento mais linear entre fases de ensaio e entre interfaces; no provete com betão adicionado N2.4, os agregados grossos de calcário influenciam o comportamento pós pico, com mais atrito e dano na interface, sendo mais irregular entre as interfaces.

4.8 Extensão (zona superior dos provetes)

O cálculo da extensão foi realizado na zona superior do provete, a qual estava sujeita a maior valor de tensão normal (Figura 36). O cálculo foi efetuado com as imagens da primeira foto e da fase elástica de ensaio, de modo a ser possível obter os deslocamentos e extensão em fase elástica.

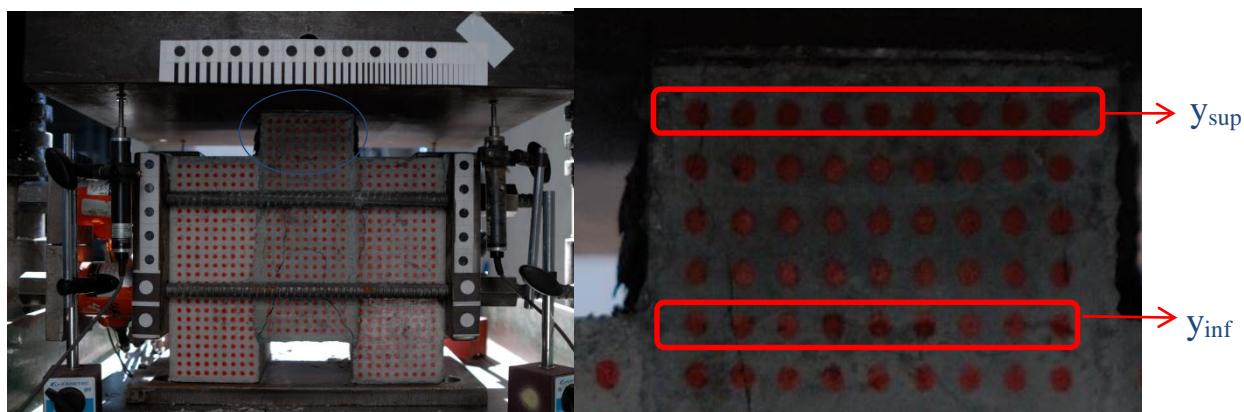


Figura 33 – Identificação da zona dos provetes sujeita a maior valor de tensão

Aplicou-se a equação (11) para o cálculo da extensão ϵ , (J. F. Silva Gomes, 2010), em função das diferenças de coordenadas médias de dois alinhamentos superior e inferior da zona de estudo.

$$\text{Extensão } (\epsilon) = (\Delta Y_{\text{inf}} - \Delta Y_{\text{sup}}) / l_0 \quad (10)$$

Em que:

- ΔY_{inf} e ΔY_{sup} – variação de deslocamento vertical dos alvos inferiores e superiores, medido em mm;
- l_0 – distância entre alvos inferiores e superiores, 40 mm.

Na Tabela 27 apresentam-se os cálculos da extensão, aplicando a equação (10) para o provete N2.4-G-H1.9-0MPa, o que permite estimar o módulo de elasticidade, E, do betão adicionado nessa zona de aplicação da carga, através da equação (11).

$$E = \sigma / \epsilon = (F_a / A) / \epsilon \quad (11)$$

Tabela 27 – Valores da Extensão no Provete N2.4-G-H1.9-0MPa

Fase Inicial/DSC_0192						
Diferença de Coordenadas						
Mira nº	Fy (mm)	Mira nº	Fy(mm)	L (mm)	Extensão	
181	-0,816	185	-0,512	40	0,008	
201	-0,629	205	-0,395		0,006	
221	-0,567	225	-0,504		0,002	
241	-0,492	245	-0,818		-0,008	
261	-0,062	265	-0,738		-0,017	
281	-0,490	285	-0,591		-0,003	
301	-0,404	305	-0,650		-0,006	
321	-0,636	325	-0,593		0,001	
341	-0,579	345	-0,474		0,003	
Média=	-0,519		-0,586			-0,002

Com os valores de tensão e extensão instaladas no provete, foi possível estimar o valor do módulo de elasticidade, através dos resultados obtidos através de Fotogrametria.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \Leftrightarrow E = \frac{Fa/Ac}{\varepsilon} \text{ (Gpa)} \quad (12)$$

Com os valores de tensão e extensão instaladas no provete, foi possível estimar o valor do módulo de elasticidade, aplicando (Equação 12) para a fase elástica do ensaio do referido provete, através dos resultados obtidos por Fotogrametria.

Deste modo e sabendo o valor do módulo de elasticidade do betão da parte intermédia do provete, (Costa, 2012), com um valor de 27,1GPa para o betão H1.9, é possível comparar com o método ótico-digital utilizado, cujo resultado foi de aproximadamente 15 GPa, a diferença de resultados pode dever-se por um lado a uma eventual assimetria na distribuição da tensão na zona carregada, originando maior deformação na face onde se faz aquisição de imagens, ou mesmo à precisão do método associada à reduzida deformação nessa zona.

5. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

5.1 Conclusões

No âmbito do trabalho desenvolvido e apresentado na presente dissertação, foi possível comparar a capacidade do método ótico-digital (Fotogrametria e Processamento de Imagem), face ao método tradicional (instrumentação com LVDT's), no estudo do comportamento estrutural de ligações entre BDN-BEAL de provetes compósitos ensaiados em laboratório.

Analisados os valores registados pelos LVDT's durante o ensaio e a correspondente curva carga/tempo, definiram-se as fases de ensaio relevantes e seleccionaram-se as respetivas imagens captadas. Para cada provete ensaiado, foram processadas as referidas imagens pelo método já desenvolvido em *Matlab*, sendo realizada a identificação e numeração dos alvos, a definição das coordenadas em cada mira e a aplicação da matriz Homografia, transformando as coordenadas de *pixels* para milímetros. Analisaram-se os deslocamentos vertical e horizontal de todas as miras, sendo possível fazer a análise estrutural dos provetes e quantificar as grandezas definidas, nomeadamente: estimativas do Módulo de Elasticidade G ao nível das interfaces; dilatância ao nível da interface e entre extremidades laterais; deformação angular de corte ao nível das interfaces; e extensão e estimativa do Módulo de Elasticidade E na zona de carregamento dos provetes.

Do estudo efectuado, foi possível obter as seguintes conclusões, pela comparação e análise entre os métodos utilizados:

- A monitorização tradicional, com os registos dos instrumentos LVDT's apresentam valores coerentes com a evolução do ensaio e com elevada precisão de análise, permitindo mesmo corrigir valores em falta, através de correlações lineares entre instrumentos, não interferindo na monitorização total e final do ensaio.
- O método combinado utilizado, de fotogrametria e processamento de imagem, possibilita resultados rápidos e em geral com boa precisão, processados de forma automática e num número praticamente ilimitado de pontos análise; permite a análise de um vasto conjunto de parâmetros, não carecendo da utilização de equipamento técnico e de tratamento específicos, isto é, para a monitorização é apenas necessário ter uma grelha de alvos circulares, e visíveis na aquisição de imagem, sobre a superfície do provete.
- Da comparação específica entre métodos, o método ótico-digital tem elevada capacidade e precisão na avaliação de deslocamentos e deformações diversas na superfície ou elemento em análise, permitindo estimar grandezas elásticas e constitutivas dos materiais e estruturas, designadamente deslocamentos em qualquer zona ou superfície,

deformações normais ou de corte, o que permite estimar módulos de elasticidade ou estados de tensão por zonas definidas.

- O método ótico-digital embora apresente muitas vantagens relativamente à celeridade de processos e de tratamentos de dados, apresenta também algumas limitações, especialmente quando ocorrem erros na aquisição e no processamento da imagem, o mesmo poderá refletir-se em todas as análises feitas com os valores de coordenadas e deslocamentos de cada mira obtidos; as miras podem não ser detetadas e ordenadas corretamente, resultando em valores de deslocamentos calculados incorrentes com o comportamento real; nesse sentido, é necessária a capacidade de análise do utilizador para detetar e corrigir situações de erro. Além disso, por vezes a precisão do método poderá não ser suficiente para as deformações e deslocamentos ocorridos, quando estes são muito reduzidos.

- O varrimento do ensaio requer uma elevada frequência de aquisição, para situações de monitorização com várias fases e com rápidas transições entre fases, como por exemplo a transição de regime elástico para um regime pós-pico de rotuda; assim, poderão adquirir-se imagens muito próximas ou coincidentes com as diversas fases que se pretendem analisar. No presente estudo, a aquisição de imagens foi pouco frequente, o que limitou o numero de pontos de análise e nem sempre foi possível obter as imagens nos momentos de ensaio pretendidos.

5.2 Desenvolvimentos Futuros

Na sequência do trabalho desenvolvido e das conclusões obtidas, sugerem-se alguns estudos que podem ser realizados na comparação e validação do método da Fotogrametria, comparativamente ao método de monitorização tradicional, nomeadamente:

- Estudo da largura de fendas e evolução do padrão nas faces de provetes e elementos de betão;

- Estimativa dos valores dos módulos de elasticidade em diferentes partes de provetes e elementos, calculado com base nas extensões e tensões instaladas ao longo dos ensaios de monitorização.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Brito, J., (2004). Diagnóstico, Patologia e Reabilitação de Revestimentos de Paredes, Cadeira de Reabilitação Não-Estrutural de Edifícios por Jorge de Brito, Instituto Superior Técnico, Lisboa

Campilho, A. (2000). Instrumentação Electrónica. Métodos e Técnicas de Medição. FEUP-Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto

Carmo, R., Costa, H., C., L., Andrade, D., & Simões, T. (2012). Influence of both concrete strength and transverse confinement on bending behaviour of reinforced LWAC beams. *Engineering Structures*.

Costa, H. (2012). BETÕES ESTRUTURAIS DE AGREGADOS LEVES. APLICAÇÕES EM PREFABRICAÇÃO E REFORÇO DE ESTRUTURAS. Dissertação de Doutoramento na área científica de Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra.

DECivil - Departamento de Engenharia Civil, Arquitectura e Georrecursos; Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal; sitio oficial, www.civil.ist.utl.pt/

Dias-da-Costa, D., Valença, J. e Júlio E. (2010). Monitorização Estrutural até à Rotura Aplicando Técnicas de Pós-Processamento de Dados Obtidos por Fotogrametria, Encontro Nacional Betão Estrutural 2010, Lisboa

Dias-da-Costa, D., J. Valença, e E. Júlio (2011), Laboratorial test monitoring applying photogrammetric post-processing procedures to surface displacements. *Measurement*, 2011

Eurocódigo-2. NP EN 1992-1-1: Eurocódigo 2 – Projecto de estruturas de betão. Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios, European Committee for Standardization (CEN). 2010

Gomes, J., (2013). Análise de vigas de betão sujeitas à flexão através de Fotogrametria, Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Construção Urbana, Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, Coimbra

Gonzales, R. and R. Woods. *Digital image processing*. ed. Second Edition, Prentice Hall. 2002

G.W. Lisk Company, Inc. Website

J. F. Silva Gomes, Lucas Filipe Martins da Silva, (2010). *Introdução à Resistência dos Materiais*, Edição Publindústria, Portugal

Lourenço, C. F. (2011). Influência do Confinamento do Betão Leve no Comportamento Geral de Vigas. Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Construção Urbana, Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, Coimbra

Valença, J. M. (2006). Aplicações de Fotogrametria à Engenharia de Estruturas. Coimbra, Universidade de Coimbra, Tese de Mestrado.

Valença, J. M. (2012). Monitorização do estado de conservação de estruturas de betão por processamento de imagem e análise multi-espectral. Dissertação de Doutoramento na área de Engenharia Civil, Universidade de Coimbra.

Valença, J., Júlio, E., & Araújo, H. (2007). Aplicações de Fotogrametria na Monitorização de estruturas. A Instrumentação Científica e a Metrologia Aplicadas à Engenharia Civil, LNEC, Lisboa.

Valença, J., Dias-da-Costa, D., Júlio, E. e Araújo, H. (2011). SISTEMA INTEGRADO PARA DETECTAR E CARACTERIZAR FISSURAS EM SUPERFÍCIES DE BETÃO DURANTE ENSAIOS LABORATORIAIS, Congresso de Métodos Numéricos em Engenharia 2011, Coimbra.

Valença, J., Dias-da-Costa, D., Júlio, E. e Júlio E. (2010). Desenvolvimento de um Método Inovador de Detecção e Medição de Fissuras em Estruturas de Betão, Encontro Nacional Betão Estrutural 2010, Lisboa

Wikipedia - The Free Encyclopedia; sitio oficial, www.wikipedia.org.