



**Marco Gonçalves  
Filipe**

**Caraterização de alvenarias antigas.  
Ensaio de *Flat Jack*.**





**Marco Gonçalves  
Filipe**

**Caraterização de alvenarias antigas.  
Ensaios de *Flat Jack*.**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, realizada sob a orientação científica do Doutor Romeu da Silva Vicente, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro e do Doutor Aníbal Guimarães da Costa, Professor Catedrático do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro.



Dedico este trabalho aos meus Pais, Gentil Filipe e Rute Gonçalves.



## **o júri**

Presidente

Prof. Doutor Carlos Daniel Borges Coelho  
professor auxiliar da Universidade de Aveiro

Doutor Luís Filipe Barbosa Miranda

Prof. Doutor Romeu da Silva Vicente  
professor auxiliar da Universidade de Aveiro

Prof. Doutor Aníbal Guimarães da Costa  
professor catedrático da Universidade de Aveiro





## agradecimentos

Na hora em que escrevemos os agradecimentos não é difícil olhar para trás e perceber que o resultado do nosso esforço pessoal foi fruto de um apoio colectivo tão importante que é uma dívida que dificilmente se pagará.

Como Cristão, agradeço a Deus, a relação é pessoal e significativa para mim.

Como aluno, agradeço ao Professor Romeu Vicente que na sua competência mostrou-se acessível, prático, solícito e encorajador. A orientação tem sentido quando sentimos que houve debate, opiniões, estratégias e discussão de caminhos a seguir entre orientador e orientado. Eu tive a sorte e o prazer de ser orientado. Muito Obrigado.

Ao meu co-orientador, Professor Aníbal Costa agradeço também a ajuda prestada em opiniões e nos contactos realizados para obter material indispensável à realização desta dissertação, obrigado.

Como amigo, agradeço aqueles que me apoiaram, cumprindo sempre o dever deles apontando-me falhas e ajudando-me a superá-las não se resignando na complacência de apenas observar mas agindo no meu melhor interesse. De salientar Nuno Melo, Telmo Cardoso, Filipe Soares, Izidro Alves e Gonçalo Igreja. Abraham Lincoln estava certo “A melhor parte da vida de uma pessoa, está nas suas amizades”.

Um agradecimento especial aos funcionários do Departamento de Engenharia Civil e do Instituto de Telecomunicações da Universidade de Aveiro, pelo seu companheirismo demonstrado. Aos engenheiros António Figueiredo, Bruno Lobo, Fábio Garcia, Maria Carlos e ao Vítor Rodrigues. Professor Rogério Nogueira, Dra. Lúcia Bilro e Carlos Marques, muito obrigado.

E aqueles que dão sentido ao caminho que trilhamos, agradeço...

Aos meus pais que sempre fizeram por mim muito mais do que aquilo que lhes era exigido, nenhum filho teve melhores pais.

À minha namorada Micaela Vicente, que é simultaneamente o chão onde me apoio e o céu para onde olho. Na nossa relação, o maior devedor serei sempre eu, Obrigado Mica.

Às minhas irmãs Sara Vinhas e Liliana Couto pelo carinho e interesse.

Aos meus cunhados Filipe Vinhas, Ismael Couto e Carina Vicente pelo incentivo e interesse.

Às minhas sobrinhas Carolina Vinhas e Sarai Couto que as amo como se fossem minhas.

Aos que aqui foram referidos e aos que não foram, sendo importantes, na singeleza da palavra, apenas posso dizer: Obrigado.



## **palavras-chave**

Ensaio de macacos planos, alvenaria de adobe, fibras ópticas, melhorias ensaio.

## **resumo**

Inserido no contexto da região onde está localizada a Universidade de Aveiro a construção em adobe é tema de discussão de vários estudos científicos promovidos por esta universidade. Os ensaios de macacos planos (*flat jack*) apesar de já largamente conhecidos e estudados por diferentes autores apresentam resultados que podem ser melhorados.

Na presente dissertação realizou-se ensaios de macacos planos numa parede de alvenaria de adobe construída em laboratório com o objectivo não de estudar as características mecânicas do adobe mas sim adaptar o protocolo de ensaio actualmente utilizado neste tipo de ensaios de modo a permitir melhorias na medição da área efectivamente carregada.

A medição desta área efectivamente carregada passou por duas fases principais: a primeira consistiu na adaptação de uma rede de marcação na superfície do macaco onde se realizaram ensaios em condições idênticas de modo a comparar-se os resultados obtidos entre o ensaio de macacos planos normal e o ensaio de macacos planos adaptado com rede de marcação. Foram estimados valores segundo a via de cálculo sugerida pelo Eurocódigo 6 e por métodos expeditos de modo a comparar-se os resultados obtidos com aqueles estimados por via experimental. Numa segunda fase promoveram-se estudos da viabilidade da utilização de redes de Bragg como medidores de deformações no ensaio de macacos planos. Estes estudos implicaram testes de adaptabilidade da fibra óptica aos condicionalismos do ensaio de macacos planos.

Os resultados obtidos na presente dissertação acentuam a importância da área efectivamente carregada na validade dos resultados obtidos por este tipo de ensaios "in situ" e constituem um primeiro passo na adopção de novas tecnologias que irão fornecer resultados mais precisos.



**keywords**

Flat jack testing, adobe masonry, optical fiber, testing improvement

**abstract**

Inserted in the context of the region where the Universidade de Aveiro is located, the adobe construction is the discussion topic of several scientific studies promoted by this University. The flat jacks testing, despite widely known and studied by different authors, present results that could still be improved.

In this dissertation, trials on flat jacks were done on a adobe masonry wall previously built in a laboratory, not with the objective of studying the mechanical characteristics of the adobe, but with the objective of adapting the test protocol currently used in this type of trials, so that improvements in the measuring of the effectively loaded area would be possible.

The measuring of the effectively loaded area, relevant feature of flat jack testing, undertook two main phases: The first phase consisted in the adaptation of a marking mesh in the surface of the flat jack, where the trials were executed, under identical conditions, in order to compare the results obtained with the normal testing protocol flat jacks trials and the results obtained in the adapted jacks with the marking mesh. Values were estimated accordingly to the calculations suggested by the Eurocode 6 and using expedite methods in order to compare the results obtained with those calculated in an experimental way. In a second phase viability studies were promoted concerning the use of Bragg networks as a measure of deformability on flat jacks testing. This studies implied tests on the adaptability of optic fiber to the constraints of the flat jack testing trial.

The results obtained in this dissertation accentuate the importance of the effectively loaded area in the validity of the results obtained in this type of "in situ" testing, and constitute the first step towards the adoption of new technologies that will be able to provide more accurate results.



## ÍNDICE GERAL

**Agradecimentos**

**Resumo**

**Abstract**

**Índice da Dissertação** ..... **xv**

**Índice de Figuras** ..... **xvii**

**Índice de Tabelas** ..... **xix**

**Simbologia** ..... **xx**

**Lista de Acrónimos** ..... **xxi**

1.	Enquadramento, objectivos e organização da dissertação.....	3
1.1.	Enquadramento do tema .....	3
1.2.	Objectivos da dissertação .....	4
1.3.	Organização da dissertação .....	5
2.	Ensaio de macacos planos.....	9
2.1.	Breve história dos ensaios de macacos planos .....	9
2.2.	Normas internacionais .....	10
2.3.	Constituição dos macacos planos .....	13
2.4.	Descrição geral do ensaio com recurso a macacos planos .....	14
2.4.1.	Ensaio simples .....	14
2.4.2.	Ensaio duplo .....	17
2.4.3.	Pressupostos teóricos do ensaio de macacos planos.....	20
2.4.4.	Condicionantes do ensaio de macacos planos .....	21
2.5.	Equipamentos utilizados.....	22
3.	Análise experimental .....	29
3.1.	Enquadramento e objectivos.....	29
3.2.	Construção das paredes .....	29
3.3.	Coefficiente de correcção $K_m$ .....	31
3.4.	Caracterização dos materiais utilizados na construção da parede .....	34
3.4.1.	Ensaio de flexão e compressão aos provetes de argamassa .....	35
3.4.2.	Ensaio de compressão dos blocos de adobe .....	37

3.5.	Ensaio simples.....	38
3.5.1.	Método Expedito- Opção A: Tensão instalada .....	39
3.5.2.	Macacos Planos- Opção B: Tensão instalada.....	40
3.6.	Ensaio duplos.....	45
3.6.1.	Resistência à compressão .....	48
3.6.2.	Coefficiente de <i>Poisson</i> e módulo de elasticidade .....	52
3.7.	Resistência à compressão das paredes de alvenaria de adobe segundo EC6 .....	54
3.8.	Discussão dos resultados .....	56
3.8.1.	Estimativa da tensão instalada.....	58
3.8.2.	Estimativa da resistência à compressão .....	59
3.8.3.	Estimativa do módulo de elasticidade .....	61
4.	Fibra óptica.....	65
4.1.	Fibra óptica – Conceitos fundamentais .....	65
4.1.1.	Introdução.....	65
4.1.2.	Redes de Bragg uniformes .....	65
4.1.3.	Breve história das redes de Bragg .....	67
4.1.4.	Gravação dos sensores pelo método de máscara de fase .....	68
4.1.5.	Sensibilidade das redes de Bragg a perturbações externas .....	69
4.2.	Ensaio realizado com fibra óptica .....	70
4.2.1.	Posicionamento dos sensores .....	70
4.2.2.	Testes de adaptabilidade da fibra .....	73
4.3.	Discussão dos resultados .....	75
4.3.1.	Discussão dos resultados das abordagens realizadas .....	76
4.3.2.	Ensaio realizado apenas com fibra óptica .....	81
5.	Conclusões, comentários finais e perspectivas de trabalho futuro.....	87
5.1.	Síntese do trabalho realizado.....	87
5.1.1.	Breve descrição do trabalho realizado .....	87
5.1.2.	Avaliação de resultados.....	88
5.2.	Conclusões principais.....	89
5.3.	Comentários finais.....	90
5.4.	Perspectivas de trabalho futuro .....	91
	Referências Bibliográficas.....	95



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Aspecto geral do ensaio de calibração dos macacos planos realizado por Rossi [Miranda, 2011] .....	10
Figura 2: Macaco plano semi-oval utilizado nos ensaios .....	13
Figura 3: Ilustração das diferentes fases do ensaio simples [Miranda, 2011] .....	15
Figura 4: Fases do ensaio simples descrito no Capítulo 3 .....	17
Figura 5: Esquema geral do ensaio duplo [Miranda, 2011] .....	18
Figura 6: Viga de carregamento utilizada.....	19
Figura 7: Sensores utilizados nos ensaios realizados .....	23
Figura 8: Exemplos de equipamentos utilizados .....	24
Figura 9: Equipamento de medição e aquisição de dados .....	25
Figura 10: Procedimentos na construção da parede de adobe .....	30
Figura 11: Construção da parede de adobe.....	31
Figura 12: Processo de calibração macacos planos .....	33
Figura 13: Ensaio de argamassas .....	36
Figura 14: Relação tensão-extensão do provete de adobe ensaiado .....	37
Figura 15: Ensaio de resistência de provetes cilíndricos de adobe .....	38
Figura 16: Disposição geral dos ensaios simples realizados em relação à parede de alvenaria de adobe .....	39
Figura 17: Procedimentos realizados com a viga de carregamento em betão armado .....	40
Figura 18: Solução de impressão com rede de marcação da área efectivamente carregada	41
Figura 19: Ensaio simples realizados na parede de alvenaria de adobe.....	42
Figura 20: Imagens obtidas através de uma ferramenta de desenho automático (AutoCad2013) .....	42
Figura 21: Cálculo de todas as áreas obtidas durante os ensaios de macacos planos.....	43
Figura 22: Resultados obtidos no ensaio simples utilizando rede de marcação .....	44
Figura 23: Resultados obtidos no ensaio simples utilizando apenas papel químico .....	45
Figura 24: Ensaio duplo adaptado com rede de marcação .....	46
Figura 25: Esquema geral dos ensaios duplos realizados na parede de alvenaria.....	47
Figura 26: Resultados obtidos no ensaio duplo adaptado com rede de marcação.....	49

Figura 27: Tensão em função da média das extensões dos alinhamentos verticais. Ensaio duplo com rede de marcação .....	50
Figura 28: Resultados obtidos no ensaio duplo sem rede .....	51
Figura 29: Tensão em função da média das extensões verticais no ensaio duplo sem rede	51
Figura 30: Relação tensão-extensão do ensaio de macacos planos duplo com e sem rede.	52
Figura 31: Estimativa do módulo de elasticidade do ensaio duplo com rede .....	53
Figura 32: Registos químicos do mesmo tipo de ensaio de macacos planos com e sem rede de marcação.....	57
Figura 33: Representação esquemática do funcionamento de uma rede de Bragg uniforme (imagem alterada de [Alberto, 2011]).....	66
Figura 34: Espectros de reflexão e transmissão de uma rede Bragg uniforme [Alberto, 2011].....	67
Figura 35: Gravação de redes de Bragg pelo método de máscara de fase [Alberto, 2011]	68
Figura 36: Modelos de ensaio de verificação da resistência da fibra óptica .....	73
Figura 37: Indicação da posição da fibra óptica e local de rotura num ponto de fixação com cola de secagem rápida.....	76
Figura 38: Conjunto formado pelo macaco plano, fibra óptica e envolvente em fibra de carbono .....	77
Figura 39: Conjunto formado por macaco, envolvente dos sensores em fibra de carbono e capa exterior em tela comum .....	77
Figura 40: Membrana de alta densidade .....	78
Figura 41: Abordagem n.º 5 .....	79
Figura 42: Abordagem n.º6 .....	80
Figura 43: Abordagem n.º7 .....	81
Figura 44: Esquema geral do ensaio de compressão das fibras .....	82
Figura 45: Relação força-deslocamento da fibra óptica.....	82
Figura 46: Relação força/deslocamento da fibra plástica.....	83
Figura 47: Condição mecânica das fibras ópticas após serem testadas.....	84
Figura 48: Diferentes aplicações do sistema Tactilus [Imagens de <a href="http://www.sensorprod.com">www.sensorprod.com</a> ]	92

**ÍNDICE DE TABELAS**

Tabela 1: Características dimensionais a respeitar nos ensaios de macacos planos.(Tabela modificada de [Miranda, 2011]).....	11
Tabela 2: Equivalência entre força e deslocamento para cada ciclo de carga.....	33
Tabela 3: Calibração do macaco plano semi-oval superior.....	34
Tabela 4: Calibração do macaco plano semi-oval inferior.....	34
Tabela 5: Tensão resistente da argamassa de construção (flexão).....	35
Tabela 6: Tensão resistente da argamassa de construção (compressão).....	36
Tabela 7: Registos obtidos relativamente às áreas carregadas no ensaio simples.....	43
Tabela 8: Coeficiente de correcção para o macaco plano utilizado nos ensaios simples....	43
Tabela 9: Registos obtidos relativamente à área carregada dos ensaios duplos.....	48
Tabela 10: Coeficientes de <i>Poisson</i> .....	53
Tabela 11: Estimativas dos módulos de elasticidade obtidos nos ensaios duplos.....	54
Tabela 12: Variação dos <i>Ka</i> .....	57
Tabela 13: Resumo das tensões instaladas.....	59
Tabela 14: Resumo dos resultados obtidos para resistência à compressão.....	59
Tabela 15: Comparação de resultados do módulo de elasticidade.....	61
Tabela 16: Forma e dimensões (em m) dos macacos planos utilizados.....	71
Tabela 17: Soluções de disposição do macaco plano.....	72

**SIMBOLOGIA**

$A_c$	Área de carregamento dos macacos planos obtida através dos registos com papel químico marcados com ou sem rede
$A$	Comprimento do macaco plano
$B$	Profundidade do macaco plano
$d_{ref}$	Distância na vertical entre os pontos de referência no ensaio simples
$E_{mac}$	Distância medida na vertical entre os macacos planos no ensaio duplo
$E_0$	Módulo de elasticidade inicial
$e_{folhas}$	Espessura das folhas de aço com que se faz o macaco
$f_b$	Resistência à compressão dos elementos de alvenaria
$f_m$	Resistência à compressão da argamassa utilizada na alvenaria
$f_k$	Resistência à compressão característica da alvenaria
$H_{alv}$	Altura de uma unidade de alvenaria
$K$	Coefficiente que depende do tipo de elementos, tipo de argamassa e parede
$K_a$	Constante que traduz a relação entre a área do macaco e a área da abertura realizada na parede
$K_m$	Constante que procura traduzir a rigidez do macaco plano e o atrito do sistema hidráulico, pode ser determinada laboratorialmente através do procedimento de calibração (Norma ASTM C1197-91)
$L_{alv}$	Comprimento de uma unidade de alvenaria
$p$	Pressão medida no manómetro da bomba que pressuriza os macacos
$P_{max}$	Pressão máxima recomendada debitada pelo sistema hidráulico no macaco durante o ensaio
$P_{alv}$	Espessura de uma unidade de alvenaria
$R$	Raio do disco da máquina de corte
$S_{potenciómetros}$	Sensibilidade dos potenciómetros
$\alpha$	Expoente [0.55;0.75]: argamassa convencional – 0.65
$\beta$	Expoente [0.25;0.30]: argamassa convencional – 0.25

$\varepsilon$	Extensão média estimada
$\varepsilon_h$	Extensão horizontal
$\varepsilon_v$	Extensão vertical
$\gamma$	Peso específico de diversos materiais
$\nu$	Coefficiente de <i>Poisson</i>
$\sigma_m$	Tensão média (corrigida)
$\sigma_i$	Tensão normal instalada
$\sigma_{m\acute{a}x}$	Tensão máxima atingida

## LISTA DE ACRÓNIMOS

ASTM	American Society for Testing and Materials
DECivil- UA	Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro
EC6	Eurocódigo 6 Design of masonry structures - Part 1-1: General rules for reinforced and unreinforced masonry structures.
IT- UA	Instituto de Telecomunicações da Universidade de Aveiro
RILEM	Reunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux
U.V	Espectro de radiação ultra violeta.
LVDT	Linear Variable Differential Transducer



## **Capítulo 1**

### **Enquadramento, objectivos e organização da dissertação**

---

---

## **Capítulo 1 Enquadramento, objectivos e organização da dissertação**

- 1.1. Enquadramento do tema
- 1.2. Objectivos da dissertação
- 1.3. Organização da dissertação



---

# 1. ENQUADRAMENTO, OBJECTIVOS E ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

## 1.1. Enquadramento do tema

“O Mercado de reabilitação em Portugal vale perto de duzentos mil milhões de euros. Parece um número astronómico, superior à riqueza produzida em Portugal, mas, a pecar, é por defeito.” In Jornal Público On-line 12/01/2010, Luísa Pinto [Pinto, 2010]

Em Portugal no 3º trimestre de 2010 foram licenciados 6,8 mil edifícios. Do total de edifícios licenciados 67,3% correspondem a habitações novas. Estes dados do INE [Estatística, 2011] comprovam que as políticas de construção do país ainda não estão orientadas para um sector decisivo como é indubitavelmente o sector da reabilitação. No conjunto de 14 países em que existem dados disponíveis, Portugal coloca-se como o país que menos investe na reabilitação (6,6% do investimento na construção não é dedicado a construção nova) apenas a Roménia investe menos (5,5% investidos na reabilitação). Não obstante, a realidade do país irá obrigar a uma mudança cada vez mais acentuada na canalização de recursos para a reabilitação do património edificado e a oportunidade de explorar este nicho de mercado deverá atrair cada vez mais interessados. Os sucessivos pacotes legislativos, lavrados por diferentes governos, pretendiam fomentar uma cultura de reaproveitamento e requalificação do património edificado (linhas de crédito bonificado para obras de reabilitação, actualização de rendas, etc.) ainda assim a reabilitação em Portugal não teve o impulso necessário que nos colocaria ao mesmo nível dos parceiros europeus. O difícil contexto macroeconómico que o país atravessa também coloca sérios desafios com a contracção orçamental a posicionar-se como o principal adversário de obras de reabilitação. A linha orientadora do governo é agora de contenção de custos conforme explicitado no Orçamento do Estado para 2012: ”... Em paralelo, prevê-se a suspensão, durante o ano de 2012, da aplicação do regime de exceção consagrado na Lei de Finanças Locais respeitante a empréstimos a médio e longo prazo a contrair pelos municípios no âmbito de programas de reabilitação urbana e projectos com participação de fundos comunitários.” [Finanças, 2012].

A determinação de propriedades de alvenarias a restaurar apresenta-se como um grande desafio à engenharia. De facto, mesmo possuindo os desenhos originais da construção, pormenores construtivos e descrição detalhada do sistema de construção utilizado, muitas vezes os valores estimados para a resistência das alvenarias têm associado uma margem de erro que simplesmente não se pode ignorar.

Métodos de ensaios destrutivos como a remoção de carotes, por vezes não são aceitáveis pois além de condicionarem a utilização do edifício ainda podem danificar património que não pode sofrer alterações de nenhum tipo, como é o caso de património cultural com elevado valor histórico.

No campo de ensaios não destrutivos os ensaios de macacos planos constituem uma alternativa válida, que permite determinar, *in situ*, o estado de tensão local instalado numa parede, bem como estimar o módulo de elasticidade e a capacidade resistente à compressão da alvenaria. Estes aspectos são o cerne do trabalho desenvolvido nesta dissertação.

## **1.2. Objectivos da dissertação**

Tendo em conta a importância dos ensaios de macacos planos na caracterização mecânica das alvenarias, nomeadamente na obtenção do módulo de elasticidade e resistência à compressão, é objectivo fundamental deste trabalho o desenvolvimento de técnicas que permitam obter uma melhoria no ensaio de macacos planos. Os objectivos definidos são os seguintes:

- i) Construção de uma parede que permita a realização de dois conjuntos de ensaios de macacos planos (dois ensaios simples e dois ensaios duplos) para apoiar o estudo desenvolvido;
- ii) Desenvolver e aplicar alterações no procedimento de ensaio de macacos planos com recurso a redes de marcação e assim imprimir melhorias no procedimento e protocolo de ensaio estabelecido nas normas internacionais;

- iii) Realização de uma campanha experimental para a caracterização mecânica das alvenarias: resistência à compressão, deformabilidade, coeficiente de *Poisson* e módulo de elasticidade;
- iv) Desenvolvimento de estudos preliminares para avaliar a viabilidade da aplicação de sensores de fibra óptica no ensaio de macacos planos com o objectivo último de obter dados relativamente à área de carregamento.

### **1.3. Organização da dissertação**

O texto está dividido em cinco capítulos e um anexo geral dos quais o Capítulo 1 é a presente introdução. A divisão da dissertação é a seguinte:

- i) No Capítulo 1 é feito o enquadramento do tema da reabilitação no actual contexto português e a pertinência da utilização do ensaio de macacos planos como ensaio parcialmente destrutivo em obras de reabilitação. Nos objectivos da dissertação são referidos os quatro principais pontos de interesse fundamental para o tema abordado e que foram desenvolvidos no presente trabalho.
- ii) No Capítulo 2 são apresentados os ensaios de macacos planos simples e duplos enquanto técnica parcialmente destrutiva: origens, regulamentação, constituição dos materiais, pressupostos e condicionantes, descrição do protocolo de ensaio propriamente dito e equipamentos utilizados.
- iii) O Capítulo 3 refere o interesse da construção de uma parede em alvenaria de adobe no laboratório do DECivil-UA assim como os ensaios de macacos planos, descritos no Capítulo 2, realizados na parede. São descritos os procedimentos de calibração experimental dos macacos planos e os dois métodos distintos de estimativa da tensão instalada. É ainda acrescentado o método de cálculo da resistência à compressão da alvenaria preconizado pelo EC6.

- iv) O Capítulo 4 inicia-se com uma introdução à fibra óptica enquanto tecnologia com potencial para desenvolvimento de aplicações em diferentes áreas no geral, e para a engenharia civil em particular. Pretende-se neste capítulo uma abordagem exploratória à capacidade de utilização das redes de Bragg como sensores de deformação. Nos ensaios realizados, são descritas as limitações da fibra óptica enquanto parte integrante do ensaio de macacos planos e na discussão de resultados é feita uma análise aos problemas e limitações detectadas.
  
- v) Finalmente, o Capítulo 5 pretende evidenciar a comparação dos resultados obtidos no Capítulo 3, assim como conclusões que se possam adquirir das modificações realizadas nos ensaios de macacos planos. São ainda apresentados ensaios comparativos de resistência entre a fibra descrita no Capítulo 4 e um novo tipo de fibra óptica plástica com potencial para se adaptar com sucesso às condicionantes do ensaio de macacos planos.

Em anexo foram adicionadas informações complementares ao trabalho tais como cálculo realizados.

## **Capítulo 2**

### **Ensaio de macacos planos**

---

---

## **Capítulo 2 Ensaio de macacos planos**

- 2.1. Breve história dos ensaios de macacos planos
- 2.2. Normas internacionais
- 2.3. Constituição dos macacos planos
- 2.4. Descrição geral do ensaio com recurso a macacos planos
  - 2.4.1. Ensaio simples
  - 2.4.2. Ensaio duplo
  - 2.4.3. Pressupostos teóricos
  - 2.4.4. Condicionantes do ensaio
- 2.5. Equipamentos utilizados

---

## 2. ENSAIOS DE MACACOS PLANOS

### 2.1. Breve história dos ensaios de macacos planos

A aplicação inicial dos ensaios de macacos planos deriva do campo da Mecânica das Rochas onde se realizava um procedimento com as devidas adaptações a esta área. Era realizado um rasgo no terreno, por intermédio de orifícios consecutivos com cerca de 5 cm de espessura após o qual era introduzido o macaco. O contacto entre este e a rocha era conseguido através de uma argamassa de preenchimento, o procedimento destacava-se negativamente pela morosidade do ensaio e pela perturbação significativa do terreno envolvente ao local do teste [LNEC, 1970].

No final da década de 1960 o Laboratório Nacional de Engenharia Civil introduziu alterações que visaram a obtenção de resultados mais fiáveis para o ensaio de macacos planos nomeadamente ao nível de uma estimativa mais precisa das quantidades ensaiadas, uma redução da perturbação causada pelo teste na zona envolvente ao ensaio e numa redução significativa do tempo de procedimento. Para estas melhorias contribuiu a substituição das secções dos macacos planos usadas até ao momento. O macaco plano de secção rectangular passou a ser semicircular e assim verificou-se uma melhor adaptação entre a superfície de contacto do macaco e do material a testar [Miranda, 2011].

O investigador italiano Paolo Rossi (ver Figura 1) adaptou o método para aplicação em alvenaria no início de 1980. A validação do ensaio simples foi realizada pelo mesmo investigador que o calibrou aplicando uma carga conhecida a troços de alvenaria de grandes dimensões [Miranda, 2011]. Foi Rossi que apresentou uma variação ao ensaio simples que hoje é usada para determinar características da alvenaria: o ensaio duplo.

A técnica tem sido então alvo de pesquisa por parte de vários intervenientes Abdunur [1983] realizou testes com pequenos e macacos planos semicirculares conduzindo ensaios de tensão elástica sobre modelos plásticos. Noland *et al.* [1990] Realizaram ensaios na avaliação de paredes antigas de alvenaria de tijolo nos Estados Unidos da América. Qinglin and Xiuyi [1988] desenvolveram uma técnica de ensaio que permitia grandes

deslocamentos de modo a adaptar-se aos materiais de alvenaria mais brandas, tipicamente encontradas na China.

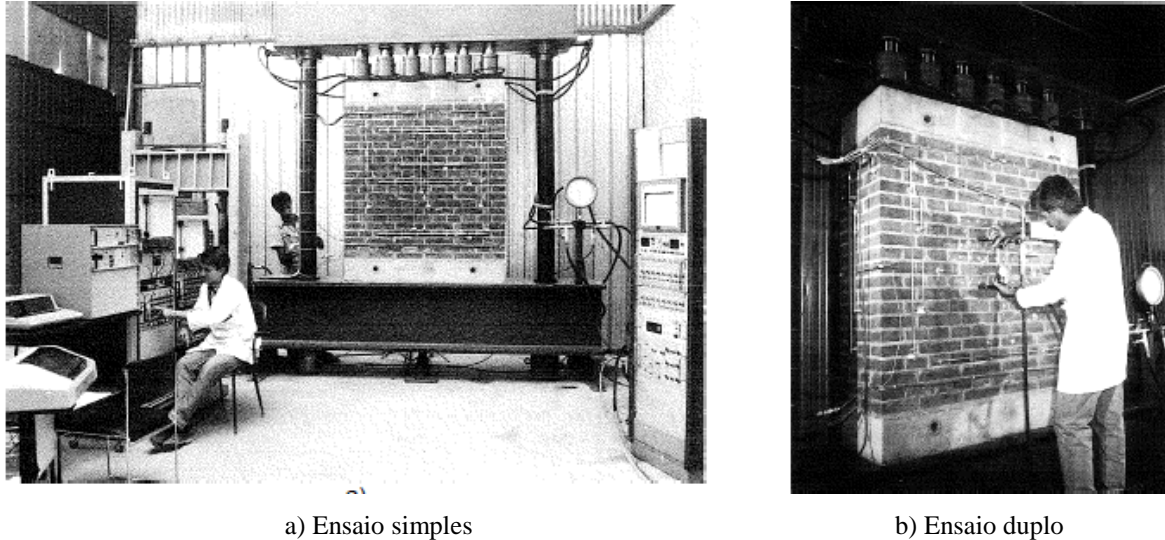


Figura 1: Aspecto geral do ensaio de calibração dos macacos planos realizado por Rossi [Miranda, 2011]

## 2.2. Normas internacionais

O organismo norte-americano responsável pelo desenvolvimento de normas técnicas de materiais, ASTM editou duas normas distintas aprovadas em 1991:

- ✓ ASTM Standard Test Methods C 1196-91, *In-Situ Compressive Stress Within Solid Unit Masonry Estimated Using Flat-jack Measurements* [ASTM, 1991a]
- ✓ ASTM Standart Test Methods C 1197-91, *In Situ Measurement of Masonry Deformability Properties Using the Flat-jack Method* [ASTM, 1991b]

A nível europeu as normas produzidas pela **Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux, systèmes de construction et ouvrages** ou RILEM, aprovadas em 1990 regulam os ensaios de macacos planos:

- ✓ RILEM, LUM.D.2, *In-situ stress tests on masonry based on the flat jack* [RILEM, 1990]



- ✓ RILEM, LUM.D.3, *In-situ strength/elasticity tests on masonry based on the flat-jack* [LUM.D.3, 1990]

Na Tabela 1 são resumidas as exigências normativas das normas ASTM e RILEM e na coluna “Verificação” se a regulamentação foi cumprida ou não nos ensaios realizados no Capítulo 3. De salientar que para as dimensões  $A$ ,  $B$  e  $E_{mac}$  foi considerado que a norma era respeitada quando pelo menos uma das recomendações era cumprida.

Tabela 1: Características dimensionais a respeitar nos ensaios de macacos planos.(Tabela modificada de [Miranda, 2011])

Parâmetro	ASTM [ASTM, 1991a]	RILEM [RILEM, 1990]	Verificação	
			ASTM	RILEM
$A$	$A \geq L_{alv}$ $A \geq 200mm$	$A \geq 1,5L_{alv}$ (se $L_{alv} > 200mm$ ) $A \geq 2L_{alv}$ (se $L_{alv} < 200mm$ )	✓	✗
$B$	$B \geq P_{alv}$ $B \geq 75mm$	$B \geq P_{alv}$	✓	✗
$R$	-	-	-	-
$e_{folhas}$	$0,61 > e_{folhas} > 1,2mm$	$0,5 > e_{folhas} > 1mm$	✓	✗
$P_{max}$	$6,9MPa$	$6,0 MPa$	✓	✓
$d_{ref}$	$0,3A < d_{ref} < 0,6A$	$0,3A < d_{ref} < A$	✗	✓
$E_{mac}$	$E_{mac} \geq 5$ fiadas de alvenaria $E_{mac} \leq 1,5 A$	$E_{mac} \geq 5$ fiadas ( $H_{alv} \leq 100mm$ ) $E_{mac} \geq 3$ fiadas ( $H_{alv} \geq 100mm$ ) $0,3A < E_{mac} < 0,6A$ $E_{mac} \geq 2,5B$	✓	✓
$S_{potenciômetros}$	$0,005\%$ da distância medida	$0,0025mm$	✓	✓

Onde:

$A$	Comprimento do macaco plano;
$B$	Profundidade de inserção do macaco plano;
$R$	Raio do disco da máquina de corte;
$e_{folhas}$	Espessura das folhas de aço com que se faz o macaco plano;
$P_{max}$	Pressão, que o macaco plano pode suportar sem romper, debitada pelo sistema hidráulico no macaco durante o ensaio;
$P_{alv}$	Espessura de uma unidade de alvenaria;
$d_{ref}$	Distância na vertical entre os pontos de referência no ensaio simples;
$E_{mac}$	Distância medida na vertical entre os macacos planos no ensaio duplo;
$H_{alv}$	Altura de uma unidade de alvenaria;
$L_{alv}$	Comprimento de uma unidade de alvenaria;
$S_{potenciômetros}$	Resolução dos potenciômetros.

Na sua generalidade, as recomendações normativas foram respeitadas nos ensaios de macacos planos descritos no Capítulo 3. Não obstante, algumas limitações impostas pela norma são de difícil execução, nomeadamente a profundidade de inserção do macaco plano. Se fosse considerada a utilização de um macaco plano de profundidade no mínimo igual à espessura da unidade de alvenaria a ensaiar, no caso da presente dissertação onde a espessura da alvenaria é igual à espessura do pano da parede, seriam induzidas grandes deformações na secção do macaco que sairia da parede, sendo provável que se verificassem abatimentos locais que comprometeriam a validade dos resultados obtidos.

Acrescido às considerações do parágrafo anterior é de referir que o material à disposição para a elaboração da presente dissertação não contava com macacos planos de dimensões superiores a 400 mm de comprimento que não superam o comprimento de uma unidade de alvenaria (420 mm) pelo que seria difícil cumprir a regulamentação neste ponto. Conclui-se portanto, que algumas condicionantes da norma são de difícil aplicação

quando os elementos singulares constituintes da parede de alvenaria apresentam dimensões elevadas.

### **2.3. Constituição dos macacos planos**

Tipicamente o material que constitui os macacos planos é de aço inoxidável com soldadura ao longo das bordas [Gregorczyk & Lourenço, 2000]. A espessura varia entre 1 mm e 6 mm. Na presente dissertação, os macacos planos utilizados, tanto para os ensaios de resistência da fibra óptica como nos dois conjuntos de ensaios realizados no laboratório do DECivil-UA, apresentam uma espessura de 3 mm.

A forma do macaco plano dependeu, entre outros, do equipamento utilizado para abrir o rasgo na alvenaria. Utilizando uma serra com formato circular optou-se então por uma forma semi-oval do macaco. O tamanho do macaco utilizado foi de 400 mm de comprimento por 100 mm de profundidade (ver Figura 2). Os macacos planos utilizados cumprem as recomendações normativas e possuem dois orifícios: um para entrada/saída do óleo hidráulico e outro para purgar o ar que se encontra no interior do macaco.



Figura 2: Macaco plano semi-oval utilizado nos ensaios

## 2.4. Descrição geral do ensaio com recurso a macacos planos

Conforme referido, o ensaio de macacos planos permite estimar características importantes da alvenaria: módulo de elasticidade, coeficiente de *Poisson* em situação confinada e caracterizar o estado de tensão instalado nas paredes [Gregorczyk & Lourenço, 2000].

O ensaio simples permite determinar a tensão *in situ* da alvenaria e utiliza um macaco plano, é realizado com base na libertação de tensões provocada pela execução de um corte na alvenaria onde se insere o macaco. O macaco é pressurizado até que a alvenaria deformada recupere a sua geometria original.

O ensaio duplo é realizado numa fase posterior ao ensaio simples e prevê a abertura de um segundo corte, horizontal, paralelo e com uma distância mínima definida relativamente ao macaco inferior. Estes dois macacos confinam um troço de parede que é sujeito a compressão simples. Os ciclos de carga/descarga, realizados com auxílio de um sistema hidráulico que pressuriza os macacos, induzem deformações que são registadas por sensores de deslocamento e que possibilitam a construção de um gráfico com conhecimento das curvas de deformabilidade do material permitindo estimar o módulo de elasticidade e, através de medições de deformações horizontais, o coeficiente de *Poisson*.

A determinação do valor de tensão instalada através da técnica de macacos planos verifica pressupostos teóricos e condicionantes ao ensaio que é necessário observar. No subcapítulo 2.4.3 e 2.4.4 é abordada esta temática de forma mais detalhada.

### 2.4.1. Ensaio simples

O ensaio simples utiliza um macaco plano para caracterizar o estado de tensão na alvenaria, o procedimento do ensaio é o seguinte:

- 1) Definição da zona de corte e marcação de três ou quatro alinhamentos verticais (dependendo se são observadas as normas *RILEM* ou *ASTM* respectivamente) que interceptam a zona de corte;

- 2) Medição de distâncias entre os pontos extremos dos alinhamentos verticais que constituem os pontos de referência;
- 3) Realização do corte no local definido no ponto 1). Esta abertura na alvenaria irá provocar uma descompressão no local e os pontos de referência previamente marcados aproximam-se. Efectua-se então uma nova medição entre os pontos de referência;
- 4) Insere-se o macaco plano no rasgo da alvenaria e inicia-se a pressurização do sistema com o objectivo de repor o estado inicial de deformação da parede, o procedimento é gradual e termina quando as distâncias medidas depois da abertura do corte são aproximadamente iguais às distâncias medidas inicialmente (ver Figura 3).

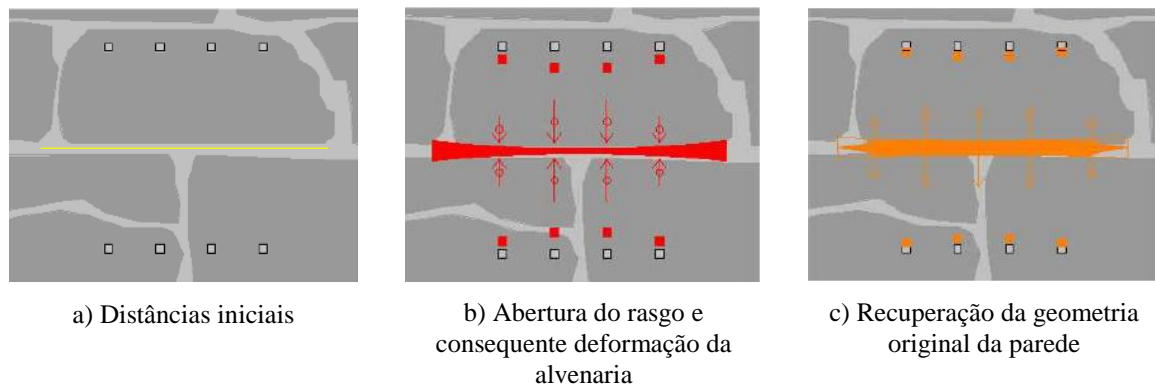


Figura 3: Ilustração das diferentes fases do ensaio simples [Miranda, 2011]

Após a realização do ensaio simples, os dados recolhidos são tratados e por intermédio da Equação 1 é estimado o valor da tensão instalada na parede:

$$\sigma_m = K_m \times K_a \times p \quad (\text{Eq. 1})$$

- ❖ A pressão no interior do macaco plano durante a realização do ensaio não é a que é efectivamente aplicada na parede. Esta diferença deve-se ao facto de o valor lido no manómetro, que regista a pressão à saída da bomba hidráulica,

não ter em consideração a rigidez do macaco plano, nem o atrito do sistema hidráulico. O coeficiente  $K_m$  tem em conta essas condicionantes. No Capítulo 3, subcapítulo 3.3 explica-se como se obteve em laboratório o valor do coeficiente  $K_m$  que é sempre inferior à unidade ( $< 1$ ). O  $K_m$  é dado pelo quociente:

$$K_m = \frac{P_{\text{anel carga}}}{P_{\text{bomba hidráulica}}} \quad (\text{Eq. 2})$$

- ❖ A área de corte ( $A_c$ ) é superior à área de contacto do macaco plano ( $A_m$ ) de modo a facilitar a entrada do macaco na abertura da alvenaria. Assim a zona de descompressão da alvenaria não é aquela inicialmente prevista (igual à área do macaco plano utilizado) mas superior. Para corrigir esta variação de áreas aplica-se à tensão instalada um coeficiente ( $K_a < 1$ ) na qual se pressupõe que a força aplicada pelo macaco plano se encontra distribuída por toda a superfície do corte feito. Este coeficiente é determinado *in situ*, e é dado pelo quociente:

$$K_a = \frac{A_m}{A_c} \quad (\text{Eq. 3})$$

- ❖  $p$  é o valor da pressão medida no transdutor de pressão da bomba, em bar ou kPa, do sistema hidráulico.

A Figura 4 ilustra as diferentes fases dos ensaios simples desenvolvidos no Capítulo 3.

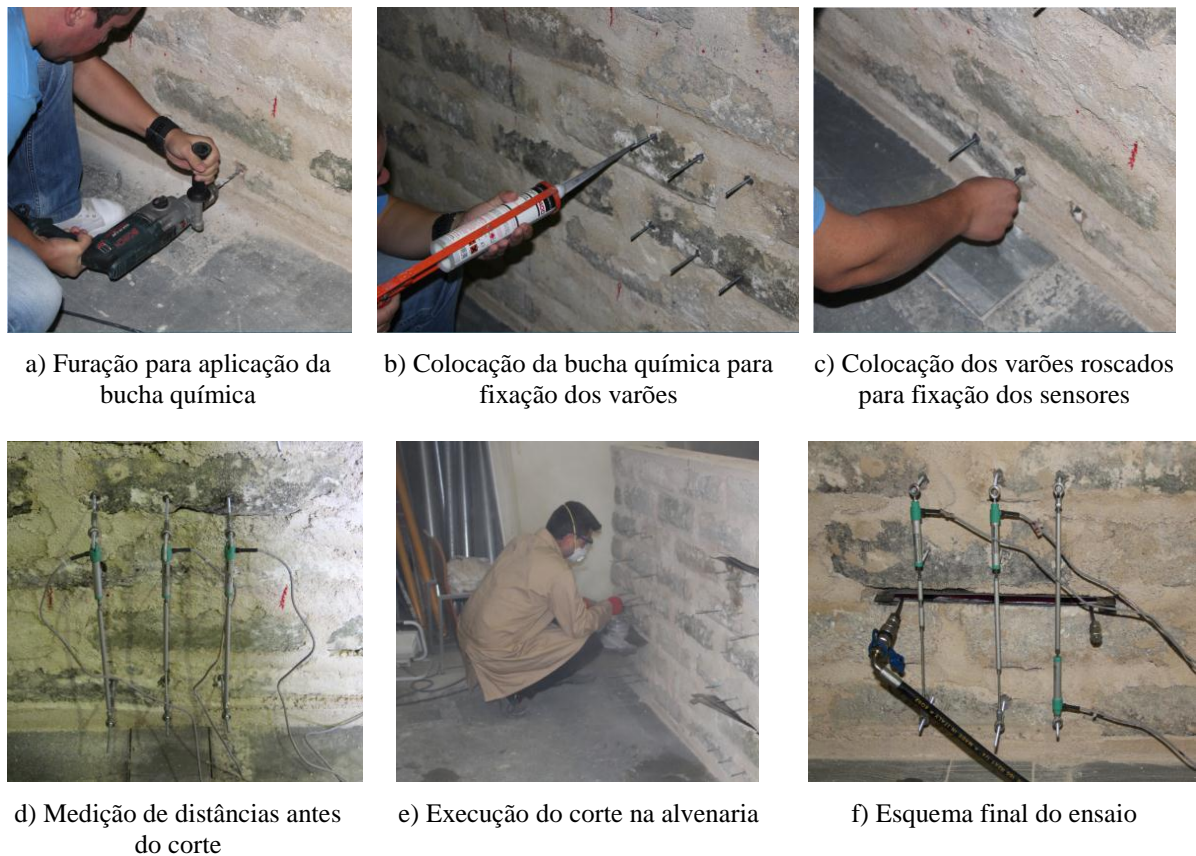


Figura 4: Fases do ensaio simples descrito no Capítulo 3

### 2.4.2. Ensaio duplo

É frequente realizar-se o ensaio duplo numa fase posterior ao ensaio simples de forma a aproveitar o macaco plano inferior que já está inserido na abertura. Este ensaio permite estimar características da alvenaria nomeadamente o módulo de elasticidade, coeficiente de *Poisson* e estimar a resistência à compressão da parede.

Delimitada uma zona de parede entre os dois macacos (ver Figura 5a) é montado um conjunto de sensores de deformação em alinhamentos verticais, marcados no troço de alvenaria que será comprimido pelos macacos planos. Esta zona de parede é sujeita à mesma pressão visto que os macacos planos são ligados à mesma bomba hidráulica manual.

No estudo de L.Binda and Tiraboschi [1999] realizado com base em modelos físicos e numéricos, se conclui que, para valores de carregamento reduzidos (< 20 % da carga última) o efeito do confinamento pode ser desprezado; no entanto para valores de carregamento mais importantes (<50% da carga última) o módulo de elasticidade da estrutura não confinada é cerca de 10% menor quando comparado com o da estrutura em estado confinado. Miranda [2011] refere que as conclusões anteriores apresentadas para alvenaria de tijolo são igualmente válidas para outros tipos de alvenaria.

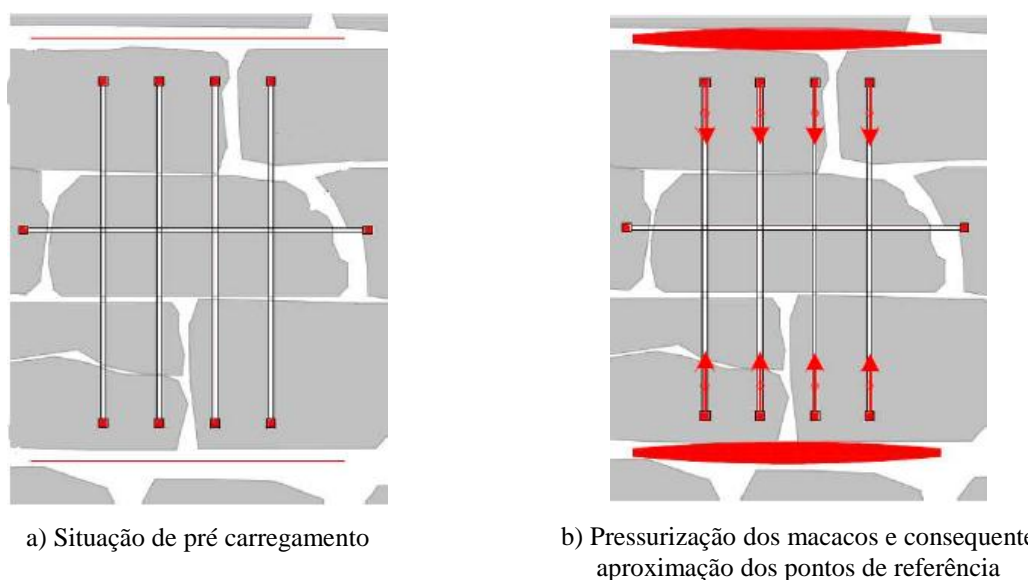


Figura 5: Esquema geral do ensaio duplo [Miranda, 2011]

Pode-se ainda observar na Figura 5, a existência de um sensor de deformação horizontal que permite estimar posteriormente o coeficiente de dilatação transversal que pode ser relacionado com o coeficiente de *Poisson*. R. d. S. Vicente [2008] refere a possibilidade deste sensor funcionar como indicador de abertura de juntas verticais o que resulta na danificação da parede confinada entre macacos.

Em toda a campanha experimental com macacos planos utilizou-se uma viga de betão armado com as seguintes dimensões ( $h \times l \times c$ ) : (0,71 × 0,60 × 3,00m), esta estrutura foi posicionada na parte superior da parede de adobe para simular as acções permanentes e sobrecargas de uma construção tradicional de adobe, com uma carga de 30 kN. Como se pode observar na Figura 6, tentou-se minimizar o efeito de excentricidade do



carregamento da parede através da marcação e posterior alinhamento das distâncias médias da parede e da viga.



a) Posicionamento da viga de carregamento



b) Alinhamento da viga de carregamento segundo as direcções perpendiculares e paralelas à parede

Figura 6: Viga de carregamento utilizada

As fases do ensaio duplo são as seguintes:

- 1) Após a realização do ensaio simples inicia-se o ensaio duplo com a abertura de um segundo rasgo, num plano superior tanto quanto possível horizontal e paralelo em relação à abertura realizada para o ensaio simples. As normas recomendam uma distância não superior a uma vez e meia o comprimento dos macacos planos;
- 2) Inserido o macaco plano no rasgo são colocados os potenciómetros para registo das deformações quer no plano perpendicular aos macacos planos quer no plano paralelo a estes de modo a estimar-se também o coeficiente de *Poisson*. Os potenciómetros são calibrados e conectados ao *software* informático de aquisição de dados;
- 3) Depois de ligados os macacos planos ao sistema de pressurização e após ser adaptado a célula transdutora de pressões no macaco hidráulico iniciam-se ciclos de carga/descarga através de incrementos de carga constantes. Durante estes ciclos são realizadas leituras das deformações induzidas no troço de alvenaria compreendido entre os dois macacos planos.

No ensaio duplo a avaliação das propriedades da alvenaria já mencionadas são afectadas pelos coeficientes  $K_a$  e  $K_m$ . Estes valores são calculados com base na média dos valores individuais inerentes a cada macaco plano utilizado no ensaio. No Capítulo 3 subcapítulo 3.5 e 3.6 a apresentação gráfica dos resultados é acompanhada pela indicação dos valores dos respectivos coeficientes  $K_a$  e  $K_m$ .

O módulo de elasticidade médio da alvenaria é estimado com base na curva de tensão-extensão obtida durante a realização dos ensaios duplos. A equação que permite estimar a extensão média da alvenaria é a seguinte:

$$\varepsilon = \frac{L_f - L_i}{L_i} \quad (\text{Eq. 4})$$

Onde:

$\varepsilon$	extensão média;
$L_f$	distância final medida entre os pontos de referência (mm);
$L_i$	distância inicial medida entre os pontos de referência (mm).

### 2.4.3. Pressupostos teóricos do ensaio de macacos planos

Na realização dos ensaios de macacos planos, tanto simples como duplos, considerou-se que:

- ❖ O estado de tensão inicial nas paredes de alvenaria no local do teste é de compressão e considerado uniforme ao longo da espessura, não se considera a existência de caminhos de força alternativos ou preferenciais;
- ❖ A alvenaria deforma-se simetricamente na envolvente do rasgo. As possíveis deformações inelásticas são distribuídas ao longo do comprimento do rasgo e não são quantificáveis [R. d. S. Vicente, 2008];
- ❖ A alvenaria que rodeia o local de teste é homogénea, não são considerados núcleos internos de material com resistência variável;

- ❖ A alvenaria trabalha em regime elástico. A curva de tensão-extensão obtida no ensaio simples deve confirmar este pressuposto;
- ❖ A tensão aplicada pelos macacos planos sobre a alvenaria é considerada uniforme.

#### **2.4.4. Condicionantes do ensaio de macacos planos**

As condicionantes relacionadas com os ensaios simples e duplos são:

- ❖ As tensões que foram estimadas na parede podem não corresponder efectivamente às tensões instaladas. Foi referido, que o estado de tensão de compressão era uniforme ao longo do rasgo e que o material era homogéneo, não obstante, face à impossibilidade de garantir estas duas condições são esperadas concentrações não simétricas de tensões e heterogeneidade das alvenarias que conduzem a desvios nos resultados [R. Vicente *et al.*, 2007];
- ❖ A dificuldade em garantir a qualidade dos blocos de adobe que constituem a parede. No Capítulo 3, subcapítulo.3.2 referiu-se a preferência para utilizar blocos inteiros, não fissurados, aparentemente homogéneos e com dimensões e pesos aproximados entre si. De modo a sustentar estes padrões de qualidade, extraíram-se carotes do lote de blocos de adobe com que se construiu a parede com vista a realizar ensaios para estimar características mecânicas do material. Os resultados são apresentados no Capítulo 3, subcapítulo 3.3;
- ❖ O registo da área de carregamento efectivo dos macacos afigura-se como a principal condicionante da fiabilidade dos resultados. De modo a melhorar o registo da área de carregamento foram introduzidas no ensaio redes de marcação. No Capítulo 3 subcapítulo 3.4.1 se desenvolverá com detalhe esta temática;
- ❖ Carregamento insuficiente sobre a parede, o carregamento foi realizado com o objectivo de garantir condições de reacção suficientes à pressão que os macacos planos e o sistema hidráulico induzem na parede;

- ❖ Fiabilidade e incerteza dos resultados para valores de carga muito baixos, dado o baixo nível de deformação sofrido pela parede;
- ❖ A dificuldade de se garantir uma complementaridade absoluta entre a área do rasgo e o macaco plano;
- ❖ Garantir a horizontalidade, planeza e espessura dos rasgos executados na alvenaria para a realização dos ensaios.

## 2.5. Equipamentos utilizados

Os ensaios de macacos planos, não exigindo um nível de equipamento particularmente sofisticado, necessitam de um conjunto de ferramentas fundamentais para a realização do mesmo. Segue-se a descrição do tipo de equipamento utilizado nos ensaios descritos no Capítulo 3, nomeadamente:

- ❖ Macacos planos metálicos, bem soldados, sem fugas de óleo no sistema hidráulico e no macaco plano propriamente dito ou nos elementos de ligação ao sistema de pressurização.
- ❖ Conjunto hidráulico (bomba e manguerias) para pressurização dos macacos planos de accionamento manual. O sistema utilizado foi preparado para pressurizar dois macacos em simultâneo para a realização do ensaio duplo. O sistema deve ainda estar munido de óleo suficiente e garantir uma pressão constante. A bomba tem acoplado uma derivação que permite ligar o transdutor de pressões ao *software* de aquisição de dados.
- ❖ Equipamento de medição de deslocamentos. Na presente dissertação foram utilizados potenciómetros da marca GEFTRAN modelo *PZ12 Rectilinear Displacement Transducer with cylindrical case* como se pode observar na Figura 7.



a) Potenciómetro da marca GEFRA



b) Adaptação de extensores aos sensores de acordo com a necessidade dos ensaios

---

Figura 7: Sensores utilizados nos ensaios realizados

- ❖ Ferramentas diversas: máquina de corte com disco apropriado para o rasgo na alvenaria de adobe; berbequim eléctrico com broca apropriada para adobe, escopro e martelo para a remoção de argamassas, alicates e chaves de bocas com tamanhos diversos para as uniões aparafusadas dos macacos e dos potenciómetros, ar pressurizado para limpeza dos rasgos.
  
- ❖ Material diverso: marcadores, fita métrica, fita-cola, papel químico, papel branco, redes de marcação, varões metálicos para fixação dos potenciómetros, porcas metálicas com tamanho apropriado aos varões e às uniões dos potenciómetros, bucha química para fixação dos varões metálicos à parede. Calços metálicos com a forma dos macacos planos (ver Figura 8).
  
- ❖ Sistema de aquisição de dados: *software* e computador portátil. Máquina para registo fotográfico.
  
- ❖ Equipamento de protecção individual: máscara, luvas, óculos e protecção de ouvidos.



a) Macaco plano semi-oval



b) Bomba hidráulica e tubo transmissor de pressões



c) Máquina de corte



d) Calços metálicos com a forma dos macacos utilizados

---

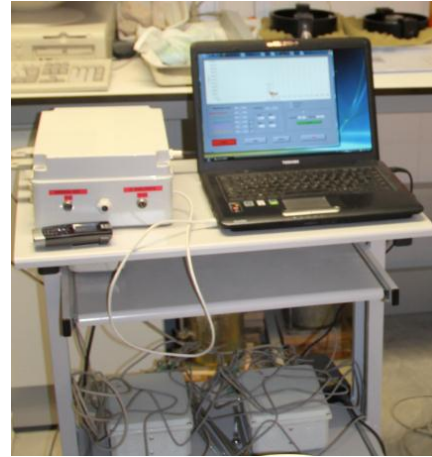
Figura 8: Exemplos de equipamentos utilizados

Relativamente ao sistema hidráulico a pressão fornecida por uma bomba hidráulica (manual ou eléctrica) pode ser medida por uma célula de pressão com um alcance semelhante à máxima pressão operacional do macaco plano e uma precisão de 1% em relação à escala do sistema hidráulico. O sistema deve ser capaz de manter uma pressão constante durante um período de tempo nunca inferior a cinco minutos. Habitualmente a capacidade de um ensaio de macacos planos é de 6,9 MPa conforme referido nas normas ASTM [ASTM, 1991a] e [ASTM, 1991b].

Nas figuras seguintes observam-se equipamentos utilizados nos ensaios práticos com macacos planos.



a) Dinamómetro digital (valores em kg)



b) *Software* de aquisição de dados

Figura 9: Equipamento de medição e aquisição de dados

Apesar de não ser material indispensável à realização do ensaio de macacos planos, no trabalho desenvolvido utilizou-se ainda a grua de 10 toneladas do laboratório do DECivil-UA para posicionar a viga de carregamento e um dinamómetro digital apresentado na Figura 9a com o objectivo de conhecer a carga actuante na parede. A viga de betão armado foi colocada na parte superior da parede e o peso foi libertado, manteve-se no entanto as correntes por motivos de segurança no caso de se verificarem instabilizações. Foram usadas manilhas de alta densidade e ganchos de redução como elementos de ligação entre a viga de betão armado e a grua.







---

## Capítulo 3 Análise experimental

- 3.1. Enquadramento e objectivos
- 3.2. Construção das paredes
- 3.3. Coeficiente de correcção  $K_m$
- 3.4. Caracterização dos materiais utilizados na construção da parede
  - 3.4.1. Ensaio de flexão e compressão aos provetes de argamassa
  - 3.4.2. Ensaio de compressão dos blocos de adobe
- 3.5. Ensaio simples
  - 3.5.1. Método Expedito- Opção A: Tensão instalada
  - 3.5.2. Macacos Planos- Opção B: Tensão instalada
- 3.6. Ensaio duplos
- 3.7. Resistência à compressão das paredes de alvenaria de adobe segundo EC6
- 3.8. Discussão dos resultados
  - 3.8.1. Tensão instalada
  - 3.8.2. Resistência à compressão

---

## **3. ANÁLISE EXPERIMENTAL**

### **3.1. Enquadramento e objectivos**

Conforme referido no Capítulo 1 o objectivo da dissertação não foi utilizar os ensaios dos macacos planos para a caracterização de alvenarias, ao invés, pretendia-se a aplicação de um método que permitisse obter uma impressão da imagem de carregamento mais perceptível, com o objectivo de melhorar o protocolo de ensaio, reduzindo assim o erro associado à tensão instalada na parede durante o ensaio.

Tendo o objectivo no parágrafo anterior presente, optou-se pela construção de uma parede em alvenaria de adobe no laboratório do DECivil-UA de modo a poder controlar a qualidade de construção da parede, garantir homogeneidade dos blocos de adobe, da argamassa utilizada, assim como facilitar a montagem dos sensores de deformação e indicadores de pressão do ensaio propriamente dito.

Na parede realizaram-se dois conjuntos de ensaios onde num deles foi realizado o ensaio de macacos planos de forma tradicional utilizando uma folha de papel químico e no outro conjunto de ensaios foi utilizado, além do papel químico, uma rede de marcação. No subcapítulo 3.8 do presente capítulo são discutidas as alterações aos resultados que esta rede de marcação introduziu nos resultados obtidos.

Recorreu-se ao EC6 [CEN, 2005] para determinar a resistência à compressão da parede em alvenaria de adobe.

### **3.2. Construção das paredes**

Na construção da parede foram utilizados blocos de adobe provenientes de uma demolição de muros na região de Aveiro. Os blocos foram limpos de modo a remover restos de argamassa seca e teve-se o cuidado de escolher blocos inteiros, não fissurados, aparentemente homogéneos e com dimensões e pesos aproximados entre si.

Para quantificar o peso volúmico da alvenaria de adobe pesou-se cada bloco individualmente. Os valores foram registados (ver Figura 10a) e organizados numa tabela em anexo. Efectuou-se uma molhagem da superfície do bloco antes do seu assentamento como se pode observar na Figura 10b de modo a evitar que a água da argamassa fosse absorvida pelos blocos de adobe e assim evitar uma dessecação da argamassa.



a) Pesagem unitária dos blocos de adobe



b) Molhagem prévia da superfície do bloco

---

Figura 10: Procedimentos na construção da parede de adobe

As dimensões médias ( $c \times h \times l$ ) dos blocos de adobe utilizados foram:  $[0,42 \times 0,12 \times 0,20\text{m}]$  e as dimensões ( $c \times h \times l$ ) da parede foram:  $[2,00 \times 1,20 \times 0,20\text{m}]$ . As dimensões da parede foram definidas tendo em conta o necessário afastamento entre os macacos planos e a distância aos limites da parede estipuladas nas normas internacionais que regulam o ensaio de macacos planos já referidas no Capítulo 2, subcapítulo 2.2.

A parede assenta na laje de reacção do DECivil-UA. A argamassa utilizada na camada de regularização superior e inferior assim como no preenchimento de juntas obedece ao traço 1:2:2 (uma medida de cal hidráulica, duas medidas de areia e duas medidas de terra pouco argilosa) misturada através de meio mecânico (betoneira eléctrica com 60 litros de capacidade). Os blocos foram colocados em contrafiada vertical e foram observadas as práticas da boa construção verificando-se várias vezes o aprumo da parede como se pode verificar na Figura 11.



a) Construção da 4ª fiada de alvenaria de adobe



b) Construção de uma camada final de regularização da parede

Figura 11: Construção da parede de adobe

### 3.3. Coeficiente de correcção $K_m$

De acordo com o que foi atrás referido o valor do coeficiente  $K_m$  reflecte a rigidez do macaco plano e o atrito do sistema hidráulico [ASTM, 1991a].

A avaliação da influência da rigidez de um macaco plano é realizada colocando o macaco plano entre duas chapas metálicas rígidas (ver Figura 12b). É aplicada pressão cíclica no macaco cujo valor é determinado pelo *software* transdutor de pressões acoplado à saída da bomba hidráulica (*Pbomba hidráulica*). Esta pressão é comparada com a pressão (*Panel de carga*) lida no anel de carga (ver Figura 12b) que regista a deformação entre as chapas rígidas. A relação entre estas pressões dá origem a um coeficiente designado por  $K_m$  (ver Eq. 1). Este coeficiente pode ser fornecido pelo fabricante do macaco, contudo, visto que estes valores não estavam disponíveis para consulta, foi determinado o coeficiente no laboratório do DECivil-UA e o procedimento utilizado foi o seguinte:

Equipamentos necessários:

- ❖ Prensa mecânica;
- ❖ Bomba hidráulica utilizada nos ensaios;
- ❖ Chapas metálicas com espessura e rigidez adequadas para permitir a prensa do macaco plano;
- ❖ Sistema de aquisição e registo de dados;
- ❖ Balança.

Dados necessários:

- ❖ Área do macaco plano ( $0,028\text{m}^2$ ).
- ❖ Peso das chapas metálicas (5,889 kg).

Procedimento:

- i) Removeu-se o óleo resultante de ensaios anteriores do interior do macaco plano e foi posicionado na prensa mecânica o conjunto formado pelo macaco plano e chapas metálicas, é ajustada a “pressão de equilíbrio” na prensa;
- ii) Foram aplicados através do sistema de pressurização, ciclos de carga em intervalos regulares de 5 kN (intervalo utilizado entre 5 kN e 30 kN). Registou-se os valores medidos;
- iii) Com a área do macaco plano e a peso das chapas calculou-se, para cada incremento de carga, o valor da tensão a que está sujeito o macaco plano. Nos dados apresentados da Tabela 2 e Tabela 3 já estão retirados o peso da chapa;
- iv) Organizou-se a Tabela 2 e Tabela 3 onde o valor final do coeficiente  $K_m$  é obtido pelas médias parciais de cada ciclo de carga.

O anel de carga (50 kN) da prensa, regista valores de deformação. Com a calibração fornecida pelo fabricante é possível transformar a deformação, indicada pelo anel de carga, em força. A equação que regula esta equivalência (Eq. 4) permitiu construir a Tabela 2.

$$y = 23,1157x + 0,20415 \quad (\text{Eq. 4})$$

Onde:

- $y$  Força correspondente à deformação registada pelo anel de carga (kN);  
 $x$  Deformação registada pelo anel de carga (mm).

Tabela 2: Equivalência entre força e deslocamento para cada ciclo de carga

Força aplicada (kN)	Deslocamento teórico (mm)
5	0,207
10	0,424
15	0,640
20	0,856
25	1,073
30	1,289

Na Figura 12a pode-se visualizar o esquema geral do processo de calibração dos macacos. O tubo metálico, cilíndrico que exerce a força de compressão sobre as chapas de aço, visível na Figura 12b pode ser considerado infinitamente rígido.



a) Esquema geral da calibração dos macacos



b) Pormenor da aplicação de duas forças distintas

Figura 12: Processo de calibração macacos planos

A Tabela 3 e Tabela 4 registam os dados recolhidos durante o processo de calibração e indicam os coeficientes parciais de cada ciclo e respectivamente a média obtida para cada macaco plano. Como o método de pressurização é manual, por vezes, não se consegue obter com precisão o deslocamento teórico calculado na Tabela 1, deste modo, o valor real registado é indicado na Tabela 3 e Tabela 4. De salientar, no entanto, que a diferença é pouco significativa como se pode verificar comparando os deslocamentos registados com os deslocamentos teóricos (Tabela 1).

Tabela 3: Calibração do macaco plano semi-oval superior

Deslocamento real (mm)	Tensão registada na prensa (MPa)	Tensão no macaco plano (MPa)	$K_m$
0,208	0,390	0,177	0,453
0,425	0,681	0,355	0,521
0,640	0,962	0,534	0,555
0,858	1,230	0,712	0,579
1,073	1,500	0,891	0,594
1,289	1,761	1,069	0,607
Média $K_m$			0,551

No ensaio duplo utilizou-se dois macacos distintos com valores de calibração naturalmente diferentes, a Tabela 4 apresenta os dados da calibração do macaco plano inferior.

Tabela 4: Calibração do macaco plano semi-oval inferior

Deslocamento real (mm)	Tensão registada na prensa (MPa)	Tensão no macaco plano (MPa)	$K_m$
0,210	0,377	0,177	0,468
0,424	0,653	0,355	0,544
0,640	0,935	0,534	0,571
0,856	1,200	0,712	0,594
1,073	1,457	0,891	0,611
1,277	1,689	1,069	0,633
Média $K_m$			0,570

Obtidas as médias parciais para cada incremento de força aplicado sobre os macacos calculou-se o valor final de  $K_m$ . Estes valores foram posteriormente utilizados no subcapítulo 3.5.2.

### 3.4. Caracterização dos materiais utilizados na construção da parede

Neste subcapítulo pretendeu-se registar os ensaios laboratoriais realizados de modo a conhecer as características mecânicas dos materiais constituintes da parede. Os provetes de argamassa foram ensaiados à flexão e compressão no dia imediatamente após a realização



dos ensaios de macacos planos na parede. Os blocos de adobe foram ensaiados à compressão numa fase anterior à construção da parede.

### 3.4.1. Ensaios de flexão e compressão aos provetes de argamassa

Após a realização dos ensaios, os provetes de argamassa foram ensaiados à flexão e compressão utilizando uma máquina universal de ensaios, marca: Shimadzu, modelo: AG-IC 100 kN com uma célula de carga de 5 kN do laboratório do DECivil-UA (ver Figura 13). Na Tabela 5 e Tabela 6 são indicados os valores de tensão de rotura à flexão e à compressão, respectivamente.

Tabela 5: Tensão resistente da argamassa de construção (flexão)

Provete	Tensão de rotura em flexão (MPa)
1	0,67
2	0,72
3	0,66
4	0,71
5	0,79
6	0,59
7	0,77
8	0,74
9	0,75
Média	0,71
Desvio Padrão ( $\Delta\sigma$ )	0,06
Valor máximo ( $\sigma_{m\acute{a}x}$ )	0,79
Valor mínimo ( $\sigma_{m\grave{i}n}$ )	0,66

O tipo de carregamento foi compressão simples e a velocidade do ensaio de 10 N/s.

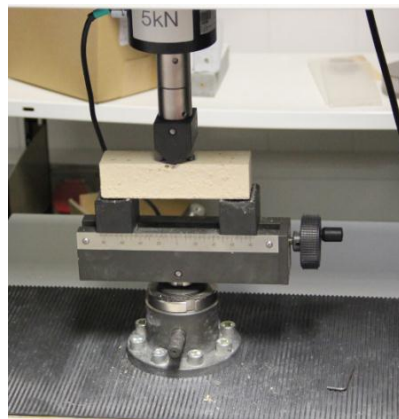
Tabela 6: Tensão resistente da argamassa de construção (compressão)

Provete	Tensão de rotura em compressão (MPa)
1	2,40
2	2,47
3	2,27
4	2,18
5	2,43
6	2,43
7	2,41
8	2,42
9	2,38
Média	2,38
Desvio Padrão ( $\Delta\sigma$ )	0,09
Valor máximo ( $\sigma_{m\acute{a}x}$ )	2,47
Valor mínimo ( $\sigma_{mín}$ )	2,18

O tipo de ensaio foi de compressão simples e a velocidade do ensaio de 50 N/s. Dos resultados obtidos verifica-se que a tensão em rotura em flexão corresponde a 30% da tensão de rotura em compressão.



a) Séries de provetes paralelepedicos retirados de cada betoneira



b) Ensaio de resistência  flexão na Máquina Universal de Ensaios do DECivil- UA

Figura 13: Ensaio de argamassas

### 3.4.2. Ensaio de compressão dos blocos de adobe

Foram extraídos dois provetes cilíndricos do conjunto de blocos de adobe utilizados para a construção da parede. Estes blocos não foram utilizados na parede mas eram em tudo semelhantes. Os provetes foram ensaiados à compressão e foi utilizado, para este objectivo, o actuador de 300 kN do laboratório do DECivil-UA (ver Figura 15). O resultado obtido para a relação tensão-extensão é apresentado graficamente na Figura 14.

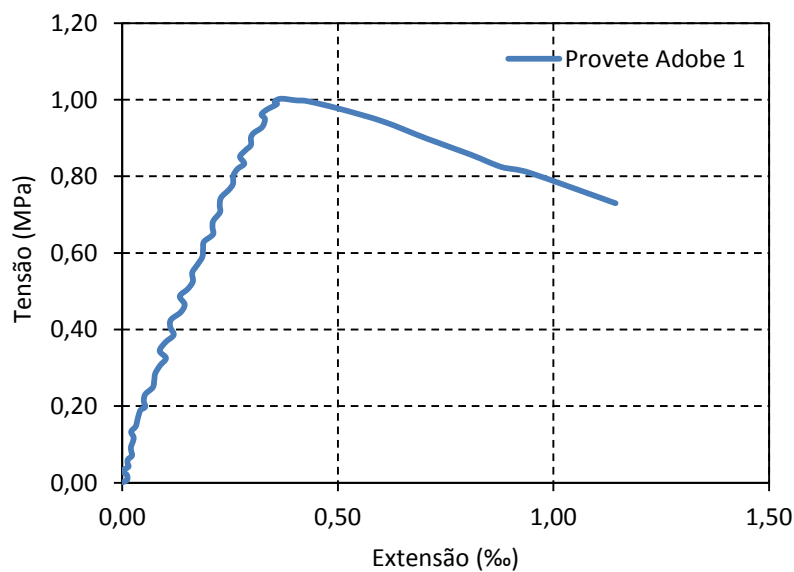


Figura 14: Relação tensão-extensão do provete de adobe ensaiado

A tensão de rotura do provete 1 foi de 1,01 MPa e no do provete 2 de 1,26 MPa. A média dos provetes ensaiados é de 1,14 MPa. Resultados obtidos por Varum et al. [2008] em campanhas de ensaios realizadas em construções tradicionais de adobe na região de Aveiro obtiveram uma resistência média à compressão de blocos de adobe em 1,10 MPa o que suporta, em parte, os resultados obtidos.



a) Provete de adobe na rotura



b) Esquema geral do ensaio



c) Preparação do ensaio, adaptação de sensores



d) Carotes cilíndricas

---

Figura 15: Ensaio de resistência de provetes cilíndricos de adobe

### 3.5. Ensaio simples

A caracterização da tensão instalada na parede de alvenaria fez-se por dois métodos. A primeira, designada de “Opção A” baseou-se no nível de carregamento a que a secção ao nível do corte estava a ser sujeita. Para isso foram contabilizados a quantidade de material que estava acima do rasgo e o peso da viga de carregamento em betão armado. A segunda, designada de “Opção B” compreende dois ensaios simples distintos que correspondem à utilização do papel químico com rede de marcação ou apenas papel químico. Na Figura 16 apresenta-se a disposição geral dos ensaios simples realizados.

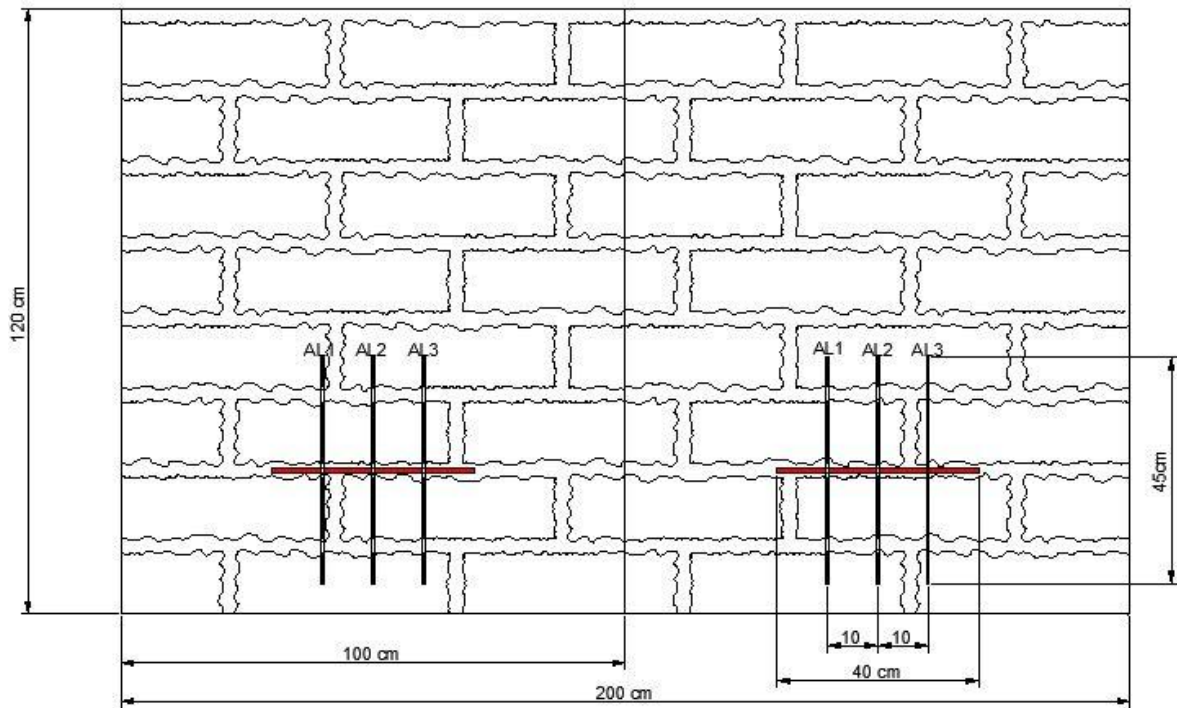


Figura 16: Disposição geral dos ensaios simples realizados em relação à parede de alvenaria de adobe

A nomenclatura (AL1, AL2 e AL3) utilizada identifica os sensores colocados segundos os diferentes alinhamentos verticais monitorizados nos ensaios.

### 3.5.1. Método Expedito- Opção A: Tensão instalada

O cálculo da tensão instalada na parede de adobe não é completamente rigoroso. Para diminuir esta incerteza no cálculo optou-se por se controlar, tanto quanto possível, os elementos de construção da parede: os blocos de adobe foram pesados e procurou-se um valor muito aproximado para o volume de argamassa utilizado. O peso actuante sobre a parede também é conhecido (ver Figura 17). Todos os cálculos considerados auxiliares encontram-se em anexo:

Peso específico da parede de alvenaria de adobe  $\gamma_{parede} = 17,32 \text{ kN/m}^3$

Peso viga de carregamento + dinamómetro + correntes  $P_{actuante} = 31,39 \text{ kN}$



a) Posicionamento da viga de carregamento



b) Transporte da viga com auxílio da grua

Figura 17: Procedimentos realizados com a viga de carregamento em betão armado

As dimensões da parede são:  $[2,00 \times 1,20 \times 0,20m]$

Cota do corte na alvenaria:  $[0,27m]$

As tensões na parede ao nível da secção do corte são:

$$\frac{31,39}{2 \times 0,20} = 78,48 \text{ kPa} \quad \text{[Carga aplicada pela viga de carregamento]}$$

$$\frac{17,32 \times (0,93 \times 0,20)}{2} = 1,61 \text{ kPa} \quad \text{[Carga exercida pelo peso próprio da parede]}$$

A tensão estimada ao nível do corte é portanto a soma das duas parcelas calculadas anteriormente: 80,09 kPa.

### 3.5.2. Macacos Planos- Opção B: Tensão instalada

Calculada a tensão no subcapítulo 3.5.1 procedeu-se ao ensaio de macacos planos simples para obter experimentalmente o valor da tensão instalada. De referir que foram feitos dois ensaios simples distintos. Um com uma rede de marcação e com papel químico (ver Figura 18) e outro apenas com papel químico.



Figura 18: Solução de impressão com rede de marcação da área efectivamente carregada

Em ambos os ensaios o protocolo de ensaio foi o mesmo (ver ponto 2.4.1) e o procedimento realizado foi o seguinte:

- 1) Após a marcação dos pontos de fixação dos sensores e das zonas de corte utilizou-se um berbequim eléctrico para abrir os orifícios onde se injectou bucha química para fixação dos sensores. A bucha química tem associado um tempo de presa de aproximadamente 45 minutos após o qual se colocaram os varões que servem de suporte aos potenciómetros.
- 2) Mediram-se as distâncias iniciais através dos potenciómetros, retiraram-se e de seguida com uma máquina de corte adequada procedeu-se à abertura de um rasgo na superfície de reboco da parede. O disco utilizado tinha a forma aproximada do macaco plano, para que a superfície aberta coincidisse o mais possível com este.
- 3) Com o corte na alvenaria realizado, procedeu-se à montagem do macaco plano e do sistema hidráulico. Colocaram-se os sensores nos alinhamentos verticais previamente marcados e centrou-se a viga de carregamento para que a excentricidade da carga sobre a parede fosse mínima.
- 4) Pressurizou-se o macaco plano ciclicamente, com incrementos de 50 kPa e posteriormente 100 kPa, até se obter as distâncias medidas inicialmente.

Na Figura 19 apresentam-se imagens relativas aos ensaios simples realizados na parede de adobe



a) Ensaio simples com rede de marcação

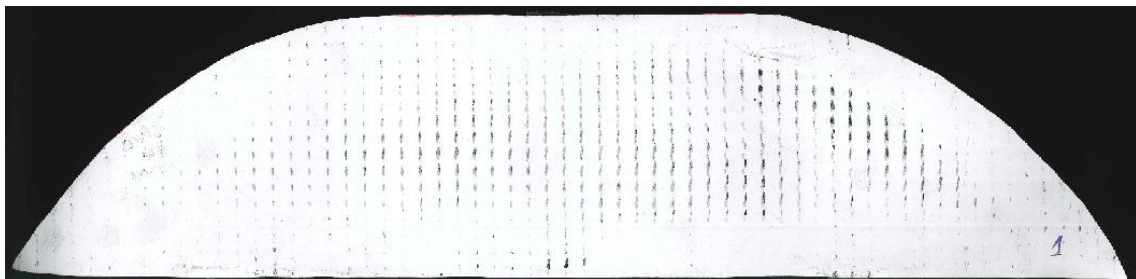


b) Ensaio simples sem rede

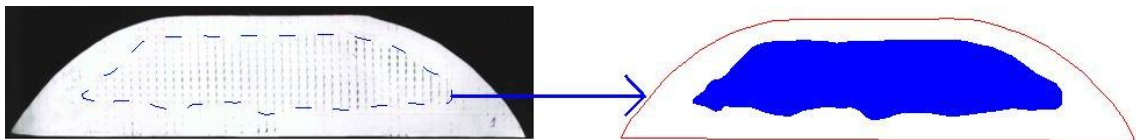
---

Figura 19: Ensaio simples realizados na parede de alvenaria de adobe

Após a realização do ensaio procedeu-se ao tratamento de dados. A Figura 20 apresenta os procedimentos adoptados para determinar a área efectivamente carregada.



a) Fotografia digital do registo do papel químico realizado no ensaio simples com rede de marcação



b) Delimitação e respectivo cálculo das áreas efectivamente carregadas

---

Figura 20: Imagens obtidas através de uma ferramenta de desenho automático (AutoCad2013)

Foram calculadas as áreas de todos os registos obtidos durante os ensaios (ver Figura 21) e com estes dados recolhidos organizou-se a Tabela 7.



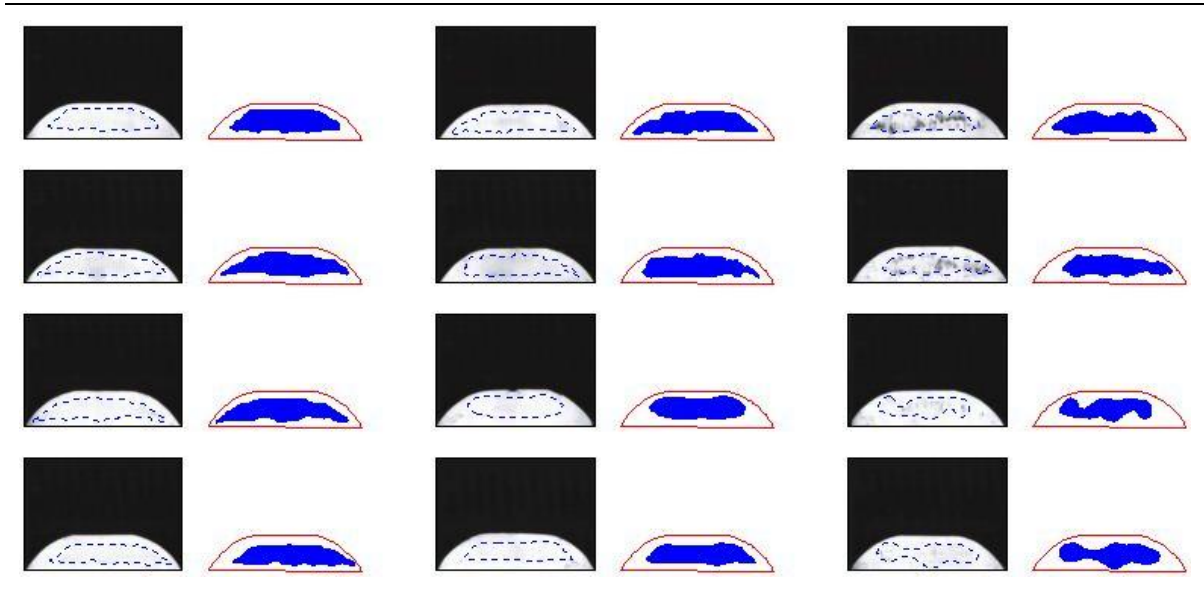


Figura 21: Cálculo de todas as áreas obtidas durante os ensaios de macacos planos

Calculando a média correspondente à face superior e inferior do macaco, obteve-se um valor que dividido pela área total do macaco plano permite conhecer o valor de  $K_a$  referido no Capítulo 2 e indicado na Tabela 7. A área total do macaco é de  $0,028 \text{ m}^2$ .

Tabela 7: Registos obtidos relativamente às áreas carregadas no ensaio simples

	Áreas carregadas ( $\text{m}^2$ )	$K_a$
Ensaio Simples c/Rede	0,0134	0,480
	0,0134	
Ensaio Simples s/Rede	0,0116	0,424
	0,0121	

O coeficiente de calibração do macaco  $K_m$  calculado no subcapítulo 3.3 do presente capítulo para o macaco plano utilizado nos ensaios simples é indicado na Tabela 8.

Tabela 8: Coeficiente de correcção para o macaco plano utilizado nos ensaios simples

	$K_m$
Ensaio Simples c/Rede	0,570
Ensaio Simples s/Rede	

Os resultados práticos obtidos nos ensaios simples foram tratados e são apresentados na Figura 22 e Figura 23.

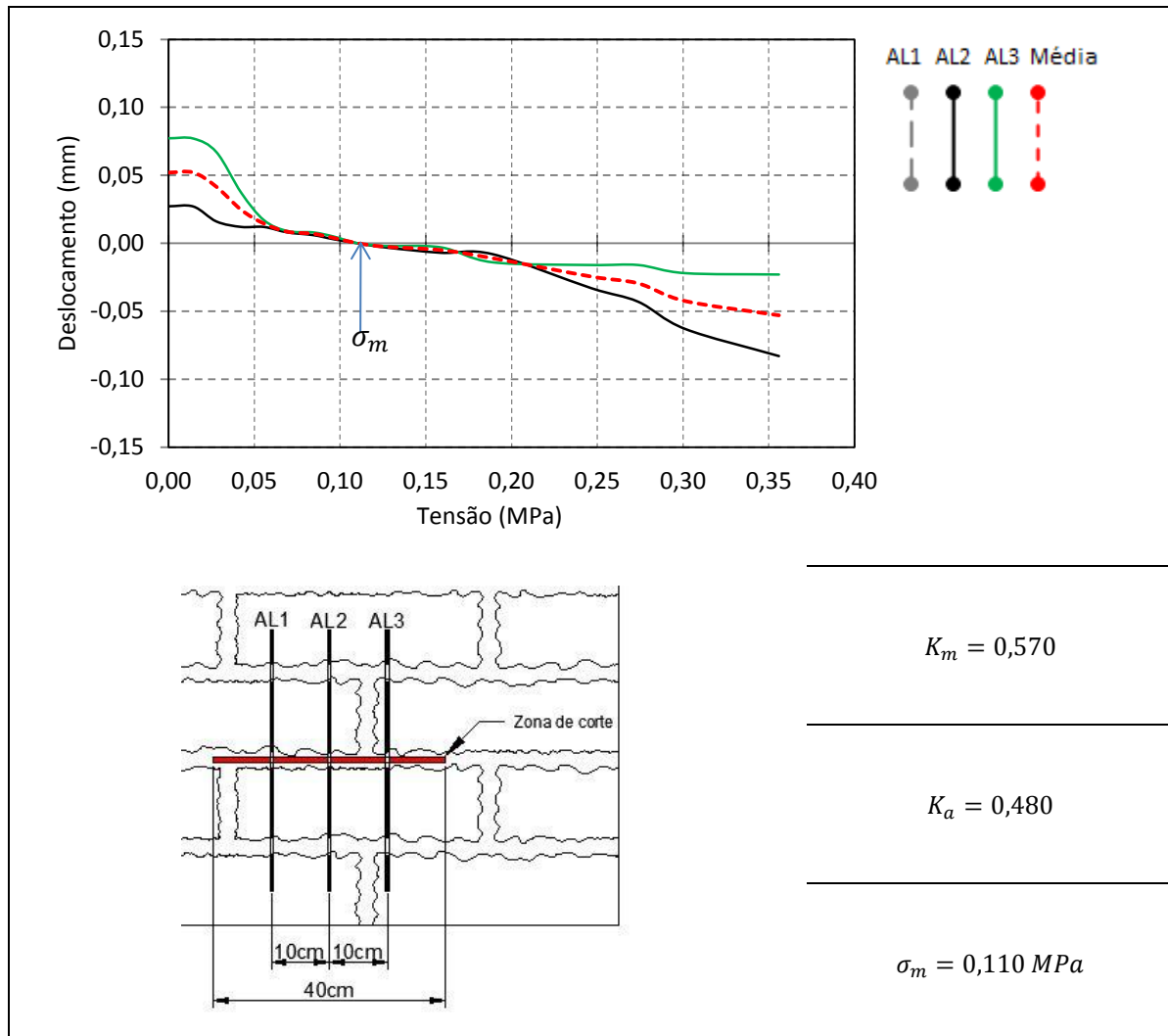


Figura 22: Resultados obtidos no ensaio simples utilizando rede de marcação

No ensaio apresentado na Figura 22 verificou-se que os sucessivos deslocamentos registados no sensor colocado segundo o “Alinhamento 1” não eram compatíveis com o restabelecimento esperado dos pontos marcados no ensaio simples de macacos planos. Face ao deficiente funcionamento do sensor colocado segundo o “Alinhamento 1” optou-se por ignorar a contribuição destes valores para a estimativa da tensão instalada. Deste modo, a média apresentada na Figura 22 foi calculada tendo em conta apenas os valores fornecidos pelos sensores colocados segundo o Alinhamento 2 e Alinhamento 3. Está apresentada na Figura 22 a indicação do valor estimado da tensão instalada ( $\sigma_m$ ).

Por motivos desconhecidos, possivelmente mau funcionamento, o sensor colocado segundo o Alinhamento 1 não registou valores de modo que a média foi obtida com valores registados pelos sensores no Alinhamento 2 e Alinhamento 3.

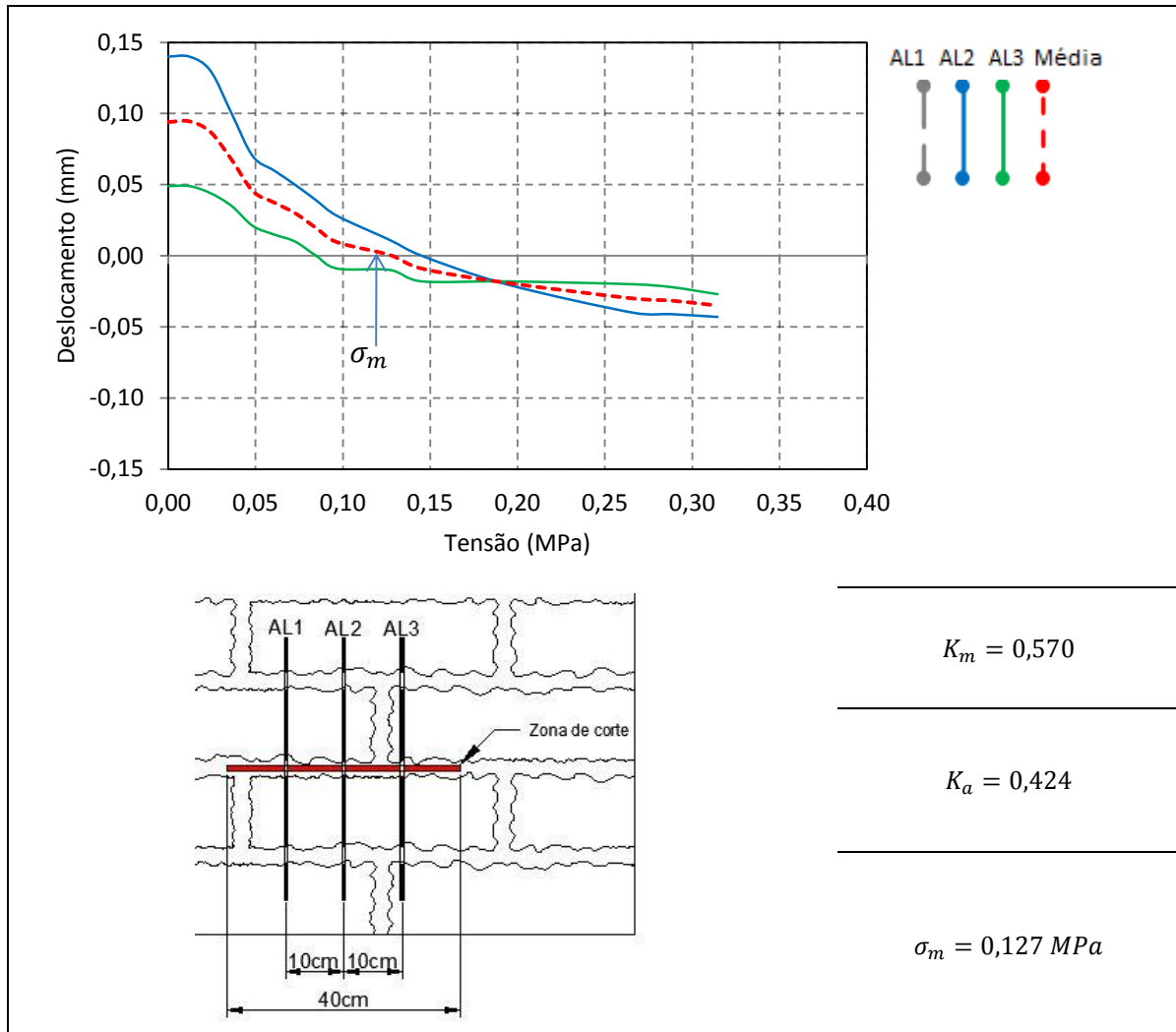


Figura 23: Resultados obtidos no ensaio simples utilizando apenas papel químico

### 3.6. Ensaio duplo

A realização do ensaio duplo aconteceu numa fase posterior ao ensaio simples. É comum aproveitar-se o macaco plano utilizado no ensaio simples para constituir o macaco plano inferior do ensaio duplo. Esta opção deve-se, muitas vezes, à difícil remoção do macaco plano da abertura existente na alvenaria. Pretende-se assim minimizar possíveis fragilizações na parede no processo de remoção do macaco e evitar danificar os registos.

É comum não substituir o registo químico após a realização do ensaio simples visto que este procedimento implicaria a remoção do macaco plano da abertura na parede. No entanto, no âmbito desta dissertação era fundamental conhecer a área carregada pelo que se optou por retirar o macaco no final do ensaio simples e colocar registos químicos novos e, no caso do ensaio duplo adaptado, além do registo químico a respectiva rede de marcação (ver Figura 24).

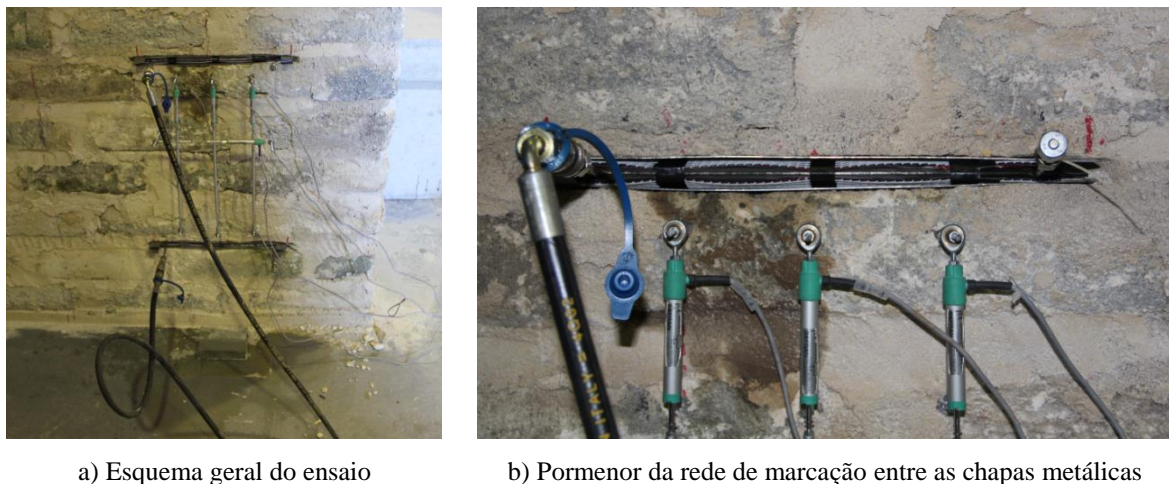


Figura 24:Ensaio duplo adaptado com rede de marcação

O protocolo de ensaio do ensaio duplo foi o seguinte:

- 1) Abertura de um segundo corte, paralelo em relação ao corte realizado para o ensaio simples, até uma distância de uma vez e meia o comprimento do macaco plano (600mm) de acordo com as recomendações normativas;
- 2) Marcação dos pontos de referência onde se efectuou a furação, injeção com bucha química, fixação dos varões roscados e posicionamento dos potenciômetros para medição de deformações;
- 3) Após verificação dos potenciômetros e ligação das mangueiras transmissoras de pressão ao sistema hidráulico e aos macacos planos, foram aplicados incrementos de pressão uniaxial ao troço de alvenaria, compreendido entre os dois macacos,

sujeita a ciclos de carga/descarga. À medida que eram realizados estes ciclos foram feitas leituras das deformações para cada incremento de pressão.

A geometria dos macacos planos utilizados no ensaio duplo foi a mesma adoptada nos ensaios simples, O esquema geral do ensaio duplo é apresentado na Figura 25.

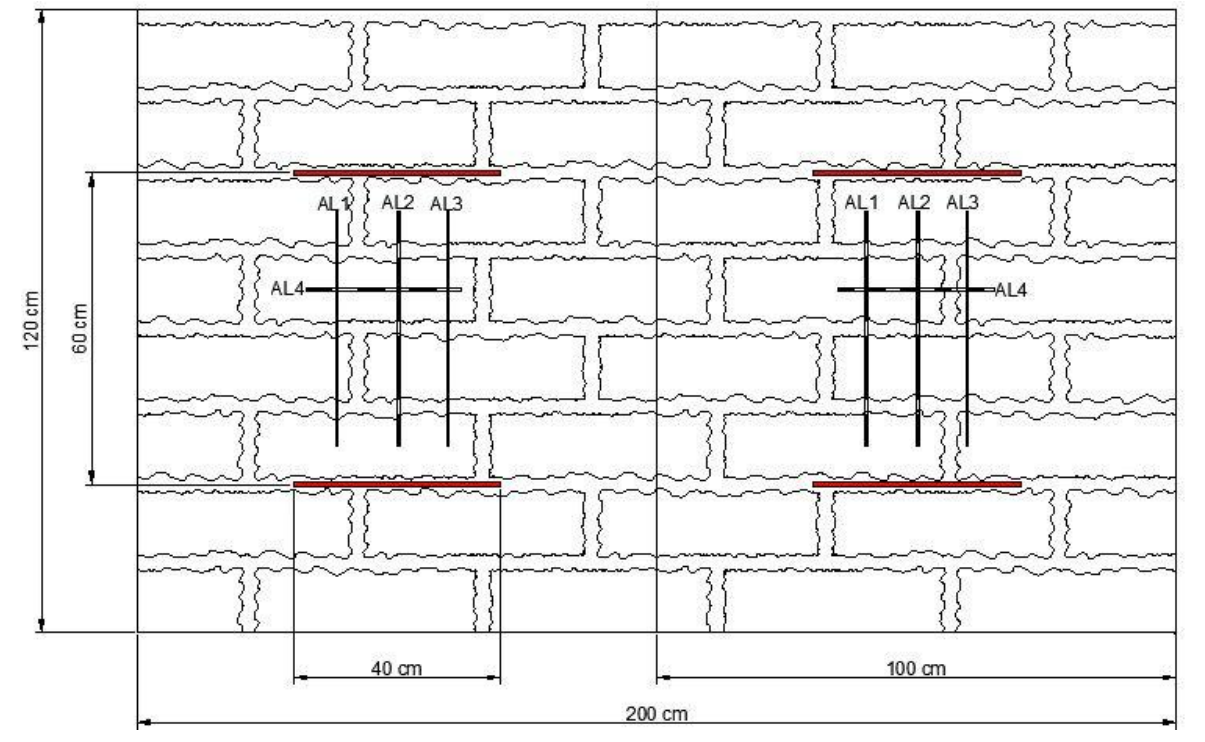


Figura 25: Esquema geral dos ensaios duplos realizados na parede de alvenaria

Foram realizados ensaios de macacos planos, em edifícios históricos na cidade de Milão, cujo objectivo foi perceber a influência que a tensão induzida pela pressurização dos macacos planos provocava numa parede de alvenaria [Miranda, 2011]. Apesar da alvenaria ensaiada não ser em adobe e os macacos planos utilizados serem de dimensões superiores aos utilizados na presente dissertação, as conclusões do estudo são relevantes e merecem uma reflexão tendo em conta as dimensões da parede ensaiada no presente trabalho.

O ensaio descrito no parágrafo anterior consistiu em colocar LVDTs segundo uma direcção ortogonal aos macacos planos e a distâncias definidas destes (12cm de

espaçamento). Os valores registados por estes LVDTs foram comparados com a média dos sensores, orientados também na vertical, colocados segundo os alinhamentos compreendidos entre os dois macacos planos. Verificou-se que os LVDTs colocados na vertical apresentam deformações que diminuíram exponencialmente com a altura, ainda assim, é referido que o LVDT mais distante do macaco plano inserido no corte superior, situado a cerca de 70 cm deste, registou pequenas deformações. No caso da parede ensaiada no âmbito da presente dissertação, não é relevante à luz dos resultados do estudo apresentado a influência do ensaio de macacos planos na extensão horizontal.

### 3.6.1. Resistência à compressão

Os ensaios de macacos planos duplos permitem estimar a resistência à compressão da parede. Na Tabela 9 indicam-se os valores do coeficiente de correcção  $K_a$ . É de salientar as diferenças entre as áreas efectivas de carregamento obtidas nos ensaios duplos quando comparadas com os ensaios simples, visto que os valores de pressão aplicados neste tipo de ensaios são bastante inferiores aos valores atingidos nos ensaios duplos.

Tabela 9: Registos obtidos relativamente à área carregada dos ensaios duplos

Tipo de ensaio	Posição do macaco plano	Áreas efectivas (m <sup>2</sup> )	$K_a$
Ensaio Duplo com Rede	Macaco Superior	0,0134	0,458
		0,0121	
	Macaco Inferior	0,0128	0,461
		0,0129	
Ensaio Duplo sem Rede	Macaco Superior	0,0113	0,401
		0,0110	
	Macaco Inferior	0,0109	0,367
		0,0096	

Foram realizados vários ciclos de carga-descarga observando-se a resposta do material, a parede ensaiada não foi levada à rotura. Na Figura 26, apresenta-se os valores correspondentes às curvas de tensão-extensão de cada alinhamento compreendido entre os dois macacos planos. Os dados registados pelo potenciómetro colocado segundo o “Alinhamento 1” não foram considerados tendo em conta que os valores obtidos não se

enquadravam no contexto do ensaio. Este alinhamento apenas está identificado na legenda com a cor cinzenta.

Em todos os gráficos apresentados foi definida uma escala padrão uniformizada de modo a comparar-se mais facilmente os resultados obtidos.

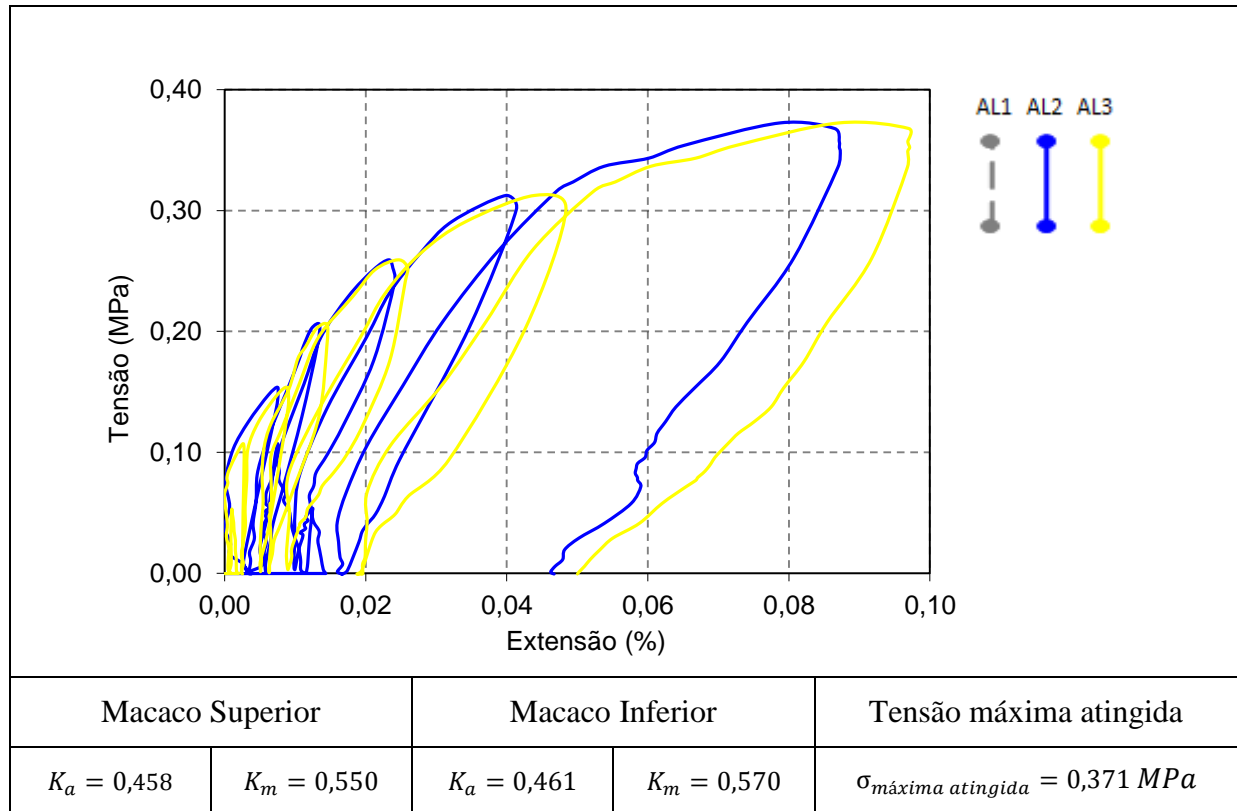


Figura 26: Resultados obtidos no ensaio duplo adaptado com rede de marcação

De forma a facilitar a leitura das curvas de tensão- extensão apresenta-se de seguida a extensão média dos alinhamentos verticais 2 e 3 em função da tensão aplicada (ver Figura 27). De referir que a tensão máxima é corrigida pelos coeficientes  $K_a$  e  $K_m$ . É indicado ainda na Figura 27 a tensão instalada calculada no subcapítulo 3.5.1.

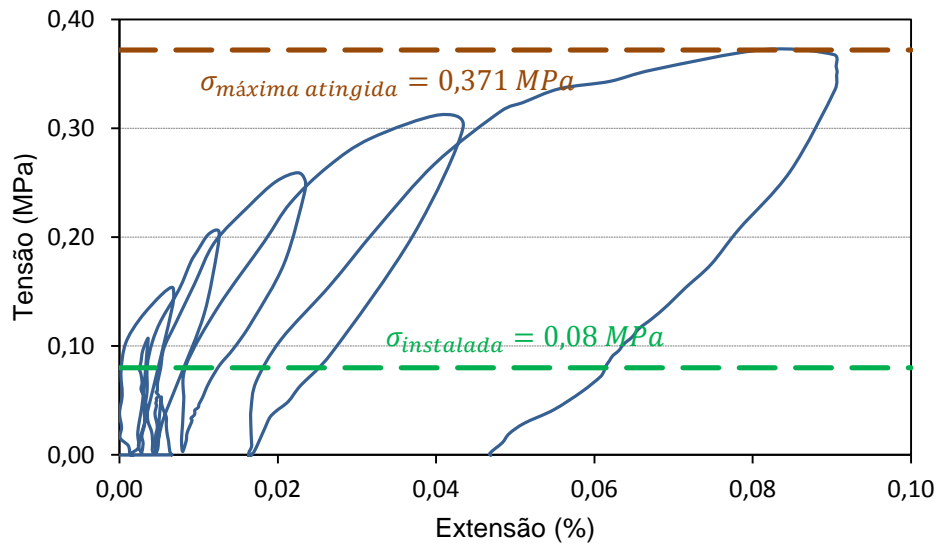


Figura 27: Tensão em função da média das extensões dos alinhamentos verticais. Ensaio duplo com rede de marcação

Verificou-se que a tensão instalada calculada por método expedito é mais de quatro vezes superior à tensão máxima atingida durante o ensaio duplo de macacos planos com rede de marcação. Este tipo resultado é comum em trabalhos de outros autores [R. Vicente et al., 2007] e [Rufo, 2010].

Após a realização do ensaio simples sem rede de marcação procedeu-se à substituição dos registos químicos utilizados no macaco plano e foi seguido o mesmo protocolo de ensaio utilizado para o ensaio duplo com rede de marcação. À semelhança do que aconteceu no ensaio duplo anterior, o sensor colocado segundo o alinhamento vertical 1 registou valores díspares tendo em conta as características do ensaio. Uma verificação pós ensaio confirmou que o potenciómetro apenas registava valores de ordens de grandeza mais elevadas. Deste modo ignorou-se a contribuição deste sensor e tratou-se os dados fornecidos pelos restantes alinhamentos. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 28.



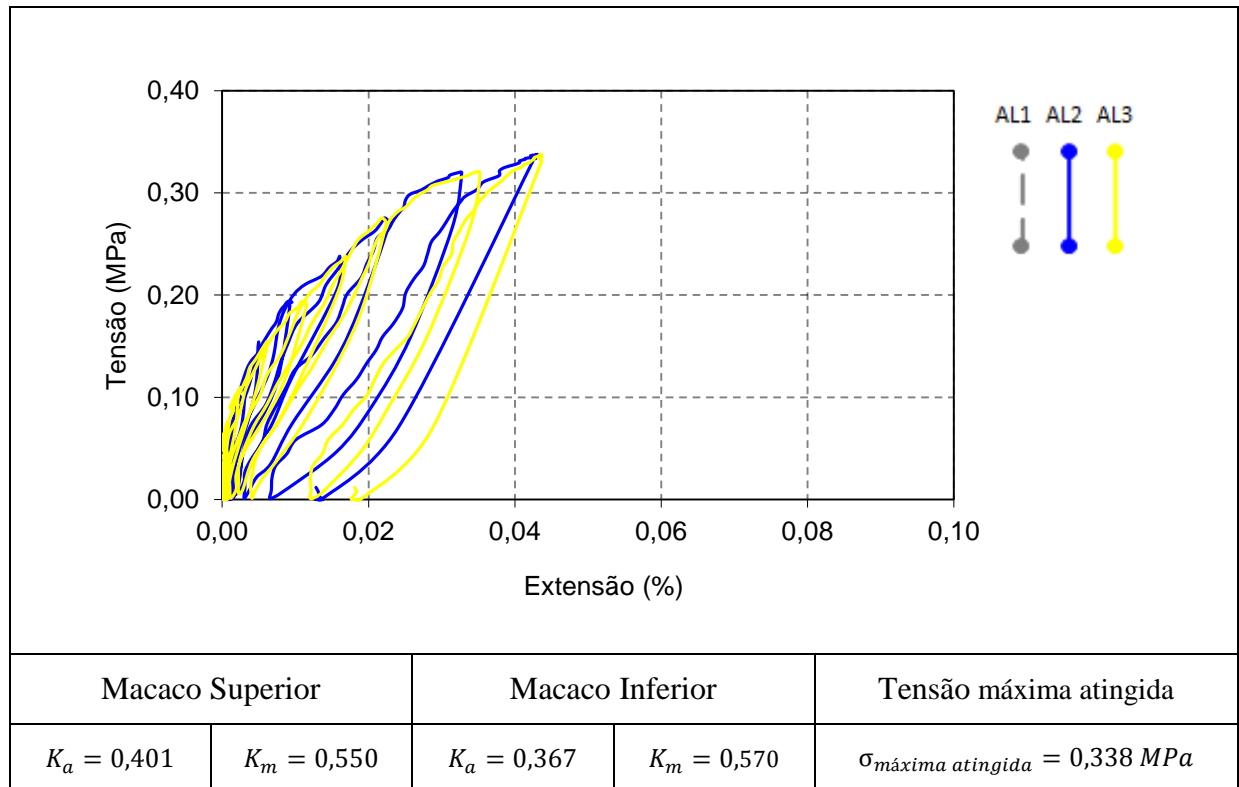


Figura 28: Resultados obtidos no ensaio duplo sem rede

Foi calculada a média das extensões de cada alinhamento e construiu-se o gráfico da Figura 29 de modo facilitar a leitura dos valores atingidos.

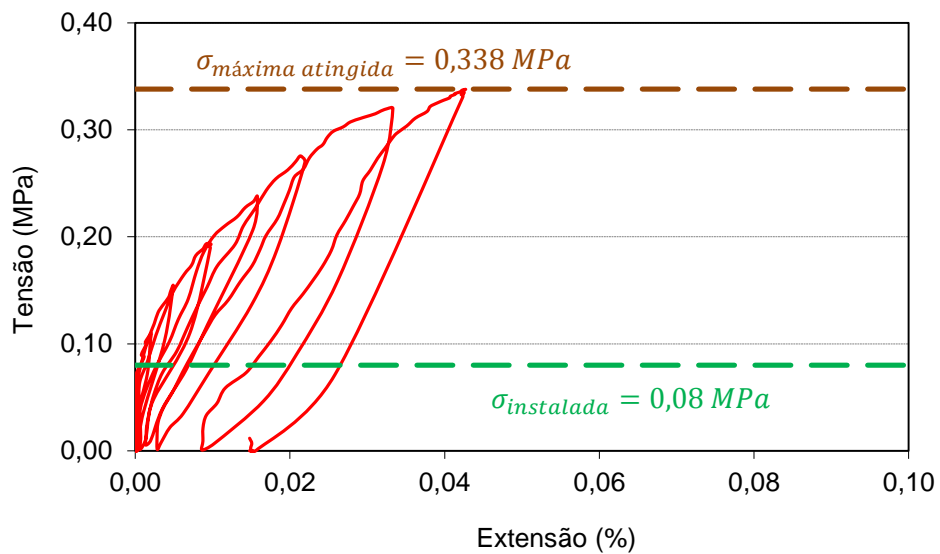


Figura 29: Tensão em função da média das extensões verticais no ensaio duplo sem rede

De forma a comparar as tensões-extensões obtidas no ensaio de macacos planos duplo, construiu-se o gráfico da Figura 30 onde se verifica que apesar de a tensão máxima atingida ser próxima, o valor das extensões foi superior no caso do ensaio duplo com rede de marcação.

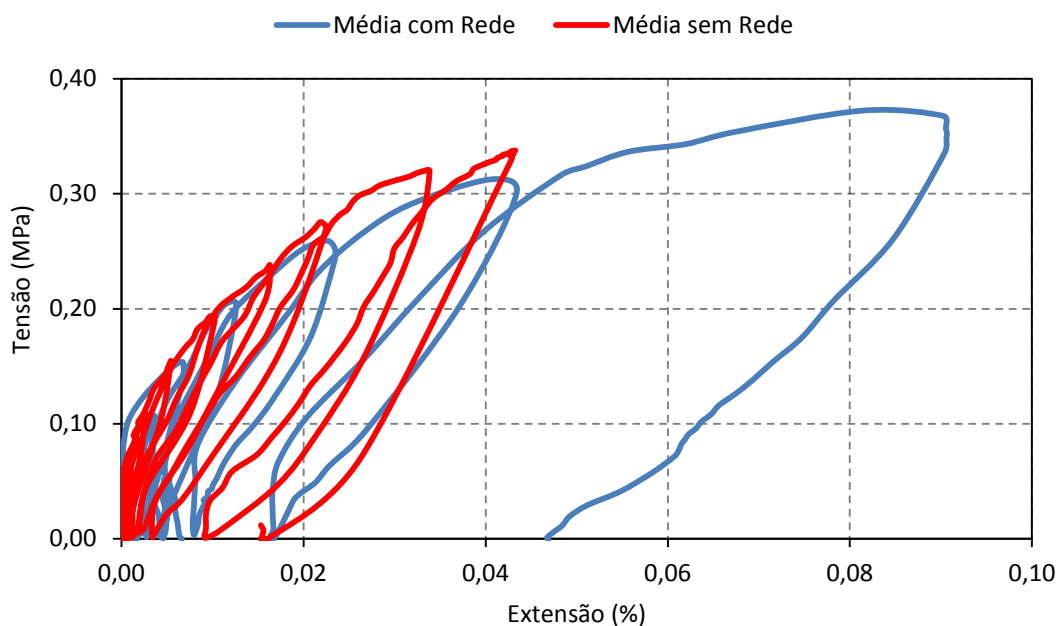


Figura 30: Relação tensão-extensão do ensaio de macacos planos duplo com e sem rede

Na Figura 30 é facilmente perceptível a diferença de valores das extensões entre cada ensaio. Apesar do valor das tensões máximas atingidas ser próximo, o valor das extensões é significativamente maior no ensaio duplo com rede. Este resultado é inesperado tendo em conta que os ensaios decorreram na mesma parede e apenas pode ser explicado pela possível fragilização precoce de algum elemento de adobe ou a existência de vazios tanto nos blocos como na argamassa.

### 3.6.2. Coeficiente de *Poisson* e módulo de elasticidade

O coeficiente de *Poisson* ( $\nu$ ) é a razão entre a deformação transversal ( $\varepsilon_h$ ) associada a uma deformação longitudinal ( $\varepsilon_v$ ) na direcção do esforço de tração. Para obter este valor calculou-se o quociente entre as extensões horizontais e a média das extensões segundo os alinhamentos verticais 2 e 3. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 10.

$$\nu = \frac{\epsilon_h}{\epsilon_v} \tag{Eq.5}$$

Tabela 10: Coeficientes de *Poisson*

Ensaio Duplo com Rede	Ensaio Duplo sem Rede
0,065	0,076

O módulo de elasticidade da alvenaria foi estimado a partir da curva tensão-extensão média obtida nos ensaios duplos. Calculou-se 30% da carga máxima atingida e verificou-se a extensão correspondente, adicionou-se a linha de tendência e o declive da recta obtida corresponde ao valor do módulo de elasticidade secante a 30% ( $E_{30\%}$ ) da carga máxima atingida. Realizaram-se os mesmos cálculos para 60% ( $E_{60\%}$ ) da carga máxima atingida e também o valor do módulo de elasticidade secante para valores entre 30% a 60% ( $E_{30\%-60\%}$ ) da carga máxima atingida. Na Figura 31 apresenta-se o procedimento descrito e que foi adoptado de igual forma para estimar o módulo de elasticidade nos ensaios duplos sem rede.

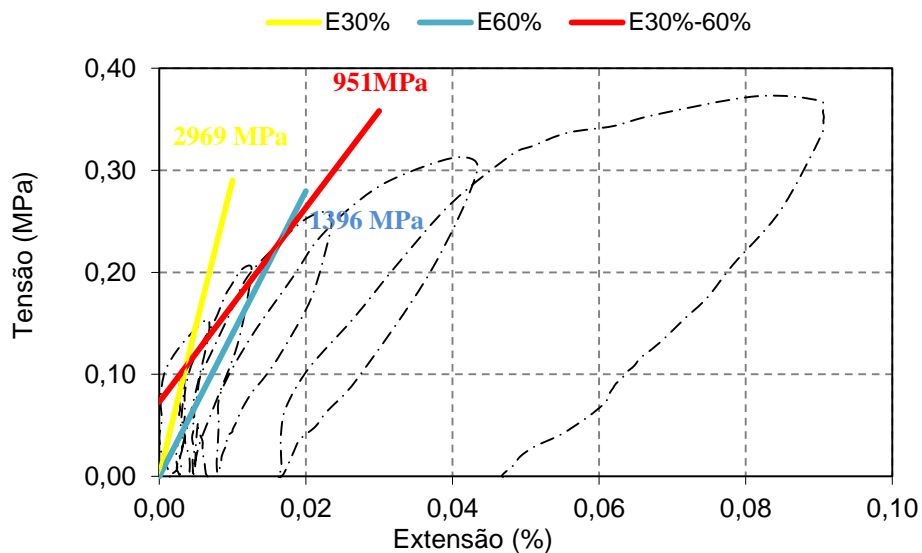


Figura 31: Estimativa do módulo de elasticidade do ensaio duplo com rede

A Tabela 11 apresenta a estimativa dos módulos de elasticidade obtidos a partir das curvas de tensão-extensão.

Tabela 11: Estimativas dos módulos de elasticidade obtidos nos ensaios duplos

Ensaio Duplo com rede (MPa)			Ensaio Duplo sem rede (MPa)		
$E_{30\%}$	$E_{60\%}$	$E_{30\%-60\%}$	$E_{30\%}$	$E_{60\%}$	$E_{30\%-60\%}$
2696	1396	951	5521	1872	1117

A discussão dos valores apresentados para o módulo de elasticidade é realizada no subcapítulo 3.8.

### 3.7. Resistência à compressão das paredes de alvenaria de adobe segundo EC6

A resistência à compressão da alvenaria é dependente de diversos factores [Rufo, 2010]: resistência das unidades e da argamassa; características de deformação das unidades e da argamassa, geometria das unidades; tipo de parede e o seu aparelho e condições de execução.

O EC6 [CEN, 2005] contempla duas maneiras distintas para o cálculo da resistência à compressão: ensaios experimentais e por relações semi-empíricas. Calculou-se a resistência à compressão usando o EC6 [CEN, 2005] para comparação com os valores de resistência obtidos nos ensaios de macacos planos.

Segundo o EC6 [CEN, 2005] a equação que estima o valor de resistência à compressão é:

$$f_k = K \times f_b^\alpha \times f_m^\beta \quad (\text{Eq. 6})$$

Onde:

$f_k$  valor característico da resistência à compressão da alvenaria, em N/mm<sup>2</sup>;

$K$  constante que, quando relevante, varia de acordo com tipo de unidade, argamassa e parede;

$\alpha, \beta$  são constantes;

$f_b$	resistência à compressão normalizada média de cada unidade de adobe na direcção em que é aplicada a força, $N/mm^2$ ;
$f_m$	resistência à compressão da argamassa, $N/mm^2$ .

O valor de  $f_m$  não pode ser superior a  $20 N/mm^2$  nem superior a  $2f_b$  quando é utilizada argamassa convencional [CEN, 2005], como é o caso da construção da parede de adobe onde decorreram os ensaios.

Para uma argamassa convencional os valores de  $\alpha, \beta$  são respectivamente 0,65 e 0,25. O valor de  $K = 0,45$  para argamassas normais do grupo 1 e de pedra natural de acordo com o EC6 [CEN, 2005]

Consultando os resultados dos ensaios de resistência à compressão dos blocos de adobe obtidos no subcapítulo 3.4.2 para o provete 1 e provete 2, respectivamente  $f_b = 1,01 N/mm^2$  e  $f_b = 1,26 N/mm^2$  a média dos provetes é de  $f_b = 1,14 N/mm^2$ . De igual forma, os resultados para a resistência à compressão dos provetes de argamassa obtidos são (ver subcapítulo 3.4.1):  $f_m = 2,38 N/mm^2$ .

Conforme referido nos parágrafos anteriores o valor de  $f_m$  tem limitações segundo o EC6[CEN, 2005]:

$$f_m \leq 20 \text{ MPa e } f_m \leq 2f_b$$

$f_m = 2,38 \text{ MPa} \leq 20 \text{ MPa}$	Verifica
$f_m = 2,38 \text{ MPa} \leq 2 \times 1,01 = 2,02 \text{ MPa}$	Não verifica
$f_m = 2,38 \text{ MPa} \leq 2 \times 1,26 = 2,52 \text{ MPa}$	Verifica

Utilizando os valores permitidos pelo EC6:

$$f_k = K \cdot f_b^\alpha \cdot f_m^\beta = 0,45 \times 1,26^{0,65} \times 2,38^{0,25} = 0,650 \text{ MPa}$$

Conclui-se portanto que, segundo o EC6, o valor característico da resistência à compressão da alvenaria que constitui a parede é de 0,650 MPa. O EC6 [CEN, 2005] preconiza o

cálculo simplificado do módulo de elasticidade da alvenaria na rotura pela seguinte fórmula:

$$E = f_k \cdot 1000 = 0,650 \times 1000 = 650 \text{ MPa}$$

### 3.8. Discussão dos resultados

Após a caracterização dos materiais constituintes da alvenaria, a realização dos ensaios de macacos planos e o respectivo tratamento de dados, organizou-se o presente capítulo de forma a apresentar os resultados obtidos e possíveis considerações e comentários sobre o trabalho desenvolvido.

Um dos objectivos da presente dissertação foi o estudo de aplicação de uma rede de marcação que introduzisse melhorias significativas no ensaio de macacos planos. A relação entre a área efectivamente em contacto e a área do macaco é uma das variáveis mais importantes no cálculo final da tensão instalada.

Na Tabela 12 apresenta-se os valores obtidos nos ensaios simples para o  $K_a$  e o respectivo desvio em relação aos valores estimados por método expedito. O procedimento efectuado para calcular os valores da Tabela 12 é descrito de seguida. Apenas se exemplifica os cálculos efectuados para o ensaio simples com rede.

$$\sigma_{instalada} = K_m \times K_a \times p$$

$$0,080 = 0,570 \times K_a \times 0,403$$

$$K_a = 0,348$$

O valor da tensão instalada é calculado no subcapítulo 3.5.1, o valor de calibração do macaco plano inferior ( $K_m$ ) foi previamente determinado e o valor da pressão (em MPa) foi lido no momento em que o restabelecimento da média dos alinhamentos foi zero, ou seja, estava encontrado o valor da tensão instalada. Deste modo, a única variável da equação é o coeficiente  $K_a$ . A variação percentual indicada na Tabela 12 refere-se à

diferença percentual entre o valor do  $K_a$  determinado com a tensão estimada por método expedito e aquele determinado pela área carregada.

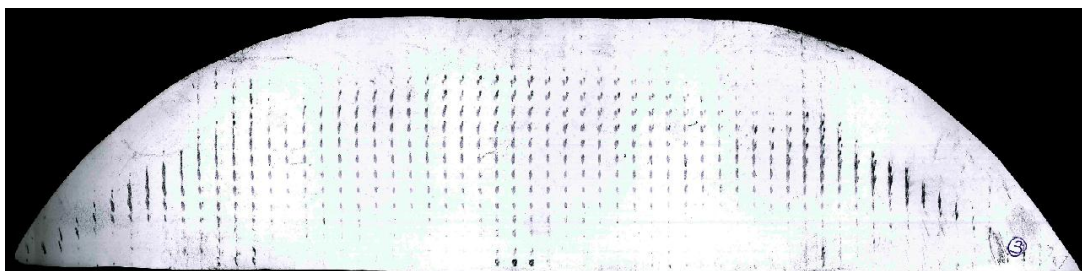
Tabela 12: Variação dos  $K_a$

Descrição	$K_{a(ensaio)}$	$K_{a(cálculo)}$	Variação (%)
Ensaio Simples com Rede	0,480	0,348	37,93
Ensaio Simples sem Rede	0,424	0,267	58,80

Esta diferença de resultados é explicada pela melhor definição das áreas de carregamento do ensaio simples adaptado com rede de marcação em relação ao ensaio simples normal. De facto, a introdução da rede de marcação permitiu uma imagem da área efectiva de carregamento mais nítida (Figura 32). É prática habitual introduzir-se o registo químico do ensaio numa ferramenta de desenho assistido por computador de modo a estimar-se com a maior precisão possível a área efectiva de carregamento.



a) Registo químico do ensaio de macacos planos normal sem rede de marcação



b) Registo químico do ensaio de macacos planos adaptado com rede de marcação

Figura 32: Registos químicos do mesmo tipo de ensaio de macacos planos com e sem rede de marcação

A definição da área efectiva apresenta algumas condicionantes sobre os quais se irá tecer algumas considerações. Em primeiro lugar, após a conclusão do ensaio, o processo de

remoção do macaco é, por vezes, difícil. Apesar do macaco recuperar parte da sua geometria original após despressurização continua com alguma deformação plástica e o registo químico pode indicar áreas que não resultaram directamente das acções de compressão sofridas entre a superfície do macaco plano e a parede mas sim da acção de remoção do próprio macaco plano da parede.

A definição da área de carregamento é alvo de imprecisões tendo em conta que diferentes utilizadores podem definir áreas efectivas aproximadamente iguais em zonas onde o registo químico indica, sem margens para dúvida, acção de compressão entre a superfície do macaco plano e a parede. Não obstante, a definição precisa da área efectivamente carregada irá certamente variar dependendo do utilizador. Em defesa dos resultados, é de salientar que apesar de diferentes valores conduzirem a diferentes factores de correcção da tensão instalada, os valores obtidos deverão ser sempre aproximadamente iguais não ignorando contudo a subjectividade inerente.

### **3.8.1. Estimativa da tensão instalada**

A tensão instalada é uma componente obtida através da correcção da pressão induzida no macaco plano conforme exposto no Capítulo 2. No subcapítulo 3.8 foi referida a influência que o coeficiente  $K_a$  tem no cálculo final da tensão instalada. Outro coeficiente a ter em conta é o coeficiente  $K_m$ . Durante o tratamento de dados verificou-se que os valores obtidos para o  $K_a$  são idênticos aos valores obtidos em estudos semelhantes realizados por outros autores: [R. d. S. Vicente, 2008] apresenta variações entre [0.412 a 0.708] e [Rufo, 2010] de [0.216 a 0.349]. A mesma correlação não se verificou para o coeficiente de calibração dos macacos. De facto, para [Rufo, 2010] a utilização de macacos planos semi-ovais idênticos aos macacos planos utilizados na presente dissertação originou coeficientes de calibração médios de 0,836 contra 0,570 obtidos neste trabalho. Esta diferença de valores poderá ser explicada com o desgaste dos macacos planos utilizados ao longo do tempo, estes já foram inúmeras vezes utilizados em ensaios promovidos pelo DECivil-UA onde a constante pressurização/despressurização dos macacos planos provocou roturas ao longo das soldaduras e consequentes reparações com solda ao nível das fissuras. O desgaste das peças de ligação entre o macaco propriamente dito e as



mangueiras transmissoras de pressão e ,possivelmente, atrito anormal no interior do macaco plano, podem ter sido a causa do cálculo de um coeficiente de calibração relativamente baixo. Para melhor análise das tensões instaladas organizou-se os resultados obtidos no Capítulo 3 na Tabela 13 onde foi incluída a informação relativa ao desvio da tensão instalada estimada por ensaio em relação ao estimado por cálculo expedito.

Tabela 13: Resumo das tensões instaladas

Método de cálculo	Tensão instalada (MPa)	Desvio (%)
Método Expedito	0,080	-
Ensaio Simples com Rede	0,110	+27,27
Ensaio Simples sem Rede	0,127	+37,00

Apesar dos desvios consideráveis dos valores obtidos para a tensão instalada verificaram-se resultados mais precisos no ensaio simples onde foi utilizada uma rede de marcação. Um desvio de +27,27% não está dentro variância aceitável ( $\pm 24,00\%$ ) mas é significativamente mais próximo do que o desvio de +37,00% verificado no ensaio simples sem rede.

### 3.8.2. Estimativa da resistência à compressão

O presente subcapítulo pretende analisar e comparar os resultados obtidos nos ensaios duplos de macacos planos, o cálculo de resistência à compressão da alvenaria segundo o Eurocódigo 6 [CEN, 2005] e ainda os resultados obtidos nos ensaios de caracterização dos provetes de adobe. Com este objectivo presente, organizou-se os dados obtidos na Tabela 14 para melhor comparação dos valores em discussão.

Tabela 14: Resumo dos resultados obtidos para resistência à compressão

Forma de cálculo	Resistência à compressão (MPa)
Ensaio Duplo Adaptado com rede	0,371
Ensaio Duplo	0,338
Expressão pelo EC6	0,650
Média Provetes de adobe	1,14

Relativamente aos resultados obtidos nos ensaios de macacos planos e apresentados na Tabela 14 era esperado que os valores obtidos por intermédio dos ensaios duplos de macacos planos para a resistência à compressão da alvenaria, indicassem valores semelhantes. Perante blocos de adobe com as mesmas características (geométricas e mecânicas), argamassa com o mesmo traço, mesmo tipo de carregamento na parede (carga uniformemente distribuída) e sistema de construção idêntico era expectável que os resultados obtidos no ensaio duplo adaptado com rede e no ensaio duplo normal fossem próximos.

O desvio percentual da resistência à compressão entre o ensaio duplo adaptado e ensaio duplo normal é de 8,9% um valor aceitável e esperado visto as condições dos ensaios serem idênticas. O desvio percentual entre os valores de tensão de resistência à compressão e o valor preconizado pelo EC6 [CEN, 2005] é naturalmente elevado visto que o valor estimado pelo EC6 é o valor de resistência à compressão na rotura. Os ensaios realizados nesta dissertação não atingiram patamares tão elevados pelo que os valores obtidos são compreensíveis.

Os resultados podem ser explicados por um lado pelo valor relativamente elevado da resistência das unidades de alvenaria ( $f_b$ ) de 1,26 MPa e que entra na formulação fornecida pelo EC6 [CEN, 2005], pelo que se prevê alguma sobrestimação dos resultados apresentados por esta via de cálculo. É de referir que, uma unidade de alvenaria tem tendência a apresentar um comportamento isolado mecanicamente melhor do que se for inserida numa secção de parede composta por unidades de blocos de adobe e argamassa de ligação.

A acrescentar às incertezas referidas no parágrafo anterior, é de salientar que os provetes extraídos para ensaio de caracterização mecânica podem ter sido de blocos de adobe que apresentavam melhores características ao nível de resistência em relação às restantes unidades. Para colmatar esta falha, seria importante realizar ensaios num conjunto suficientemente abrangente de amostras de carotes extraídos de blocos de adobe de forma a dispor de uma representação significativa de ensaios, avaliar a média destes resultados e assim obter valores mais fiáveis para a forma de cálculo proposta pelo EC6 [CEN, 2005].

### 3.8.3. Estimativa do módulo de elasticidade

Os resultados obtidos para o módulo de elasticidade foram comparados com aqueles preconizados pelo EC6 [CEN, 2005] (ver Tabela 15). No entanto estas comparações de valores devem ser interpretadas com algumas reservas visto que não se atingiu a rotura da parede de alvenaria de adobe ensaiada e o módulo de elasticidade que o EC6 [CEN, 2005] estima é o valor na rotura. O módulo de elasticidade estimado pelo EC6 foi de 650 MPa.

Tabela 15: Comparação de resultados do módulo de elasticidade

Tipo de ensaio	$E_{30\%-60\%}$ (MPa)	Varição em relação ao EC6%
Duplo com rede	951	+31,65
Duplo sem rede	1117	+41,81

Os resultados obtido através do ensaio duplo com rede foram mais precisos quando comparados com os valores obtidos através do ensaio duplo sem rede. Dos resultados obtidos pode-se afirmar que a parede ainda não tinha atingido a rotura.





---

## **Capítulo 4 Fibra óptica**

- 4.1. Fibra óptica – Conceitos fundamentais
  - 4.1.1. Introdução
  - 4.1.2. Redes de Bragg uniformes
  - 4.1.3. Breve história de redes de Bragg
  - 4.1.4. Gravação dos sensores pelo método de máscara de fase
  - 4.1.5. Sensibilidade das redes de Bragg a perturbações externas
- 4.2. Ensaio realizado com fibra óptica
  - 4.2.1. Posicionamento dos sensores
  - 4.2.2. Testes de adaptabilidade da fibra
- 4.3. Discussão dos resultados
  - 4.3.1. Discussão dos resultados das abordagens realizadas
  - 4.3.2. Ensaio realizado apenas com fibra óptica

---

## **4. FIBRA ÓPTICA**

### **4.1. Fibra óptica – Conceitos fundamentais**

#### **4.1.1. Introdução**

No presente subcapítulo são apresentados conceitos fundamentais necessários à compreensão global das redes de Bragg. Pretende-se uma explicação sucinta mas completa do funcionamento das redes de Bragg como sensores de deformação.

A fibra óptica teve as suas origens no campo das comunicações ópticas, no entanto evoluiu para áreas tão diversas como a engenharia civil, sísmica, aeronáutica e médica. Na actualidade os sensores de fibra óptica competem com os métodos de monitorização tradicionais. Características únicas distinguem esta tecnologia. Entre elas salienta-se: possibilidade de monitorização remota e em tempo real, imunidade a interferências electromagnéticas, flexibilidade e dimensões reduzidas. A possibilidade de serem medidos, simultaneamente, diferentes parâmetros incluindo deformação, temperatura, pressão, curvatura, índice de refração [Alberto, 2011] entre outros torna as redes de Bragg soluções ideais de monitorização em diversas áreas.

#### **4.1.2. Redes de Bragg uniformes**

Um rede de Bragg é uma secção de uma fibra óptica onde o índice de refração foi alterado a intervalos periódicos para que certos comprimentos de onda sejam transmitidos e outros reflectidos [Alberto, 2011]. Esta alteração do índice de refração consiste numa modulação periódica do núcleo da fibra criada pela exposição da fibra a um padrão óptico de interferência ultravioleta. A modificação de características do núcleo da fibra funciona como um filtro selectivo para os comprimentos de onda que satisfazem a condição de Bragg.

A condição de Bragg é dada por:

$$\lambda_B = 2 \cdot \Lambda \cdot \eta_{eff} \quad (\text{Eq. 7})$$

Onde:

- $\lambda_B$  é o comprimento de onda de Bragg;
- $\Lambda$  é o período de modulação do índice de refração;
- $\eta_{eff}$  é o índice de refração efectivo.

Na Figura 33 é ilustrado o princípio de funcionamento de uma rede de Bragg uniforme. Quando o comprimento de onda satisfaz a condição de Bragg verifica-se um sinal reflectido.

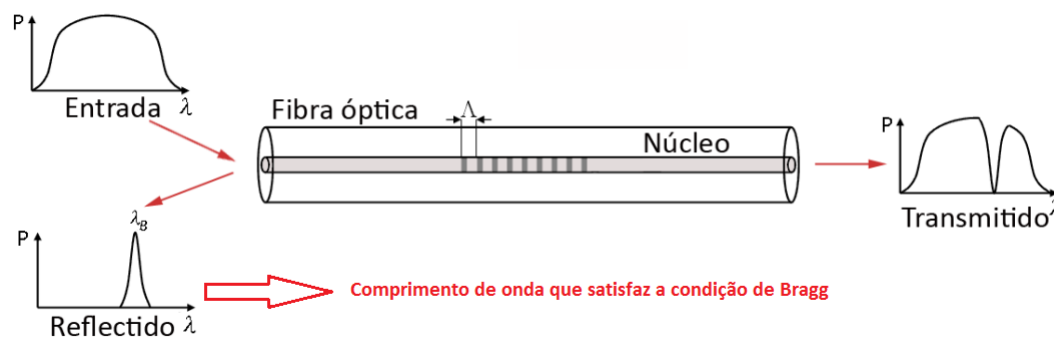


Figura 33: Representação esquemática do funcionamento de uma rede de Bragg uniforme (imagem alterada de [Alberto, 2011])

Os espectros de reflexão e de transmissão característicos de uma rede de Bragg uniforme são apresentados na Figura 34. Foi utilizada uma fibra óptica fotossensível FiberCore PS11250/1500 (dados fornecidos pelo Instituto de Telecomunicações da Universidade de Aveiro) para todos os ensaios realizados para determinar a viabilidade da aplicação da fibra óptica em ensaios de macacos planos assim como para a determinação da sua resistência.



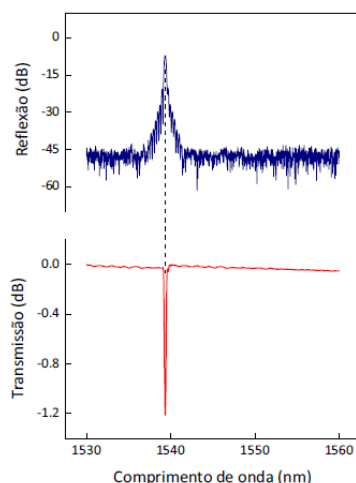


Figura 34: Espectros de reflexão e transmissão de uma rede Bragg uniforme [Alberto, 2011]

### 4.1.3. Breve história das redes de Bragg

A gravação da primeira rede de Bragg em fibra óptica foi demonstrada no *Canadian Communication Research Center* em 1978 [Alberto, 2011]. Consistiu em fazerem passar por uma fibra óptica de sílica dopada com germânio (Ge), luz visível de um feixe de íons de argônio (Ar). Verificaram que após uma prolongada exposição, a intensidade da luz reflectida aumentava em função desse tempo até que o feixe era reflectido completamente. Posteriormente confirmou-se que este aumento de reflectividade resultava da modulação do índice de refração do núcleo da fibra [Alberto, 2011], por outras palavras, o aumento da reflectividade era consequência da alteração das características do sinal emitido pelo núcleo da fibra. Estas alterações constituíram um importante passo na gravação de redes de Bragg. Existem várias configurações, entre as quais: redes de Bragg uniformes, redes de Bragg apodizadas, redes de Bragg aperiódicas, redes de Bragg inclinadas e redes de Bragg superestruturadas.

Nesta dissertação o tipo de redes que se pretendia utilizar seriam redes de Bragg uniformes. Adiante se discutirá a sensibilidade das redes de Bragg uniformes a factores externos como variações de temperatura, perturbações mecânicas e alterações do índice de refração externo decorrente da sua aplicação na engenharia civil no geral e no ensaio de macacos planos em particular.

#### 4.1.4. Gravação dos sensores pelo método de máscara de fase

A máscara de fase é um elemento de difracção óptico. É constituída por uma sequência de depressões longitudinais na superfície de um substrato de sílica (ver Figura 35). Existem dois processos distintos para a produção de máscaras de fase: processos holográficos e processos litográficos com varrimento de feixe de electrões. O método para a gravação de redes de Bragg nesta dissertação seria por processos holográficos.

O princípio de funcionamento deste método consiste na sobreposição de duas ordens de difracção no núcleo da fibra óptica de modo a formar-se um padrão de interferência. A fibra óptica é colocada próxima da máscara de fase para que o segmento do núcleo da fibra onde se pretende gravar a rede de Bragg esteja incluída na zona de sobreposição das duas ordens refractadas. Segundo Alberto [2011] o facto de a fibra ser colocada próxima da máscara de fase, no campo de refacção dos raios U.V faz com que seja minimizada a interferência de vibrações mecânicas. Othonos and Kalli [1999] refere ainda que como é apenas utilizado um elemento óptico de refacção, este método torna-se simples, com alguma robustez e estabilidade nas redes. Na Figura 35 apresenta-se um esquema da gravação de uma rede de Bragg uniforme pelo método descrito.

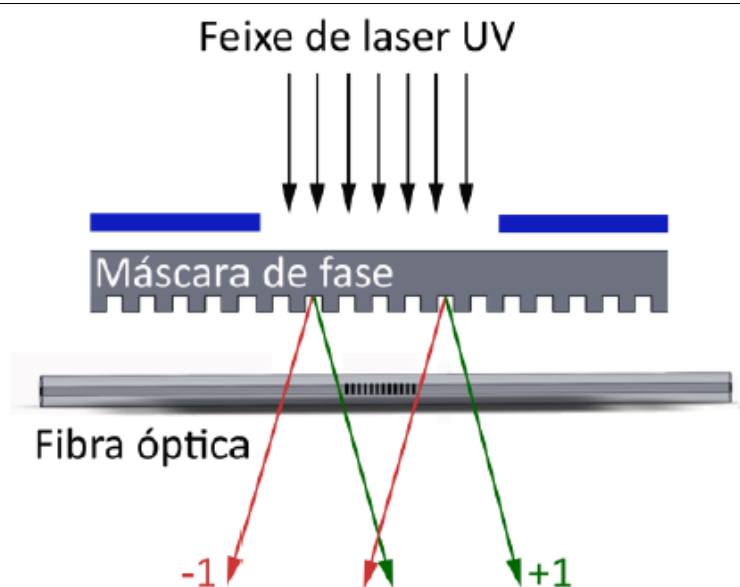


Figura 35: Gravação de redes de Bragg pelo método de máscara de fase [Alberto, 2011]

#### 4.1.5. Sensibilidade das redes de Bragg a perturbações externas

A utilização das redes de Bragg como elementos sensores é possível devido à variação do comprimento de onda como consequência de perturbações externas. No subcapítulo 4.1.3, de acordo com a Equação 6, verifica-se que o comprimento de onda de Bragg reflectido depende do índice de refração efectivo ( $n_{eff}$ ) e do período de modulação do índice de refração ( $\Lambda$ ).

Uma perturbação externa que modifique este parâmetro é quantificável, visto que o comprimento de onda reflectido terá necessariamente que variar. A alteração do comprimento de onda de Bragg devido a variações de temperatura ( $\Delta T$ ), perturbações mecânicas ( $\Delta P$ ) e alterações do índice de refração ( $\Delta RI$ ) é dado por [Othonos & Kalli, 1999]:

$$\Delta\lambda_B = \left(2\Lambda \frac{\partial n_{eff}}{\partial P} + 2n_{eff} \frac{\partial \Lambda}{\partial P}\right) \Delta P + \left(2\Lambda \frac{\partial n_{eff}}{\partial T} + 2n_{eff} \frac{\partial \Lambda}{\partial T}\right) \Delta T + \left(2\Lambda \frac{\partial n_{eff}}{\partial RI} + 2n_{eff} \frac{\partial \Lambda}{\partial RI}\right) \Delta RI$$

(Eq. 8)

No caso concreto de aplicação deste tipo de sensores em ensaios de macacos planos não é do interesse da presente dissertação compreender a complexidade matemática da Equação 8. Paralelamente, importa perceber as grandezas físicas presentes que influenciam os resultados obtidos.

Para o ensaio de macacos planos, interessava sobretudo a capacidade dos sensores de registarem deformações quando sujeitos à acção de tensões. Considerando que não existem variações significativas de temperatura inerentes à utilização dos macacos, apesar de ser conhecida a proporcionalidade entre variação de pressão e temperatura, e que as fibras ópticas utilizadas nos ensaios não são sensíveis a variações de índice do meio externo, a Equação 8 simplifica e as únicas grandezas envolvidas são as perturbações mecânicas, induzidas pela pressurização dos macacos contra a parede.

## 4.2. Ensaios realizados com fibra óptica

Conforme referido no Capítulo 1, um dos objectivos da presente dissertação foi iniciar o desenvolvimento de uma campanha de ensaios que verificasse a adaptabilidade das redes de Bragg para os ensaios parcialmente destrutivos com recurso a macacos planos. Tendo este objectivo presente, foi necessário proceder a uma optimização do protocolo de ensaio de modo a testar a possível capacidade de leitura de deformação dos sensores.

### 4.2.1. Posicionamento dos sensores

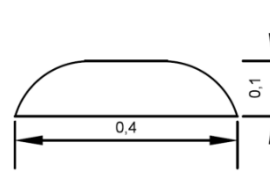
Foi desenhada a superfície de um macaco plano, utilizando uma ferramenta de desenho assistido por computador com a mesma configuração semi-oval e as mesmas dimensões geométricas dos macacos planos utilizados nos ensaios descritos no Capítulo 3. Pretendeu-se com este passo propor diferentes configurações da fibra óptica na superfície do macaco plano. Na Tabela 17 são organizadas as soluções propostas. Para melhor compreensão da tabela é necessário referir os seguintes aspectos:

- ❖ A linha que une os sensores representa o cabo de fibra óptica. A localização exacta do sensor, marcada a circunferências coloridas, é importante, já a forma como este se desenvolve sobre a superfície do macaco plano não, sendo apenas relevante na medida em que, por motivos técnicos de leitura óptica, têm que ser respeitados raios mínimos de curvatura do cabo.
- ❖ Os testes de resistência à fibra, explicados no subcapítulo 4.2.2, foram realizados com a fibra óptica assente numa camada de material com a mesma forma e dimensões dos macacos planos. Esta camada foi ainda envolvida numa capa protectora em tela comum.
- ❖ Sempre que possível optou-se por colocar os sensores em segmentos de fibra rectilíneos de modo a não comprometer a integridade física da mesma. No subcapítulo 4.3 se discutirá este tema.

- ❖ A dimensão dos macacos planos utilizados foi sempre a mesma e está definida na Tabela 16.

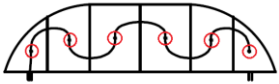

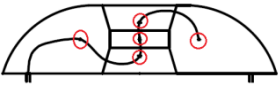
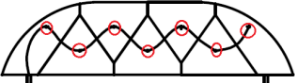
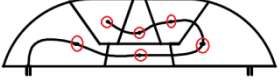
Tabela 16: Forma e dimensões (em m) dos macacos planos utilizados

Macaco plano semi-oval



Na Tabela 17 são apresentadas as diferentes configurações consideradas e onde se inclui uma explicação da posição relativa dos sensores.

Tabela 17: Soluções de disposição do macaco plano

SOLUÇÃO	POSIÇÃO SENSORES	DESCRIÇÃO DA SOLUÇÃO
A		Sensores colocados no centro de áreas obtidas com a divisão vertical em partes iguais de um macaco plano.
B		Sensores colocados no centro geométrico de áreas obtidas com a divisão horizontal em partes iguais de um macaco plano. Foi acrescentado um sensor na região central por se considerar esta zona fundamental para a análise da distribuição de carregamento.
C		Sensores colocados no centro do macaco plano onde, de acordo com ensaios anteriores, a área de carregamento é mais uniforme. As divisões são as respectivas áreas de influência dos sensores.
D		Sensores distribuídos pelo macaco plano em torno da linha média, horizontal, que divide o macaco em duas áreas iguais. As divisões são as respectivas áreas de influência dos sensores.
E		Sensores distribuídos de forma aleatória sobre a superfície do macaco plano. As divisões são as respectivas áreas de influência dos sensores.

As soluções A e D foram consideradas as mais indicadas, pois promoviam uma distribuição equitativa dos sensores e colocavam-nos sempre que possível em segmentos rectos da fibra óptica.

#### 4.2.2. Testes de adaptabilidade da fibra

No laboratório do DECivil-UA foram realizados ensaios práticos de verificação de resistência da fibra óptica a ser aplicada em ensaios de macacos planos. O protocolo de ensaio destes testes foi em tudo semelhante ao ensaio de macacos planos simples descrito no Capítulo 3, subcapítulo 3.5 com a diferença que para estes testes não foi ligado o *software* informático de aquisição de dados dos sensores de deslocamento nem o transdutor de pressão que permite conhecer, o valor da pressão aplicado pelo sistema hidráulico.

O sistema (ver Figura 36a) consiste unicamente na utilização de um macaco plano em cuja superfície estão os segmentos de fibra óptica. O conjunto é ligado a um sistema hidráulico de pressurização em que a pressão é controlada através de leituras no manómetro do macaco hidráulico. Os ensaios decorreram numa parede de alvenaria de adobe do DECivil-UA. Não se ultrapassou o limite de 0,5 MPa de pressão (leitura no manómetro do macaco de 5 Bar). Outro modo de carregamento consistiu na utilização do actuador do laboratório do DECivil-UA ligado ao macaco plano (ver Figura 36b).



a) Macaco plano



b) Actuador de 300 kN

Figura 36: Modelos de ensaio de verificação da resistência da fibra óptica

Na Tabela 6 resume-se as abordagens realizadas com diferentes materiais e configurações para a incorporação da fibra óptica. A explicação dos parâmetros de entrada da referida tabela é a seguinte:

- ❖ Tipo de fibra: a tecnologia actual de gravação dos sensores na fibra óptica obriga a que a secção, onde se situa o sensor, sofra uma redução de 50% do seu diâmetro total. Assim, a fibra testada foi clivada a intervalos regulares simulando a existência de sensores nesses espaços. A designação presente na tabela indica se a fibra tem o seu diâmetro completo (protegida) ou se está reduzida a metade em intervalos regulares (parcialmente protegida). No subcapítulo 4.3 se apresenta as consequências desta redução forçada do diâmetro.
  
- ❖ Tipo de revestimento: de forma a proteger a sensibilidade dos sensores escolheu-se materiais resistentes às acções de compressão vertical e simultaneamente de tração horizontal que o macaco plano sofre durante o ensaio. Os dois materiais seleccionados foram a fibra de carbono devido às suas excelentes propriedades mecânicas e uma membrana de alta densidade (M.A.D) com uma boa elasticidade sem contudo prejudicar a capacidade de leitura dos sensores na superfície do macaco plano.
  
- ❖ Base do sensor: este parâmetro indica sobre que base os sensores foram colocados, mais maleáveis (fibra de carbono e M.A.D) ou mais rígidas (macaco plano e placas de aço). A forma de fixação dos sensores na superfície do macaco plano e a influência para os resultados são discutidos no subcapítulo 4.3.
  
- ❖ Modo de carregamento: este parâmetro indica qual foi o sistema que provocou esforços de compressão no macaco de modo a testar as fibras. A abordagem n.º6, que na tabela tem um modo de carregamento único, é explicada no subcapítulo 5.3.
  
- ❖ Verificação: consistiu em confirmar a integridade mecânica da fibra. Naturalmente, face a uma quebra total ou mesmo parcial da fibra, o comprimento de luz da fonte emissora não era reflectido pelo que, nesta situação, o ensaio era classificado como “Não verifica”.



Tabela 6: Ensaio de verificação da resistência mecânica da fibra óptica

Abordagem	Tipo de fibra	Tipo de revestimento	Base do sensor	Modo de carregamento	Verificação
1º	Protegida	Fibra de carbono	Fibra de carbono	Macaco plano	Não verifica
2º	Protegida	Fibra de carbono	Macaco plano	Macaco plano	Não verifica
3º	Protegida	M.A.D	M.A.D	Actuador	Verifica
4º	Parcialmente protegida	M.A.D	M.A.D	Actuador	Não verifica
5º	Parcialmente protegida	M.A.D	Macaco plano	Actuador	Não verifica
6º	Parcialmente protegida	M.A.D + Cobertura de silicone no percurso da fibra	M.A.D	Leitura óptica da integridade da fibra	Não verifica
7º	Parcialmente protegida	Placas de aço	Placa de aço	Actuador	Não verifica

Os dados obtidos foram tratados no presente subcapítulo. No ponto seguinte realizou-se uma análise dos resultados recolhidos.

### 4.3. Discussão dos resultados

Foi objectivo da presente dissertação o desenvolvimento de um protocolo de ensaio que permitisse a utilização de sensores gravados em fibra óptica como medidores de deformações em pontos previamente escolhidos pelo utilizador sobre a superfície do macaco plano.

Numa primeira fase pretendeu-se neste subcapítulo uma análise das diferentes abordagens: descrição da solução, dificuldades registadas nos ensaios práticos e modos de rotura da fibra. Numa fase posterior realizou-se ensaios apenas com a fibra óptica no laboratório do DECivil-UA.

### 4.3.1. Discussão dos resultados das abordagens realizadas

As abordagens foram realizadas de forma a procurar uma abrangência suficiente de resultados para que se pudesse retirar conclusões válidas.

Na abordagem n.º1 a fixação dos sensores à base constituída por fibra de carbono fez-se por intermédio de uma cola tradicional de secagem rápida (ver Figura 37). Este método de fixação, apesar de ser comum em trabalhos de óptica, revelou-se ineficaz. A secagem rápida da cola implicou uma retracção muito elevada entre as superfícies em contacto. Constatou-se no local de contacto entre cola/fibra e carbono/fibra óptica a existência de uma zona plastificada, parcialmente rígida, que se revelou bastante sensível a tensões de corte. Como se verificou, o corte da fibra ocorreu maioritariamente nestes pontos. Na Figura 37 é apresentada a indicação do percurso da fibra a pontilhado branco e, por intermédio de uma seta colorida, a indicação de uma zona de fixação com cola de secagem rápida onde ocorreu a rotura.

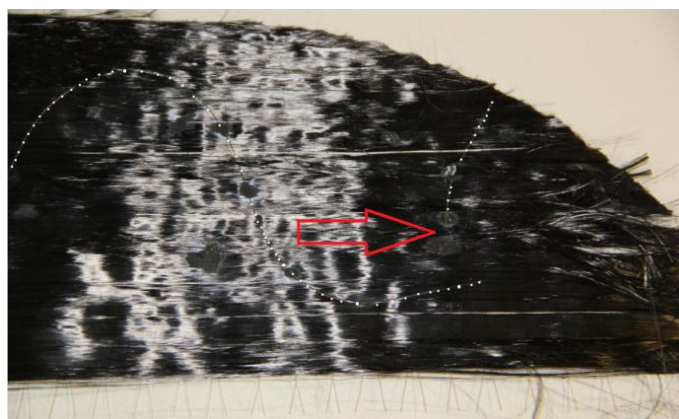


Figura 37: Indicação da posição da fibra óptica e local de rotura num ponto de fixação com cola de secagem rápida

De seguida protegeu-se a fibra com uma camada superior de fibra de carbono como é apresentado na Figura 38. A ideia seria constituir a primeira linha de protecção à sensibilidade dos sensores quando se introduzisse os macacos na parede e, principalmente, na sua extracção que, de forma geral, é difícil e fragilizadora.



Figura 38: Conjunto formado pelo macaco plano, fibra óptica e envolvente em fibra de carbono

Ao conjunto fibra óptica + fibra de carbono + macaco plano juntou-se uma capa em tela comum, construída com as dimensões e forma do macaco. Acrescentou-se umas pegas no mesmo material de forma a facilitar a extracção do macaco plano da parede. Esta tela exterior tinha como objectivo manter o conjunto descrito anteriormente unido (ver Figura 39).



Figura 39: Conjunto formado por macaco, envolvente dos sensores em fibra de carbono e capa exterior em tela comum

É ainda de referir que a fibra óptica da abordagem n.º 1 foi conectorizada com terminais apropriados. Foi instalada uma fonte emissora de potência de luz e um receptor no início e no final da fibra, respectivamente, para que, durante o ensaio, se conhecesse com exactidão o comportamento do cabo óptico. Apesar de a fibra estar intacta quando o

conjunto foi instalado na parede, assim que se iniciou a pressurização deixou-se de registar valores, o que significou rotura total ou parcial do cabo óptico.

Visto que a conectorização da fibra óptica é um processo laborioso, delicado, com equipamento sensível e realizado por técnicos especializados do I.T (Instituto de Telecomunicações) apenas se acompanhou o comportamento da fibra óptica na abordagem n.º 1 e na abordagem n.º 6, esta última por motivos que adiante se aprofundará. Mudou-se o sistema de fixação da fibra óptica passando da cola de secagem rápida para pequenos segmentos de fita isoladora.

Na abordagem n.º 2 optou-se por mudar a base maleável dos sensores, proporcionada pela fibra de carbono, para uma base sólida como é o metal constituinte do macaco plano. Não obstante, a fibra de carbono mantinha-se como primeiro elemento de protecção exterior da fibra. Esta solução revelou-se ineficaz e marcou o abandono definitivo da fibra de carbono como solução de base e de revestimento visto que a sua maleabilidade era comprometedora face à sensibilidade a tensões de corte da fibra.

As restantes abordagens, à excepção da n.º7, foram marcadas pela utilização de uma membrana de alta densidade (ver Figura 40) do tipo betuminosa, com cargas minerais, e revestida por um filme de polietileno de alta densidade.

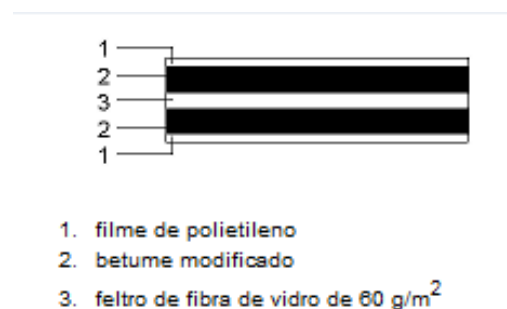


Figura 40: Membrana de alta densidade

A abordagem n.º3 demonstrou potencial, com uma base de M.A.D e com a fibra completamente protegida carregou-se o conjunto formado pelo macaco + M.A.D + fibra óptica com o auxílio do actuador do laboratório do DECivil-UA. Após carregamento

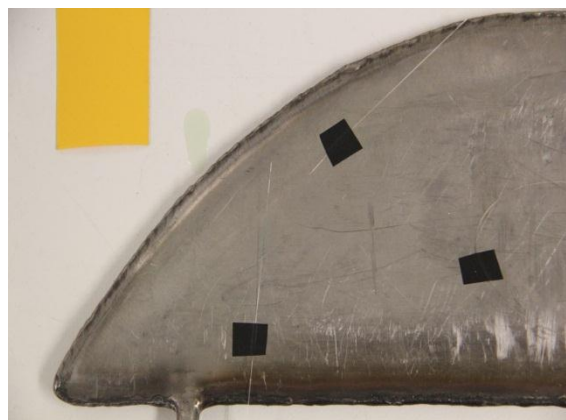
verificou-se que a fibra causava uma espécie de impressão no M.A.D sem no entanto ficar comprometida estruturalmente.

Ultrapassada a questão do suporte da fibra avançou-se para a fase seguinte (abordagens n.º4 e n.º5). A tecnologia actual de gravação de redes de Bragg em fibra óptica obriga a uma clivagem no segmento do cabo óptico onde se pretende o sensor. O diâmetro normal da fibra utilizada nos ensaios (FiberCore PS11250/1500) é de  $250 \mu\text{m}$ . Com a clivagem este valor é reduzido para metade ficando a fibra com um diâmetro de  $125 \mu\text{m}$ . Sem a protecção exterior o núcleo fica exposto e extremamente sensível à mínima tensão de corte aplicada.

A abordagem n.º4 e abordagem n.º5 são semelhantes variando apenas na base de apoio dos sensores à semelhança das abordagens n.º 1 e n.º 2. Conforme verificado nos ensaios, o local de rotura da fibra era sempre nos segmentos de clivagem (ver Figura 41).



a) Aspecto geral do conjunto ensaiado na abordagem n.º5



b) Pormenor de rotura da fibra na zona de clivagem

Figura 41: Abordagem n.º 5

As tensões de corte na zona de clivagem da fibra que provocavam a sua rotura levaram a uma solução que de algum modo distribuísse o carregamento sobre a fibra sem comprometer a sua capacidade de registar deformações. Com este objectivo decidiu-se aplicar, com todo o cuidado face à sensibilidade da fibra, uma camada de silicone sobre o cabo óptico. A Figura 42 ilustra o aspecto geral da abordagem n.º6.



a) Modelo de ensaio da abordagem n.º 6



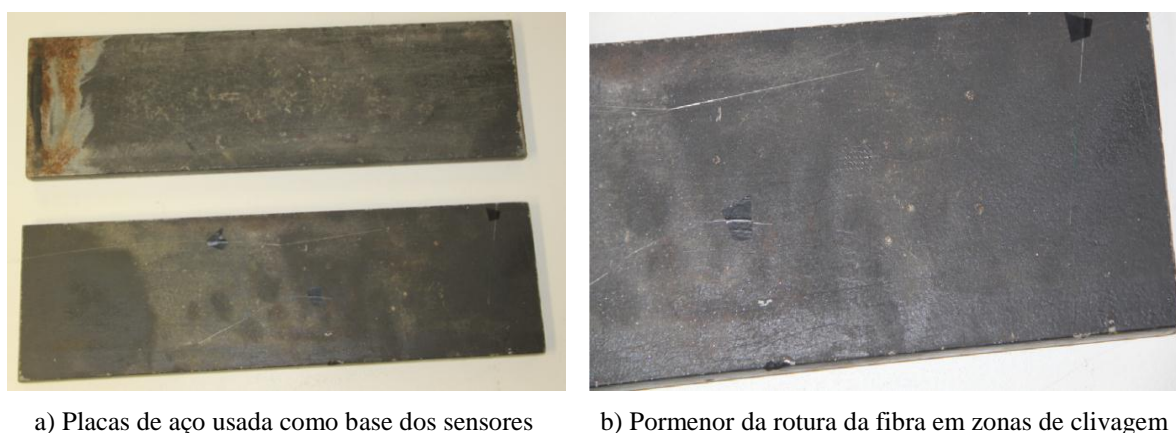
b) Pormenor da fibra embebida no silicone e com M.A.D como base

---

Figura 42: Abordagem n.º6

Como não era possível verificar se a integridade mecânica da fibra se mantinha ou não pós-ensaio, decidiu-se conectorizar as fibras e efectuar leituras de potência de luz numa fase pré-ensaio para confirmar o correcto funcionamento das mesmas. Após a conectorização, e ainda numa fase pré carregamento, não houve registo de qualquer sinal no receptor de comprimentos de onda pelo que o ensaio foi dado como terminado e classificado como “não verifica”.

Face à sistemática rotura da fibra nas zonas de clivagem, realizou-se um ensaio onde se pudesse tirar conclusões relativamente às acções de corte na fibra (Abordagem n.º7). Assim, de modo a evitar a rugosidade inerente à superfície de adobe e à possível acção de corte das chapas metálicas que são utilizadas nos ensaios de macacos planos (ver subcapítulo 2.5, Figura 8), optou-se por colocar fibra óptica parcialmente protegida numa envolvente constituída por duas chapas de aço rectangulares (20 mm de espessura), com superfícies solidárias, lisas e infinitamente rígidas tendo em conta os níveis de carregamento que se propuseram atingir (ver Figura 43).



a) Placas de aço usada como base dos sensores

b) Pormenor da rotura da fibra em zonas de clivagem

Figura 43: Abordagem n.º7

Após o ensaio verificou-se que, mesmo para níveis de tensão baixos, a integridade mecânica da fibra era comprometida e o ensaio foi classificado como “Não verifica”.

#### 4.3.2. Ensaios realizados apenas com fibra óptica

Após os ensaios descritos no subcapítulo 4.2 optou-se por realizar testes de compressão simples em vários tipos de fibra óptica. Para isso recorreu-se à Máquina de Ensaio Universal do laboratório do DECivil- UA. Foram ensaiados os dois tipos de fibra óptica utilizada nos ensaios descritos no subcapítulo 4.2.2: fibra óptica protegida e fibra óptica não protegida. O protocolo de ensaio foi semelhante nos dois tipos de fibras e consistiu em conectorizar as extremidades da fibra a testar. Adaptou-se o equipamento necessário para a medição de potência de luz: instalação de um fotoemissor (modelo EXFO AXS-100) que convertesse sinais eléctricos em sinais de luz para enviar pelo cabo óptico e o respectivo receptor que interpretasse estes sinais e assim se conseguisse verificar a funcionalidade da fibra enquanto decorria o teste. Esta era comprimida pelo actuador da Máquina Universal e quando se deixasse de registar valores no receptor de comprimentos de onda o ensaio era dado como finalizado. Na Figura 44 pode-se visualizar o esquema do ensaio realizado.

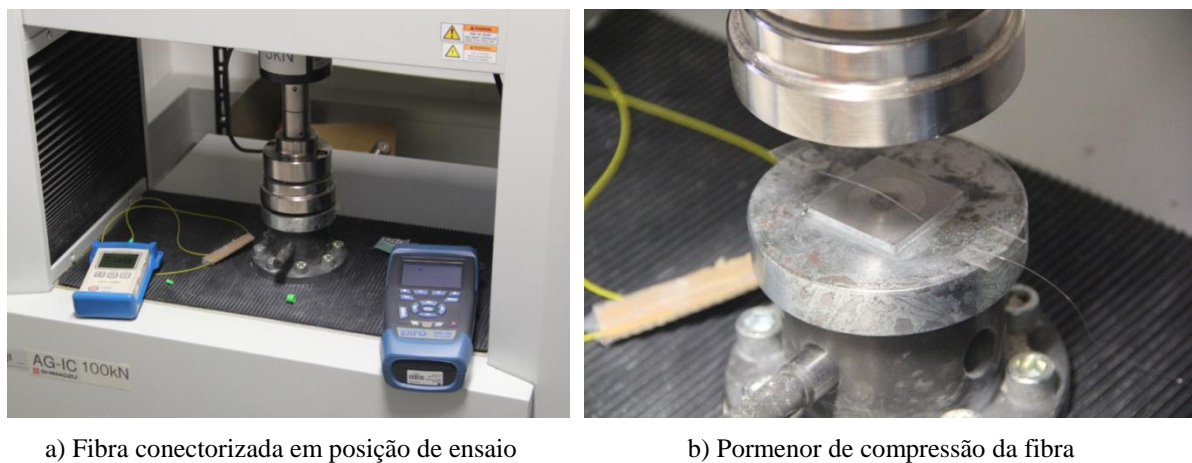


Figura 44: Esquema geral do ensaio de compressão das fibras

Com os dados fornecidos pela Máquina Universal de Ensaio construíram-se os gráficos de relação força-deslocamento da Figura 45. No entanto estes gráficos devem ser interpretados de forma crítica, tendo em conta que os deslocamentos observados nos gráficos não correspondem aos deslocamentos do corpo de prova, no caso, a fibra óptica.

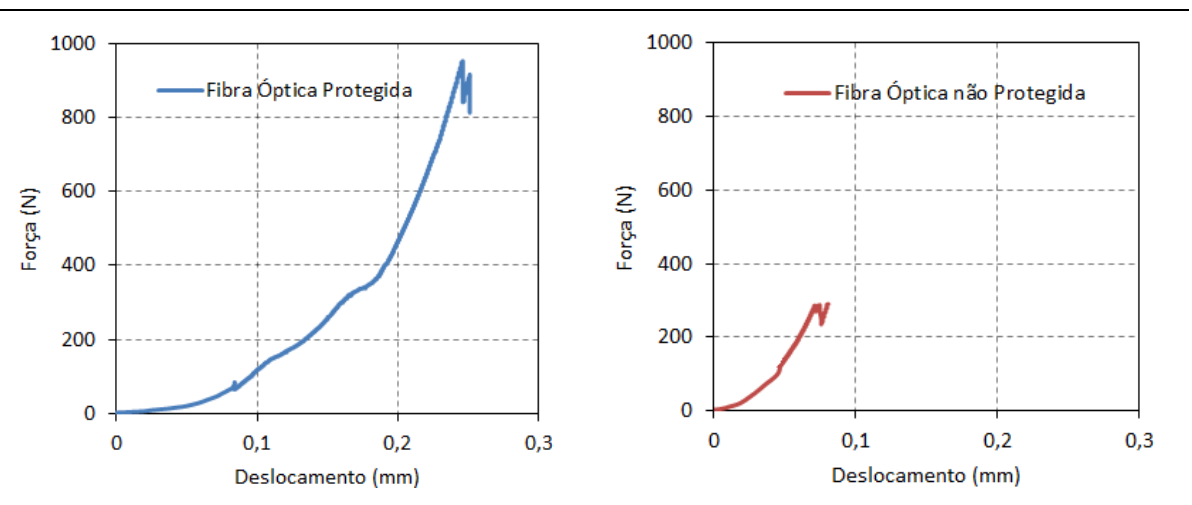


Figura 45: Relação força-deslocamento da fibra óptica

Verifica-se que a fibra óptica protegida tem um ponto de rotura quase três vezes superior ao ponto de rotura da fibra óptica não protegida. Para a fibra protegida a rotura aconteceu para uma força de 951N e para a fibra não protegida 290N.

Adicionalmente, foi testado um novo tipo de fibra óptica plástica cujas aplicações estão em desenvolvimento no IT- UA. Até à data, este tipo de fibra óptica plástica ainda



não é passível de ser conectorizada e conseqüentemente conseguir registrar-se comprimentos de onda. Este novo tipo de fibra diferencia-se da fibra óptica convencional pelo facto do núcleo do cabo óptico não ser em vidro mas em plástico, o que lhe confere grande flexibilidade. O protocolo de ensaio da fibra óptica plástica consistiu em colocar um segmento de cabo óptico plástico sobre compressão simples realizada por intermédio da Máquina Universal de Ensaio, os resultados obtidos são apresentados no gráfico da Figura 46.

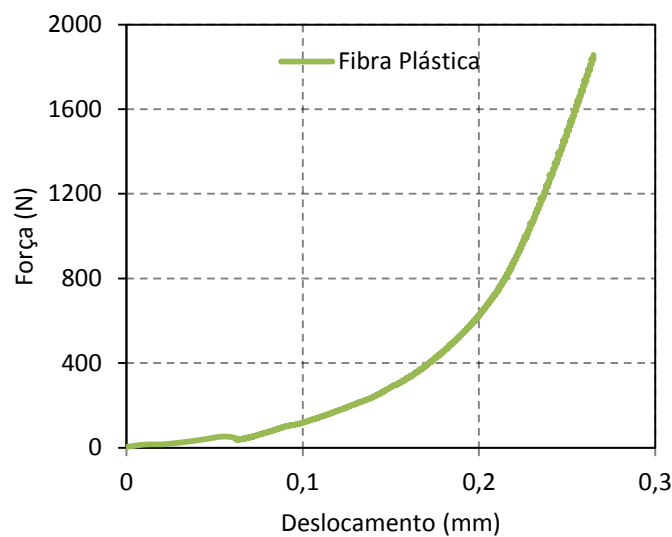
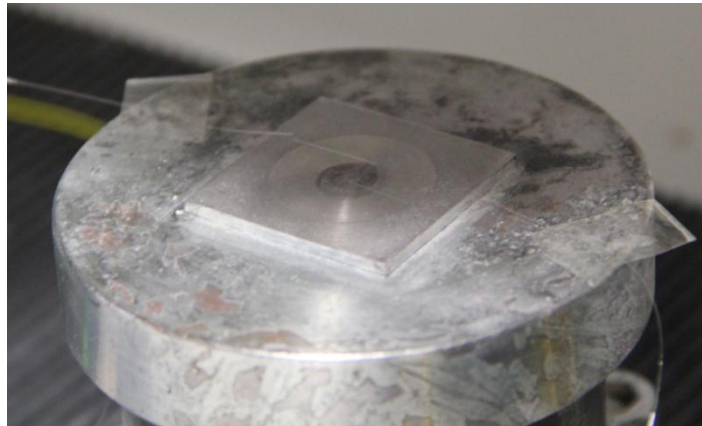


Figura 46: Relação força/deslocamento da fibra plástica

No ensaio da fibra plástica estabeleceu-se um primeiro nível de carregamento igual ao máximo que a fibra óptica protegida tinha suportado (950 N). Após uma inspeção visual à fibra e confirmar-se a integridade física da mesma optou-se por levar o carregamento até níveis mais elevados. O ensaio foi dado como terminado após se atingir valores superiores ao dobro do valor atingido pela fibra óptica não protegida, anteriormente ensaiada. Apesar de a fibra estar mecanicamente intacta não se conseguiu garantir que estivesse apta a transmitir dados de um ponto de vista óptico. A secção estava esmagada a meio do segmento óptico como se pode visualizar na Figura 47.



a) Fibra plástica fragilizada



b) Fibra óptica convencional

---

Figura 47: Condição mecânica das fibras ópticas após serem testadas

A manutenção da integridade mecânica da fibra óptica plástica numa fase pós-ensaio encoraja à utilização deste tipo de fibra em ensaios futuros de macacos planos.

## Capítulo 5

### Conclusões, comentários finais e perspectivas de trabalho futuro

---

---

## **Capítulo 5 Conclusões, comentários finais e perspectivas de trabalho futuro**

- 5.1. Síntese do trabalho realizado
  - 5.1.1. Breve descrição do trabalho realizado
  - 5.1.2. Avaliação de resultados
- 5.2. Conclusões principais
- 5.3. Comentários finais
- 5.4. Perspectivas de trabalho futuro

---

## **5. CONCLUSÕES, COMENTÁRIOS FINAIS E PERSPECTIVAS DE TRABALHO FUTURO**

### **5.1. Síntese do trabalho realizado**

#### **5.1.1. Breve descrição do trabalho realizado**

O trabalho desenvolvido na presente dissertação divide-se em dois grandes grupos. O primeiro, que compreende o Capítulo 3, apresenta os resultados experimentais sobre uma parede de alvenaria de adobe. Optou-se por ensaios em laboratório e não em construção já edificada por dois motivos principais:

- ❖ Maior controlo possível sobre quatro das variáveis que, no caso de construção já edificada, estavam sujeitas sempre a alguma ambiguidade e de quantificação relativa: caracterização mecânica da argamassa, caracterização mecânica e dimensões dos blocos de adobe, determinação do peso específico da alvenaria, valor e tipo de carregamento efectuado sobre a parede. As questões de confinamento lateral são importantes na medida em que influenciam os resultados obtidos
  
- ❖ Facilidade de realização dos ensaios sobre a parede.

Foram realizados dois conjuntos de ensaios na parede com a adaptação de uma rede de marcação no registo químico de um dos conjuntos, de modo a introduzir melhorias na impressão da área real carregada. Os ensaios foram realizados em condições idênticas, para que as diferenças verificadas nos resultados obtidos fossem, principalmente, devido à presença da rede de marcação.

A segunda parte da dissertação (Capítulo 4) apresenta os esforços desenvolvidos para a adaptação da tecnologia de fibra óptica, especificamente a capacidade de leitura de deformações das redes de Bragg para o ensaio de macacos planos, nomeadamente para a

quantificação precisa da área efectivamente carregada que constitui, actualmente, o maior factor de incerteza no que diz respeito a este tipo de ensaios. Deste modo, foram realizadas sete abordagens distintas onde variava ou a base sobre a qual os sensores eram fixos ou o tipo de protecção e ensaiou-se o conjunto para se retirar conclusões sobre a adaptabilidade das fibras ópticas às condições em que o ensaio ocorre.

### **5.1.2. Avaliação de resultados**

Foram estabelecidos quatro objectivos fundamentais a partir dos quais seria direccionado o esforço desenvolvido no presente documento: i) Construção de uma parede que permita a realização de dois conjuntos de ensaios de macacos planos (dois ensaios simples e dois ensaios duplos); ii) Desenvolver e aplicar melhorias no procedimento de ensaio de macacos planos com recurso a redes de marcação e assim imprimir melhorias no procedimento e protocolo de ensaio; iii) Realização de uma campanha experimental para a caracterização mecânica das alvenarias: resistência à compressão, deformabilidade, coeficiente de *Poisson* e módulo de elasticidade; iv) Desenvolvimento de estudos preliminares para avaliar a viabilidade da aplicação de sensores de fibra óptica no ensaio de macacos planos com o objectivo último de obter dados relativamente à área de carregamento.

Destes quatro objectivos iniciais pode-se destacar dois de maior importância:

- ❖ Análise e conclusão dos resultados que a adopção da rede de marcação introduziu no ensaio de macacos planos;
- ❖ Viabilidade da adaptação da fibra óptica correntemente utilizada em diferentes áreas científicas para o ensaio de macacos planos.

O presente documento foi desenvolvido com a preocupação sempre presente de quantificar com a maior precisão possível a área efectivamente carregada. A ideia de aplicar seis sensores na superfície dos macacos planos em pontos previamente escolhidos pelo utilizador pretendia ser um primeiro passo a partir do qual se desenvolveriam novas

soluções que levariam, em última análise, à construção de uma grelha composta por milhares de pontos sensíveis à pressão e onde as deformações pudessem ser quantificadas, relacionadas e, deste modo, determinar qual a área real que devia ser contabilizada para efeitos de cálculo da tensão instalada e de outros parâmetros que o ensaio pretende determinar.

Os resultados obtidos nos ensaios de adaptabilidade da fibra descritos no Capítulo 4, mostraram claramente que a actual tecnologia em fibra óptica não está preparada para os valores de carregamento que o ensaio de macacos planos atinge. Um sistema mais corrente, simples, pouco dispendioso e que através de uma pequena alteração no protocolo de ensaio consiga melhorias significativas nos resultados dos ensaios com macacos planos como são as redes de marcação é a curto-médio prazo uma solução exequível.

## **5.2. Conclusões principais**

Após os procedimentos adoptados e descritos ao longo da presente dissertação, apresenta-se como principais conclusões:

- ❖ As fibras ópticas comuns, designadas tecnicamente por *FiberCore PS11250/1500*, apesar de possuírem a capacidade de registar deformações, não estão preparadas para os níveis de carregamento a que são sujeitas nos ensaios de macacos planos. Apesar da fibra óptica protegida constituir um elemento mecanicamente mais estável do que a fibra clivada. A redução do diâmetro da fibra, obrigatória devido à gravação dos sensores, revelou-se comprometedor para o ensaio. Verificou-se, em vários testes realizados, que o núcleo de vidro da fibra exposto, não resiste às tensões de corte que lhe são impostas pela pressurização dos macacos contra a parede.
  
- ❖ A nova geração de fibras ópticas construídas num tipo de fibra cujo núcleo é constituído por materiais poliméricos em vez de fibra de vidro revelou, nos testes de compressão realizados no subcapítulo 4.3.2, resultados promissores e incentiva à utilização deste tipo de fibra, no ensaio de macacos planos,

assim que o procedimento de conectorização das fibras com o *software* que interpreta os comprimentos de onda, esteja vulgarizado.

- ❖ A introdução de uma rede de marcação conduziu, em condições idênticas de ensaio, a uma aproximação dos resultados obtidos experimentalmente para aqueles estimados pela via de cálculo sugerida pelo Eurocódigo 6[CEN, 2005]. Apesar de diferenças consideráveis verificou-se um desvio no cálculo da tensão instalada de 27,27% no ensaio simples com rede contra 37,00% de desvio no ensaio simples normal. Em termos de resistência à compressão, constatou-se uma diferença significativa nos resultados tendo em conta os valores estimados pelo EC6 são referentes ao módulo de elasticidade na rotura o que não foi o caso dos ensaios realizados na presente dissertação, pelo que as comparações dos módulos de elasticidade obtidos devem ser conservativas.

### 5.3. Comentários finais

Como comentários finais é de referir os seguintes pontos:

- ❖ Os resultados obtidos poderiam ser melhor fundamentados com a realização de um maior número de ensaios tanto simples como duplos, de modo a ser efectuado um tratamento estatístico dos resultados obtidos e confirmar a melhoria imposta pela adaptação da rede de marcação nos ensaios de macacos planos.
- ❖ Complementarmente ao trabalho realizado, poderia ter sido efectuado um estudo da influência do  $K_a$  se tivessem sido realizados mais ensaios. Conhecendo todas as variáveis da equação que permite determinar a tensão instalada (Eq.1) calculando a tensão por cálculo expedito ou através do ensaio simples, é possível isolar a variável  $K_a$  e estudar a variação que este coeficiente sofre e como afecta os resultados finais.



## 5.4. Perspectivas de trabalho futuro

A necessidade de se conhecer a área efectivamente carregada como factor de precisão dos resultados fornecidos pelo ensaio de macacos planos era já conhecida e discutida em estudos anteriores por diferentes autores [Vicente, 2008; Rufo, 2010].

A realização deste trabalho teve sempre como ponto de partida o desenvolvimento de soluções, seja a nível mais avançado com a adaptação da tecnologia de fibra óptica, seja com soluções mais correntes como redes de marcação, que permitissem conhecer a área real de carregamento. Não obstante, a fraca adaptabilidade das fibras ópticas de vidro convencionais para os condicionalismos dos ensaios de macacos planos não deve constituir obstáculo para o desenvolvimento tecnológico que invariavelmente este tipo de ensaios terá que sofrer.

Como ficou apresentado no Capítulo 4, as fibras ópticas plásticas apresentam-se como uma alternativa possível à utilização das fibras ópticas de vidro convencionais. Trabalhos futuros nesta área poderão passar por estabelecer um protocolo de ensaio onde será gravado o maior número possível de sensores de fibra óptica sobre a superfície do macaco.

Este tipo de procedimentos, num curto espaço de tempo será interessante realizar segundo um ponto de vista meramente académico, visto que os equipamentos de conectorização, emendas e solidarização entre fibras são tecnologicamente avançados, delicados, dispendiosos e exigem mão-de-obra tecnicamente qualificada para a sua operação. Deste modo, em ambientes agressivos e por vezes pouco práticos, como são os locais de construção não é de esperar que a utilização deste tipo de tecnologia compense os custos materiais e humanos da realização do ensaio ou traga benefícios adicionais em relação a outros ensaios do mesmo género.

Actualmente, existem no mercado, soluções tecnologicamente avançadas, com processos de funcionamento estáveis, resultados comprovados, de fácil manuseamento e interpretação de dados fiável. De referir o sistema *TACTILUS*<sup>®</sup> da empresa norte-americana “Sensor Products Inc”, líder mundial em superfícies tácteis sensíveis a pressão e

sensores de força. A tecnologia permite ao utilizador capturar e gravar condições de pressão ocorridas entre duas superfícies em tempo real. Os dados registados pela membrana *Tactilus* são então interpretados pelo algoritmo do programa que, segundo informações da empresa, distingue eficientemente condições de pressão de outro tipo de interferências cuja quantificação não é relevante para o utilizador, e apresentados graficamente em qualquer ecrã de computador (ver Figura 48).

Este tipo de membranas é desenvolvido à base de nano materiais onde especificamente nano polímeros são utilizados para obter superfícies de mapeamento de pressão. A empresa afirma que a introdução destes materiais permite obter melhor resistência à temperatura e maior precisão dos resultados obtidos.

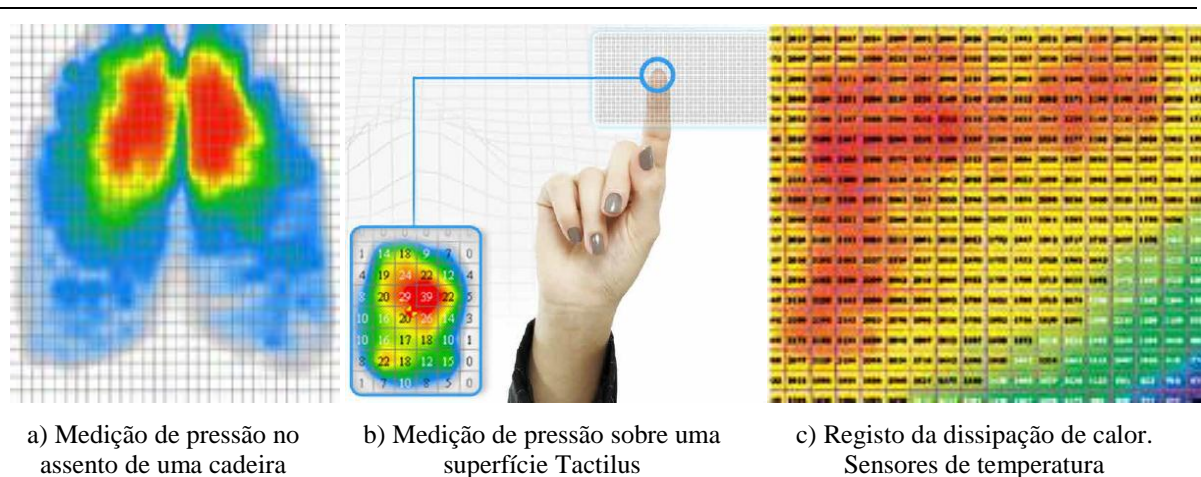


Figura 48: Diferentes aplicações do sistema Tactilus [Imagens de [www.sensorprod.com](http://www.sensorprod.com)]

Entre as especificações técnicas fornecidas pela empresa, de salientar a espessura reduzida da membrana (0,3 mm); a área de mapeamento possível numa única unidade (0,40 mm<sup>2</sup> a 12,25 cm<sup>2</sup>) e a precisão dos resultados obtidos ( $\pm 10\%$ ). No campo da engenharia civil em geral e no ensaio de macacos planos em particular a pouca resistência da membrana face a pressões mais elevadas é um aspecto negativo (limite de registo até 1,38 MPa) e muito condicionador da aplicabilidade desta tecnologia para as áreas abordadas nesta dissertação.

O desenvolvimento de novos materiais cuja resistência a pressões seja mais alargado posiciona-se como o futuro provável das adaptações dos ensaios de macacos planos no geral e na determinação das áreas efectivamente carregadas em particular.



## **Referências bibliográficas**

---



- Abdunur. (1983). *Stress and deformability in concret and masonry*. Paper presented at the IABSE Symposium on Strengthening of Building Structures, Venice, Italy.
- Alberto, N. J. (2011). *Sensores de Bragg para bioaplicações*. Doutorado, Universidade de Aveiro, Aveiro.
- ASTM. (1991a). American Society for Testing and Materials *In-Situ compressive stress within solid unit masonry estimated using flat-jack measurements* USA.
- ASTM. (1991b). American Society for Testing and Materials *In-Situ measurement of masonry deformability properties using flat-jack method*. USA.
- CEN. (2005). Eurocode 6 - Design of masonry structures - Part 1-1: General rules for reinforced and unreinforced masonry structures.
- Estatística, I. N. d. (2011). *Construção e Reabilitação*.
- Finanças, M. d. (2012). *Orçamento do Estado*.
- Gregorczyk, P., & Lourenço, P. (2000). A Review on Flat-Jack Testing Universidade do Minho.
- L.Binda, & Tiraboschi, C. (1999). Flat-jack test: a slightly destructive technique for the diagnosis of brick and stone masonry structures.
- LNEC. (1970). An improved method and apparatus for testing stresses in soil. Portugal: LNEC.
- LUM.D.3, R. (1990). Reunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux, Systèmes de Construction et ouvrages *In-Situ strenght/elasticity test on masonry based on the flat jack*.

- Miranda, L. F. B. (2011). *Ensaaios Acusticos e de macacos planos em alvenarias resistentes.*, Universidade do Porto, Porto.
- Noland, J. L., Atkinson, R. H., & Schuller, M. P. (1990). *A review of the flat-jack method for nondestructive evaluation.* Paper presented at the Nondestructive evaluation of civil structures and materials, USA.
- Othonos, A., & Kalli, K. (1999). *Fiber Bragg gratings - Fundamentals and applications in telecommunications and sensing.*
- Pinto, L. (2010). Mercado de reabilitação em Portugal vale 200 mil milhões de euros.
- Qinglin, W., & Xiuyi, W. (1988). *The evaluation of compressive strenght of bric masonry in-situ* Paper presented at the 8th International Brick/Block Masonary Conference, Dublin, Ireland.
- RILEM, L. D. (1990). Reunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux, Systèmes de Construction et ouvrages *In-situ stress tests on masonry based on the flat jack.*
- Rufo, R. J. G. (2010). *Ensaaios de caracterização mecânica das alvenarias de adobe: Flat-jack testing.* Mestrado, Universidade de Aveiro, Aveiro.
- Varum, H., Costa, A., Pereira, H., Almeida, J., & Rodrigues, H. (2008). *Associação Portuguesa de Análise Experimental de Tensões.*
- Vicente, R., Silva, J. A. R. M. d., Varum, H., Rodrigues, H., & Júlio, E. (2007). *Caracterização mecânica de paredes de alvenaria em construções antigas - ensaios com macacos planos.* Paper presented at the Congresso Construção 2007, Coimbra.



Vicente, R. d. S. (2008). *Estratégias e metodologias para intervenções de reabilitação urbana. Avaliação da vulnerabilidade e do risco sísmico do edificado da Baixa de Coimbra*. Doutoramento, Universidade de Aveiro, Aveiro.





**Anexos**

---



---

Número Bloco de Adobe	Peso (Kg)
1	19.42
2	19.32
3	20.00
4	20.72
5	7.78
6	6.66
7	19.98
8	22.42
9	20.32
10	20.74
11	19.70
12	20.24
13	21.82
14	20.48
15	7.62
16	8.90
17	20.70
18	15.72
19	20.02
20	20.06
21	20.14
22	20.44
23	21.56
24	20.50
25	10.26
26	9.08
27	21.44
28	20.86
29	19.14
30	19.22
31	19.78
32	20.42
33	20.72
34	20.58
35	7.50
36	9.24
37	20.80
38	20.50
39	20.56
40	21.08

---

Peso blocos adobe = 716,44 Kg

Volume da parede =  $2 \times 0,20 \times 1,20 = 0,48 \text{ m}^3$

Peso específico blocos adobe =  $13,56 \text{ kN/m}^3$

Peso específica argamassa de cimento =  $21 \text{ kN/m}^3$

Estimativa volume de cimento utilizado =  $0,096 \text{ m}^3$