

2014

Instituto Politécnico de Coimbra

INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE COIMBRA

Aspectos Tecnológicos Relativos a Ensaio de Vidro

MESTRADO EM EQUIPAMENTOS E SISTEMAS MECÂNICOS

AUTOR | Rui Jorge de Melo Ferreira

ORIENTADORES | Prof. Doutor Luis Borrego
| Prof. Doutora Sandra Jordão

Coimbra, dezembro 2014

Título da Dissertação

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em
Equipamentos e Sistemas Mecânicos

Autor

Rui Jorge de Melo Ferreira

Orientadores

Prof. Dr. Luis Borrego

ISEC

Prof. Dra. Sandra Jordão

FCTUC

AGRADECIMENTOS

Durante a realização deste projecto foram recebidos vários apoios directos e indirectos de muitas pessoas. Gostaria de manifestar o meu mais sincero agradecimento a todas essas pessoas que contribuíram para que este trabalho fosse possível.

Aos Dr. Luis Borrego, Dra. Sandra Jordão e Mestre Marco Pinho, tenho de agradecer as ideias, o incentivo e o apoio constante, além da disponibilidade e paciência demonstrada durante a escrita e revisão deste trabalho.

A todos os meus amigos e colegas de trabalho, pelas horas que passamos juntos e pela paciência de me aturarem.

À minha namorada pelo apoio e compreensão.

Por último, gostaria de dedicar este trabalho aos meus pais.

RESUMO

Recentemente têm-se vindo a notar uma crescente utilização do vidro em edifícios motivada pelas actuais tendências arquitectónicas. Se no passado o vidro era visto como um elemento com funções não estruturais, hoje com a investigação científica em curso e com as novas técnicas de produção e tratamento final do vidro, é possível oferecer um vidro com funções portantes à mercê da imaginação dos arquitectos.

Este trabalho está integrado num projecto de investigação em desenvolvimento no Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, denominado *S-Glass – Desempenho Estrutural e Regras de Projecto de Vigas de Vidro Reforçadas Externamente*, cujo objectivo é dar um contributo para o desenvolvimento de normas europeias para vidro estrutural. O projecto S-Glass centrar-se-á no efeito da temperatura e de acções cíclicas, com e sem a inclusão de pré-esforço em elementos de vidro laminado, para tal serão realizados diversos ensaios que terão de simular com a máxima precisão as situações reais tais como temperaturas altas e sismos que têm forte probabilidade de ocorrerem nos países do sul da Europa.

Este trabalho tem o objectivo de proporcionar todas as condições técnicas para que os ensaios sejam feitos com o máximo rigor, garantindo que todos os ensaios sejam considerados validos. Tal como quaisquer outros ensaios científicos, o equipamento utilizado é partilhado por diversos projectos assim como qualquer um que seja necessário adquirir tenha preços elevados, por isso é proposto algumas alternativas económicas e transmitido conhecimento para a manufactura e parametrização de alguns equipamentos de medição.

Em cada serie haverá sempre um ensaio piloto para analisar possíveis melhorias a introduzir no layout, assim neste trabalho também serão propostas algumas técnicas de análise assim como a solução para possíveis problemas.

PALAVRAS - CHAVE

Vidro estrutural, ensaios em vidro, fotogrametria, P.I.D., construção de células de carga.

ABSTRACT

Recently have been coming to notice an increasing use of glass in buildings motivated by current architectural trends. If in the past the glass was seen as an element with no structural functions, now scientific research in progress and new techniques of production and final treatment of the glass, it is possible to offer a glass with load bearing functions at the mercy of the imagination of architects.

This work is part of a developing research project at the Department of Civil Engineering, University of Coimbra, called *S-Glass - Structural Performance and Design Rules of Glass Beams Externally Reinforced*, whose aim is to contribute to the development of European standards for structural glass. The S-Glass project will focus on the effect of temperature and cyclical actions, with and without the inclusion of pre-stress cables in laminated glass elements, for that, will be performed several tests that will simulate with maximum precision situations real such as high temperatures and earthquakes that have strong probability of occur in the southern European countries.

This work aims to provide all the technical requirements for the tests are made with the utmost rigor, ensuring that all the tests are considered valid. Like any other scientific tests, the equipment used is shared by many projects as well as anyone having to acquire them high prices, so it is proposed some economic alternatives and transmitted knowledge for the manufacture and parameterization of some measuring equipment.

In each series there will always be a pilot study to examine possible improvements to the layout, so this work also will be offered some analysis techniques as well as the solution to potential problems.

KEYWORDS

Structural glass, test of glass, photogrammetry, P.I.D., load cell construction.

ÍNDICE

| | |
|--|------|
| AGRADECIMENTOS..... | i |
| RESUMO | ii |
| PALAVRAS - CHAVE..... | ii |
| ABSTRACT | iii |
| KEYWORDS | iii |
| ÍNDICE..... | iv |
| ÍNDICE DE FIGURAS | viii |
| ÍNDICE DE TABELAS | xii |
| ABREVIATURAS..... | xiii |
| SIMBOLOGIA..... | xiv |
| 1. INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1. Motivação | 1 |
| 1.2. Objectivos | 1 |
| 1.3. Estrutura da dissertação | 2 |
| 2. O VIDRO | 3 |
| 2.1. Enquadramento Geral..... | 3 |
| 2.2. Fabrico de vidro | 4 |
| 2.3. Propriedades do vidro..... | 4 |
| 2.4. Técnicas de reforço do vidro..... | 6 |
| 2.4.1. Vidro temperado..... | 6 |
| 2.4.2. Vidro termo-endurecido | 7 |
| 2.4.3. Vidro laminado..... | 8 |
| 3. EQUIPAMENTOS UTILIZADOS | 9 |
| 3.1. Actuador Hidráulico | 9 |
| 3.2. Extensómetros | 14 |
| 3.2.1. Selecção de extensómetros a utilizar em vidro | 15 |
| 3.2.2. Procedimentos para instalação de extensómetros em vidro. | 16 |
| 3.3. Projecto de célula de carga..... | 18 |
| 3.3.1. Construção de uma célula de carga | 20 |

| | |
|---|----|
| 3.4. Termopares | 22 |
| 3.4.1. Preparação dos termopares..... | 23 |
| 3.4.2. Instalação dos termopares no vidro | 24 |
| 3.5. Fotogrametria | 25 |
| 3.5.1. Desenvolvimento de uma aplicação para fotogrametria..... | 25 |
| 3.5.2. Aplicação da aplicação de fotogrametria a um ensaio com provete de vidro laminado. | 28 |
| 4. PARAMETRIZAÇÃO | 31 |
| 4.1. Controlo PID (Proporcional, Integral e Derivativo) | 31 |
| 4.2. Teoria de controlo básico PID | 31 |
| 4.2.1. Controlo on - off..... | 32 |
| 4.2.2. Controlo tipo P (Proporcional) | 32 |
| 4.2.3. Controlo PI (Proporcional Integrativo)..... | 33 |
| 4.2.4. Controlo PD (Proporcional Derivativo) | 33 |
| 4.2.5. Controlo PID (Proporcional Integral Derivativo) | 34 |
| 4.3. Sintonia do controle PID | 34 |
| 4.3.1. 1º Método de Ziegler e Nichols | 34 |
| 4.3.2. 2º Método de Ziegler e Nichols | 35 |
| 4.4. Fundos de escala, gráficos, tempo de amostragem e zero válvula..... | 38 |
| 4.5. Calibração | 39 |
| 5. PREPARAÇÃO DOS ENSAIOS..... | 41 |
| 5.1. Layout de Ensaios..... | 41 |
| 5.1.1. Layout do Ensaio para Cargas Monotónicas | 41 |
| 5.1.2. Layout de Ensaio para Cargas Cíclicas..... | 42 |
| 5.1.3. Layout de Ensaio para Cargas Térmicas | 43 |
| 5.2. Testes de ensaio a isolamento/refrigeração térmica para células de carga | 46 |
| 5.2.1. Sistema de Refrigeração a Água | 47 |
| 5.3. Ensaio Térmico a provete com SentryGlass | 48 |
| 5.4. Testes de Ensaio à câmara Climática | 50 |
| 5.4.1. Ensaio para estabilização da temperatura a 50°C na câmara térmica (1º Teste) | 50 |
| 5.4.2. Ensaio para estabilização da temperatura a 80°C e teste de arrefecimento de células de carga. (2º Teste) | 51 |

| | |
|--|-----|
| 5.4.3. 3º Teste térmico | 56 |
| 5.4.4. 4º e 5º Testes térmicos | 57 |
| 5.4.5. 57 | |
| 5.4.6. 6º Teste térmico | 58 |
| 5.4.7. 7º e 8º Teste térmico | 59 |
| 5.4.8. 9º ao 13º Teste térmico | 60 |
| 5.4.9. 14º Teste térmico | 62 |
| 6. CARACTERIZAÇÃO REOLÓGICA DO VIDRO | 67 |
| 6.1. Ensaio 4PB a provetes de vidro não laminados..... | 67 |
| 6.2. Optimização do layout do ensaio..... | 68 |
| 6.3. Características do material e equipamento utilizado | 71 |
| 6.4. Resultados dos ensaios | 72 |
| 6.5. Conclusões retiradas dos ensaios de caracterização | 74 |
| 7. ENSAIOS EXPERIMENTAIS | 75 |
| 7.1. Ensaio monotónico à temperatura ambiente..... | 75 |
| 7.1.1. Geometria e instrumentação..... | 76 |
| 7.1.2. Análise do ensaio..... | 78 |
| 7.1.3. Optimização do layout | 82 |
| 7.2. Ensaio monotónico à temperatura ambiente com cabos de pré-esforço | 82 |
| 7.2.1. O sistema de pré-esforço | 82 |
| 7.2.2. Geometria e instrumentação..... | 85 |
| 7.2.3. Análise do ensaio | 88 |
| 7.2.4. Optimização do layout | 90 |
| 7.3. Ensaio cíclico à temperatura ambiente..... | 90 |
| 7.3.1. Geometria e instrumentação..... | 91 |
| 7.3.2. Análise do ensaio | 94 |
| 7.3.3. Optimização do layout | 96 |
| 7.4. Ensaio térmico monotónico a 70º C | 97 |
| 7.4.1. Geometria e instrumentação..... | 97 |
| 7.4.2. Análise do ensaio | 101 |

| | |
|---|-----|
| 7.4.3. Optimização do layout | 101 |
| 8. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS..... | 103 |
| 8.1. Conclusões | 103 |
| 8.2. Desenvolvimentos futuros | 104 |
| BIBLIOGRAFIA | 105 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Fig. 1 – Comparação de aço e vidro no gráfico Tensão - Deformação (Henriques, 2010). | 3 |
| Fig. 2 - Processo de fabrico do vidro (www.cebrace.com.br)..... | 4 |
| Fig. 3 – Princípio da têmpera do vidro. (Henriques, 2010)..... | 7 |
| Fig. 4 – Actuador hidráulico de 200kN..... | 9 |
| Fig. 5 – Esquematização de exemplo de prensa hidráulica. | 9 |
| Fig. 6 - Servo-valvula <i>MOOG</i> | 10 |
| Fig. 7 – LVDT <i>HBM</i> | 11 |
| Fig. 8 – Defletómetro SDP-200 <i>TML</i> | 11 |
| Fig. 9 - Esquema básico de um LVDT. | 12 |
| Fig. 10 - Unidade hidráulica utilizada nos ensaios..... | 13 |
| Fig. 11 - Consola de controlo do actuador..... | 13 |
| Fig. 12 - Curva tensão – deformação..... | 14 |
| Fig. 13 – Extensómetro posicionado..... | 17 |
| Fig. 14 – Procedimento de colagem do extensómetro..... | 17 |
| Fig. 15 – Estanhagem e ligação dos extensómetros. | 17 |
| Fig. 16 – Instalação completa do extensómetro..... | 18 |
| Fig. 17 - Ponte de <i>Wheatstone</i> com 4 extensómetros. | 19 |
| Fig. 18 - Posicionamento dos extensómetros numa célula de carga(Roseiro, 2013)..... | 19 |
| Fig. 19 - Material utilizado na construção da célula de carga. | 20 |
| Fig. 20 - Pormenor do corpo da célula de carga..... | 21 |
| Fig. 21 - Células de carga finalizadas..... | 22 |
| Fig. 22 - Esquema de um termopar. | 22 |
| Fig. 23 - Estanhagem da junção de medição. | 24 |
| Fig. 24 - Soldadura por arco eléctrico..... | 24 |
| Fig. 25 – Termopares aplicados no vidro e respectivos adesivos. (Rolo, 2013) | 25 |
| Fig. 26 -Aplicação em <i>Matlab</i> para medição de deslocamentos..... | 26 |
| Fig. 27 - Material utilizado para aquisição de imagens digitais..... | 26 |
| Fig. 28 - Calibração da mira. | 27 |
| Fig. 29 - Quadro de resultados do teste. | 27 |
| Fig. 30 - Aquisição de imagens e respectivas miras..... | 28 |
| Fig. 31 - Divisão da imagem em diversas frames..... | 29 |
| Fig. 32 - Controlo tipo on – off.(Saber, 2013) | 32 |
| Fig. 33 - Efeito de redução PB no comportamento de PV. (Novus, 2003)..... | 32 |
| Fig. 34 - Efeito da inclusão do controlo Integral – PI. (Novus, 2003)..... | 33 |
| Fig. 35 - Comparação de um controle P com um controle PD. (Novus, 2003) | 33 |
| Fig. 36 - Resposta de um processo a uma excitação em degrau unitário. (Ogata, 1993) | 34 |
| Fig. 37 - Curva de resposta em forma de s. (Ogata, 1993) | 34 |

| | |
|---|----|
| Fig. 38 - Oscilação com período P_{cr} . (Ogata, 1993)..... | 35 |
| Fig. 39 - Quadro de configuração do PID. | 36 |
| Fig. 40 – Resposta do actuador antes do controlo PID optimizado..... | 37 |
| Fig. 41 - Resposta do actuador depois do controlo PID optimizado..... | 37 |
| Fig. 42 - Quadro de configuração do gráfico e do tempo de amostragem. | 38 |
| Fig. 43 - Quadro de configuração do zero da servo-valvula. | 38 |
| Fig. 44 - Calibração de defletómetros e célula de carga..... | 39 |
| Fig. 45 – Gráfico de comparação entre células de carga. | 40 |
| Fig. 46 - Layout do ensaio para cargas monotónicas..... | 42 |
| Fig. 47 - Layout do ensaio para cargas ciclicas..... | 42 |
| Fig. 48 - Layout do ensaio para cargas térmicas..... | 43 |
| Fig. 49 - Pormenores de construção da câmara térmica. | 43 |
| Fig. 50 - Caixa inferior da câmara térmica. | 44 |
| Fig. 51 - Dimensões da câmara térmica..... | 44 |
| Fig. 52 - Sistema de circulação e aquecimento do ar. | 45 |
| Fig. 53 – Pormenor do interior do forno..... | 45 |
| Fig. 54 - Preparação da caixa de isolamento para célula de carga. | 46 |
| Fig. 55 - Temperaturas do teste ao sistema de isolamento com lâ-de-rocha. | 46 |
| Fig. 56 - Sistema de arrefecimento a água para a célula de carga. | 47 |
| Fig. 57 - Temperaturas do teste ao sistema de refrigeração com serpentina..... | 47 |
| Fig. 58 - Amostra de vidro laminado com termopares no interior e exterior. | 48 |
| Fig. 59 - Interior do forno..... | 49 |
| Fig. 60 - Variação da temperatura na superfície do vidro e no interior do SentryGlass. | 49 |
| Fig. 61 - Localização e indicação dos termopares dentro da câmara para o teste a 50°C. | 50 |
| Fig. 62 - Temperaturas do teste à câmara climática a 50°C. | 51 |
| Fig. 63 - Preparação do sistema de refrigeração e termopar para as células de carga..... | 52 |
| Fig. 64 - Localização da instrumentação na câmara térmica para o teste a 80°C. | 53 |
| Fig. 65 - Foto do sistema para refrigerar e isolar as células de carga..... | 53 |
| Fig. 66 - Temperaturas medidas pelos termopares tipo K. | 54 |
| Fig. 67 - Temperaturas medidas pelos termopares de vareta..... | 54 |
| Fig. 68 - Equipamento para circulação de água na refrigeração das células de carga. | 55 |
| Fig. 69 - Temperaturas no interior da câmara e das células de carga..... | 55 |
| Fig. 70 – Esquematização da posição de leitura com termopares. | 56 |
| Fig. 71 – Câmara climática com entrada de ar na vertical..... | 56 |
| Fig. 72 - Evolução da temperatura nos termopares. | 57 |
| Fig. 74 - Difusor..... | 58 |
| Fig. 75 - Esquematização do difusor..... | 58 |
| Fig. 76 – Esquematização da posição das ventoinhas. | 59 |
| Fig. 77 - Representação tridimensional da posição das ventoinhas..... | 59 |

| | |
|---|----|
| Fig. 78 - Representação tridimensional da posição dos termopares. | 60 |
| Fig. 79 - Esquema de tubagens da câmara térmica (2 entradas, 1 saída) | 61 |
| Fig. 80 – Difusor com registo para afinação de caudal. | 61 |
| Fig. 81 - Provete de vidro laminado com SentryGlass instrumentado com termopares | 62 |
| Fig. 82 - Posição dos termopares de ambas as superfícies da viga de vidro. | 63 |
| Fig. 83 - Evolução da temperatura dos termopares na superfície de trás da viga de vidro. | 63 |
| Fig. 84 - Evolução da temperatura dos termopares na superfície da frente da viga de vidro. | 64 |
| Fig. 85 Evolução da temperatura no ar da câmara térmica e do forno..... | 64 |
| Fig. 86 - Comparação das temperaturas no interior da película e na superfície do vidro. | 65 |
| Fig. 87 – Esquema para ensaio 4PB segundo EN 1288-3:2000..... | 67 |
| Fig. 88 - Representação esquemática do ensaio. | 68 |
| Fig. 89 - Representação esquemática da instrumentação..... | 68 |
| Fig. 90 - Provete instrumentado. | 68 |
| Fig. 91 - Layout do ensaio com borrachas intercalares. | 69 |
| Fig. 92 - Ensaio de caracterização da borracha. | 69 |
| Fig. 93 - Padrões de ruptura dos diferentes provetes. | 70 |
| Fig. 94 - 1º layout de teste de caracterização do vidro. | 70 |
| Fig. 95 - 2º layout de teste de caracterização do vidro. | 71 |
| Fig. 96 - 3º layout de teste de caracterização do vidro. | 71 |
| Fig. 97 - Máquina universal <i>Servosys</i> 60 ton..... | 72 |
| Fig. 98 - Resultados do ensaio com o 1º layout de teste..... | 72 |
| Fig. 99 - Resultados do ensaio com o 3º e ultimo layout de teste. | 73 |
| Fig. 100 - Imagem da viga antes do ensaio..... | 75 |
| Fig. 101 – Modelo à escala real. | 76 |
| Fig. 102 - Mapeamento da localização dos extensómetros. | 76 |
| Fig. 103 - Mapeamento da localização dos deflectómetros..... | 77 |
| Fig. 104 - Gráfico de extensões para o agrupamento P1..... | 78 |
| Fig. 105 - Gráfico de extensões para o agrupamento P2..... | 79 |
| Fig. 106 - Gráfico de extensões para o agrupamento P3..... | 79 |
| Fig. 107 - Evolução do eixo neutro na secção 2 à frente. | 80 |
| Fig. 108 - Evolução do eixo neutro na secção 2 na parte de trás. | 80 |
| Fig. 109 – Gráfico força - deslocamento para o agrupamento P9..... | 81 |
| Fig. 110 - Gráfico força - deslocamento para o agrupamento P10..... | 81 |
| Fig. 111 – Representação esquemática do sistema do provete pré-esforçado. | 83 |
| Fig. 112 - Pormenor do sistema de ancoragem do cabo ao provete (sistema explodido)..... | 83 |
| Fig. 113 - Pormenor dos desviadores dos cabos. | 84 |
| Fig. 114 – Sistema de ancoragem e sistema de medição de forças no cabo..... | 84 |
| Fig. 115 – Processo de aplicação do pré-esforço..... | 85 |
| Fig. 116 – Pormenor do provete antes do ensaio..... | 85 |

| | |
|---|-----|
| Fig. 117 - Mapeamento da localização dos deflectómetros..... | 86 |
| Fig. 118 - Mapeamento da localização dos extensómetros. | 86 |
| Fig. 119 - Posição dos extensómetros do ensaio monotónico com cabo..... | 88 |
| Fig. 120 - Diferença entre a força nos cabos de pré-esforço durante o ensaio. | 88 |
| Fig. 121 – Variação da extensão no provete em relação à força de pré-esforço. | 89 |
| Fig. 122 - Provete após ensaio com cabo de pré-esforço..... | 89 |
| Fig. 123 – Desalinhamento do provete em relação aos roletes. | 90 |
| Fig. 124 – Pormenor do layout de ensaios antes do ensaio cíclico. | 91 |
| Fig. 125 - Mapeamento da localização dos deflectómetros..... | 92 |
| Fig. 126 -Mapeamento da localização dos extensómetros. | 92 |
| Fig. 127 - Posição dos extensómetros no ensaio cíclico. | 94 |
| Fig. 128 – Representação gráfica da estratégia de carga utilizada no ensaio cíclico. | 95 |
| Fig. 129 - Registo de carga na célula central durante o ensaio cíclico | 95 |
| Fig. 130 - Pormenor da centragem da placa de alumínio intercalar. | 96 |
| Fig. 131 – Provete antes do ensaio térmico. | 97 |
| Fig. 132 – Pormenor dos deflectómetros fora da câmara térmica..... | 98 |
| Fig. 133 - Mapeamento da localização dos deflectómetros..... | 98 |
| Fig. 134 - Mapeamento da localização dos extensómetros. | 99 |
| Fig. 135 - Posição dos extensómetros do ensaio termico. | 100 |
| Fig. 136 – Posição dos termopares no provete para o ensaio térmico. | 100 |

ÍNDICE DE TABELAS

| | |
|---|-----|
| Tab. 1 - Propriedades dos diferentes vidros (Haldimann, Luible, & Overend, 2008). | 3 |
| Tab. 2 – Propriedades mecânicas do vidro (Henriques, 2010). | 5 |
| Tab. 3 – Propriedades físicas do vidro (Henriques, 2010). | 5 |
| Tab. 4 – Propriedades térmicas do vidro (Henriques, 2010). | 6 |
| Tab. 5 – Tabela de comparação de extensómetros. | 15 |
| Tab. 6 – Tabela comparativa de tipos de extensómetros. (TML, 2013) | 16 |
| Tab. 7 - Tabela de selecção de termopares. | 23 |
| Tab. 8 - Regra de sintonia de Ziegler-Nichols (1º Método). (Ogata, 1993) | 35 |
| Tab. 9 - Regra de sintonia de Ziegler-Nichols (2º Método). (Ogata, 1993) | 36 |
| Tab. 10 – Resultados dos ensaios de caracterização monotónicos a 20°C. | 73 |
| Tab. 11 - Composição dos agrupamentos e parâmetros medidos. | 78 |
| Tab. 12 - Composição dos agrupamentos e parâmetros medidos. | 87 |
| Tab. 13- Composição dos agrupamentos e parâmetros medidos. | 93 |
| Tab. 14 – Estratégia de carga do ensaio cíclico | 94 |
| Tab. 15 - Composição dos agrupamentos e parâmetros medidos. | 100 |

ABREVIATURAS

- 4PB - Ensaio de flexão a 4 pontos (4 pointbending)
- CH – Canal utilizado no datalogger (ex:CH024)
- CN - Adesivo utilizado para colagem de extensómetros (cianoacrilato)
- d.d.p. - Diferença de potencial
- DEC - Departamento de Engenharia Civil
- EN - Norma Europeia
- FCTUC - Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra
- IRDH - International Rubber Hardness Degrees
- MV - Manipulated Variavel
- P.I.D. - Proporcional Integral Derivativo
- PB - Proporcional Band
- ppm - Partes por milhão
- PV - Process Variavel
- SP - Setpoint

SIMBOLOGIA

- A – Área
C – Calor Específico
Cr - Símbolo químico do crómio
Cu – Símbolo químico do Cobre
 Δl – Variação do comprimento
 ΔR – Variação da resistência
E – Modulo de Elasticidade Longitudinal
F – Força
 F_{\max} – Força máxima
G - Modulo de Elasticidade Transversal
K – Gauge Factor
 K_{cr} – Ganho crítico
 K_p – Ganho proporcional
l - Comprimento
Ni - Símbolo químico do Niquel
 P_{cr} – Período crítico
PVB – Polivinil Butiral
R – Resistência eléctrica
SGP – SentryGlas® Plus
 T_d – Tempo derivativo
 T_i – Tempo integral
 δ – Deformação máxima
 ε – Extensão
 ε_{med} – Media das medidas dos extensómetros
 λ – Condutividade térmica
 ν – Coeficiente de Poisson
 ρ – Resistividade
 σ – Tensão
 σ_{adm} – Tensão admissível
 σ_{\max} – Tensão máxima

1. INTRODUÇÃO

1.1. Motivação

Apesar de no passado o vidro se ter restringido a funções não estruturais, os modernos conceitos arquitectónicos incluem elementos de vidro com funções portantes. Hoje em dia podem ser utilizados muitos produtos de vidro, seleccionados de acordo com vários critérios, nomeadamente no que respeita às acções e as cargas que terão de sustentar.

Devido ao facto de que a fractura do vidro é principalmente regida pela concentração de tensões em torno de defeitos superficiais, a resistência de uma peça de vidro é difícil de prever com rigor suficiente. Os tratamentos térmicos e a laminação são as duas técnicas mais frequentes para conseguir um comportamento seguro.

Os vidros laminados são fabricados combinando placas de vidro com películas intercalares poliméricas. As aplicações arquitectónicas cada vez mais audaciosas têm impulsionado o desenvolvimento de elementos de vidro estrutural, com altas resistências pós-rotura. No entanto, os engenheiros de estruturas continuam a ter dificuldades nalgumas decisões, tais como: o número de camadas a utilizar; a espessura das respectivas camadas; o número de películas intercalares; a resistência exigida após a rotura; o período em que é necessário assegurar essa resistência; a quantidade de pré-tensão; o tipo de películas intercalares; e a aplicação de outras estratégias, tais como fluxos de cargas alternativos. (Cruz, 2010)

1.2. Objectivos

Este trabalho enquadra-se num projecto financiado pela Fundação da Ciência e Tecnologia denominado *S-Glass - Desempenho Estrutural e Regras de Projecto de Vigas de Vidro Reforçadas Externamente*. Os ensaios experimentais propostos no projecto vão possibilitar a compreensão do comportamento de elementos de vidro, conseguindo sistemas com comportamentos mais previsíveis e fiáveis e fornecendo um conjunto abrangente de recomendações para a concepção desses mesmos elementos, no entanto o objectivo deste trabalho não se centra na análise dos resultados dos ensaios mas sim nos aspectos tecnológicos em torno dos ensaios em vidro laminado visto ser uma área ainda pouco explorada e com pouca informação disponível. Espero que seja um contributo para os futuros investigadores na área do vidro.

1.3. Estrutura da dissertação

O texto deste trabalho divide-se em 8 capítulos, sendo este o capítulo introdutório, o qual inclui as motivações e objectivos do projecto.

-No Capítulo 2 denominado “O Vidro” são explicados alguns conceitos relativos às suas características, métodos de fabrico e reforços.

-No Capítulo 3 “Equipamento” será descrito o material a utilizar nos ensaios assim como dado sugestões para uma boa utilização. É ainda explicado passo-a-passo a construção de uma célula de carga.

-No Capítulo 4 designado “Parametrização” irá ser dado a conhecer procedimentos a adoptar para obter sucesso nos resultados dos ensaios.

-No Capítulo 5 “Preparação dos ensaios” irá ser apresentado o layout onde serão realizados os ensaios e todos os componentes envolvidos, dando especial realce à construção de uma câmara térmica.

-No Capítulo 6 chamado “Caracterização reológica do vidro” será divulgado as técnicas envolvidas para obter dados para calibrar modelos numéricos por elementos finitos.

-No Capítulo 7 “Ensaio experimentais” serão apresentados os ensaios piloto que serviram para corrigir eventuais falhas assim como se ter uma ideia do comportamento do sistema.

Como conclusão teremos uma síntese do trabalho realizado neste projecto assim como algumas sugestões de trabalhos futuros.

2. O VIDRO

2.1. Enquadramento Geral

De uma forma genérica, vidro é toda a substância mineral frequentemente transparente e por vezes translúcida que à temperatura ambiente se apresenta no estado sólido. É um material que resulta da mistura de diferentes silicatos obtidos por fusão, predominando os silicatos alcalinos e os de cálcio. De forma rigorosa, o vidro é o resultado da combinação de dois silicatos: um alcalino e outro terroso ou metálico. Dessa junção, obtém-se uma matéria vitrificável, ou seja, o vidro propriamente dito, que apresenta uma estrutura não cristalina ou amorfa (Henriques, 2010). De notar que apesar da semelhante aparência, o vidro pode ter diferentes propriedades, dependendo dos tratamentos aplicados, conforme pode ser visto na figura seguinte.

| Resistência Mecânica | MPa |
|---|------------|
| Resistência à tracção molecular | 30000 |
| Resistência à tracção de fibras de vidro | 10000 |
| Resistência à tracção de vidro temperado | 250 |
| Resistência à tracção de vidro <i>float</i> | 50 |

Tab. 1 - Propriedades dos diferentes vidros (Haldimann, Luible, & Overend, 2008).

No entanto, o vidro é um material com um comportamento mecânico perfeitamente elástico que nunca apresenta deformações no regime plástico, conforme é visível na figura seguinte.

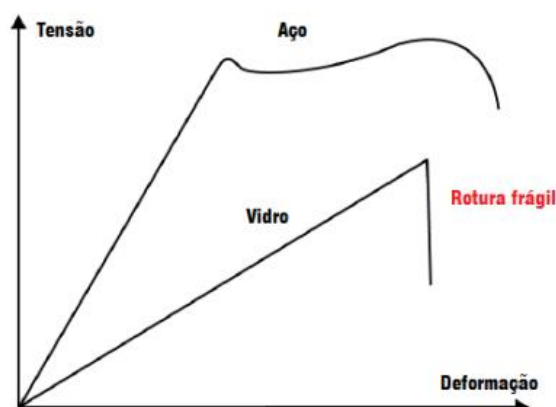


Fig. 1 – Comparação de aço e vidro no gráfico Tensão - Deformação (Henriques, 2010).

2.2. Fabrico de vidro

O vidro comum é mais vulgarmente apelidado por vidro *float*, a origem deste termo provem do inglês e que significa que foi obtido por processo de flutuação. Neste processo, os materiais seleccionados são misturados e introduzidos no forno a cerca de 1550°C. A mistura obtida é derramada continuamente a cerca de 1000°C para dentro de um recipiente de fundo plano que contém estanho. Devido à diferença de densidades da mistura e do estanho, este último mantém-se no fundo e o vidro flutua (Sanches, 2013).

A última etapa é processada na câmara de recozimento ou câmara fria, onde o vidro sofre um processo de arrefecimento lento para evitar criação de tensões residuais internas e ou choque térmico, daí também chamar-se ao vidro *float* vidro recozido.

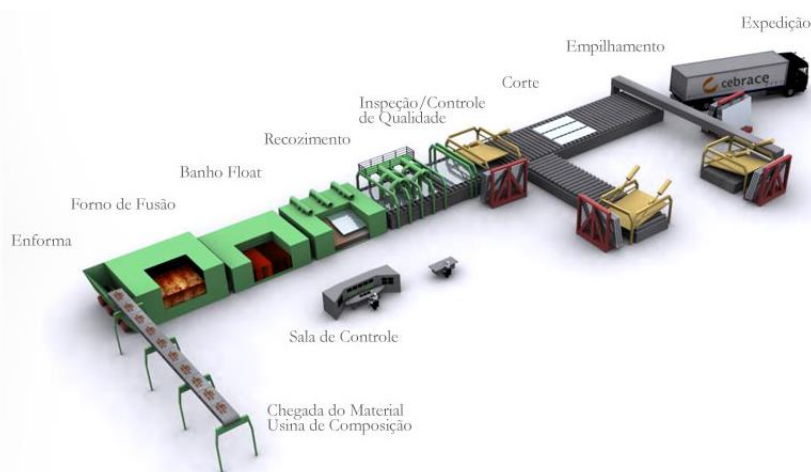


Fig. 2 - Processo de fabrico do vidro (www.cebrace.com.br).

2.3. Propriedades do vidro

Uma das propriedades mais importantes do vidro é a sua transparência, mas apresenta também elevada resistência química, elevada resistência à abrasão, elevada rigidez e óptimo comportamento ao fogo. Estas características que podem ser consultadas nas tabelas seguintes, tornam o vidro num material muito utilizado nas suas mais diversas variedades.

| | |
|---------------------------------|--|
| Elasticidade | <p>Módulo de elasticidade longitudinal, E: $E = 48 - 794 \text{ GPa}$ [11]</p> <p>Módulo de elasticidade transversal, G: $E = 26 - 33 \text{ GPa}$ [11]</p> <p>Coefficiente de Poisson, ν: $\nu = 0,21 - 0,27$ [11]</p> |
| Resistência à tracção | <p>A resistência à tracção varia de 30 a 70MPa [10] e depende de :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Duração da carga para cargas permanentes, a resistência à tracção diminui cerca de 40%; • Humidade, diminui em cerca de 20%; • Temperatura: a resistência diminui com o aumento de temperatura; • Corte e estado dos bordos. |
| Resistência à compressão | <p>A resistência do vidro à compressão é muito elevada, cerca de 1000MPa [10] e não limita praticamente o campo das suas aplicações. Em termos práticos significa que para quebrar um cubo de 1cm de lado, a carga necessária será na ordem das 10 toneladas.</p> |
| Resistência à flexão | <p>Um vidro submetido à flexão tem uma face a trabalhar à compressão e a outra à tracção. A resistência à rotura por flexão é na ordem de:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 40MPa para um vidro recozido [10]; • 120 a 200MPa para um vidro temperado (segundo a espessura, manufactura dos bordos e tipo de fabrico) [10]. |

Tab. 2 – Propriedades mecânicas do vidro (Henriques, 2010).

| | |
|------------------------------|---|
| Massa volúmica | <p>As densidades são muito variáveis, no entanto, normalmente aceita-se o valor 2.5, o que dá uma massa de 2.5kg por m² e por mm de espessura para os vidros planos [10].</p> |
| Dureza | <p>Para determinar a dureza superficial, isto é, a resistência a ser riscado por outro material, utiliza-se a escala de MOHS. O vidro tem a dureza 6.5 entre a ORTOSE (6) e o quartzo (7) [10].</p> |
| Resistência à abrasão | <p>É 16 vezes mais resistente que o granito [10].</p> |

Tab. 3 – Propriedades físicas do vidro (Henriques, 2010).

| | |
|------------------------------|--|
| Calor específico | O calor específico C do vidro é a quantidade de calor necessária para elevar de um grau, um Kg de vidro a 20°C. $C = 840 \text{ J/kg.K [10]}$ |
| Condutividade térmica | A condutividade térmica é o fluxo de calor que passa, por hora, através de um metro quadrado de uma parede, com um metro de espessura, para a diferença de 1°C de temperatura, entre as duas faces. $\lambda \approx 0,72 - 0,86 \text{ W/mK [10]}$ |
| Dilatação linear | O coeficiente de dilatação linear do vidro é a variação sofrida por uma unidade de comprimento, ao alterar de 1°C a sua temperatura. No intervalo de 20°C a 220°C, o coeficiente de dilatação linear do vidro é de 9×10^{-6} [10]. |

Tab. 4 – Propriedades térmicas do vidro (Henriques, 2010).

2.4. Técnicas de reforço do vidro

2.4.1. Vidro temperado

A têmpera ou tratamento por calor é o tratamento mais importante da indústria vidraceira, nomeadamente no que se refere a aplicações estruturais, o que faz com que este tipo de vidro represente uma grande fatia do vidro utilizado na construção. A ideia principal da aplicação da têmpera é a criação de um campo de tensões favoráveis, que impeçam o desenvolvimento dos defeitos existentes ou até mesmo o seu fecho. Isto é, só existe crescimento efectivo da fenda caso seja ultrapassada a tensão limite na origem da mesma. Ora, com a inserção de tensões residuais de compressão na zona de fendas, e desde que o carregamento não induza tensões superiores ao nível de tensões residuais introduzido, não haverá um crescimento efectivo da fenda, aumentando-se assim os esforços resistentes. Em termos teóricos, o processo é muito idêntico ao pré-esforço aplicado no betão armado.

O vidro temperado é obtido através do vidro recozido, em que este último é novamente aquecido até uma temperatura de 650°C e arrefecido rapidamente através de jactos de ar, para que a superfície do painel de vidro arrefeça mais rápido que o interior do mesmo. Depois de retirado do forno, e à temperatura ambiente, o interior continua a arrefecer dando origem a tensões de compressão na superfície e de tracção no interior (Valarinho, 2010).

A representação seguinte e respectivos diagramas ilustram o processo para uma melhor compreensão.

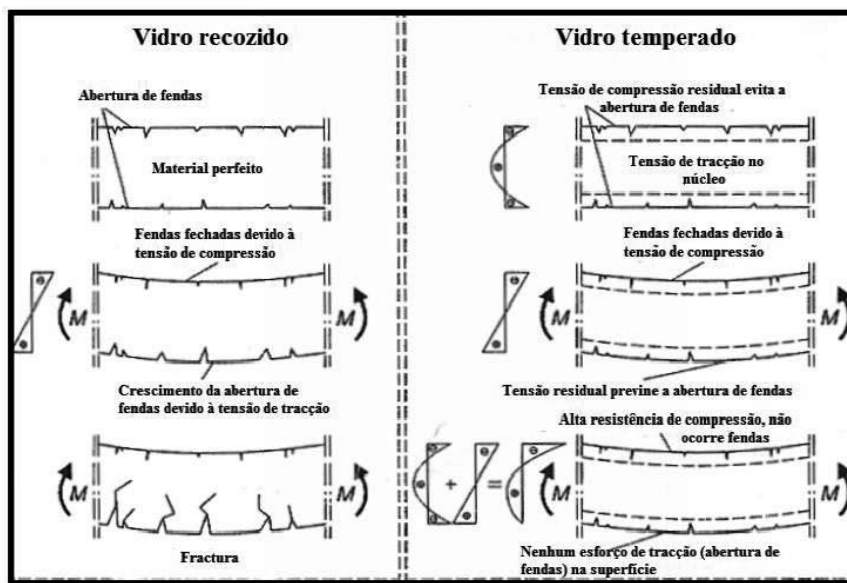


Fig. 3 – Princípio da têmpera do vidro. (Henriques, 2010)

2.4.2. Vidro termo-endurecido

O vidro termo-endurecido é um tipo de vidro intermédio entre o vidro temperado e o vidro recozido, sendo fabricado até espessuras de 12mm. É produzido da mesma forma que o vidro temperado, mas é arrefecido de uma forma mais lenta, dando origem a um campo de tensões residuais de menor valor e, por conseguinte, a uma tensão resistente menor que a obtida para o vidro temperado – a tensão resistente à tracção é cerca de 110 MPa. Após a rotura, o vidro termo-endurecido fragmenta-se em pedaços maiores que o vidro temperado, mas mais pequenos que os do vidro recozido. Isto significa que o vidro termo-endurecido pode ser uma boa solução para alcançar maiores resistências, mas também para obter uma razoável resposta no comportamento pós-rotura.

Note-se ainda que qualquer vidro que tenha sido submetido a tratamento por calor, nunca poderá ver modificada a sua forma ou dimensão, uma vez que qualquer alteração que requiera meios mecânicos para ser efectivada, provocará sempre a fragmentação do vidro (Valarinho, 2010).

2.4.3. Vidro laminado

Duas ou mais placas de vidro recozido ou de vidro temperado, ou até mesmo de ambos os tipos, coladas entre si através de um filme de plástico transparente, formam o que se chama de vidro laminado. A obtenção deste conjunto, além da colagem, inclui uma passagem por autoclave com temperaturas de 140°C e pressões superiores a 14 bar, de modo a eliminar quaisquer inclusões de ar entre filmes.

Este sistema, juntamente com o vidro temperado, representa a outra grande evolução na utilização do vidro em termos estruturais, nomeadamente na procura da segurança após a rotura. Neste caso, em vez de se procurar apenas um aumento da resistência, procura-se obter um sistema redundante: ao ligar-se duas placas de vidro entre si através de um filme aderente, consegue-se que uma possível quebra de uma das placas possa ser suplantada pela manutenção da integridade de uma outra placa. Para além disso, o filme aderente permite que o vidro, depois da rotura, permaneça no lugar garantindo um aumento da segurança quanto a possíveis quedas sobre transeuntes e melhorando o desempenho estrutural do laminado de vidro após a rotura. Esta melhoria estrutural será tanto maior quanto menor for o grau de fragmentação do vidro, já que quanto maiores forem os fragmentos de vidro, maiores serão também as suas capacidades resistentes, fazendo com que o melhor desempenho pós-rotura seja alcançado quando os laminados são constituídos por vidro recozido. (O comportamento pós-rotura está também dependente do filme interior que compõe o laminado (Valarinho, 2010). O filme mais comum é constituído por polivinil butiral (PVB), no entanto, neste trabalho será utilizado o filme de SentryGlas® Plus (SGP), que oferece cinco vezes mais resistência e é 100 vezes mais rígido que o filme de PVB (Rolo, 2013).

3. EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

3.1. Actuador Hidráulico

O actuador hidráulico utilizado nos ensaios para aplicações das forças foi um *DARTEC* com capacidade de 200kN e curso de 200mm, e que pode ser visto da figura seguinte.

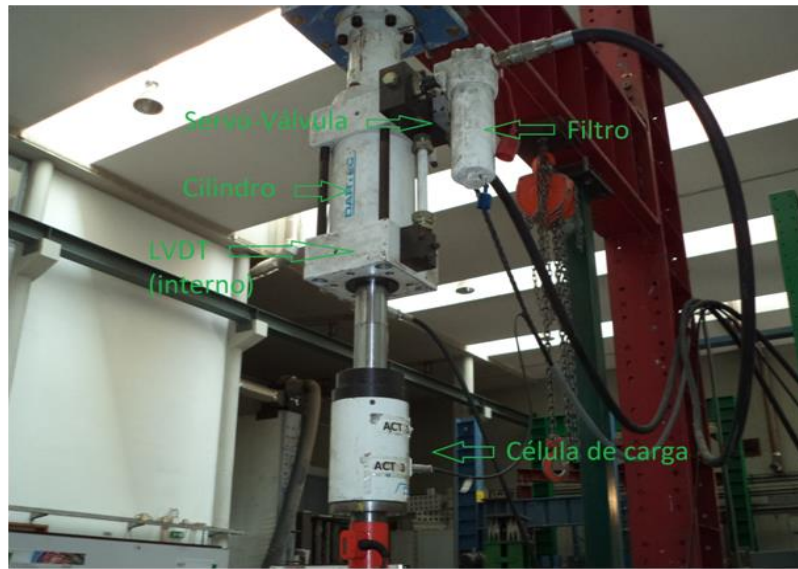


Fig. 4 – Actuador hidráulico de 200kN.

Os principais elementos constituintes que convêm realçar são, o cilindro hidráulico, a servo-valvula, a célula de carga, o LVDT, a unidade hidráulica e os filtros.

O controlo deste equipamento é feito por software desenvolvido pela *Ultrasens*.

Os **cilindros hidráulicos** são dispositivos que convertem a energia hidráulica em força mecânica linear ou de movimento.

O princípio básico de funcionamento é o seguinte:

Segundo a lei de Pascal, a pressão exercida em um ponto qualquer de um líquido estático é a mesma em todas as direcções e exerce forças iguais em áreas iguais.

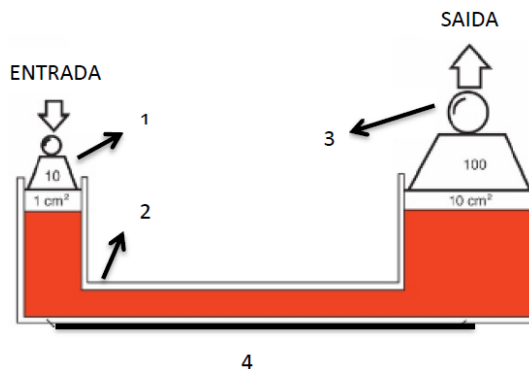


Fig. 5 – Esquematização de exemplo de prensa hidráulica.

A melhor maneira de perceber o fenómeno da prensa hidráulica é através de um exemplo prático.

Sabendo que $F/A=P$, sendo F a força em kgf, A a área em cm^2 e P a pressão expressa em kgf/cm^2 , então se aplicarmos 10 kgf em (1) tendo a câmara 1cm^2 de área, logo:

$$p_1 = \frac{F_1}{A_1} = \frac{10 \text{ kgf}}{1\text{cm}^2} = 10 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

Temos que a pressão interna na câmara da prensa é de $10\text{kgf}/\text{cm}^2$.

Esta pressão suportara um peso de 100kgf se tivermos uma área A_2 de 10 cm^2 .

$$F_2 = P_1 * A_2$$

Em suma, uma força de 10kgf aplicada a um pistão de 1cm^2 de área, desenvolve uma pressão de $10\text{kgf}/\text{cm}^2$ em todos os sentidos dentro da prensa e essa pressão suportará um peso de 100kgf.

A **servo-valvula** é o equipamento onde um sinal eléctrico é aplicado e transforma-se analogicamente em um sinal de saída para comando hidráulico, mediante as técnicas de controlo que serão abordadas um pouco mais à frente.



Fig. 6 - Servo-valvula *MOOG*.

A **célula de carga** é um equipamento para medição de forças. O princípio de funcionamento de uma célula de carga baseia-se na variação da resistência ohmica de uma ponte de extensómetros, quando a mesma é submetida a uma deformação. Em virtude da deformação dos extensómetros, o desequilíbrio entre os mesmos é proporcional à força que a provoca. É através da medição deste desequilíbrio que se obtêm o valor da força.

Uma descrição mais detalhada pode ser encontrada no subcapítulo – Projecto de célula de carga.

-O **LVDT** (Linear variable differential transformer) é um dispositivo para medição de deslocamentos lineares. O funcionamento baseia-se na interação entre um núcleo ferromagnético e 3 bobines. A razão pela qual é apresentada uma descrição mais detalhada prende-se pelo facto de normalmente de confundir LVDT com defletómetro, sendo notado esse erro inúmeras vezes em varias teses. O defletómetro tem como princípio de funcionamento a ponte de Wheatstone¹. As figuras seguintes mostram que facilmente são confundíveis.



Fig. 7 – LVDT *HBM*



Fig. 8 – Defletómetro SDP-200 *TML*

As 3 bobines dos LVDT são, a bobine central que é a primária e outras duas que são as secundárias. O núcleo está preso à haste do cilindro, sendo o deslocamento da mesma, o valor a ser medido. A movimentação do núcleo em relação às bobines provoca uma saída de sinal proporcional ao deslocamento.

Para se ter o sinal de saída, uma corrente alternada é aplicada na bobine primária, que por sua vez induz em cada bobine secundária uma tensão proporcional à indutância com a bobine primária. Ao variar a posição do núcleo, a indutância muda, fazendo com que exista

¹ Ver subcapítulo projecto de célula de carga, pois o princípio de funcionamento é o mesmo.

uma diferença de potencial (d.d.p.) entre os terminais das bobinas secundárias. Quando o núcleo está no meio do curso, tensões opostas com a mesma amplitude são induzidas nas bobinas secundárias, fazendo com que a d.d.p. aos terminais seja zero. Logo podemos dizer que o LVDT está na origem. Quando o núcleo se move para outra posição a partir da origem, a tensão aos terminais também aumenta de zero para um valor até + ou – 10 Volts conforme a direcção tomada pelo núcleo.

A amplitude da tensão é proporcional ao deslocamento do núcleo.

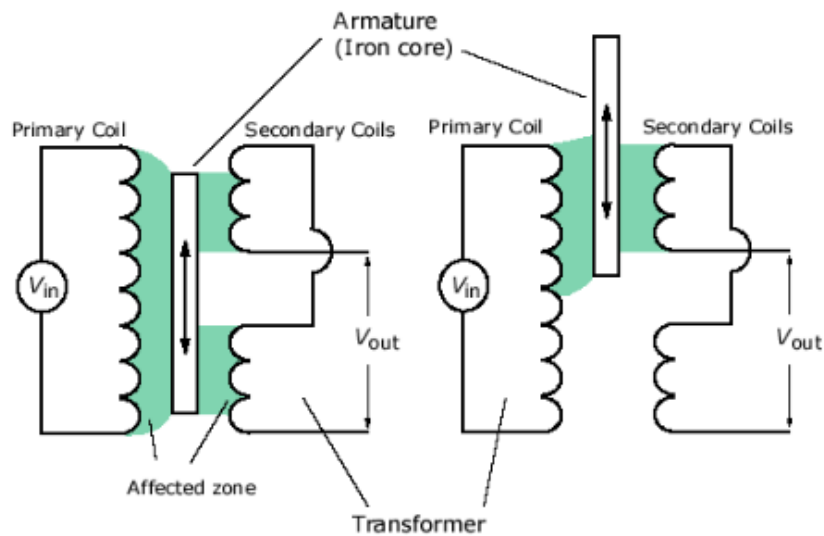


Fig. 9 - Esquema básico de um LVDT.

De notar ainda que o núcleo não está em contacto com nenhuma peça, a não ser a haste, fazendo com que não exista atrito apreciável, e estando isolado com o meio envolvente, confere-lhe características de alta precisão.

A **unidade hidráulica** é constituída principalmente por bomba, permutador, válvulas e reservatório e tem por função respectivamente, bombear o fluido hidráulico para o circuito, arrefecer o fluido hidráulico, controlo da direcção, caudal e pressão do fluido hidráulico e armazenamento do mesmo.



Fig. 10 - Unidade hidráulica utilizada nos ensaios.

Para assegurar a qualidade do fluido hidráulico, mantendo o mesmo livre de impurezas são utilizados **filtros**.

O software para controlar o actuador foi o *extensile 1.0* e o *gerador de funções 1.0*, desenvolvido pela *Ultrasens – Metrologia de Precisão e Controlo de Qualidade, Lda*



Fig. 11 - Consola de controlo do actuador.

3.2. Extensómetros

A extensometria é um conjunto de técnicas que permitem determinar o estado de deformação em torno de um ponto de um corpo, a partir do conhecimento das extensões. Para se obter o conhecimento das extensões utilizam-se extensómetros.

Se um dado material for traccionado ou encurtado, a força aplicada no material é proporcional à deformação causada na região elástica. Os materiais têm a propriedade de se alongar quando traccionados e de encurtar quando comprimidos. Supondo que um material é traccionado, e a quantidade de alongamento seja dada por Δl e o comprimento inicial seja l , a relação $\Delta l/l$ é chamada deformação e é adimensional, sendo representada por ε (*strain*), cuja relação é indicada em (1).

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} \quad (1)$$

A figura seguinte mostra a relação entre tensão e deformação de um corpo de aço macio submetido à tracção. A tensão é proporcional à deformação entre a origem e o ponto a, onde uma inclinação aproximadamente linear é obtida. Esta zona linear é chamada a região elástica e onde se aplicam as leis de Hooke.² A expressão mais utilizada está referenciada em (2).

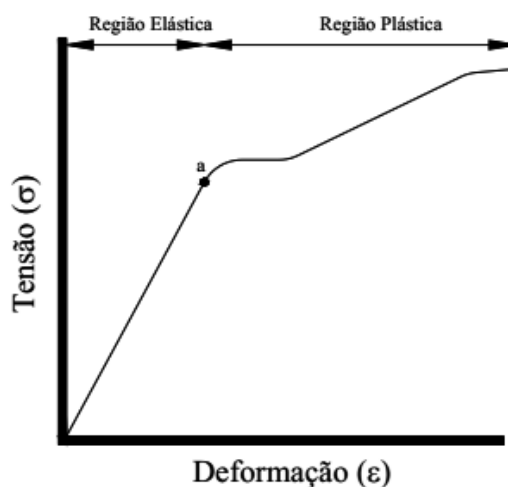


Fig. 12 - Curva tensão – deformação.

$$\frac{\sigma}{\varepsilon} = E \quad (2)$$

² Em 1660 o físico inglês R. Hooke (1635-1703), observando o comportamento mecânico de uma mola, descobriu que as deformações elásticas obedecem a uma lei básica. Hooke descobriu que quanto maior fosse o peso de um corpo suspenso a uma das extremidades de uma mola, maior era a deformação sofrida pela mesma. Hooke verificou ainda analisando outros sistemas que existia sempre proporcionalidade entre a força aplicada e deformação elástica produzida. Através das suas observações pode então enunciar os seus resultados sob a forma de uma lei, a lei de Hooke.

Onde E é uma constante de proporcionalidade referente a um dado material e σ a tensão expressa em MPa .

O princípio de funcionamento do extensómetro é baseado no facto de que os metais mudam a sua resistência eléctrica quando sofrem uma deformação, sendo relacionados por (3).

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (3)$$

Sendo A a área da secção transversal do metal, ρ a resistividade do metal e l o seu comprimento.

Também pode ser feita uma correspondência de maneira a ser conhecido o “*gauge factor* (K)” (4) que é um parâmetro muito utilizado em extensometria.

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} = \frac{\Delta R/R}{K} \quad (4)$$

Sendo ΔR a variação da resistência mediante uma deformação (ε) e R a resistência do extensómetro, normalmente 120, 350 ou 1000 Ω (ohms).

3.2.1. Selecção de extensómetros a utilizar em vidro







Os extensómetros a utilizar são da marca TML. Para seleccionar o extensómetro ideal é necessário conhecer algumas características dos ensaios e dos materiais em questão, tais como expansão térmica, temperatura de funcionamento, limites de extensão, limite de ciclos, entre outros.

Analisando o catálogo da marca TML verifica-se a existência de três séries de extensómetros que podem ser utilizados nos ensaios a efectuar em vidro.

| Série | Expansão térmica (ppm/°C) | Temperatura de funcionamento (°C) | Adesivo | Material | | Limite de extensão | Nº limite de ciclos | Aplicação |
|-------|---------------------------|-----------------------------------|-------------|--------------------|----------------|--------------------|---------------------|--|
| | | | | Base | Elemento | | | |
| F | 8, 11, 17, 23 | -20 ~ +80 | CN/P-2/EB-2 | Epoxy | Cu-Ni | 3 % | 1x10 ⁶ | Extensómetro de uso geral |
| WF | 11, 17, 23 | 0 ~ +80 | CN/P-2 | Epoxy | Cu-Ni | 3 % | 1x10 ⁶ | Extensómetro à prova de humidade |
| FLA-T | 11, 17, 23 | -30 ~ +80 | CN/P-2 | Epoxy Poliamida | Cu-Ni Ni-Cr | 3 % 1 % | 1x10 ⁶ | Extensómetro que incorpora um termopar |

Tab. 5 – Tabela de comparação de extensómetros.

Destas três apenas a série F possui extensómetros com auto compensação de temperatura próprios para o vidro (coeficiente de expansão térmica 8 ppm/°C). No mesmo catálogo encontram-se portanto os seguintes extensómetros da série F para o vidro:

| Gauge pattern | | Type | Gauge size | | Backing | | Resistance |
|---|--|---|------------|-----|-------------|-----|-------------|
| | | | L | W | L | W | in Ω |
|  ● Single-element (G.F. 2.1 approx.) FLA-5-8 | | Single-element | 2 | 1.5 | 6.5 | 3.0 | 120 |
|  ● 90° 2-element Cross (G.F. 2.1 approx.) Stacked type FCA-2-8 | | | 5 | 1.5 | 10.0 | 3.0 | 120 |
|  ● 90° 2-element Cross (G.F. 2.1 approx.) Stacked type FCA-2-8 | | 90° 2-element Cross, Stacked type | 2 | 0.9 | ϕ 7.0 | | 120 |
|  ● 45°/90° 3-element Rosette (G.F. 2.1 approx.) Stacked type FRA-5-8 | | 45°/90° 3-element Rosette, Stacked type | 5 | 1.9 | ϕ 12.0 | | 120 |
|  ● 45°/90° 3-element Rosette (G.F. 2.1 approx.) Stacked type FRA-5-8 | | 45°/90° 3-element Rosette, Stacked type | 2 | 0.9 | ϕ 7.0 | | 120 |
|  ● 45°/90° 3-element Rosette (G.F. 2.1 approx.) Stacked type FRA-5-8 | | 45°/90° 3-element Rosette, Stacked type | 5 | 1.9 | ϕ 12.0 | | 120 |

Each package contains 10 gauges.

Tab. 6 – Tabela comparativa de tipos de extensómetros. (TML, 2013)

As três séries têm temperaturas de funcionamento adequadas aos ensaios do projecto S-GLASS (+20°C, +50°C e +80°C).

Para se ter a ideia da extensão máxima nos ensaios calculou-se a extensão ϵ correspondente a uma tensão σ de 100MPa. Como este valor de tensão ultrapassa o valor de cálculo para ensaios de vidro em tracção é seguro afirmar que as extensões máximas são inferiores aos 3% de limite impostos pelo fabricante.

3.2.2. Procedimentos para instalação de extensómetros em vidro.

Devido às características pouco porosas e absorventes do vidro é necessário ter muita atenção na preparação das superfícies, todo este processo deve ser feito num ambiente livre de poeiras, gorduras, ventilado e à temperatura ambiente.

A superfície deve estar bem limpa e para tal utiliza-se acetona pura (dimetilcetona), ter atenção para não utilizar a acetona de venda nos supermercados pois esta tem aditivos que engorduram o provete.

Posteriormente, deve-se marcar a posição do extensómetro com uma caneta de tinta permanente no provete e com o auxílio de fita-cola coloca-se o extensómetro no local exacto conforme pode ser visto na figura seguinte.

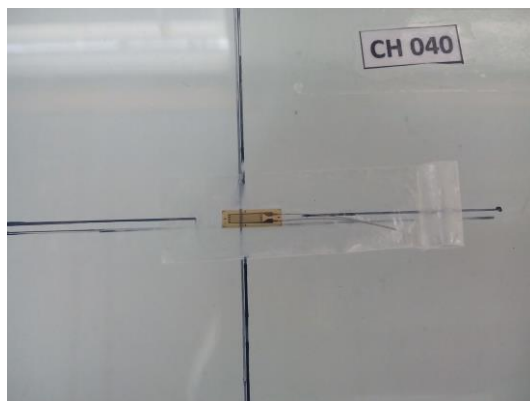


Fig. 13 – Extensómetro posicionado

Levantando uma ponta coloca-se a cola de maneira a preencher toda a base do extensómetro e rapidamente e com o auxílio da folha de polietileno fornecida pelo fabricante deve ser aplicada uma ligeira força no extensómetro contra o provete durante 45seg. A cola utilizada para a colagem dos extensómetros é a *CN* da TML (cianoacrilato).



Fig. 14 – Procedimento de colagem do extensómetro.

O passo seguinte passa pela estanagem, instalação das ponteiras e a utilização de *SB Tape* da TML, processo este que ligará os fios com a informação da extensão para o datalogger³. A sequência de fotos seguintes ilustra o processo.



Fig. 15 – Estanagem e ligação dos extensómetros.

³ Um datalogger é um equipamento de aquisição de dados, nestes ensaios foi utilizado o 530 da TML.

Finalmente, a figura seguinte ilustra um exemplo de trabalho de instrumentação com extensómetro já finalizado, onde o ultimo passo passou por proteger a instalação com N-1 da TML.

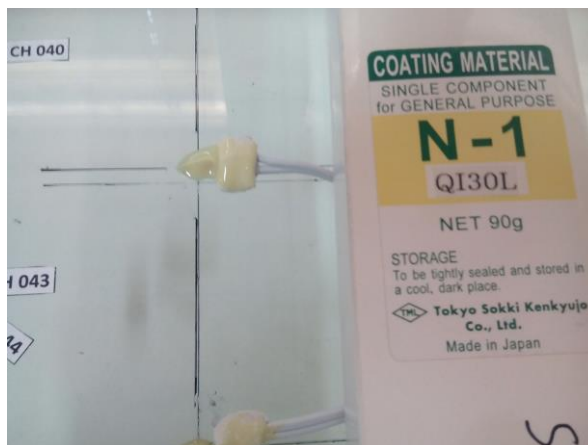


Fig. 16 – Instalação completa do extensómetro.

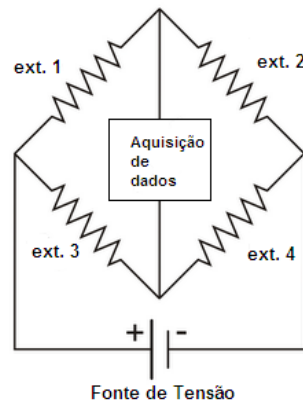
3.3. Projecto de célula de carga

Conforme já mencionado anteriormente, uma célula de carga é um dispositivo para medir forças.

O princípio de funcionamento de uma célula de carga baseia-se na variação da resistência ohmica de uma ponte de extensómetros, quando a mesma é submetida a uma deformação.

Uma célula de carga é constituída por um corpo metálico instrumentado com extensómetros, sendo estes colocados com a configuração de uma ponte de Wheatstone⁴, tendo a ponte 4 braços, conforme pode ser visto na figura e podendo ser utilizados vários extensómetros por braço.

⁴ A ponte de Wheatstone é um esquema de montagem de componentes eléctricos que permite a medição do valor de uma resistência eléctrica desconhecida. Foi desenvolvido por Samuel Hunter Christie em 1833, no entanto foi Charles Wheatstone quem se evidenciou ao referenciar o dito esquema alguns anos mais tarde.

Fig. 17 - Ponte de *Wheatstone* com 4 extensómetros.

Quando uma carga de tracção é aplicada, os extensómetros 1 e 4 sofrem tracção e os extensómetros 2 e 3 sofrem compressão. Como exemplo, na direcção de aplicação da carga temos, no extensómetro 1 o efeito indicado em (5):

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma}{E} \quad (5)$$

Na direcção perpendicular, no extensómetro 2 ocorre uma deformação negativa por efeito de Poisson⁵ (6).

$$\varepsilon_2 = -\nu\varepsilon_1 \quad (6)$$

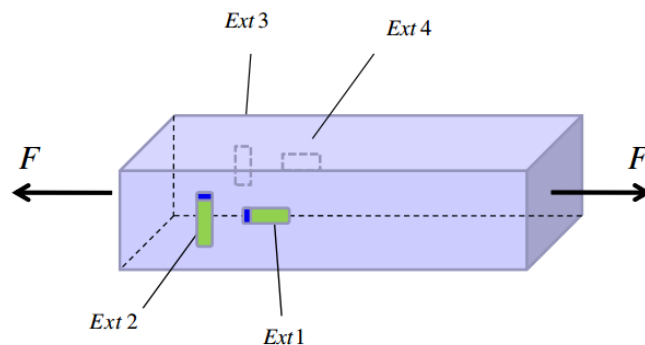


Fig. 18 - Posicionamento dos extensómetros numa célula de carga (Roseiro, 2013).

Caso seja aplicado uma carga de compressão o efeito será o inverso, os extensómetros 1 e 4 sofrem compressão e os extensómetros 2 e 3 sofrem tracção.

Quando não há carga os 4 extensómetros tem a mesma resistência e assim a d.d.p. na aquisição de dados é zero, diz-se então que a ponte está em equilíbrio.

Ao aplicar carga cria-se um desequilíbrio na ponte levando a que exista uma d.d.p. na aquisição proporcional à carga aplicada.

⁵ Qualquer material elástico ao ser traccionado ou comprimido, sofre também uma deformação transversal que é proporcional à deformação longitudinal aplicada.

O uso de 4 ou múltiplos de 4 extensómetros em ponte completa nas células de carga, anula o efeito da temperatura nas resistências. Uma variação de temperatura afecta por igual todos os braços da ponte, fazendo com que não exista uma d.d.p. de desequilíbrio.

3.3.1. Construção de uma célula de carga

Para construir uma célula de carga é necessário ter em conta os limites de carga envolvidos para assim ser possível dimensionar a mesma, ou seja, o elemento metálico constituinte da célula tem de resistir à solicitação de carga aplicada, mantendo-se no seu domínio elástico tendo em conta que os extensómetros a utilizar também tem um limite de extensão, normalmente na ordem de 3% que correspondem a $30000\mu\epsilon$, o ideal será utilizar aços de elevada resistência mecânica com as geometrias apropriadas para os ensaios.

O material utilizado para a construção da célula de carga foi um parafuso de classe 10.9, tendo então 1000 MPa de resistência à tracção e 900 MPa de limite de escoamento, sendo este o último valor a considerar e corrigido com um factor de segurança mínimo de 2, para casos em que acidentalmente se ultrapasse o valor limite de carga, não danifique imediatamente a célula de carga. Sendo assim o valor a ter em conta é de 450 MPa.



Fig. 19 - Material utilizado na construção da célula de carga.

A geometria de uma célula de carga deve ser a ideal para a função em questão podendo ter diversas formas, cabe ao projectista decidir qual a melhor tendo em conta as limitações mencionadas anteriormente, para este projecto sabíamos que a mesma deveria ter um furo passante e respeitar um certo diâmetro para ser possível a medição do sistema de cabo de pré-esforço assim como ser possível utiliza-la no sistema concebido. Outros detalhes acerca do pré-esforço serão abordados no decorrer deste trabalho.

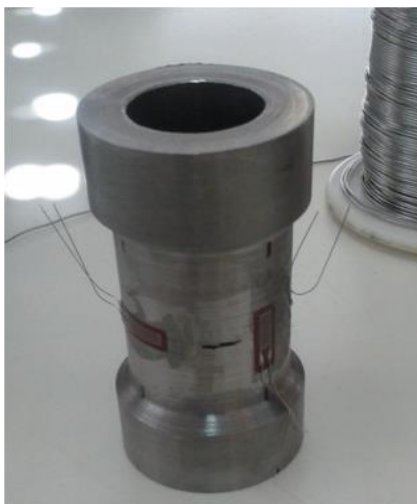


Fig. 20 - Pormenor do corpo da célula de carga.

Sabendo que a geometria a utilizar tem de respeitar a seguinte formulação (7) para a tensão admissível (σ_{adm}) e dimensionando neste caso a célula de carga para 100kN:

$$\sigma_{adm}[MPa] = \frac{F[N]}{A[mm^2]} \quad (7)$$

Substituindo valores irá dar uma área resistente mínima de 222 mm^2 , sabendo que para os ensaios em questão será necessário que o corpo da célula tenha um furo passante para permitir a passagem de um varão M16 com folga suficiente para não existir atrito apreciável, para um furo de 18mm de diâmetro temos 255 mm^2 de área resistente a subtrair. Tendo em conta que é necessário instrumentar com extensómetros o corpo e que vai haver ligações físicas entre os mesmos, então tem de se garantir área suficiente para tal. Por isso foi proposto que a célula ficasse com 25mm de diâmetro externo, subtraindo a área do furo, a área resultante será de 235 mm^2 , logo superior aos 222 mm^2 de área mínima resistente.

O aspecto final das células de carga pode ser visto na figura seguinte.



Fig. 21 - Células de carga finalizadas.

O próximo passo será a calibração das células de carga. (Ver subcapítulo Calibração)

3.4. Termopares

Um dos dispositivos mais utilizados para medir temperatura, quer sejam em Laboratório quer seja na indústria é o termopar.

Um termopar consiste de dois condutores de diferentes metais, sejam eles puros ou ligas homogéneas. Os fios são soldados num extremo ao qual se dá o nome de junção de medição, a outra extremidade, chamada junção de referência é levada ao instrumento de medição.

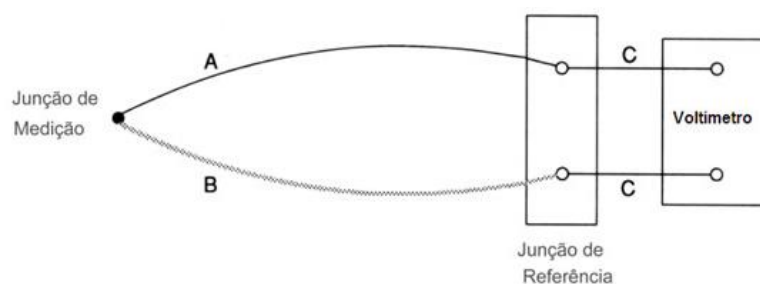


Fig. 22 - Esquema de um termopar.

O aquecimento de dois metais diferentes com temperaturas diferentes em suas extremidades, gera o aparecimento de uma f.e.m. (da ordem de mV). Este princípio conhecido como efeito de *Seebeck*⁶ proporcionou a utilização de termopares para medição de temperatura. Conforme a aplicação existem diversos tipos de termopares, na tabela seguinte pode ser visto alguns tipos de termopares e suas principais características.

⁶ Thomas Seebeck foi o físico responsável pela descoberta em 1821 do efeito termoelétrico.

| Tipo | Elemento Positivo | Elemento Negativo | Faixa de Temperatura Usual | Características | Restrições |
|----------|------------------------------|-----------------------------|----------------------------|---|--|
| T | Cobre (+) | Constantan (-) | -184 a 370°C | Podem ser usados em atmosferas oxidantes, redutores, inertes e no vácuo. Adequados para medições abaixo de zero grau. | 1) Oxidação do cobre acima de 310°C. |
| J | Ferro (+) | Constantan (-) | 0 a 760°C | Podem ser usados em atmosferas oxidantes, redutores, inertes e no vácuo. Não devem ser usados em atmosferas sulfurosas e não se recomenda o uso em temperaturas abaixo de zero grau. Apresenta baixo custo. | 1) Limite máximo de utilização em atmosfera oxidante de 760°C devido à rápida oxidação do ferro. 2) Utilizar tubo de proteção acima de 480°C. |
| E | Níquel Cromo (+) | Cobre Níquel (+) | 0 a 870°C | Podem ser usados em atmosferas oxidantes e inertes. Em ambientes redutores ou vácuo perdem suas características termoeletrônicas. Adequado para o uso em temperaturas abaixo de zero grau. | 1) Baixa estabilidade em atmosfera redutora. |
| K | Chromel (+) | Alumel (+) | 0 a 1200°C | Recomendável em atmosferas oxidantes ou inertes. Ocasionalmente podem ser usados abaixo de zero grau. Não devem ser utilizados em atmosferas sulfurosas. Seu uso no vácuo é por curto período de tempo. | 1) Vulnerável em atmosfera sulfurosa e gases como SO ₂ e H ₂ S1 requerendo substancial proteção quando utilizado nessas condições. |
| S | Platina 90% 10% Ródio (+) | Platina 100% (-) | 0 a 1600°C | Recomendável em atmosferas oxidantes ou inertes. Não devem ser usados abaixo de zero grau no vácuo, em atmosferas redutoras ou atmosferas com vapores metálicos. Apresenta boa precisão em temperaturas elevadas. | 1) Vulnerável a contaminação em atmosferas que não sejam oxidantes. 2) Para altas temperaturas, utilizar isoladores e tubos de proteção de alta alumina. |
| R | Platina 87% 13% Ródio (+) | Platina 100% (-) | 0 a 1600°C | Recomendável em atmosferas oxidantes ou inertes. Não devem ser usados abaixo de zero grau no vácuo, em atmosferas redutoras ou atmosferas com vapores metálicos. Apresenta boa precisão em temperaturas elevadas. | 1) Vulnerável a contaminação em atmosferas que não sejam oxidantes. 2) Para altas temperaturas, utilizar isoladores e tubos de proteção de alta alumina. |
| B | Platina 70% 30% Ródio (+) | Platina 94% 6% Ródio (-) | 870 a 1795°C | Recomendável em atmosferas oxidantes ou inertes. Não devem ser usados no vácuo, em atmosferas com vapores metálicos. Mais adequados para altas temperaturas que os tipo S/R. | 1) Vulnerável a contaminação em atmosferas que não sejam oxidantes. 2) Utilizar isoladores e tubos de proteção de alta alumina. |
| N | Nicrosil (+) | Nisil (-) | 0 a 1260°C | Excelente resistência à oxidação até 1200°C. Curva FEM x temp. similar ao tipo K, porém possui menor potência termoeletrônica. Apresenta maior estabilidade e menor drift x tempo. | 1) Melhor desempenho na forma de tempopar de isolamento mineral. |

Tab. 7 - Tabela de selecção de termopares.

Para os ensaios foram escolhidos os termopares de tipo K, visto terem uma boa relação preço/precisão e sendo também os mais usuais nos ensaios laboratoriais em curso e já decorridos no D.E.C., então podem ser facilmente reaproveitados de e para outros projectos.

3.4.1. Preparação dos termopares

A junção de medição pode ser executada de diversos meios onde são de salientar a estanhagem, caso o ensaio a realizar seja inferior à temperatura de fusão do estanho (231°C) ou através do auxílio de mercúrio como veículo condutor e equipamento de soldadura para uma solda por arco eléctrico.

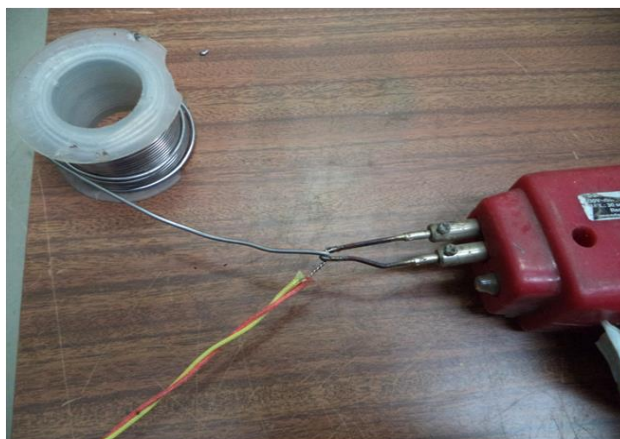


Fig. 23 - Estanhagem da junção de medição.



Fig. 24 - Soldadura por arco eléctrico.

3.4.2. Instalação dos termopares no vidro

Analogamente aos extensómetros, a zona onde será colocado o termopar deve estar limpa e para tal utiliza-se a acetona pura. Depois da junção de medição estar feita conforme foi explicado anteriormente e a localização do termopar marcada no provete, coloca-se o termopar na posição e aplica-se um pouco de resina adesiva NP-50 da TML, esta resina tem um tempo de cura de cerca de 3 horas à temperatura ambiente e por tal é necessário colocar uma tira de polietileno e algo que provoque uma pressão de cerca de 3 bar de maneira a garantir que o termopar fique mesmo encostado ao vidro. Foi ainda colocado silicone num dos termopares com a intenção de garantir que a medição fosse mesmo a do vidro e não a do ar envolvente, no entanto comparando com um termopar que não leve silicone, os valores são idênticos. Em jeito de conclusão o silicone apenas é mais um adesivo a auxiliar o correcto posicionamento do termopar. O conjunto de figuras seguintes ilustram o termopar aplicado e respectivos adesivos.



Fig. 25 – Termopares aplicados no vidro e respectivos adesivos. (Rolo, 2013)

3.5. Fotogrametria

A fotogrametria é cada vez mais utilizada devido á facilidade , precisão e economia em comparação com os métodos tradicionais de medição. Neste trabalho apenas se utilizou a fotogrametria para medir deslocamentos.

A palavra fotogrametria, deriva de três palavras de origem grega, *photos*, *gramma* e *metron* que têm, respectivamente, o significado de : luz, descrição e medidas e é a ciência que permite a medida precisa das feições representadas numa fotografia, propondo-se estudar e definir com precisão a forma, natureza, dimensões e posição de um objecto qualquer, utilizando essencialmente medidas e observações feitas sobre uma ou várias fotografias. (Abib, 1983)

Um termo também muito utilizado é o pixel, sendo considerado como o menor componente de uma imagem digital. Quanto mais pixéis foram utilizados para representar uma imagem, mais se aproxima de parecer com o objecto original. O número de pixéis em uma imagem é chamado de resolução, também para o uso da fotogrametria, quanto maior for a resolução menor será o erro envolvido.

3.5.1. Desenvolvimento de uma aplicação para fotogrametria

Para a medição de deslocamentos em provetes além dos tradicionais defletómetros foi também desenvolvido uma aplicação em *MatLab* e testada numa máquina de ensaios universal.

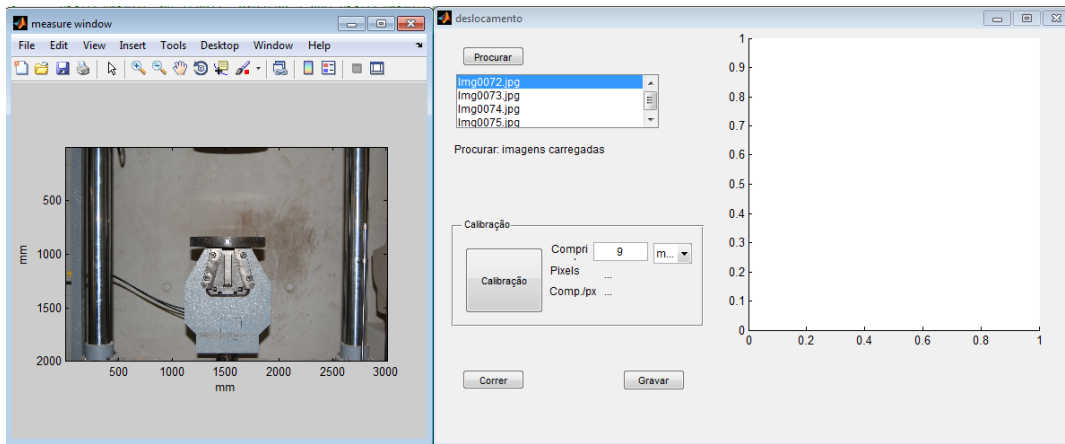


Fig. 26 -Aplicação em *Matlab* para medição de deslocamentos.

A máquina fotográfica digital utilizada foi uma *Canon 60D* e o software para disparo remoto foi o *EOS Utility*, para o teste efectuado em cima foi definido uma velocidade de 0.1mm/s na máquina de ensaios, tendo sido adquiridas 4 fotos. Na máquina de ensaios foi colocada uma mira com um quadrado branco com 9x9mm. O passo seguinte consiste em calibrar a mira com o auxílio de apontadores, ou seja, vai ser atribuído um certo número de pixéis à mira aplicada e correr o programa, conforme pode ser visto nas figuras seguintes.



Fig. 27 - Material utilizado para aquisição de imagens digitais.

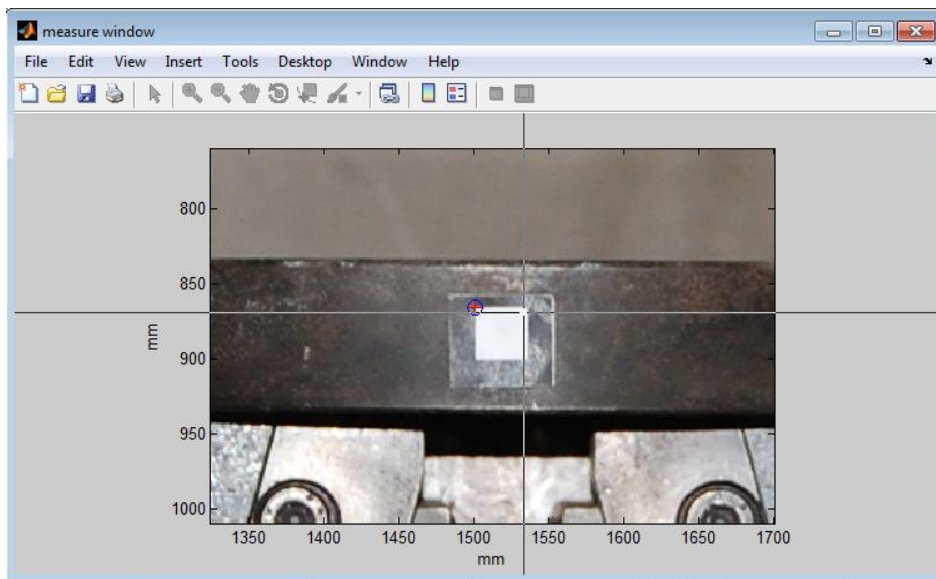


Fig. 28 - Calibração da mira.

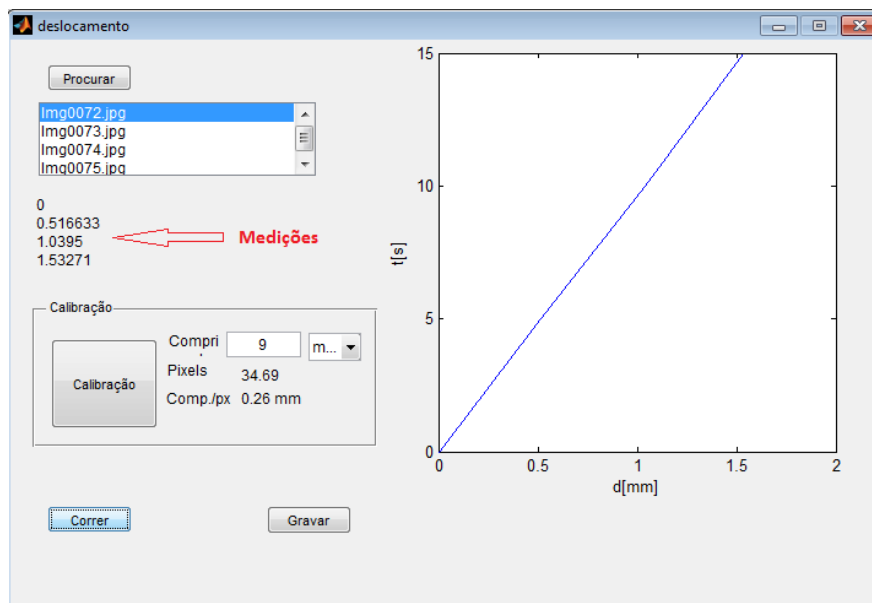


Fig. 29 - Quadro de resultados do teste.

Pode-se então ver os 4 valores de deslocamento em mm resultantes indicados com a seta vermelha.

Comparando os valores com os indicados na maquina de ensaios pode-se verificar um erro máximo de cerca de 0.032mm correspondendo para o curso efectuado cerca de 2%.

3.5.2. Aplicação da aplicação de fotogrametria a um ensaio com provete de vidro laminado.

Para este ensaio foram colocadas 8 miras no provete de vidro laminado, conforme podem ser vistas no painel do software de aquisição de fotos seguinte.



Fig. 30 - Aquisição de imagens e respectivas miras.

A estratégia de aquisição de deslocamentos neste ensaio foi a mesma da utilizada no teste preliminar mas tendo a particularidade de se utilizar 8 miras de uma só vez. Como a aplicação só está preparada para adquirir dados de uma só mira é necessário contornar o problema com a utilização do *software Photoshop* e dividir a foto em diversas frames

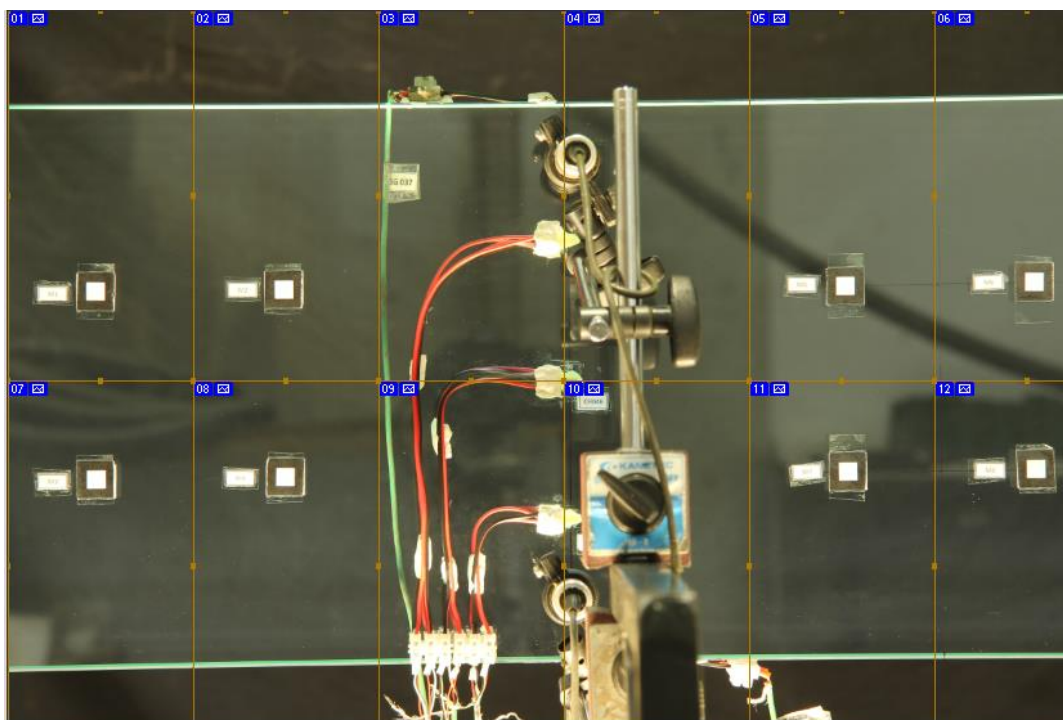


Fig. 31 - Divisão da imagem em diversas frames.

A partir do momento em que se tem as fotos já divididas por zonas basta aplicar os procedimentos mencionados anteriormente. No futuro será para desenvolver uma aplicação que adquira os dados de varias miras em simultâneo ou mesmo desenvolver um software divida as imagens de forma automática⁷.

Este teste com fotogrametria foi feito num ensaio piloto cíclico onde ainda existiam algumas folgas que só posteriormente foram anuladas e tendo em conta que foi o 1º teste notou-se algumas deficiências a nível da resolução, velocidade e armazenamento na captura de imagens, assim sendo serão também os próximos passos a melhorar num próximo ensaio.

⁷ Será facultado o código a quem se interessar a utilizar ou melhorar a aplicação. Email: ruiferreira@dec.uc.pt

4. PARAMETRIZAÇÃO

Os ajustes de parâmetros são provavelmente a tarefa que ocupa maior parte do tempo e são de extrema importância para o sucesso dos ensaios experimentais. Mesmo que os equipamentos tenham sistemas de auto-calibragem, (o equipamento utilizado neste trabalho não tem) é sempre necessário um último ajuste para se adaptar ao tipo de actuador e às características do material que se vai ensaiar.

Os principais parâmetros de ajuste do actuador são, controlo PID, os fundos de escala, a visualização gráfica, o zero servo-valvula, a detecção de ruptura e alarmes e a linearização. Neste capítulo vai ser abordado resumidamente alguns destes temas dando mais ênfase ao controlo PID.

4.1. Controlo PID (Proporcional, Integral e Derivativo)

O controlo PID é uma técnica de controlo de processos que permite que o sinal de saída tenha o mínimo erro possível, no entanto é o mais difícil de se ajustar e embora existam métodos analíticos para sintonia do PID, a técnica mais usual é a de “tentativa e erro”, mas tendo conhecimento dos princípios básicos de funcionamento do controle PID que serão aqui expostos, essa tarefa será em muito facilitada.

É ainda interessante assinalar que maior parte dos sistemas de controlo de precisão na indústria, utilizam estratégias de controlo PID.

4.2. Teoria de controlo básico PID

Antes de avançar convém ter conhecimento das abreviaturas e termos seguintes:

PV – Process Variable. Variável que é controlada no processo, neste caso será força ou posição do actuador.

SP – Setpoint. Valor desejado para a variável de processo (PV)

Pb- Proporcional band. Largura de banda proporcional

MV- Manipulated Variable. Variável de saída para controlar o processo, esta será a tensão a aplicar na servo-valvula.

E- Erro. Diferença entre SP e PV ou seja a diferença entre o valor desejado e o real.

V- Tensão de comando

Existem diversos tipos de controlo de processos, mas os mais usados são do tipo “on-off” ou se a precisão esperada for maior, então os processos mais usuais são do tipo P (proporcional), do tipo PI (proporcional integrativo), do tipo PD (proporcional derivativo) ou mesmo numa junção de todos, o controle do tipo PID.

4.2.1. Controlo on - off

É também conhecido com o controle de “duas posições”, ou controle “liga e desliga”. O sinal de saída tem apenas duas posições que vão de um extremo ao outro, podendo ser: válvula aberta ou válvula fechada, resistência ligada ou resistência desligada, compressor ligado ou compressor desligado. Analisemos pela figura seguinte um controlador ON-OFF. Neste exemplo temos um actuador: o valor desejado de posição é dado pelo SP, o valor atual de posição PV é medido por um LVDT a função do controlador é a de abrir e fechar a valvula de pressão hidraulica do actuador tendo como parâmetro o valor de posição fornecido pelo LVDT de modo que mantenha a posição no valor determinado pelo SP dentro dos limites possíveis.

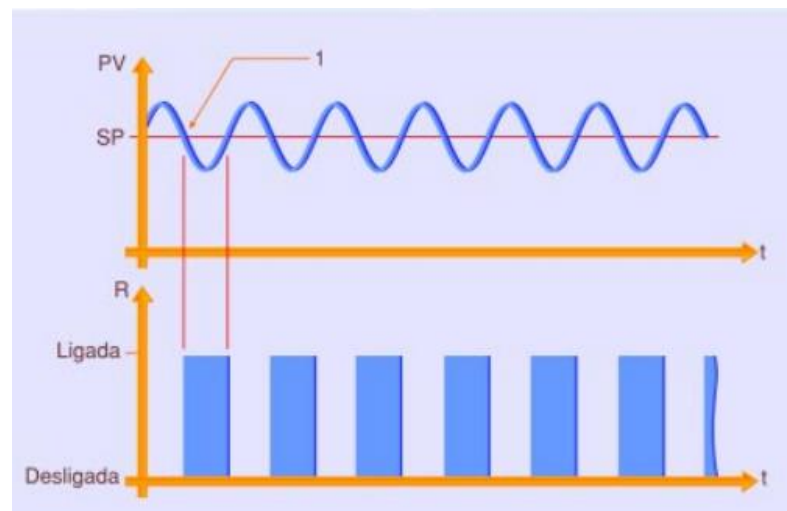


Fig. 32 - Controlo tipo on – off.(Saber, 2013)

4.2.2. Controlo tipo P (Proporcional)

Em processos que requerem um controlo mais preciso que o anterior, pode ser implementado um controlo do tipo proporcional (P).

Neste tipo de controlo o valor de MV é proporcional ao erro, quando $SP = PV$, $MV=0$, quando o erro é máximo, $MV=100\%$ e é este o valor de MV que define a banda proporcional.

Será mais fácil de entender através das seguintes figuras:

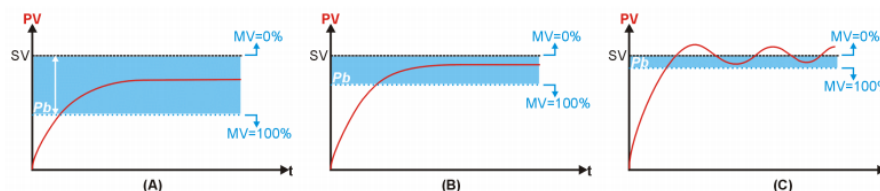


Fig. 33 - Efeito de redução PB no comportamento de PV. (Novus, 2003)

Pode-se analisar que conforme se vai reduzindo P_b o processo vai-se aproximando do SP, mas reduzindo demasiado, o processo tende a instabilizar.

No entanto quando $PV=SV$ e por consequência $MV=0$, logo nenhum sinal é aplicado ao controlo levando a que surja novamente erro, tornando-se assim um ciclo repetitivo. Por isso, com apenas um controlo P não é possível estabilizar com $PV=SV$.

4.2.3. Controlo PI (Proporcional Integrativo)

O controlo integral não pode ser utilizado sem uma acção proporcional. Com este controlo a saída MV é proporcional à amplitude e duração do erro. Resumidamente, a acção integral tem a função de eliminar o erro existente do controlo P.

A figura seguinte ilustra o processo para melhor compreensão o efeito do controlo PI

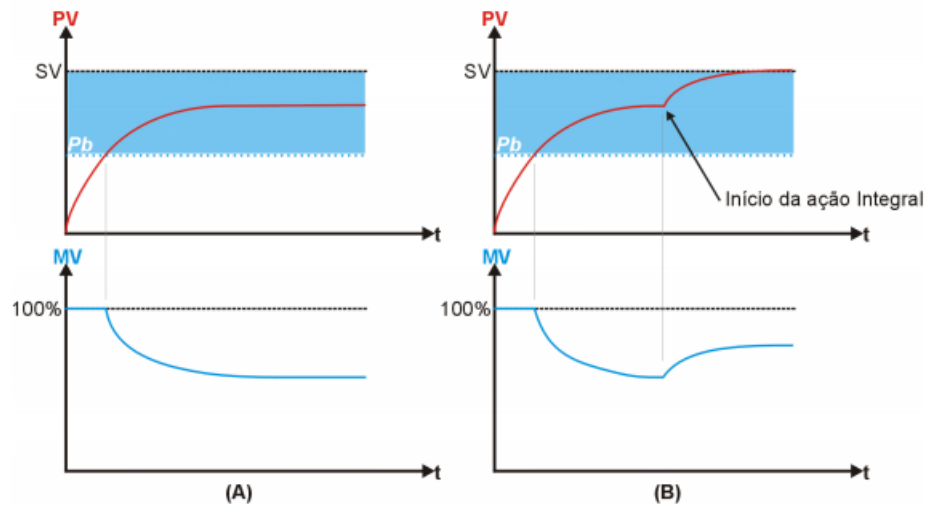


Fig. 34 - Efeito da inclusão do controlo Integral – PI. (Novus, 2003)

4.2.4. Controlo PD (Proporcional Derivativo)

O controlo derivativo também não pode ser utilizado sem o efeito de uma acção proporcional. Através deste controlo obtêm-se uma saída (MV) proporcional a variação do desvio. Sendo assim é possível reduzir a velocidade das variações de PV , evitando flutuações bruscas no sistema. O processo derivativo só entra em acção quando existe variação no erro.

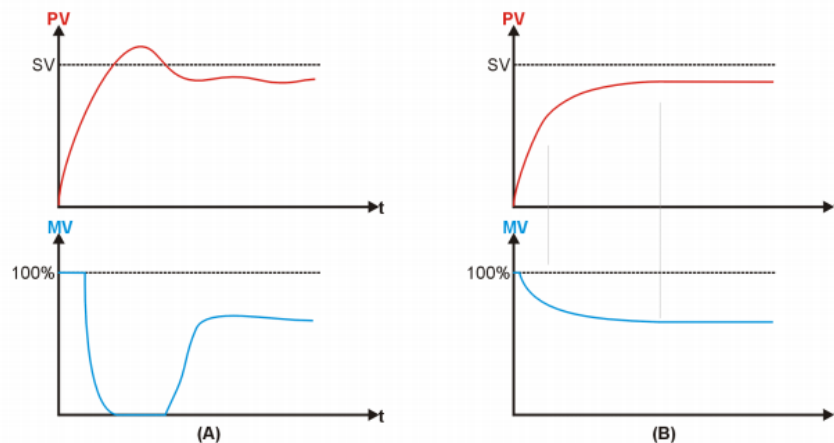


Fig. 35 - Comparação de um controlo P com um controlo PD. (Novus, 2003)

4.2.5. Controlo PID (Proporcional Integral Derivativo)

Para concluir, unindo as 3 técnicas mencionadas anteriormente, conseguimos eliminar o erro com o processo Integral (I), reduzir a flutuação com o processo Derivativo (D), ambos em conjunto com o processo básico proporcional (P). No entanto torna-se necessário sintonizar para os melhores valores de intensidade de cada um dos termos.

4.3. Sintonia do controlo PID

Tendo em conta que a maioria dos controlos PID tem de ser ajustados no local, visto serem diferentes de caso para caso, tornou-se necessário criar algumas regras a fim de facilitar o processo. Existem diversas regras propostas na literatura mas as mais usuais e com maior facilidade de aplicação são as de Ziegler e Nichols⁸.

4.3.1. 1º Método de Ziegler e Nichols

Ao aplicar uma excitação em degrau unitário a curva de resposta tem o aspecto da figura seguinte:

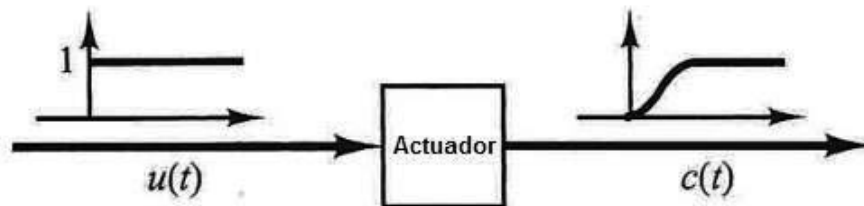


Fig. 36 - Resposta de um processo a uma excitação em degrau unitário. (Ogata, 1993)

Sendo que L é o tempo de retardo e T a constante de tempo, estes termos podem ser determinados ao traçar uma recta tangente á curva em forma de s no ponto de inflexão e determinando as intersecções com o eixo dos tempos e com a recta $C(t)=K$.



Fig. 37 - Curva de resposta em forma de s. (Ogata, 1993)

⁸ As regras de Ziegler e Nichols embora tenham sido publicadas em 1942 ainda continuam a ser uma referência no controlo de processos.

Basta agora substituir os valores de T e L na tabela seguinte:

| Tipo de controlador | K_p | T_i | T_d |
|---------------------|-------------------|-----------------|--------|
| P | $\frac{T}{L}$ | ∞ | 0 |
| PI | $0,9 \frac{T}{L}$ | $\frac{L}{0,3}$ | 0 |
| PID | $1,2 \frac{T}{L}$ | $2L$ | $0,5L$ |

Tab. 8 - Regra de sintonia de Ziegler-Nichols (1º Método). (Ogata, 1993)

4.3.2. 2º Método de Ziegler e Nichols

Conforme se tinha mencionado atrás, ao aumentar muito o controle proporcional, a resposta de saída começa a instabilizar. O 2º método aproveita esse fenómeno de instabilização para determinar os valores de K_{cr} (Ganho crítico) e do P_{cr} (período crítico), conforme pode ser visto na figura seguinte:

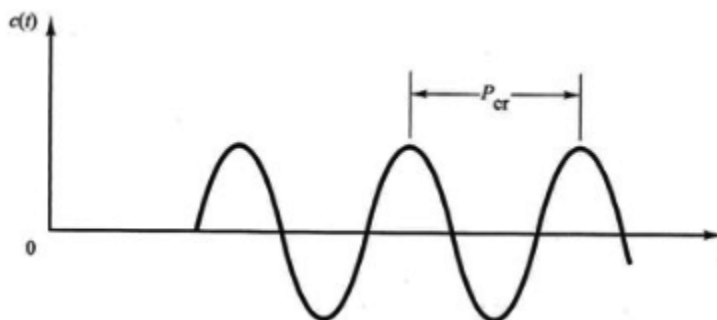


Fig. 38 - Oscilação com período P_{cr} . (Ogata, 1993)

Tendo o valor para o qual o processo começa a instabilizar (K_{cr}) e determinado o período (P_{cr}), novamente basta substituir na tabela seguinte, no nosso caso o valor de K_p para o qual o actuador começou a instabilizar foi de 2.6, sendo então este o nosso valor de K_{cr} .

| Tipo de controlador | K_p | T_i | T_d |
|---------------------|--------------|------------------------|---------------|
| P | $0,5K_{cr}$ | ∞ | 0 |
| PI | $0,45K_{cr}$ | $\frac{1}{1,2} P_{cr}$ | 0 |
| PID | $0,6K_{cr}$ | $0,5P_{cr}$ | $0,125P_{cr}$ |

Tab. 9 - Regra de sintonia de Ziegler-Nichols (2º Método). (Ogata, 1993)

Para o caso do actuador utilizado nos ensaios deste trabalho o método utilizado foi o 2º, podendo-se ver na figura seguinte o quadro de configuração do PID e fundo de escala.

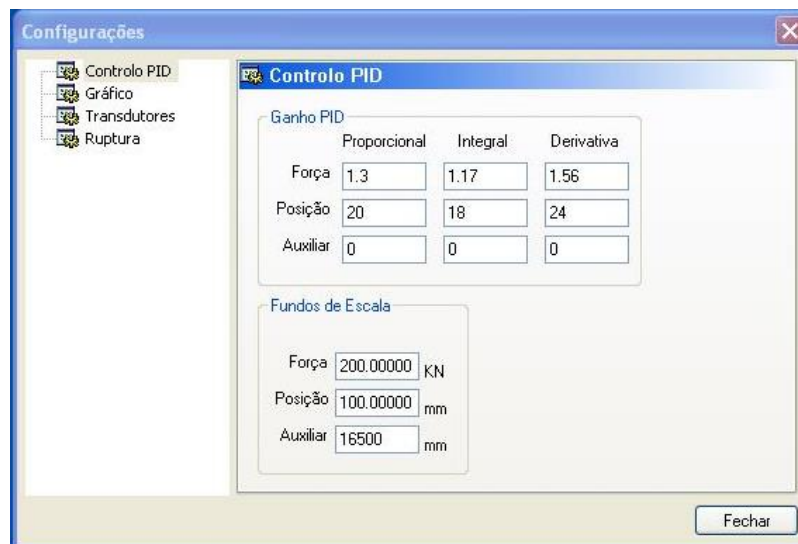


Fig. 39 - Quadro de configuração do PID.

Seguidamente serão apresentados gráficos onde se pode verificar a correcção do erro aplicando as técnicas atrás referidas. Neste teste foi aplicado uma taxa de 0.05mm/s.

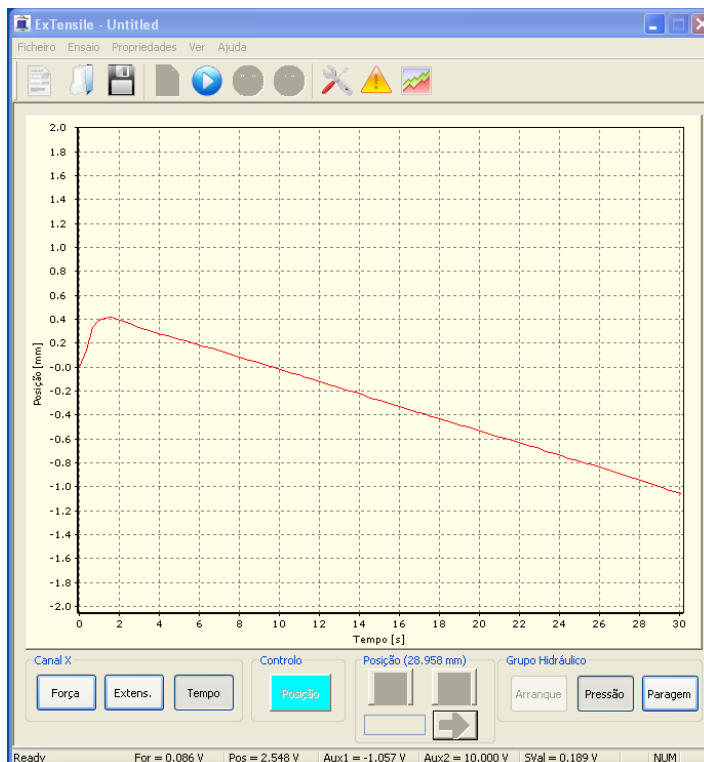


Fig. 40 – Resposta do actuador antes do controlo PID otimizado.

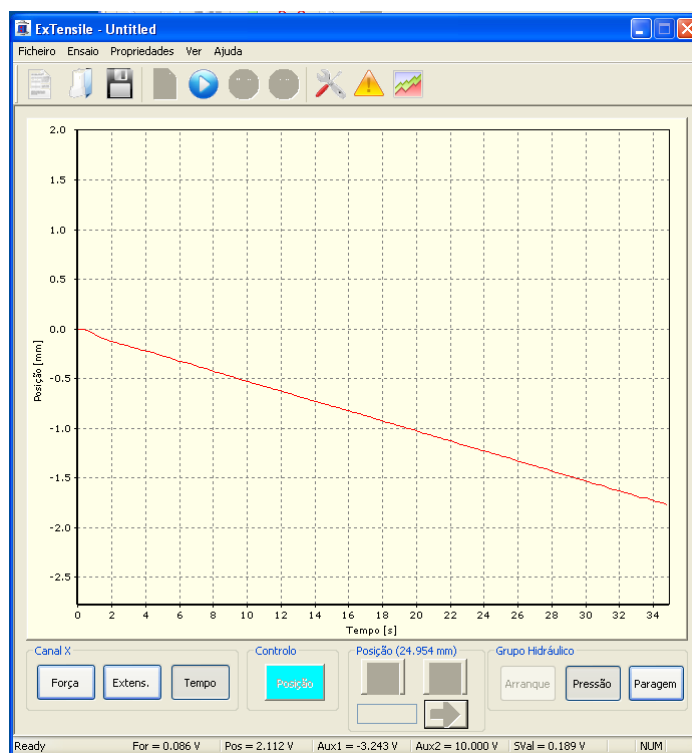


Fig. 41 - Resposta do actuador depois do controlo PID otimizado.

4.4. Fundos de escala, gráficos, tempo de amostragem e zero válvula

A edição dos fundos de escala é de extrema importância, sendo estes correspondentes aos valores máximos que as máquinas de ensaios podem atingir, na máquina utilizada nos ensaios deste trabalho a tensão de saída é de 0 a 10V, sendo então o valor de 0 o equivalente ao início de escala de medida e 10V ao fundo de escala, tendo este 2 pontos já é possível obter uma curva e obter todos os valores intermédios. Estes dados em conjunto com os parâmetros PID, definem a percentagem de erro a introduzir no algoritmo de controlo do actuador.

Na janela que pode ser vista na figura seguinte é possível configurar o aspecto do gráfico assim como o tempo de amostragem que corresponde à diferença temporal entre o registo de um valor das variáveis e o valor seguinte.

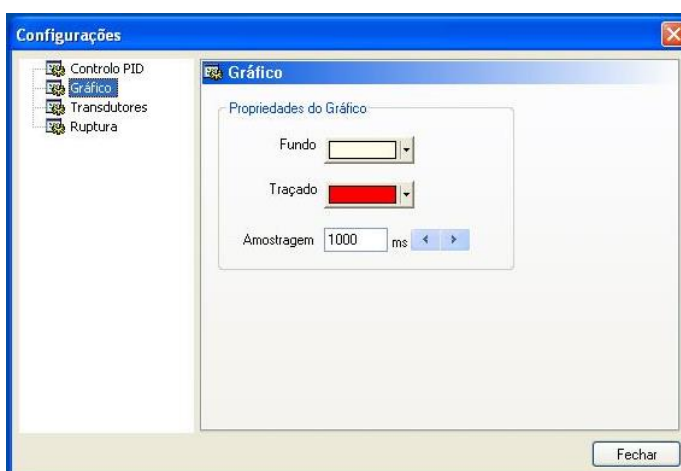


Fig. 42 - Quadro de configuração do gráfico e do tempo de amostragem.

O zero da servo-válvula é um parâmetro define o valor em volts para que o sistema mantenha a estabilidade e varia conforme a máquina de ensaios e a tensão de rede, sendo então necessário ajustar sempre que se inicia um ensaio visto a tensão de rede variar diariamente.

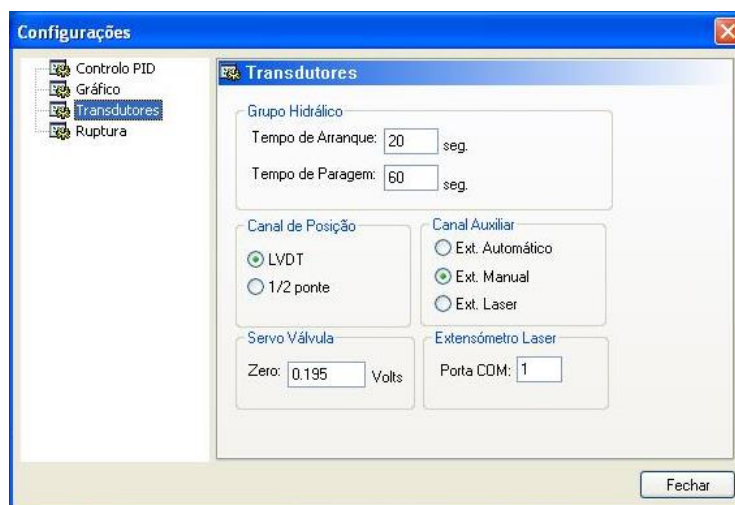


Fig. 43 - Quadro de configuração do zero da servo-válvula.

4.5. Calibração

A calibração é um processo de verificação de um sistema de medição em comparação com um instrumento padrão de precisão superior ao sistema que está a ser calibrado. A maior parte dos sistemas de medição é sensível à temperatura, e por tal a calibração deve ser feita somente para uma temperatura específica. A temperatura normalmente utilizada em calibração é de 20°C. Para avançar, convém ter conhecimento de alguns dos termos mais utilizados em calibração.

Precisão – É o quanto os dados fornecidos pelo sistema se aproximam dos valores reais, ou seja, quanto maior o erro, menor a precisão.

Tolerância - é o erro máximo permitido.

Repetibilidade - É a capacidade de um sistema indicar a mesma saída para uma serie de aplicações do mesmo sinal de entrada, num tempo de intervalo entre aplicações pequeno.

Estabilidade - É a capacidade de um sistema indicar a mesma saída para uma serie de aplicações do mesmo sinal de entrada, mas neste caso, num tempo de intervalo entre aplicações longo.

Reprodutibilidade - É a capacidade de um sistema indicar uma leitura quando uma entrada for constantemente aplicada ao sistema em várias ocasiões.

O **erro** pode ser determinado em termos da percentagem do valor real ou em termos de percentagem de desvio total da escala por (8) e (9) respectivamente.

$$Erro = \frac{Valor\ medido - Valor\ real}{Valor\ real} * 100\% \quad (8)$$

$$Erro = \frac{Valor\ medido - Valor\ real}{Valor\ maximo\ da\ escala} * 100\% \quad (9)$$

Tendo em conta a importância de utilizar instrumentos de medição que garantam a confiabilidade, todos os equipamentos utilizados nos ensaios foram calibrados.

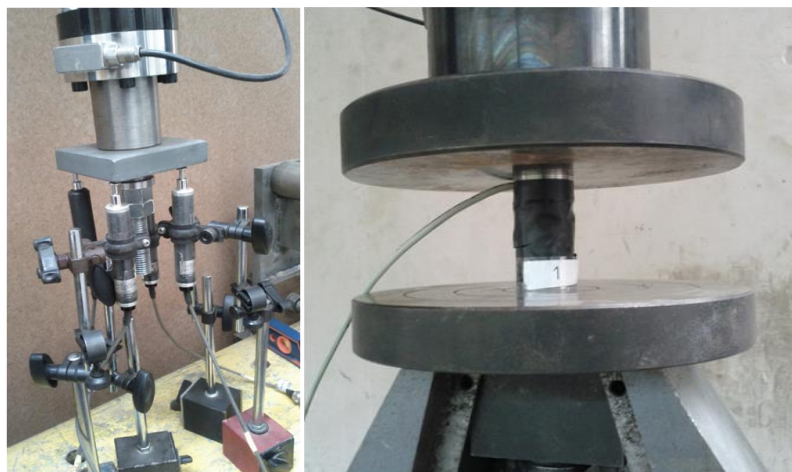


Fig. 44 - Calibração de defletómetros e célula de carga.

No gráfico seguinte é possível visualizar um exemplo de uma serie de medições efectuadas na calibração de uma célula de carga, neste exemplo já tinha sido aplicado um coeficiente⁹ de correcção a fim de igualar ao máximo os dados de saída com a célula de carga padrão¹⁰.

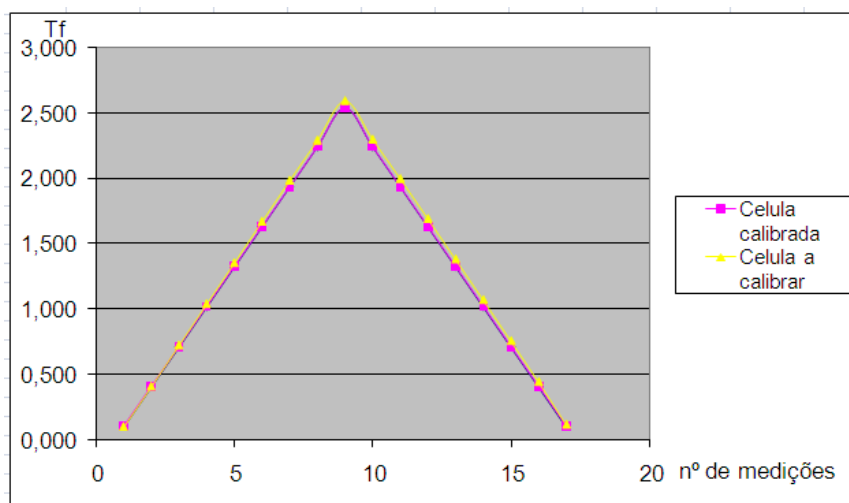


Fig. 45 – Gráfico de comparação entre células de carga.

Nos diversos equipamentos calibrados foram efectuadas varias repetições das medições com o objectivo de se obter dados para se ter valores de repetibilidade, estabilidade e reprodutibilidade, tendo em conta que os ensaios a efectuar precisam de grande precisão nas medições.

⁹ Coeficiente -Factor multiplicativo que permite corrigir valores numéricos.

¹⁰ Célula de carga padrão -Célula de carga com classe de precisão superior.

5. PREPARAÇÃO DOS ENSAIOS

5.1. Layout de Ensaios

Para a realização dos ensaios foi necessário idealizar o layout através de um programa de simulação 3D, nomeadamente o *Solidworks*, tendo em conta, as forças envolvidas, material disponível, localização, as utilidades necessárias, tais como tubagens hidráulicas, ligações eléctricas etc. Este processo foi evoluindo e melhorando conforme a necessidade e foram equacionadas diversas hipóteses até se chegar ao layout final. De notar que para a construção das peças envolvidas foi tentado reaproveitar ao máximo materiais já existentes no Laboratório a fim de minimizar os gastos e contribuir um pouco para não prejudicar mais o ambiente através da utilização de peças que já estariam prontas para ir para a sucata.

Os princípios que nuclearam a definição do layout foram:

- Sistema periférico de apoio completamente rígido, conseguido com um pórtico de grande rigidez encastrado à laje através de um sistema de varões *diwidag* de grandes dimensões e blocos de apoio trancados contra o mesmo e com lintel de ligação rígido.

- Apoios da viga e pontos de aplicação de carga indeformáveis na direcção da viga, rotulados com contacto flexível e fáceis de montar e reutilizáveis.

- Sistema de contraventamento em 4 secções, ambos os lados também estes fáceis de montar e reutilizáveis.

- Actuador rotulado no plano da estrutura.

- Layout preparado para receber os ensaios monotónicos, cíclicos, com cabo de pré-esforço e com câmara térmica.

O layout nas suas diversas opções, conforme o tipo de ensaio, foi o resultado de um trabalho iterativo de optimização e encontra-se representado nas figuras seguintes.

5.1.1. Layout do Ensaio para Cargas Monotónicas

Para os ensaios monotónicos, os provetes de vidro laminado são restringidos inferiormente nas extremidades com 2 roletes a simular apoios duplos e tendo a peça de carregamento mais 2 roletes de modo a que seja efectuado um ensaio de flexão em 4 pontos (4PB), lateralmente existem 8 contraventamentos realizados com varões roscados com ponteira em nylon que impossibilitam a instabilidade lateral do provete com um baixo coeficiente de atrito.

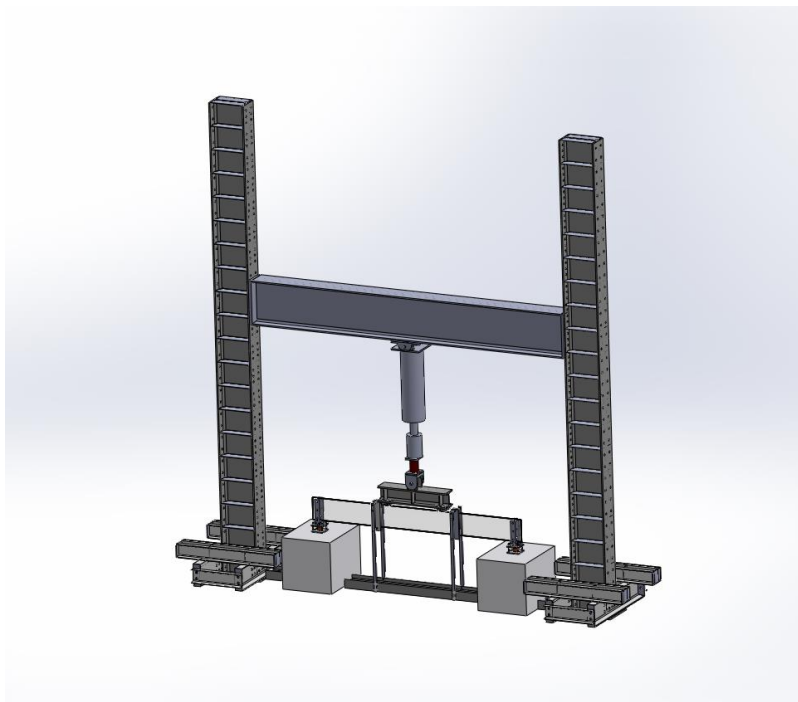


Fig. 46 - Layout do ensaio para cargas monotónicas.

5.1.2. Layout de Ensaio para Cargas Cíclicas

A diferença neste layout em relação ao anterior para ensaios monotónicos é que nas extremidades existem 4 roletes ao invés de 2 a simular apoios duplos sendo 2 na parte superior e 2 na parte inferior, tendo a peça de carregamento mais 4 roletes de modo a que seja efectuado um ensaio de flexão em 4 pontos (4PB) em ambos os sentidos, lateralmente continuam a existir os 8 contraventamentos.

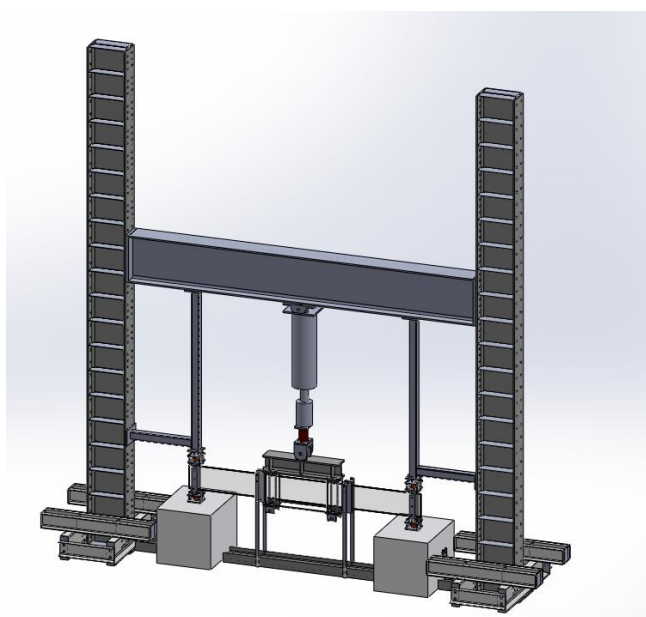


Fig. 47 - Layout do ensaio para cargas ciclicas.

5.1.3. Layout de Ensaio para Cargas Térmicas

No que diz respeito ao layout para cargas térmicas, este só difere dos anteriores pela câmara climática que teve de ser construída para o efeito.

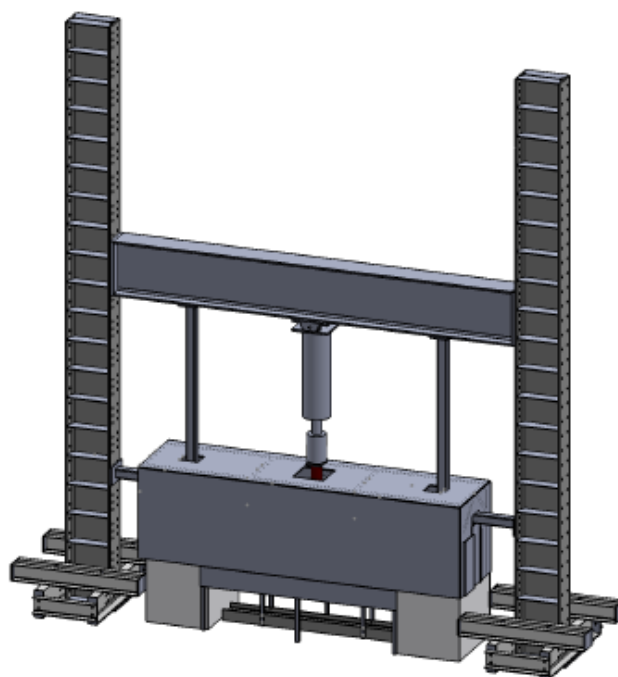


Fig. 48 - Layout do ensaio para cargas térmicas

Com uma estrutura interior em aço para conferir rigidez. As faces laterais foram constituídas por painéis acústicos que também fornecem bom isolamento térmico, para os topos e tampo da câmara construiu-se uma “sandwich” de gesso cartonado e lâ-de-rocha.



Fig. 49 - Pormenores de construção da câmara térmica.

Na câmara térmica, previu-se ainda uma zona rebaixada entre os blocos de betão, visível na figura seguinte, de modo a possibilitar a deformação da viga sem que houvesse interferências, aproveitando essa mesma zona para recolha de fragmentos de vidro resultantes da rotura da viga e permitir a instalação da instrumentação e tomadas de circulação de ar quente necessário para os ensaios térmicos.



Fig. 50 - Caixa inferior da câmara térmica.

A câmara térmica foi idealizada para ser possível a colocação do provete de vidro, toda a instrumentação de medição necessária e ainda a circulação do ar aquecido. As dimensões da câmara encontram-se na figura seguinte.

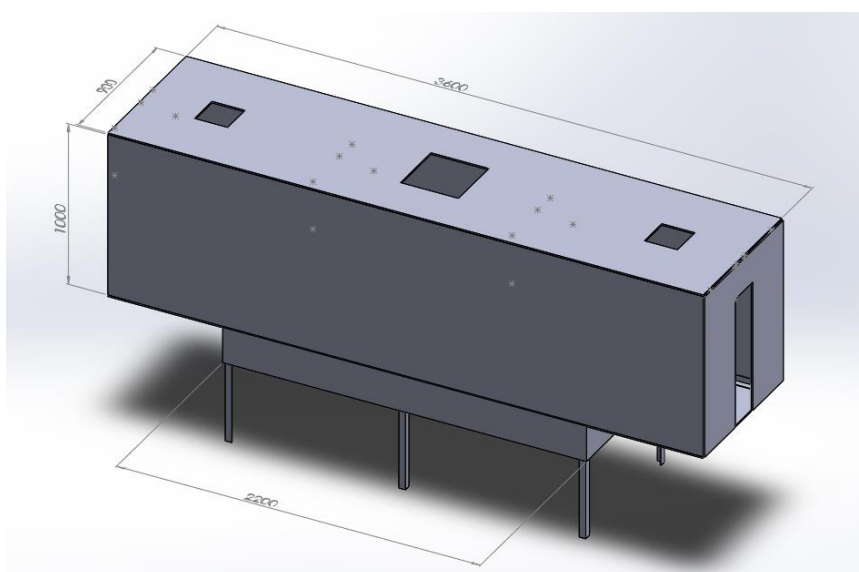


Fig. 51 - Dimensões da câmara térmica.

Foi ainda necessário implementar um sistema de aquecimento do ar para dentro da câmara. Esse sistema de aquecimento foi concebido através de um processo de circulação do ar, com recurso a um extractor (cor azul na foto) e a um forno com resistências cerâmicas por onde circula o ar num circuito em anel onde o mesmo é reaquecido pois o ar de admissão é o do interior da câmara. Nas figuras seguintes é possível verificar o sistema de circulação e aquecimento do ar, e um pormenor do interior do forno construído propositadamente para o efeito.



Fig. 52 - Sistema de circulação e aquecimento do ar.



Fig. 53 – Pormenor do interior do forno.

5.2. Testes de ensaio a isolamento/refrigeração térmica para células de carga

Para efectuar ensaios de carga térmica elevada, é necessário isolar as células de carga para que estas não se danifiquem, devido a ficarem sujeitas a temperaturas superiores às recomendadas pelo fabricante. O teste para o isolamento da célula de carga, foi idealizado para 6 horas a 80°C, sendo este o tempo máximo previsto para estabilização da temperatura no interior da câmara térmica no ensaio térmico com viga de vidro laminado. Para que não correr o risco de danificar uma célula de carga durante estes testes, foi usada uma já danificada.

O primeiro esquema de isolamento da célula de carga foi composto de uma maneira simples para se ter uma ideia da complexidade do problema. Foi construída uma caixa de madeira com revestimento interno em lã de rocha para envolver a célula de carga.



Fig. 54 - Preparação da caixa de isolamento para célula de carga.

Foram instalados 3 termopares para a medição e registo das temperaturas, um encontrava-se junto da célula de carga, a fim de avaliar a temperatura desta, um no meio do isolamento de lã de rocha e o ultimo dentro do forno para registo e controle de temperatura.

Este método de isolar a célula de carga provou-se não ser o ideal, tendo-se interrompido o teste, uma vez que as temperaturas atingidas junto à célula e entre a lã de isolamento ultrapassaram os 70°C, temperatura próxima da máxima para o bom funcionamento da célula, aliás como pode ser observado pelo gráfico seguinte.

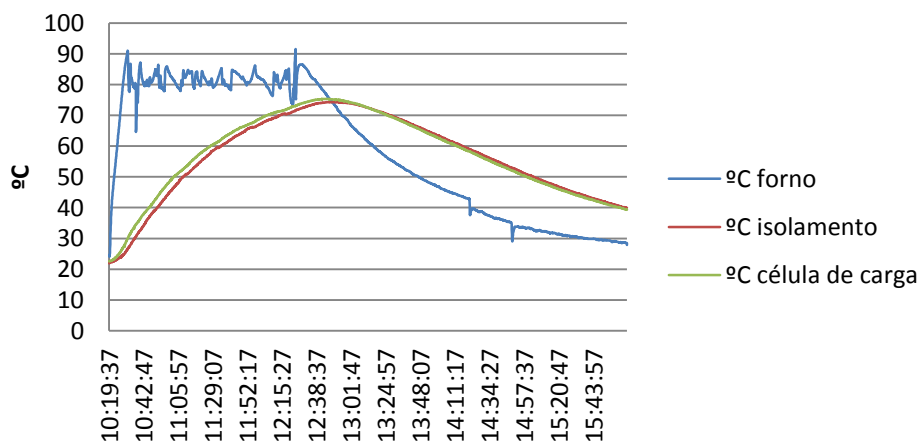


Fig. 55 - Temperaturas do teste ao sistema de isolamento com lã-de-rocha.

O gráfico representa as curvas da temperatura registada, em cada termopar, durante o teste. Observa-se que as temperaturas registadas junto à célula de carga e entre a lã-de-rocha são muito próximas, não revelando uma diferença significativa entre os locais. Ao fim de aproximadamente 2 horas, a temperatura junto da célula de carga atingiu os 70°C tendo-se interrompido o teste.

5.2.1. Sistema de Refrigeração a Água

Tendo falhado a tentativa anterior, decidiu-se usar uma serpentina colocada em volta da célula de carga, e por onde circulava água para provocar o arrefecimento da célula. Não sendo impeditivo e para melhorar o isolamento térmico da célula e tubo, este sistema foi envolvido em lã de rocha.



Fig. 56 - Sistema de arrefecimento a água para a célula de carga.

A água para a refrigeração da célula encontrava-se dentro de um recipiente inicialmente à temperatura ambiente com um termómetro para observar a evolução da sua temperatura, uma vez que devido às várias passagens pelo tubo ao redor da célula e sob o efeito térmico, iria aumentar a sua temperatura.

Neste modelo foram usados 2 termopares para o registo e medição das temperaturas atingidas, o primeiro entre a célula de carga e o tubo, para medir junto da célula, e o outro no forno para o registo das temperaturas deste.

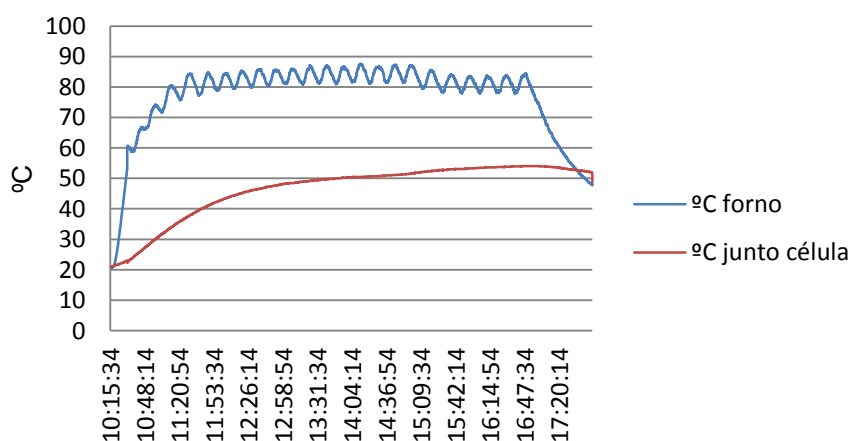


Fig. 57 - Temperaturas do teste ao sistema de refrigeração com serpentina.

Analisando o gráfico das temperaturas registadas, observa-se que este método resulta num bom arrefecimento da célula de carga, com temperaturas do meio envolvente a oscilar nos 80°C, a célula atingiu uma temperatura máxima de 54°C.

Pudemos então assumir que este será o método de arrefecimento a utilizar nos ensaios térmicos futuros.

5.3. Ensaio Térmico a provete com SentryGlass

Este ensaio tem a finalidade de observar o comportamento térmico e registo da temperatura numa amostra de vidro laminado com SentryGlass e que possui um termopar no interior. O ensaio decorrerá dentro dum forno em que se elevará a temperatura a 80°C e proceder-se-á ao registo das temperaturas e suas variações.

A amostra de vidro laminado com SentryGlass tem as seguintes dimensões em mm.

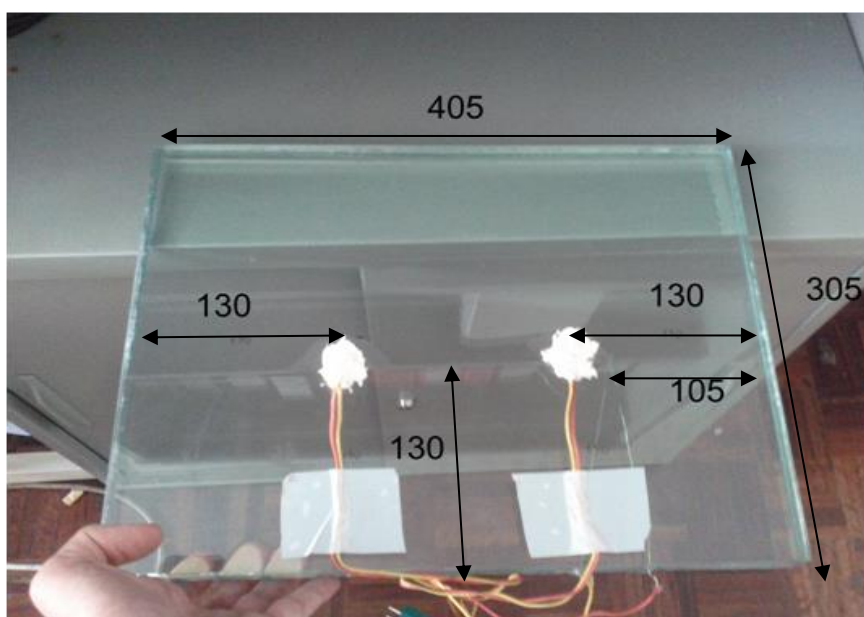


Fig. 58 - Amostra de vidro laminado com termopares no interior e exterior.

Foram ainda instalados 2 termopares na superfície do vidro, dentro do forno, foram colocados termopares para registo e comparação da temperatura envolvente da amostra.



Fig. 59 - Interior do forno

O objectivo deste teste foi também o de determinar o pré-acondicionamento térmico¹¹ necessário para os ensaios térmicos seguintes e de testar o sistema de colagem do termopar ao vidro. Observando o gráfico da evolução da temperatura nota-se que não há diferença apreciável do interior da película de SentryGlass para a superfície mas como esperado no início do ensaio, o interior por se encontrar mais protegido da fonte de calor possui temperatura inferior que ao fim de 1 hora acaba por se sobrepôr à temperatura do exterior, sendo este o tempo mínimo de espera para se garantir que todo o provete se encontra à mesma temperatura.

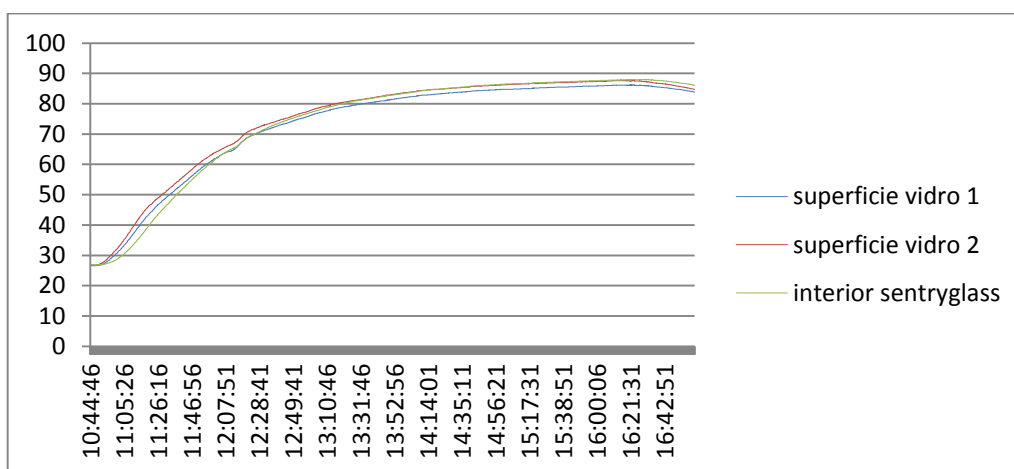


Fig. 60 - Variação da temperatura na superfície do vidro e no interior do SentryGlass.

¹¹ Condições físicas necessárias para garantir que todo o provete se encontra à mesma temperatura e avaliação do tempo que o interior do provete demora a atingir a temperatura exterior.

5.4. Testes de Ensaio à câmara Climática

5.4.1. Ensaio para estabilização da temperatura a 50°C na câmara térmica (1º Teste)

Para testar a câmara térmica e verificar se era possível uma boa estabilização da temperatura em todo o seu volume, procedeu-se a um teste com o objectivo de alcançar o patamar de 50°C.

Os termopares para obter os valores de temperatura foram colocados de modo a medir as temperaturas em três pontos onde futuramente estará o provete de vidro, um em cada ponto de localização das extremidades (na zona dos apoios), um ao centro (meio da viga) e ainda um quarto termopar na saída do forno das resistências para controlo e registo da temperatura destas, uma vez que é necessário elevar a temperatura acima da desejada para a poder estabilizar dentro da câmara.

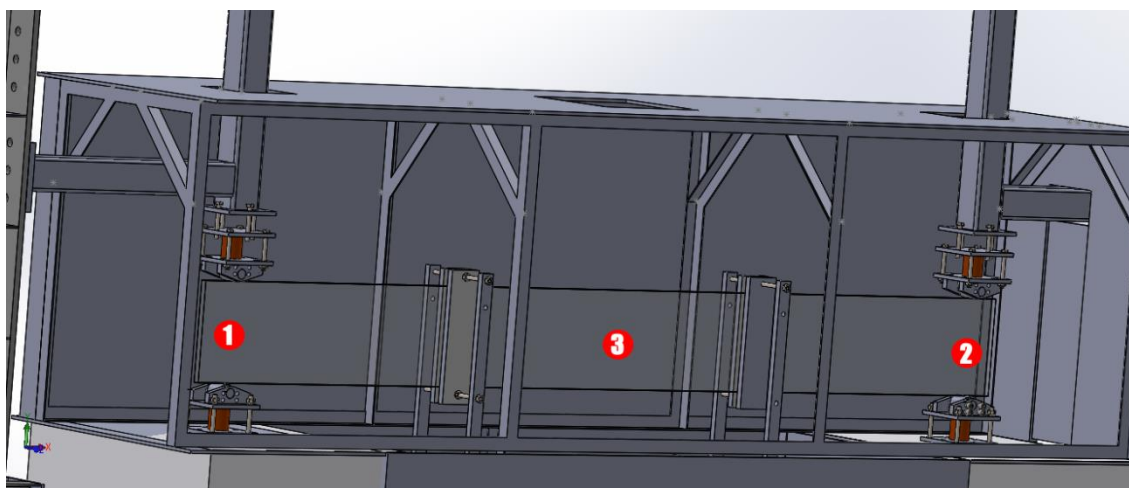


Fig. 61 - Localização e indicação dos termopares dentro da câmara para o teste a 50°C.

Como observado no gráfico seguinte, a temperatura de 50°C no interior da câmara era perfeitamente alcançável, no entanto nada ainda nos indicava que a câmara estivesse toda ela a essa temperatura.

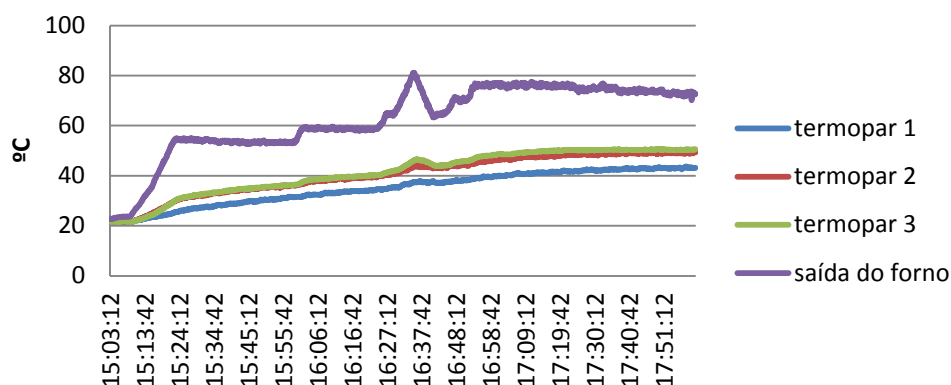


Fig. 62 - Temperaturas do teste à câmara climática a 50°C.

5.4.2. Ensaio para estabilização da temperatura a 80°C e teste de arrefecimento de células de carga. (2º Teste)

Para testar a estabilização da câmara à temperatura de 80°C, aproveitou-se para testar em simultâneo os sistemas de arrefecimento das células de carga (cinco no total). Neste ensaio para simular as células de carga utilizaram-se parafusos preenchidos com porcas para ficarem com dimensões idênticas.

Como visto anteriormente, o melhor sistema usado para o arrefecimento das células de carga é o sistema de serpentinas em volta das células. Cada serpentina apenas envolve uma célula, assim a água entra no sistema, refrigera a célula e sai, não passando por mais nenhuma célula, minimizamos o seu tempo dentro dos tubos expostos ao calor, posteriormente a água de retorno é arrefecida num sistema de termoventilador. Foram também colocados termopares entre a serpentina e o protótipo de cada célula de carga, para registo dos valores de temperatura.



Fig. 63 - Preparação do sistema de refrigeração e termopar para as células de carga.

Tal como no ensaio anterior a 50°C foram aplicados termopares nos pontos de extremidade e meio vão, onde se encontraria a viga. Juntamente a estes foram também aplicados termopares de vareta, para comparação. A meio da câmara foi ainda colocado um medidor de humidade.

Na figura seguinte é apresentado a localização da instrumentação para este teste. Em (1) encontra-se um termopar tipo K e termopar de vareta, e 2 células de carga (célula 1.1 e 1.2) montadas com o sistema de refrigeração e termopar (como já mostrado na figura anterior, em (2) encontra-se igualmente, termopar, vareta e células isoladas (célula 2.1 e 2.2), tal como em (1), em (3) encontra-se o termopar, o termopar vareta, uma instrumentação do sistema de refrigeração, para representar a célula de carga (célula 3) que se encontrará na viga de carregamento, e ainda um sensor de humidade. A entrada do ar quente faz-se pelo topo onde se encontra a marca (2).

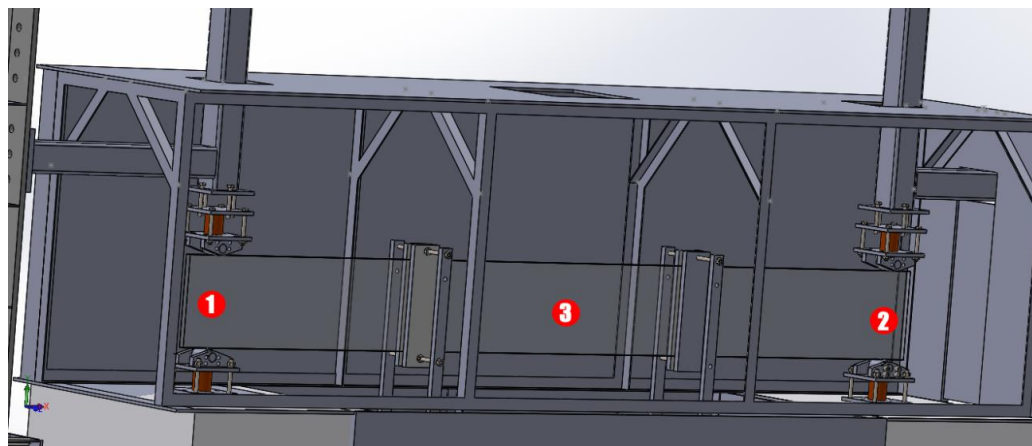


Fig. 64 - Localização da instrumentação na câmara térmica para o teste a 80°C.



Fig. 65 - Foto do sistema para refrigerar e isolar as células de carga.

Dos dados recolhidos conclui-se a estabilização da temperatura para a zona onde estava colocada a instrumentação ocorreu como previsto.

Comparando os termopares de vareta com os de tipo K, estes últimos registaram melhores valores de medição, pois nos 3 pontos diferentes da câmara climática registaram temperaturas muito mais próximas uns dos outros.

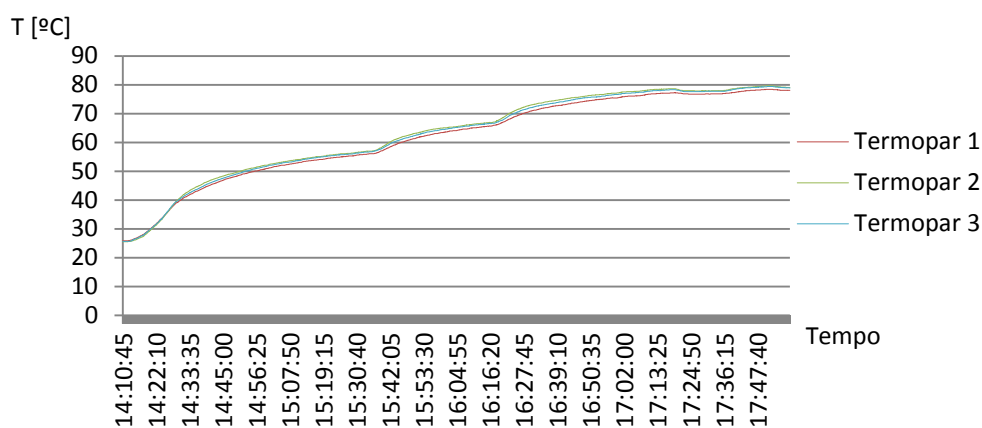


Fig. 66 - Temperaturas medidas pelos termopares tipo K.

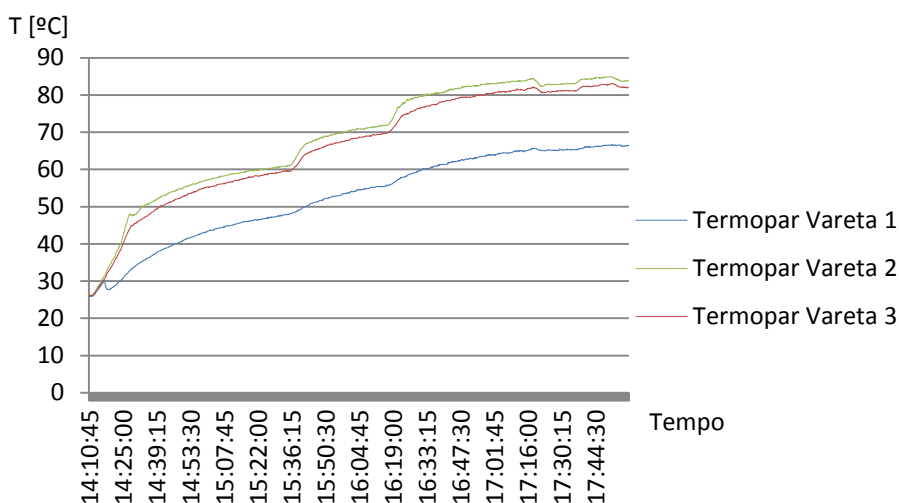


Fig. 67 - Temperaturas medidas pelos termopares de vareta.

No que diz respeito à refrigeração das células de carga, podemos concluir que se obteve um bom desempenho com este sistema de circulação e refrigeração por água nos tubos envolventes das células, com o auxílio de uma bomba e um termoventilador.



Fig. 68 - Equipamento para circulação de água na refrigeração das células de carga.

Como é perceptível no gráfico seguinte, a temperatura máxima atingida nas células de carga está compreendida entre os 30 e os 40°C, quando a temperatura na câmara é de 80°C.

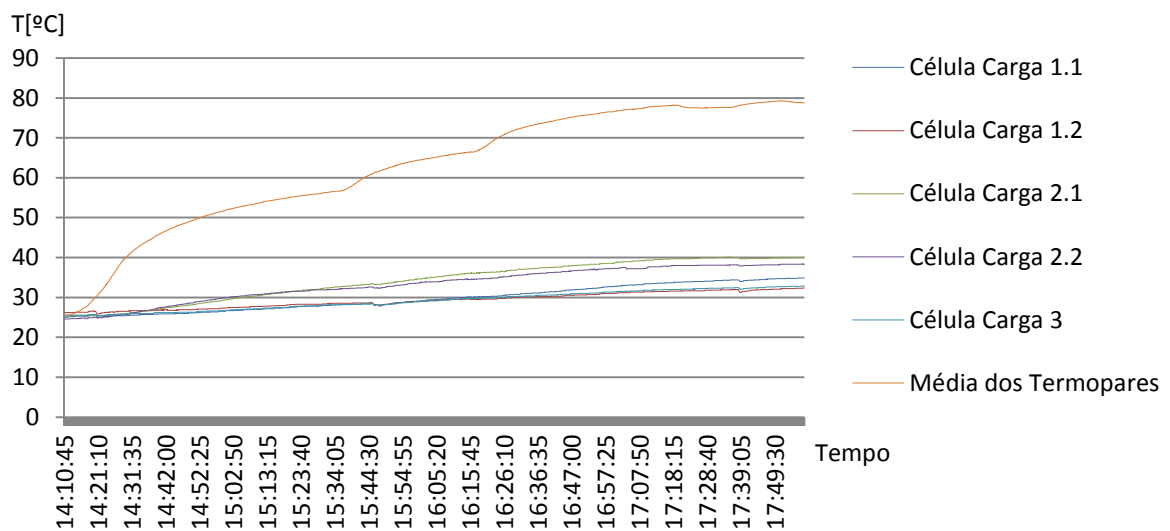


Fig. 69 - Temperaturas no interior da câmara e das células de carga.

No entanto ao mudar de posição em altura dos termopares a temperatura também alterava, estando mais elevada na parte superior da câmara e com diferenças também entre o lado esquerdo e direito, visíveis na figura seguinte e marcados com X, face a esta situação procedeu-se a alterações ao sistema com o objectivo de conseguir uma temperatura estabilizada e uniforme por toda a câmara que se revestiu de alguma complexidade na medida em que foi difícil controlar o escoamento de ar aquecido dentro da câmara.

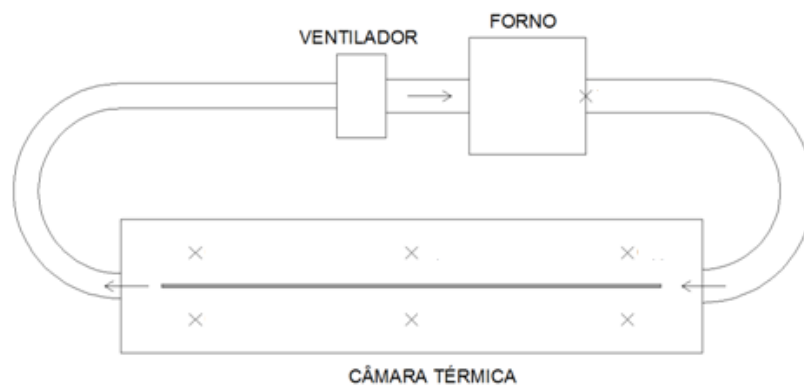


Fig. 70 – Esquematização da posição de leitura com termopares.

5.4.3. 3º Teste térmico

Neste 3º teste foram colocados mais 3 termopares, sendo que ficaram 3 de cada lado do provete de teste. Foi também alterada a entrada de ar para uma orientação mais vertical conforme pode ser visto na figura seguinte.



Fig. 71 – Câmara climática com entrada de ar na vertical.

Na figura seguinte os canais 4, 13 e 22 correspondem ao lado direito, os canais 5, 14 e 23 ao lado esquerdo e o canal 24 à saída do forno.

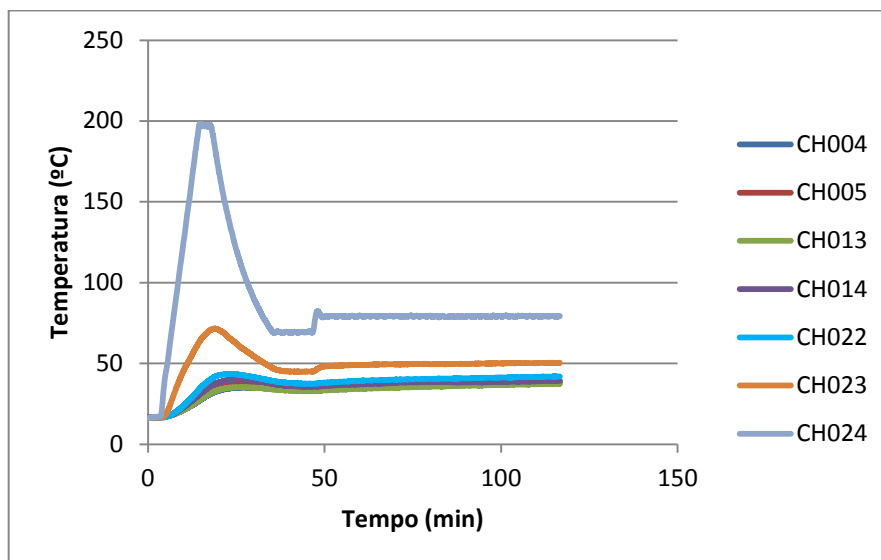


Fig. 72 - Evolução da temperatura nos termopares.

Analisando o gráfico nota-se perfeitamente que o canal 23 está a um nível superior em relação aos outros e em face deste resultado optou-se por uma nova iteração no sentido de conseguir uma temperatura estabilizada e uniforme dentro do forno.

5.4.4. 4º e 5º Testes térmicos

5.4.5.

Nestes 4º e 5º testes o esquema foi idêntico ao anterior com a excepção da colocação de um difusor de ar na entrada da câmara, sendo o primeiro para o patamar de 40°C e o segundo para 70°C, o objectivo do difusor era conduzir a uma entrada de ar mais simétrica na câmara.



Fig. 73 - Difusor

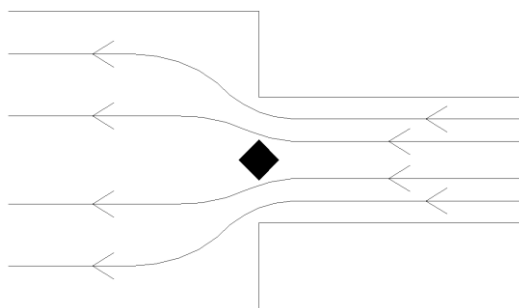


Fig. 74 - Esquematização do difusor

Com estas modificações foi possível um maior equilíbrio de temperaturas mas ainda com variações de 3°C, no entanto detectou-se um gradiente de 50°C desde o nível inferior ao superior.

5.4.6. 6º Teste térmico

Neste 6º teste o esquema de montagem foi em tudo idêntico aos 4º e 5º testes mas com a inclusão de 2 ventoinhas, uma em cada topo.



Fig. 75 – Esquematização da posição das ventoinhas.

Nestes ensaios foi verificado melhorias mas ainda existiam variações de temperatura entre o lado esquerdo e direito da câmara, assim como em altura.

5.4.7. 7º e 8º Teste térmico

Nestes testes como se verificou que a inclusão de ventoinhas era benéfica para a estabilização de temperatura optou-se por colocar mais 4 ventoinhas assim como colocar mais 2 níveis de termopares conforme as figuras seguintes.

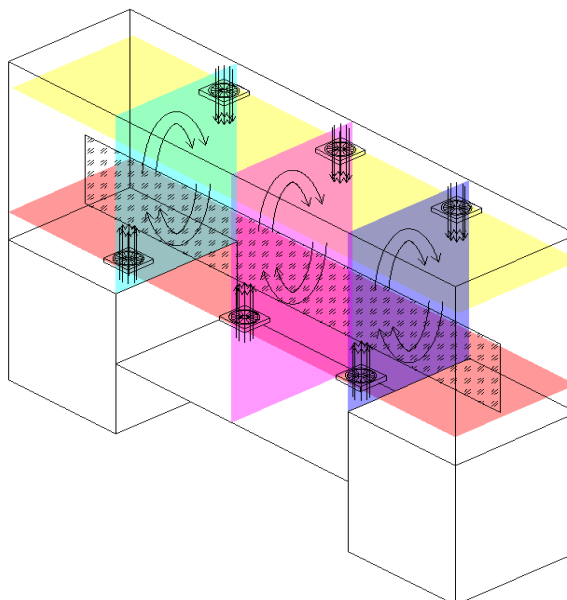


Fig. 76 - Representação tridimensional da posição das ventoinhas.

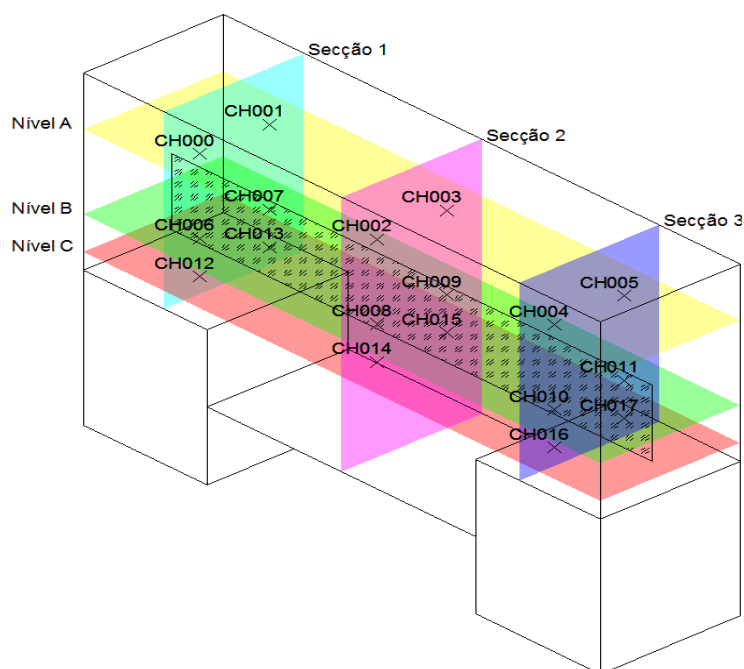


Fig. 77 - Representação tridimensional da posição dos termopares.

Nestes ensaios foram verificadas melhorias mas ainda existiam variações de temperatura que gostaríamos de anular, o que levou a que se fizessem alterações a nível da entrada e saída do ar.

5.4.8. 9º ao 13º Teste térmico

Nesta serie de testes foram testadas diversas estratégias de cargas térmicas tanto a nível de rácios de temperatura assim como de patamares de estabilização (40°C, 50°C e 70°C).

O esquema de entrada e saída de ar foi alterado para que fosse possível ter 2 entradas de ar, uma em cada topo e saída ao centro e por baixo e a posição dos termopares pode ser vista na figura anterior.

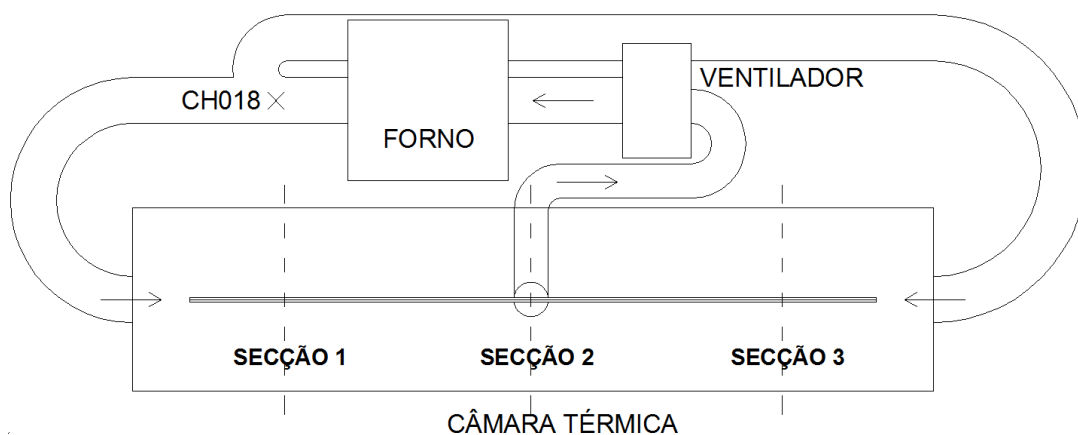


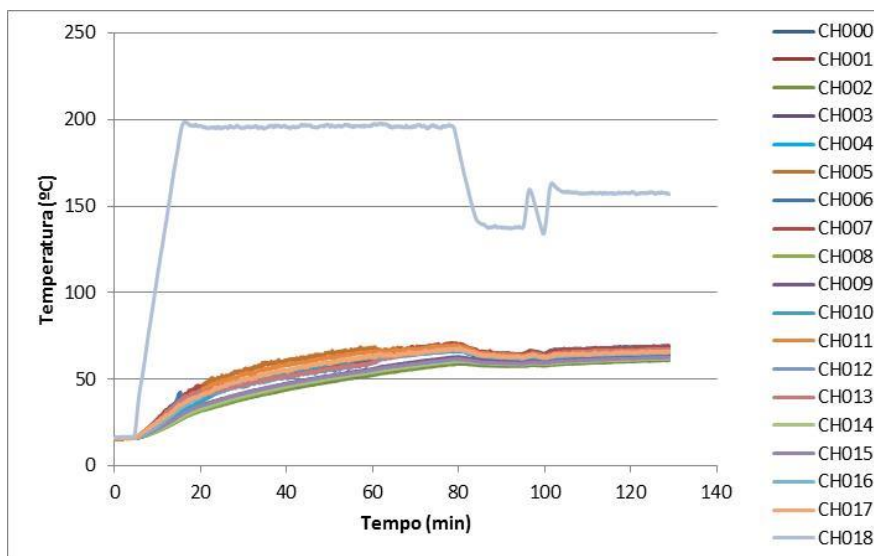
Fig. 78 - Esquema de tubagens da câmara térmica (2 entradas, 1 saída)

Foi também executado mais um difusor para a nova entrada de ar com registo para ser possível a regulação de caudal de ar, pois os tubos têm diferentes perdas de carga devido às curvas e comprimentos diferentes.



Fig. 79 – Difusor com registo para afinação de caudal.

Conforme pode ser visto no gráfico seguinte a estabilização da temperatura depois de todas estas alterações atingiu um patamar aceitável.



O passo seguinte passa por testar as temperaturas com um provete de vidro laminado.

5.4.9. 14º Teste térmico

Neste teste já foi colocado dentro da câmara térmica um provete instrumentado com 2 termopares na película de SentryGlass e outros 32 na superfície do vidro com o objectivo de também avaliar o tempo de pré-condicionamento.



Fig. 80 - Provede de vidro laminado com SentryGlass instrumentado com termopares

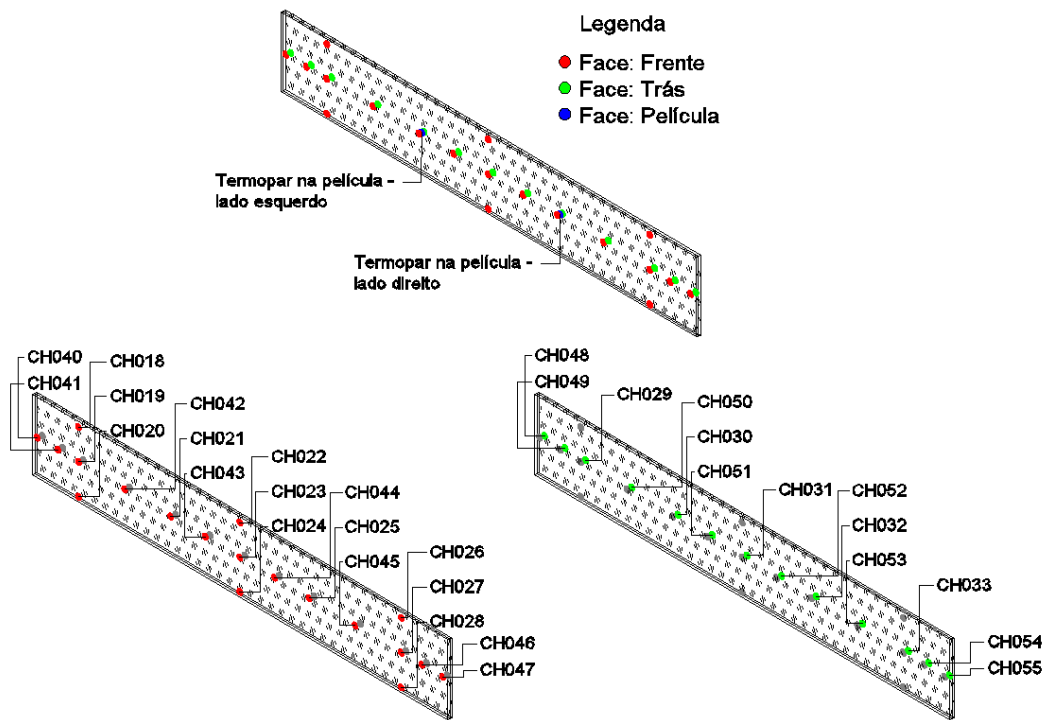


Fig. 81 - Posição dos termopares de ambas as superfícies da viga de vidro.

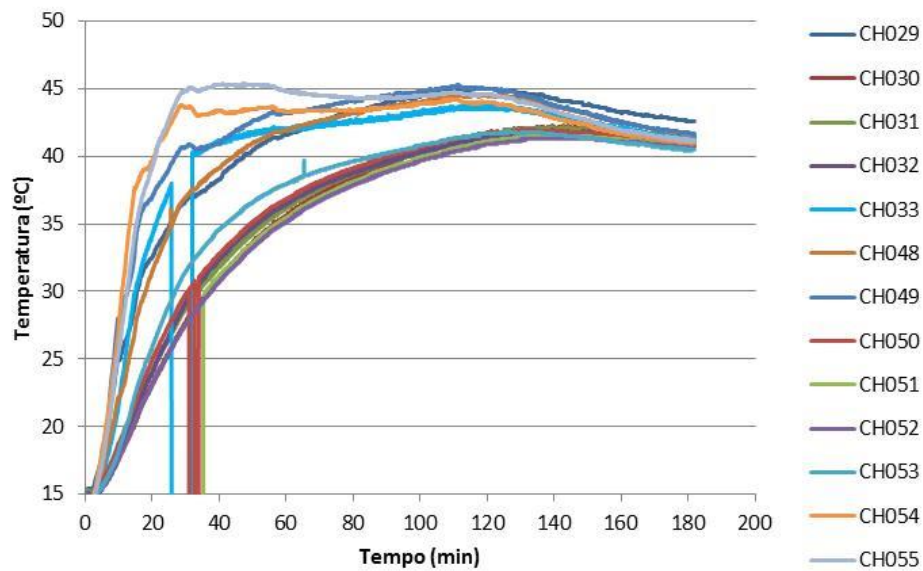


Fig. 82 - Evolução da temperatura dos termopares na superfície de trás da viga de vidro.

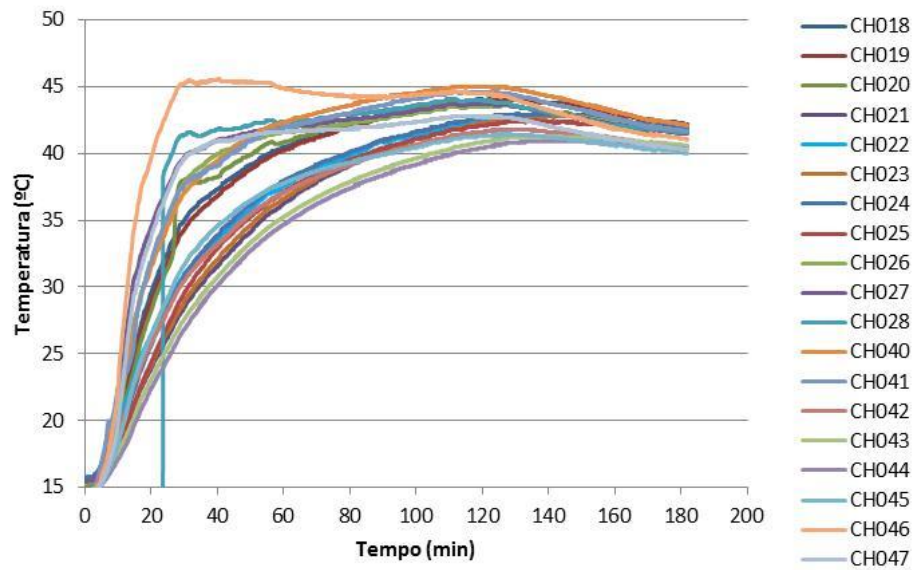


Fig. 83 - Evolução da temperatura dos termopares na superfície da frente da viga de vidro.

Nos gráficos anteriores onde aparece registos verticais significa que se teve de reajustar os fios dos termopares, ora desligando as fichas ora reposicionando para melhores desempenhos de medição.

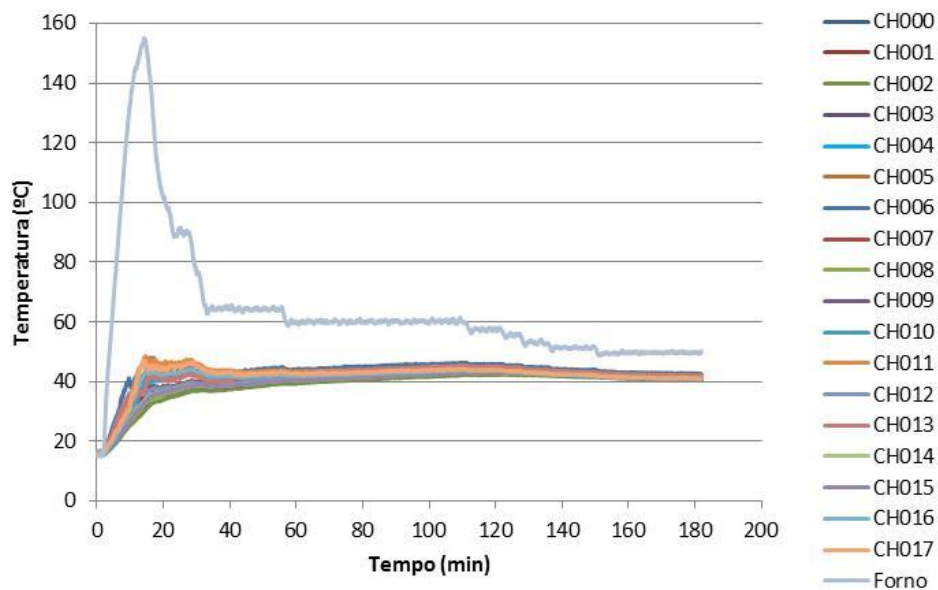


Fig. 84 Evolução da temperatura no ar da câmara térmica e do forno

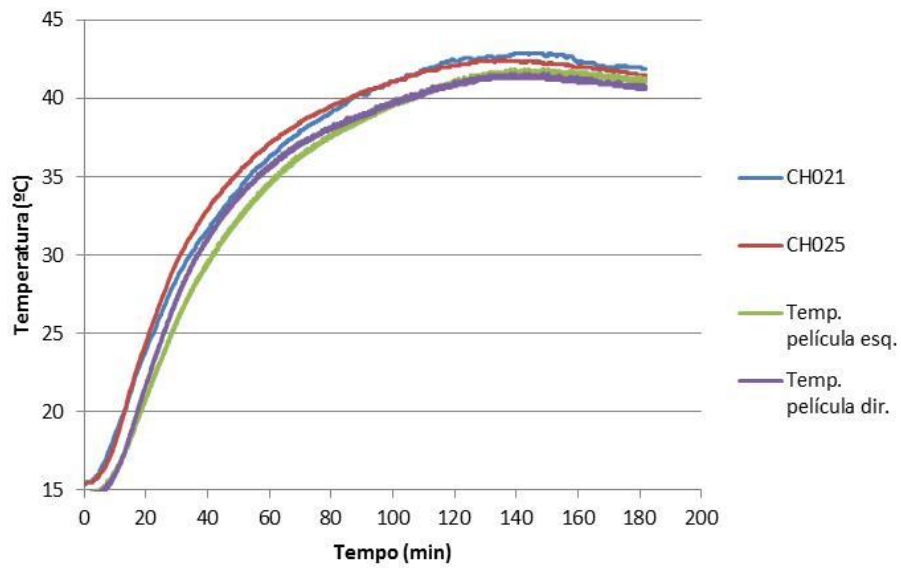


Fig. 85 - Comparação das temperaturas no interior da película e na superfície do vidro.

Embora tenha sido um trabalho exaustivo conseguiu-se alcançar o objectivo de estabilizar e controlar a temperatura dentro da câmara térmica e no provete, também se chegou à conclusão que os termopares no interior da película registam menor temperatura, pelo menos até aos 180 min., com tendência para convergir para os valores da superfície do vidro. Prolongando o tempo de aquecimento da câmara tudo indica que os valores de temperatura ficaram ainda mais próximos entre o interior da película e na superfície do vidro.

6. CARACTERIZAÇÃO REOLÓGICA DO VIDRO

6.1. Ensaio 4PB a provetes de vidro não laminados

O objectivo deste teste foi o de obter um conhecimento detalhado do comportamento reológico do vidro para calibrar o modelo numérico por elementos finitos, que reproduza os resultados de uma análise experimental.

O método de ensaio foi o de 4PB em que a carga monotónica é aplicada à distância dos terços da peça e a uma velocidade de 0,05mm/s, o que equivale a uma taxa de $2N/mm^2$ por segundo, seguindo as linhas orientativas da norma EN 1288-3:2000 Glass in buildings – Determination of the bending strength of glass – Part 3: Test with specimen supported at two points (4PB).

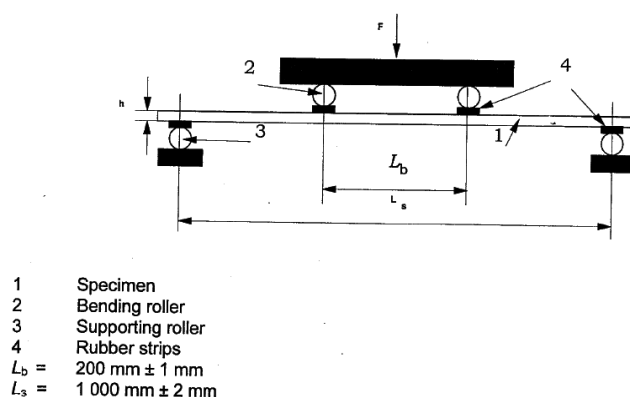


Fig. 86 – Esquema para ensaio 4PB segundo EN 1288-3:2000.

Algumas alterações nas dimensões dos provetes tiveram de ser feitas, de maneira a se poder ensaiar com o equipamento disponível, tendo o cuidado de se manter uma relação L/b próxima (Norma: $L = 1000 \text{ mm}$ e $b = 360 \text{ mm}$ / Ensaio: $L = 350 \text{ mm}$ e $b = 100 \text{ mm}$)

As dimensões e instrumentação dos provetes podem ser vistas nas figuras seguintes.

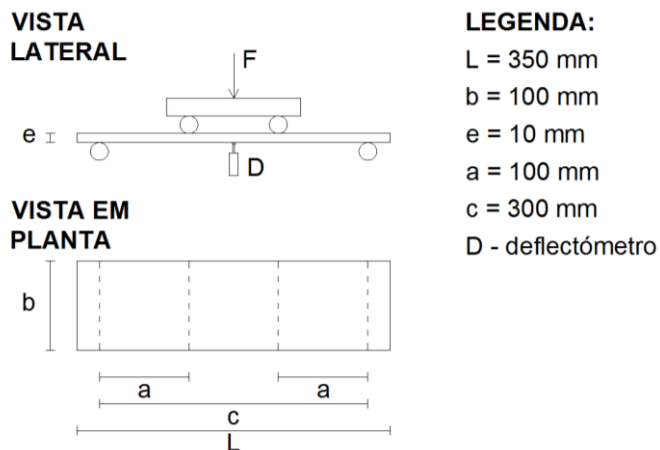


Fig. 87 - Representação esquemática do ensaio.

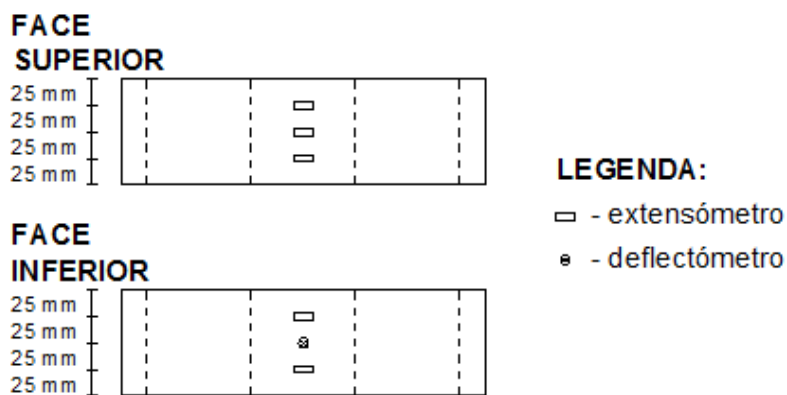


Fig. 88 - Representação esquemática da instrumentação.

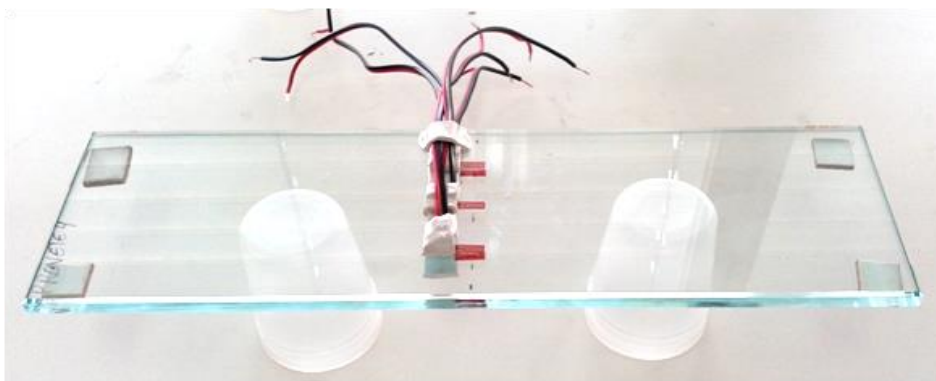


Fig. 89 - Provete instrumentado.

6.2. Optimização do layout do ensaio

Segundo a norma EN 1288, foram ainda colocadas borrachas nos pontos de apoio, mas estas como não seguiam as características de dureza indicadas na norma EN 1288, 3mm de espessura e 40 +/- 10 IRDH de dureza, não foi possível obter valores de ensaio rigorosos.

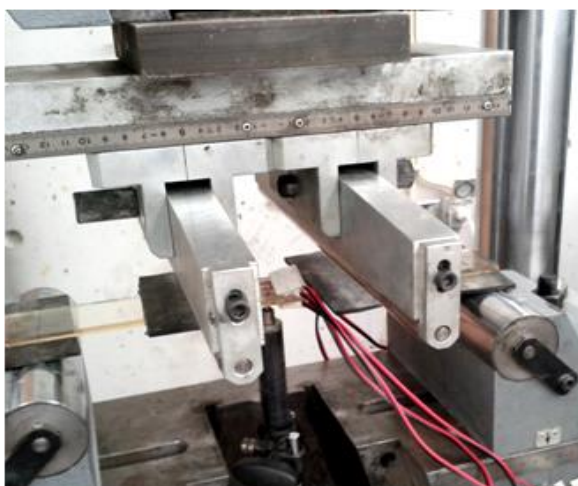


Fig. 90 - Layout do ensaio com borrachas intercalares.



Fig. 91 - Ensaio de caracterização da borracha.

Tendo em conta que ensaios efectuados por outros autores revelaram também grandes dispersões nos resultados optou-se por considerar a não utilização de elementos intercalares, sendo esta opção considerada como correcta devido a não ser notado qualquer iniciação de fendas junto aos apoios motivadas por tensões de contacto conforme pode ser vista na figura seguinte.



Fig. 92 - Padrões de ruptura dos diferentes provetes.

Tendo em vista dados de ensaios altamente rigorosos foram testadas 2 configurações de layout de ensaios antes da considerada final, a primeira era composta por 2 células de carga colocadas simetricamente em relação ao eixo da maquina, esta configuração provou-se não ser a ideal visto os valores das células de carga não serem iguais e por consequência provocarem cargas excêntricas no provete, na segunda configuração foi testada apenas uma célula de carga fixada por 6 parafusos mas que se revelou também não ser a ideal em virtude da possibilidade da existência de transferência de carga e atritos pelos parafusos.



Fig. 93 - 1º layout de teste de caracterização do vidro.



Fig. 94 - 2º layout de teste de caracterização do vidro.

Para solucionar os problemas expostos foi utilizado um sistema sem parafusos sendo a união das peças feita por uma rosca interna na célula de carga, este sistema é perfeitamente fixo e garante a ausência de atrito e forças de transferência pelos parafusos.



Fig. 95 - 3º layout de teste de caracterização do vidro.

6.3. Características do material e equipamento utilizado

Os provetes utilizados foram retirados de uma placa de vidro do mesmo lote dos provetes à escala real tendo também o mesmo tipo de acabamento de aresta, sendo a mesma biselada e polida. Os ensaios foram efectuados numa máquina universal de testes com capacidade de 60 ton. de marca *Servosys* e a aquisição de dados ficou a cargo de um datalogger de marca TML, a uma temperatura ambiente de cerca 20°C.



Fig. 96 - Máquina universal *Servosys* 60 ton.

6.4. Resultados dos ensaios

Nas figuras seguintes pode-se ver os resultados dos ensaios com o 1º layout e com a última, sendo notório a aproximação à curva nominal proposta pela norma EN-572-1 neste último e melhorado layout.

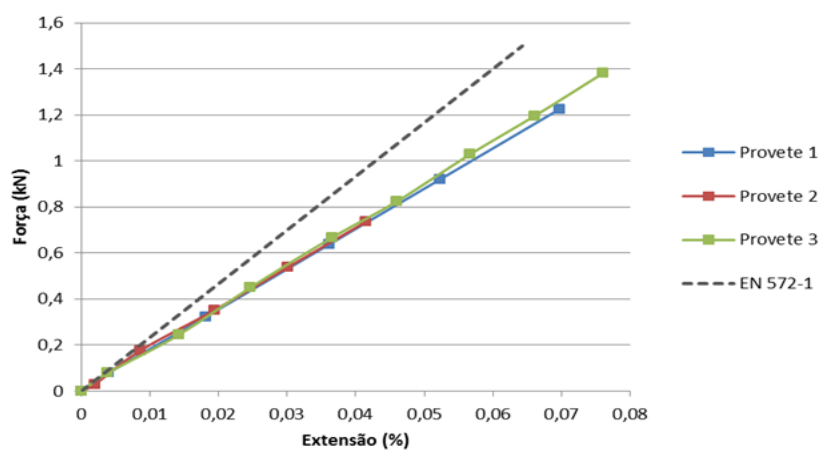


Fig. 97 - Resultados do ensaio com o 1º layout de teste.

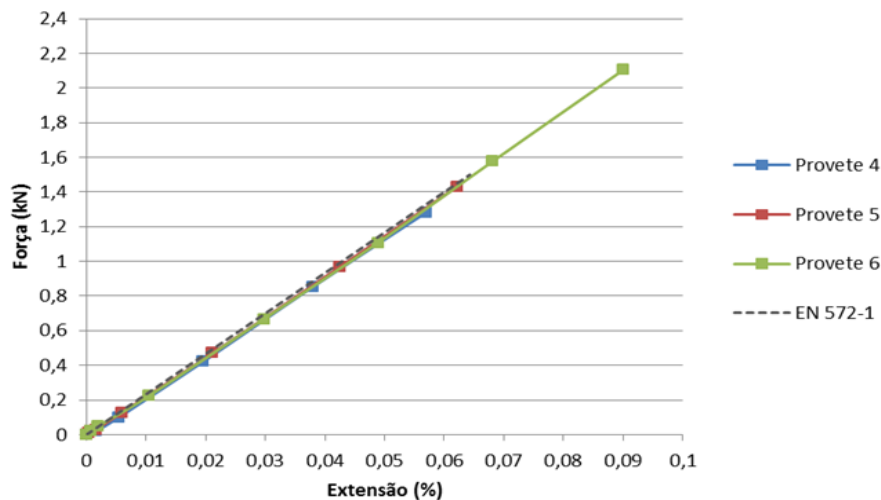


Fig. 98 - Resultados do ensaio com o 3º e ultimo layout de teste.

Nestes últimos ensaios os resultados apresentados são a força máxima ($F_{m\acute{a}x}$) atingida na rotura, a correspondente deformação vertical a meio vão ($\delta_{m\acute{a}x}$) e a média das leituras medidas em todos os extensómetros do respectivo provete ($\epsilon_{m\acute{e}d}$). Na tabela seguinte, ainda são indicadas as tensões máximas e módulos de elasticidade calculados a partir da força máxima e da deformação vertical atingidas. São ainda indicados dois valores para o módulo de elasticidade, cuja obtenção é feita através da integração da linha elástica, cuja equação é tabelada por diversos autores (10) e pela relação tensão extensão obtida através da lei de Hooke (11).

$$E = \frac{23}{648} \frac{F_{m\acute{a}x} c^3}{I \delta_{m\acute{a}x}} \quad (10)$$

$$E = \left(\frac{F_{m\acute{a}x} a e}{I} \right) \cdot \frac{1}{\epsilon} \quad (11)$$

| Nº do Provede | $F_{m\acute{a}x}$ (kN) | $\delta_{m\acute{a}x}$ (mm) | $\epsilon_{m\acute{e}d}$ (%) | $\sigma_{m\acute{a}x}$ (MPa) | E (GPa) | |
|---------------|------------------------|-----------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|-------------------------|
| | | | | | Integração da linha elástica | Relação tensão extensão |
| Provede 4 | 1.284 | 1.13 | 0.057 | 38.1 | 64.7 | 66.9 |
| Provede 5 | 1.431 | 1.24 | 0.062 | 42.5 | 65.7 | 68.4 |
| Provede 6 | 2.107 | 1.80 | 0.090 | 62.6 | 66.6 | 69.5 |

Tab. 10 – Resultados dos ensaios de caracterização monotónicos a 20°C.

6.5. Conclusões retiradas dos ensaios de caracterização

Verifica-se claramente diferentes tensões de rotura nos vários provetes, sendo consistente com os resultados encontrados em diversas publicações, sendo estas maiores ou menores do que os 45MPa referenciados na norma EN-572-1.

Quanto aos resultados do cálculo do módulo de elasticidade pelos 2 métodos indicados atrás, nota-se que ambos estão abaixo do valor de 70 GPa indicados pela mesma norma, mas já com notória aproximação. Estas diferenças podem ser devidas aos erros, embora pequenos, dos diversos equipamentos tais como os extensómetros e células de carga que são na ordem de +/- 1 %. (Jordão, 2013)

7. ENSAIOS EXPERIMENTAIS

Neste capítulo pretende-se abordar de forma simples os ensaios piloto ou seja o primeiro de cada série propostos no projecto, nomeadamente os ensaios monotónicos com e sem cabo de pré-esforço e o cíclico todos à temperatura ambiente e por último o ensaio com carregamento térmico e monotónico a 70°C. Estes ensaios revelam-se de grande importância visto de além fornecerem dados para a caracterização do material em termos de resistência e deformabilidade, serão os mesmos utilizados para detectar eventuais aspectos a corrigir no layout.

Pretende-se também que os ensaios forneçam dados para calibração dos modelos numéricos assim como transmitir técnicas de análise de possíveis problemas que possam colocar em caso a validade do ensaio.

7.1. Ensaio monotónico à temperatura ambiente

Este ensaio é o mais importante na medida que irá representar o esquema estrutural para as variações seguintes: Sistema com cabo de pré-esforço, sistema com carregamento cíclico e sistema com carregamento térmico. Na figura seguinte pode ser visto a estação experimental e correspondente provete antes da realização do ensaio.

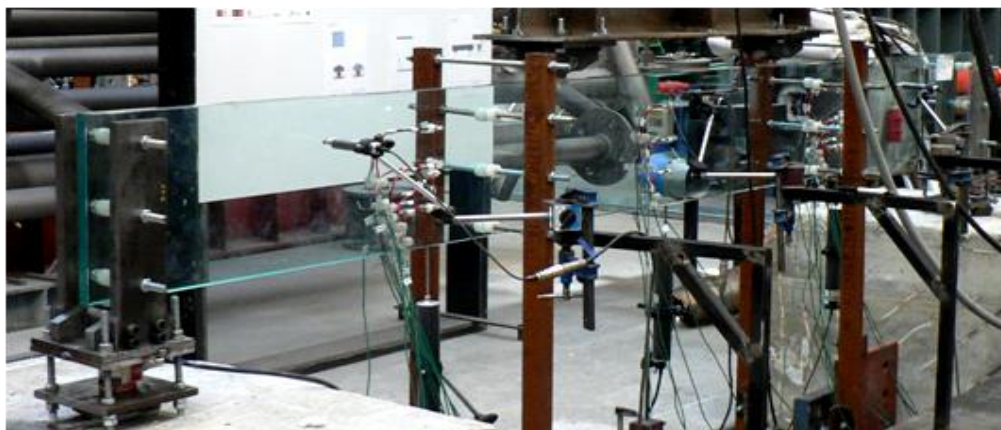


Fig. 99 - Imagem da viga antes do ensaio.

7.1.1. Geometria e instrumentação

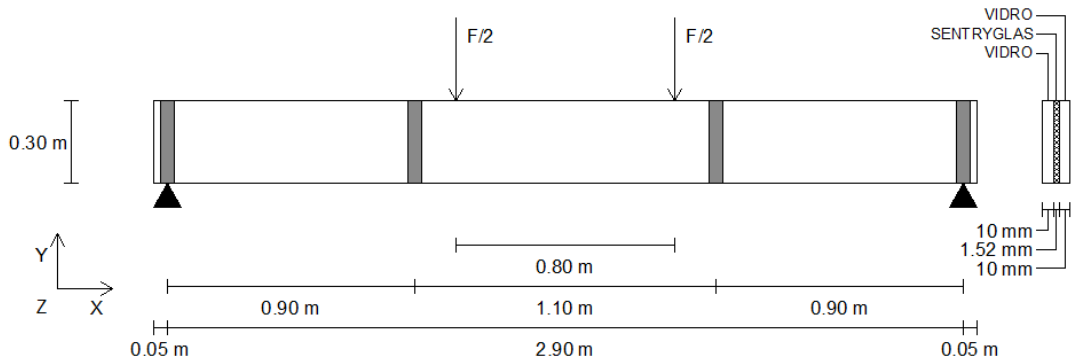


Fig. 100 – Modelo à escala real.

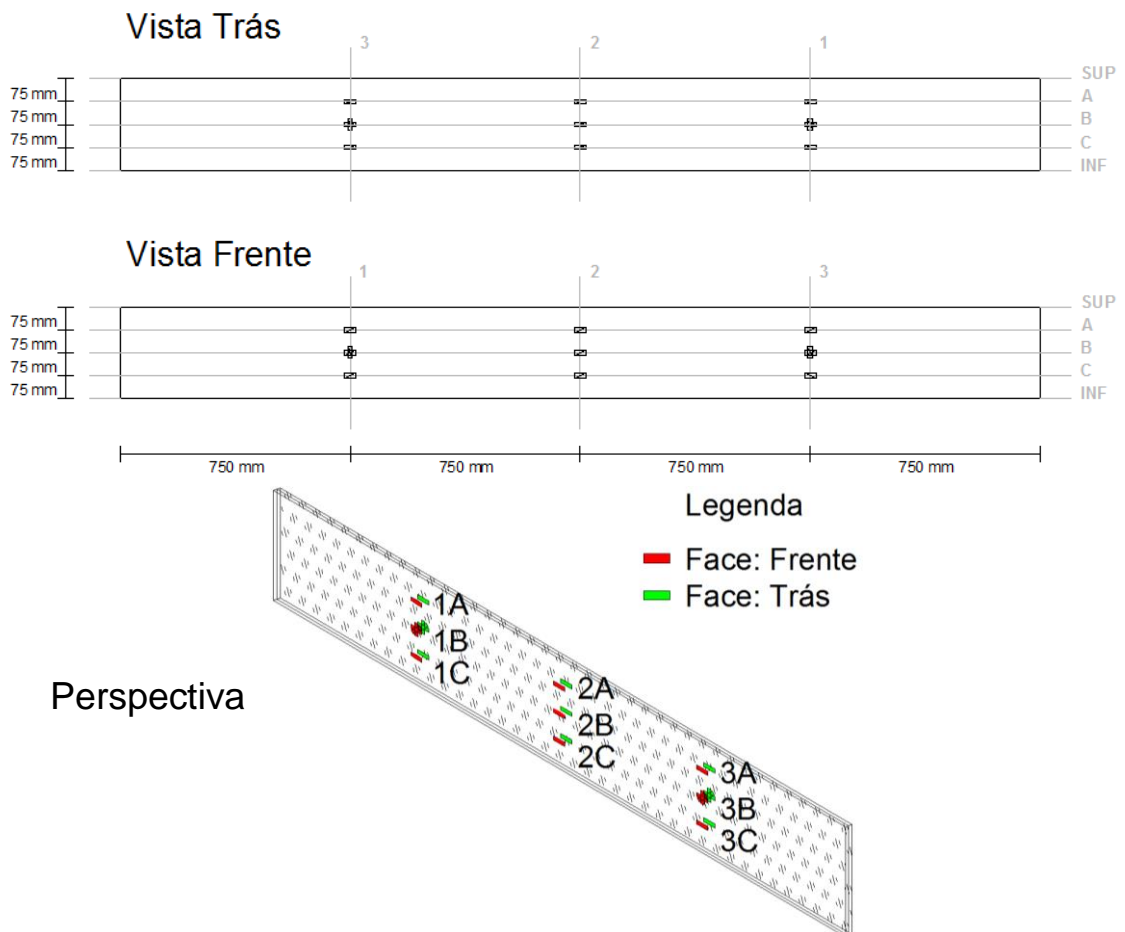


Fig. 101 - Mapeamento da localização dos extensómetros.

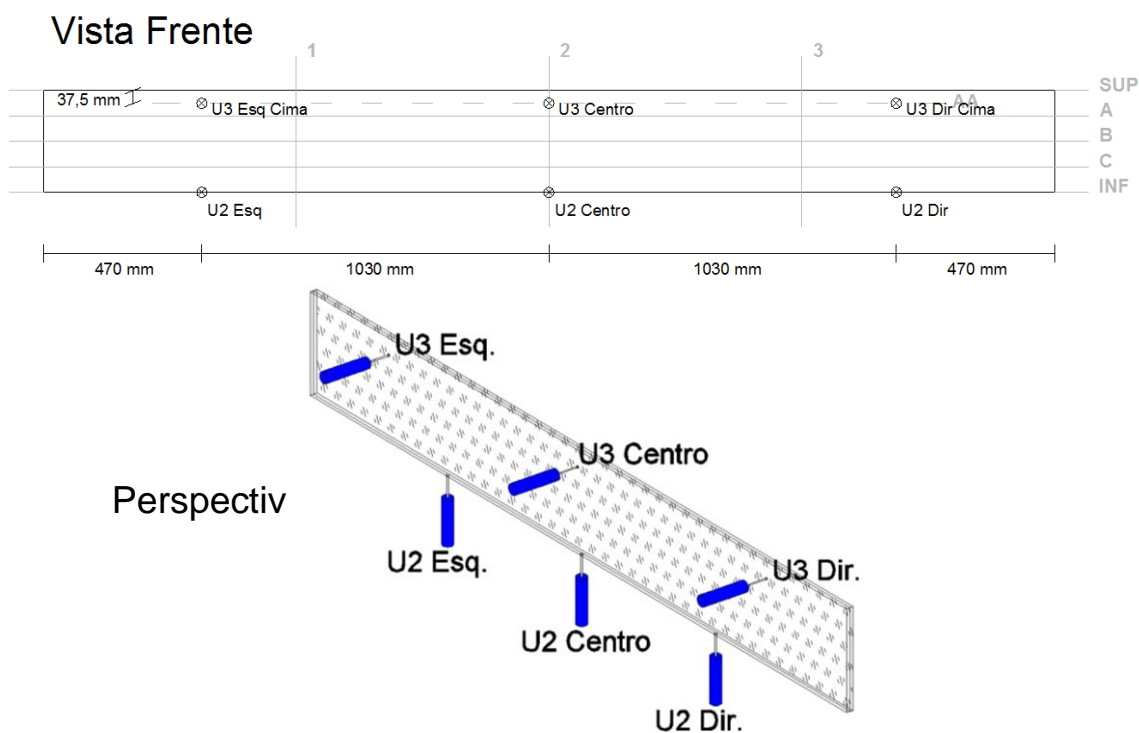


Fig. 102 - Mapeamento da localização dos deflectómetros.

| Nome do Agrupamento | Pontos de leitura | Parâmetro medido |
|---------------------|--|----------------------------|
| P1 | 1A-Frente 3A-Frente 1A-Trás 3A-Trás | Extensão na horizontal |
| P2 | 1B-Horizontal-Frente 3B-Horizontal-Frente 1B-Horizontal-Trás 3B-Horizontal-Trás | Extensão na horizontal |
| P3 | 1C-Frente 3C-Frente 1C-Trás 3C-Trás | Extensão na horizontal |
| P4 | 2A-Frente 2A-Trás | Extensão na horizontal |
| P5 | 2B-Frente 2B-Trás | Extensão na horizontal |
| P6 | 2C-Frente 2C-Trás | Extensão na horizontal |
| P7 | 1B-Vertical-Frente 3B-Vertical-Frente 1B-Vertical-Trás 3B-Vertical-Trás | Extensão na vertical |
| P8 | 1B-Diagonal-Frente 3B-Diagonal-Frente 1B-Diagonal-Trás | Extensão na diagonal (45°) |

| | 3B-Diagonal-Trás | |
|-----|------------------|-----------------------|
| P9 | U2 Esq U2 Dir | Deformação vertical |
| P10 | U2 Centro | Deformação vertical |
| P11 | U3 Esq U3 Dir | Deformação horizontal |
| P12 | U3 Centro | Deformação horizontal |

Tab. 11 - Composição dos agrupamentos e parâmetros medidos.

7.1.2. Análise do ensaio.

O ensaio é realizado com o esquema tipo 4PB, em controlo de posição e a uma velocidade de 0,05mm/seg até esgotamento da capacidade resistente da viga.

Interessa que exista uma distribuição simétrica de esforços, logo analisando as linhas 1 e 3, frente e trás que correspondem aos agrupamentos P1,P2,P3 com o auxílio dos respectivos gráficos, visíveis nas figuras seguintes. Para maior compreensão será também representada uma curva analítica para um $E=70\text{GPa}$.

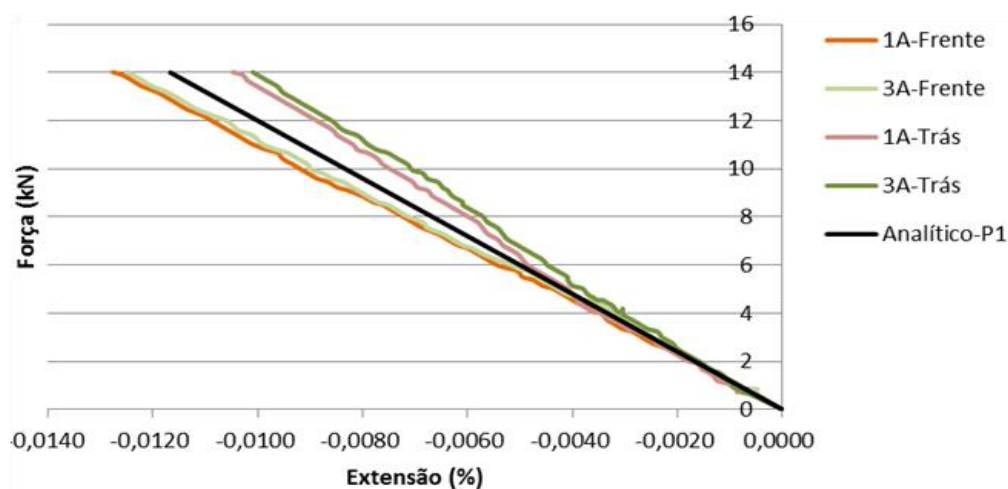


Fig. 103 - Gráfico de extensões para o agrupamento P1.

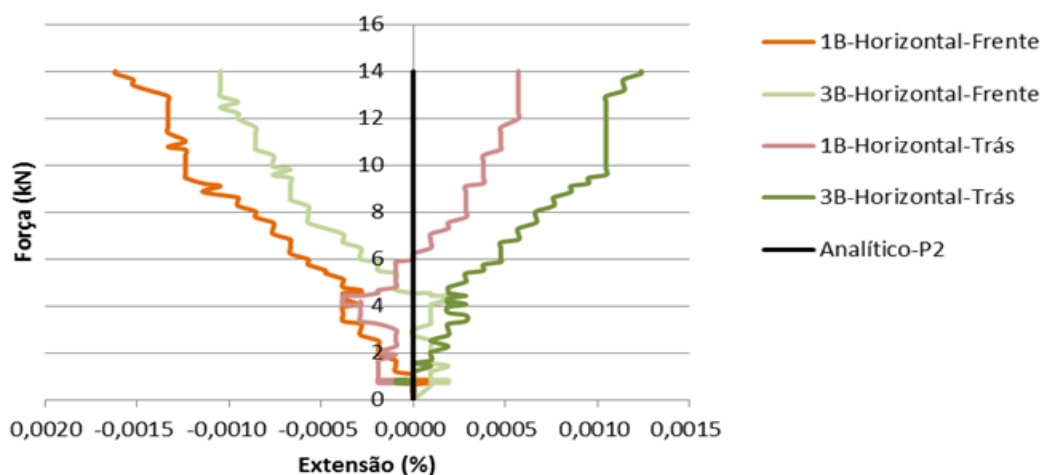


Fig. 104 - Gráfico de extensões para o agrupamento P2.

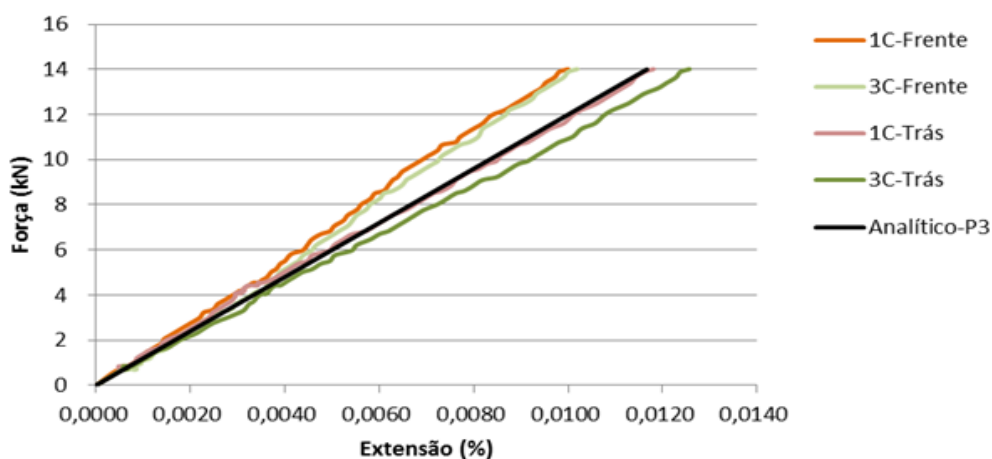


Fig. 105 - Gráfico de extensões para o agrupamento P3.

Nota-se então uma simetria de esforços em todos os agrupamentos das figuras representadas em cima, outro ponto importante é que eixo neutro se situe a meia altura da viga, caso contrário, existe evidências de alguma flexão fora do plano da estrutura, que é o caso que se pode constatar pelas figuras seguintes e que pode dever-se ao posicionamento da viga no layout de ensaio.

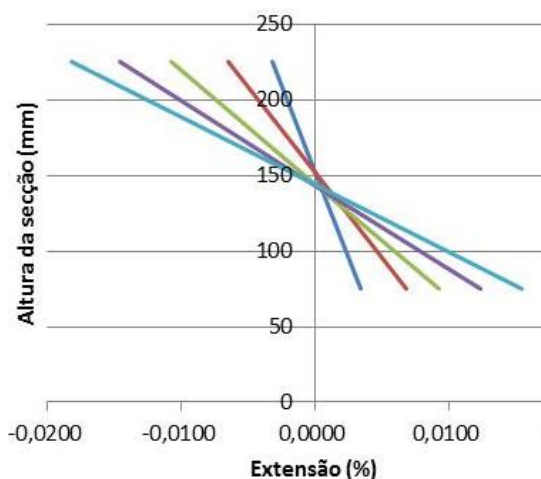


Fig. 106 - Evolução do eixo neutro na secção 2 à frente.

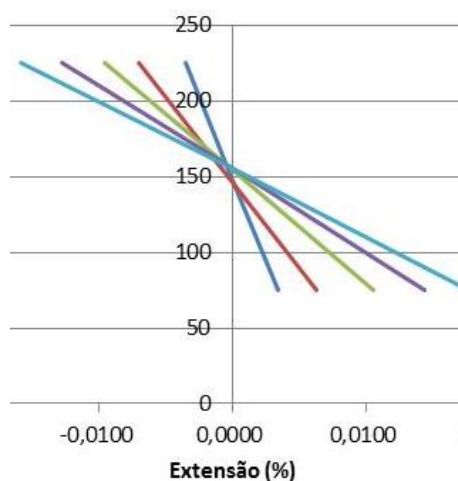


Fig. 107 - Evolução do eixo neutro na secção 2 na parte de trás.

Interessa também que a viga não instabilize devido à esbelteza do provete, essa análise pode ser feita com recurso ao cálculo analítico da carga crítica pela expressão de Euler (12), sendo Le o comprimento equivalente determinado conforme as condições de fronteira ou experimentalmente pelos extensómetros colocados nos níveis 1,2 e 3 e caso os dados alternem entre compressão e tracção para o mesmo lado respectivamente, então poderemos estar com problemas de instabilidade no provete, neste caso não existe evidências de instabilidade, visto os extensómetros apresentarem todos compressão no lado de trás e tracção no lado da frente.

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{Le^2} \quad (12)$$

Como o layout de ensaios é formado por acoplamento de diversas peças é provável a existência de folgas, estas provocam sinais de saída com dados errados. Por isso é necessário que o layout de ensaios seja perfeitamente rígido e sem folgas. Essas folgas e alguma eventual

deformabilidade nos elementos de alumínio dos apoios pode ser verificado com o recurso aos deflectómetros U2 Esq, U2 Centro e U2 Dir e por comparação das respectivas curvas analíticas dos agrupamentos P9 e P10 conforme pode ser visível nos gráficos seguintes.

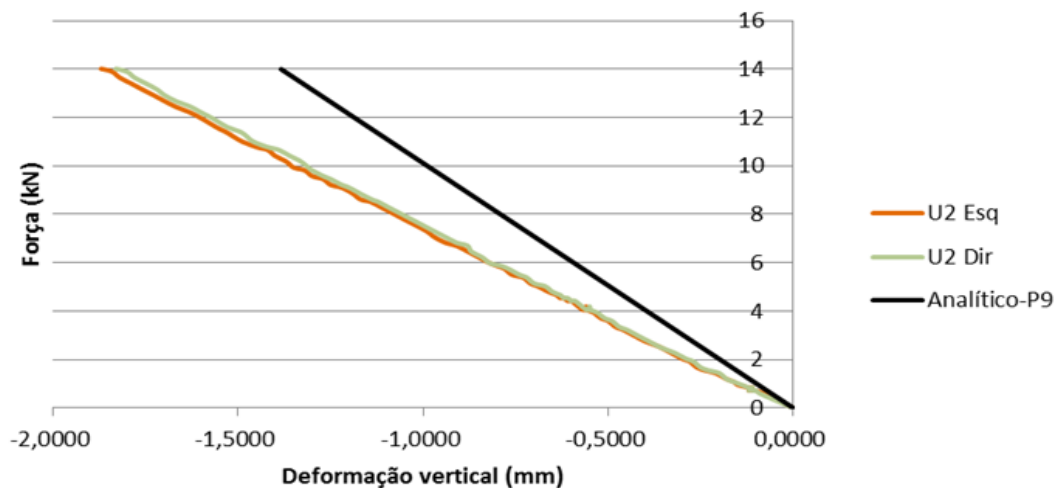


Fig. 108 – Gráfico força - deslocamento para o agrupamento P9.

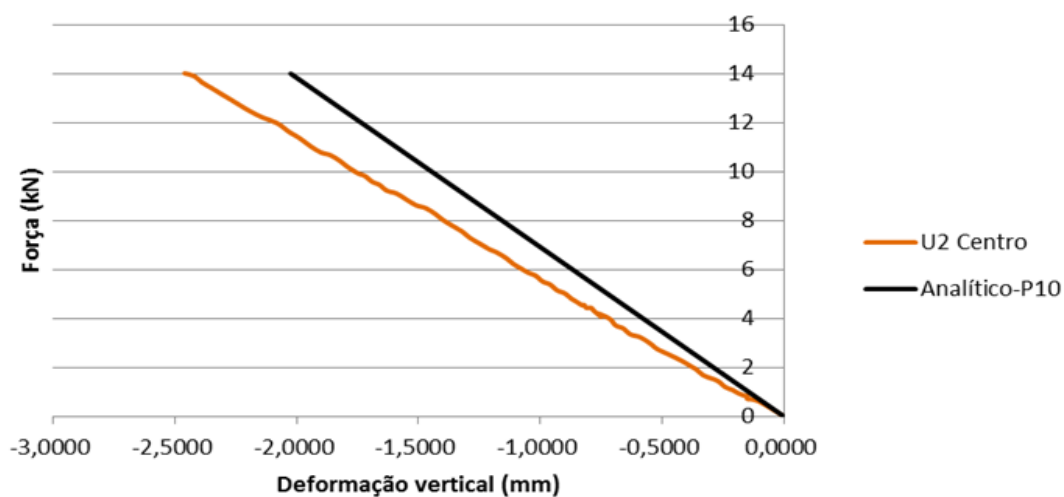


Fig. 109 - Gráfico força - deslocamento para o agrupamento P10.

Nota-se então um desvio em relação à curva analítica que deverá ser motivado pelo deslocamento de corpo rígido associado as folgas e possíveis deformações dos elementos de alumínio intercalados nos apoios, no entanto como a diferença é constante poderá ser utilizado um factor de correcção para avaliar os restantes dados.

7.1.3. Optimização do layout

A análise dos resultados do ensaio permitiu tirar conclusões sobre aspectos a melhorar nos próximos ensaios, nomeadamente:

- Melhorar o processo de colocação e ajuste da viga no layout de ensaio, garantindo a sua verticalidade.

- Melhorar o alinhamento dos apoios e dos pontos de contacto da viga com o carro de carga, de modo a evitar flexão fora do plano.

- Eliminar ou reduzir ao máximo as folgas nos aparelhos de apoio, de modo a evitar o deslocamento vertical de corpo rígido que aparece nas leituras dos deflectómetros que deveriam registar apenas a deformação por flexão.

7.2. Ensaio monotónico à temperatura ambiente com cabos de pré-esforço

Este ensaio tem o esquema base semelhante ao ensaio anterior com a excepção da inclusão de 2 cabos de aço com a função de pré-esforçar o provete.

Os objectivos deste ensaio são comuns aos referidos no ensaio anterior, tendo neste caso o interesse de verificar as alterações produzidas pelo pré-esforço.

7.2.1. O sistema de pré-esforço

O pré-esforço é aplicado ao provete através de 2 cabos de aço com 10 mm de diâmetro, previamente esticados, para eliminar folgas existentes entre filamentos.

Ao conceber o sistema foi dito em conta diversos objectivos nomeadamente:

- Evitar furos no provete para não alterar suas propriedades.

- Evitar ao máximo ligações coladas, pois além de ser um processo moroso devido ao tempo de cura do adesivo, inviabiliza o reaproveitamento das peças envolvidas.

- Os cabos tem de ter liberdade de rotação na ancoragem para poderem acompanhar as deformações ao longo do ensaio.

- O sistema deve ser fácil e rápido de montar.

- Deve ser possível a medição das forças envolvidas no cabo, nomeadamente através de células de carga feitas propositadamente para o efeito.

- O sistema de desviadores dos cabos devem interferir o mínimo possível de maneira que se transfira as forças verticais ao provete de forma adequada.

Nas figuras seguintes estão as representações do sistema.

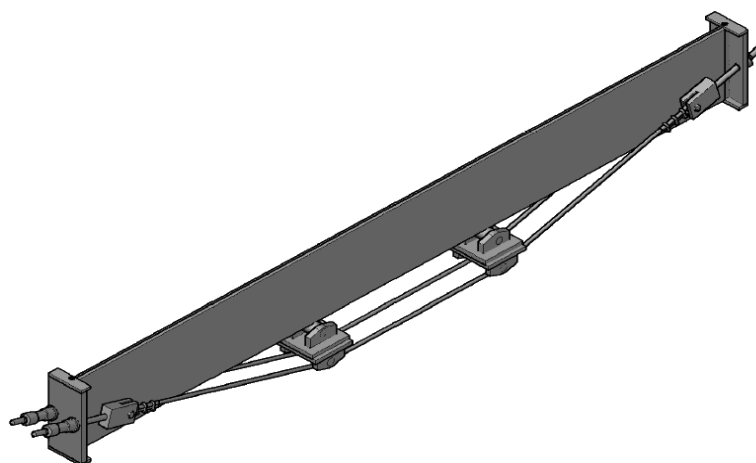


Fig. 110 – Representação esquemática do sistema do provete pré-esforçado.

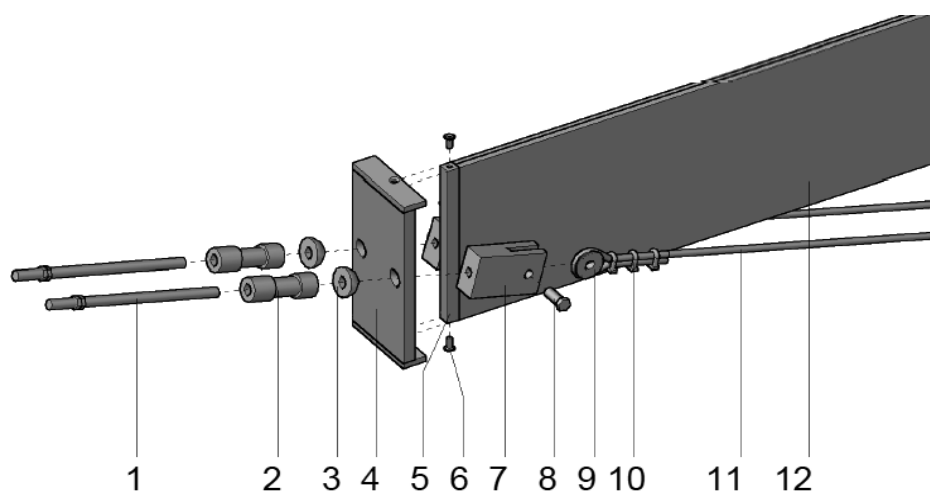


Fig. 111 - Pormenor do sistema de ancoragem do cabo ao provete (sistema explodido).

Onde:

- 1-Varão roscado M16 com duas porcas M16;
- 2-Células de carga;
- 3-Semiesferas com furo de 20 mm;
- 4-Chapa de aço;
- 5-Perfil metálico para colagem ao vidro;
- 6-Parafuso M12 com 20 mm de comprimento;
- 7-Elemento metálico de ligação entre o varão e o cabo;
- 8-Parafusos M16 com 40 mm de comprimento;
- 9-Olhal com furação de 16 mm;
- 10-Cerra-cabos de 10 mm;
- 11-Cabo de pré-esforço de 10 mm;
- 12-Vidro laminado de 10+1,52+10 com vidro simples e SentryGlas.

Os desviadores são compostos por 2 roletes, um para transferir a força vertical ao provete e outro para acomodar os cabos de pré-esforço através de 2 sulcos, para manter os cabos na posição, com o mínimo atrito e ser causar restrições à sua deformação longitudinal, conforme pode ser visto na figura seguinte.

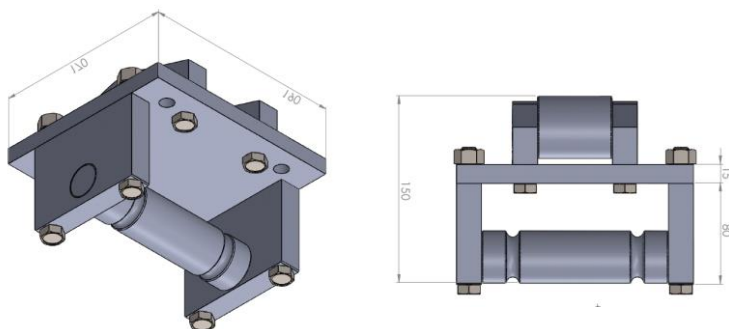


Fig. 112 - Pormenor dos desviadores dos cabos.

A aplicação do pré-esforço é feita através do aperto das porcas que se encontram no elemento 1. Pode-se ver nas figuras seguintes o sistema de ancoragem, o processo de aplicação do pré-esforço e o provete antes do ensaio.



Fig. 113 – Sistema de ancoragem e sistema de medição de forças no cabo.



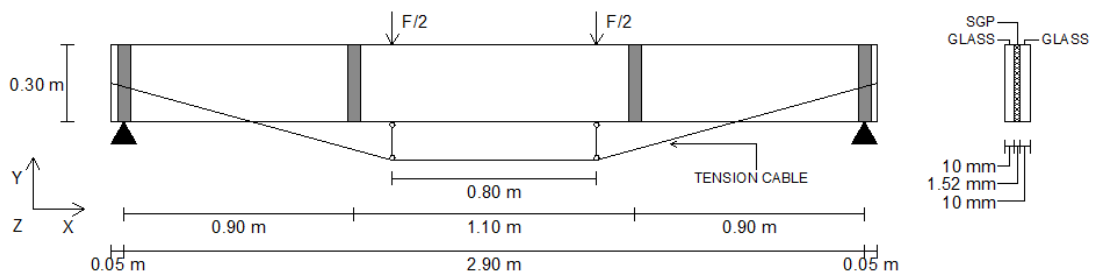
Fig. 114 – Processo de aplicação do pré-esforço.



Fig. 115 – Pormenor do provete antes do ensaio.

7.2.2. Geometria e instrumentação

A Figura seguinte representa a geometria da viga e respectivo traçado e posição do cabo. Em termos de instrumentação, para além dos deflectómetros aplicados no ensaio anterior, foram adicionados outros três deflectómetros (10 mm de curso) a medir deformações horizontais (Figura). Foram também adicionados mais dois extensómetros, relativamente ao ensaio anterior. Estes são colocados apenas na face da frente, mas nas fibras superior e inferior da secção central. A sua medição é feita na direcção horizontal.



Vista Frente

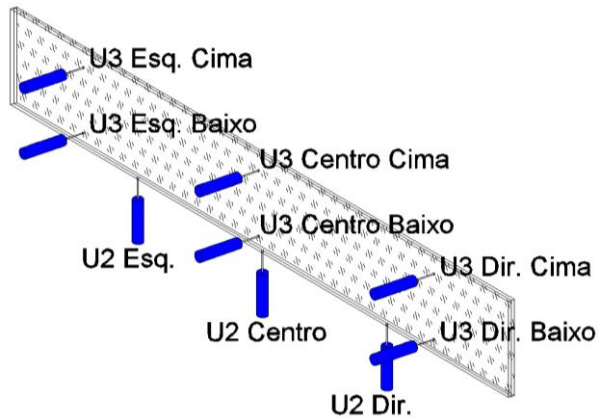
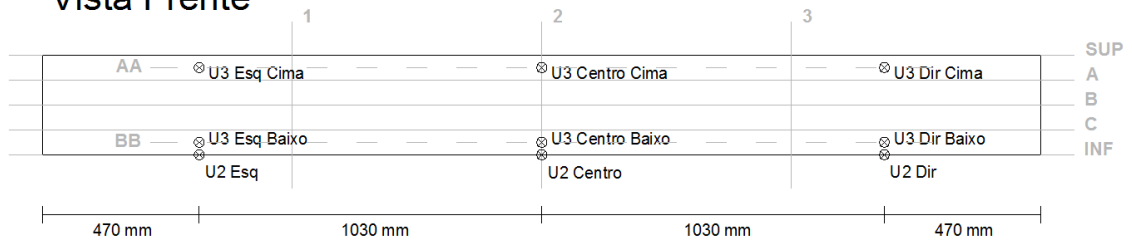
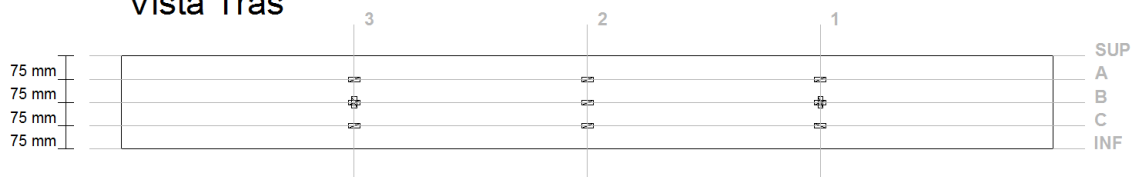


Fig. 116 - Mapeamento da localização dos deflectómetros.

Vista Trás



Vista Frente

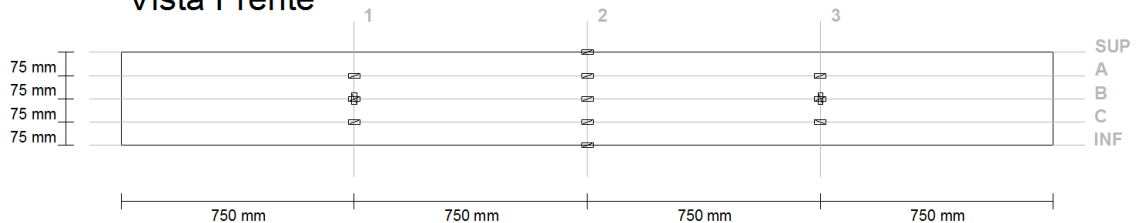


Fig. 117 - Mapeamento da localização dos extensómetros.

| Nome do Agrupamento | Pontos de leitura | Parâmetro medido |
|----------------------------|--|----------------------------|
| P1 | 1A-Frente 3A-Frente 1A-Trás 3A-Trás | Extensão na horizontal |
| P2 | 1B-Horizontal-Frente 3B-Horizontal-Frente 1B-Horizontal-Trás 3B-Horizontal-Trás | Extensão na horizontal |
| P3 | 1C-Frente 3C-Frente 1C-Trás 3C-Trás | Extensão na horizontal |
| P4 | 2A-Frente 2A-Trás | Extensão na horizontal |
| P5 | 2B-Frente 2B-Trás | Extensão na horizontal |
| P6 | 2C-Frente 2C-Trás | Extensão na horizontal |
| P7 | 1B-Vertical-Frente 3B-Vertical-Frente 1B-Vertical-Trás 3B-Vertical-Trás | Extensão na vertical |
| P8 | 1B-Diagonal-Frente 3B-Diagonal-Frente 1B-Diagonal-Trás 3B-Diagonal-Trás | Extensão na diagonal (45°) |
| P9 | U2 Esq U2 Dir | Deformação vertical |
| P10 | U2 Centro | Deformação vertical |
| P11 | U3 Esq Cima U3 Dir Cima | Deformação horizontal |
| P12 | U3 Centro Cima | Deformação horizontal |
| P13 | U3 Esq Baixo U3 Dir Baixo | Deformação horizontal |
| P14 | U3 Centro Baixo | Deformação horizontal |
| P15 | 2SUP Frente | Extensão na horizontal |
| P16 | 2INF Frente | Extensão na horizontal |

Tab. 12 - Composição dos agrupamentos e parâmetros medidos.

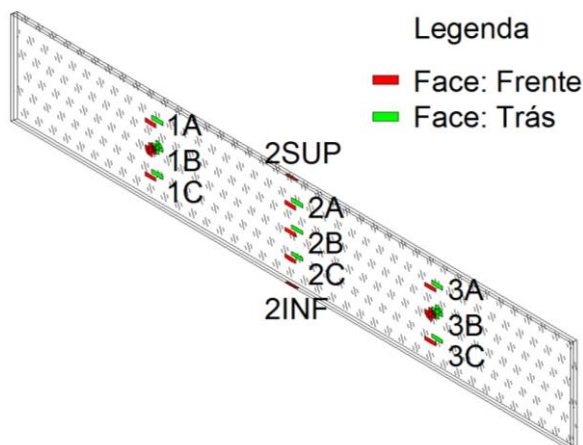


Fig. 118 - Posição dos extensómetros do ensaio monotónico com cabo.

7.2.3. Análise do ensaio

A primeira fase do ensaio corresponde à aplicação do pré-esforço nos cabos de modo a garantir que a força seja a mais equilibrada possível, em todos os momentos e em ambos os cabos, esse controlo é feito através da leitura do Extensómetro 2SUP do agrupamento P9 e das células de carga dos cabos.

A análise de possíveis problemas foi feita da mesma maneira que o ensaio anterior com a excepção da necessidade de agora avaliar também o sistema de pré-esforço.

Com o recurso à figura seguinte pode-se verificar que o pré-esforço vai aumentando conforme aumenta a força de carregamento do ensaio e que existe uma diferença crescente na força de pré-esforço.

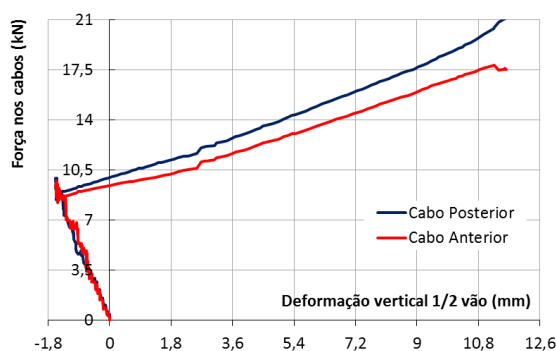


Fig. 119 - Diferença entre a força nos cabos de pré-esforço durante o ensaio.

Analisando os extensómetros da linha 1 e 3, nota-se que os primeiros estão mais comprimidos, o que leva a supor que existe esforço axial variável ao longo do provete, conforme se pode constatar ao analisar o gráfico seguinte.

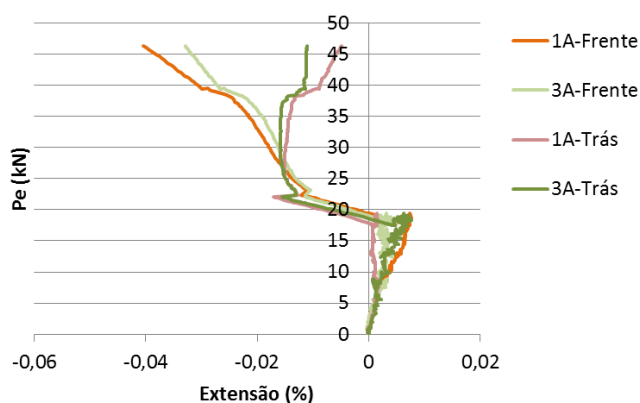


Fig. 120 – Variação da extensão no provete em relação à força de pré-esforço.

As barras metálicas que unem os desviadores e os respectivos varões roscados sofreram deformação, sendo evidente a existência de forças horizontais não previstas inicialmente conforme pode ser visto na figura seguinte.



Fig. 121 - Provete após ensaio com cabo de pré-esforço.

Nota-se também na figura seguinte, que a centragem do provete não é perfeita levando a deformações fora do plano.

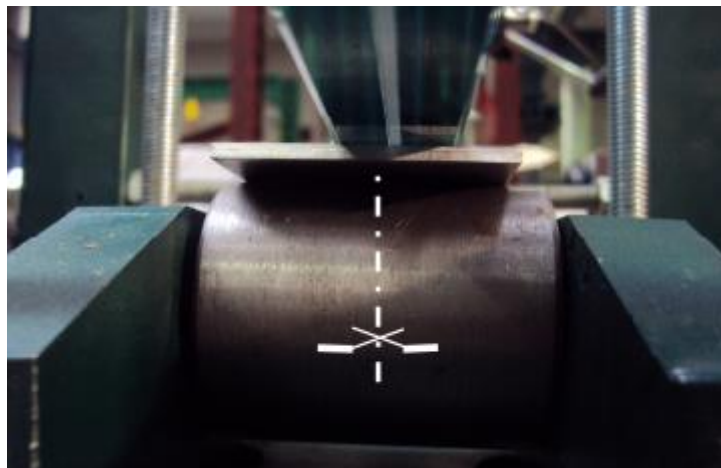


Fig. 122 – Desalinhamento do provete em relação aos roletes.

7.2.4. Optimização do layout

Com vista à melhoria integral do sistema, foram propostas as seguintes alterações:

-Alargar os sulcos nos desviadores e utilizar um lubrificante adequado para diminuir possíveis atritos entre o cabo e o rolete.

-Colocar mais 2 células de carga nas outras extremidades do cabo para se ter noção da possível perda de carga provocada pelos desviadores e melhor avaliação do sistema de pré-esforço.

-Aumentar rigidez dos contraventamentos e das barras de ligação dos desviadores.

-Alinhar todo o layout de maneira a garantir a perfeita centragem do provete.

-Intercalar uma película de acetato entre o alumínio dos apoios e o provete para reduzir possíveis danos no vidro.

7.3. Ensaio cíclico à temperatura ambiente

Este ensaio difere dos anteriores por ter solicitação cíclica e por ser novamente sem cabo de pré-esforço. Além dos objetivos mencionados nos anteriores ensaios, neste ensaio as preocupações são viradas para os novos componentes constituintes do layout, nomeadamente as 2 novas células de carga, respectivos apoios e a inclusão de novo sistema na peça de carregamento para as cargas ascensionais.

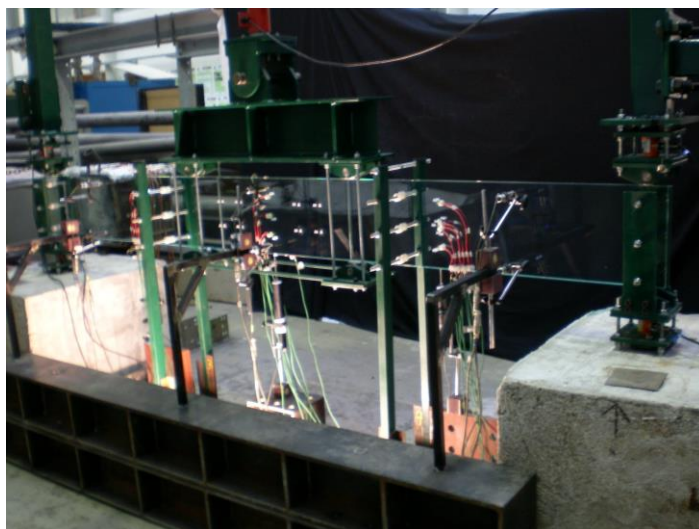
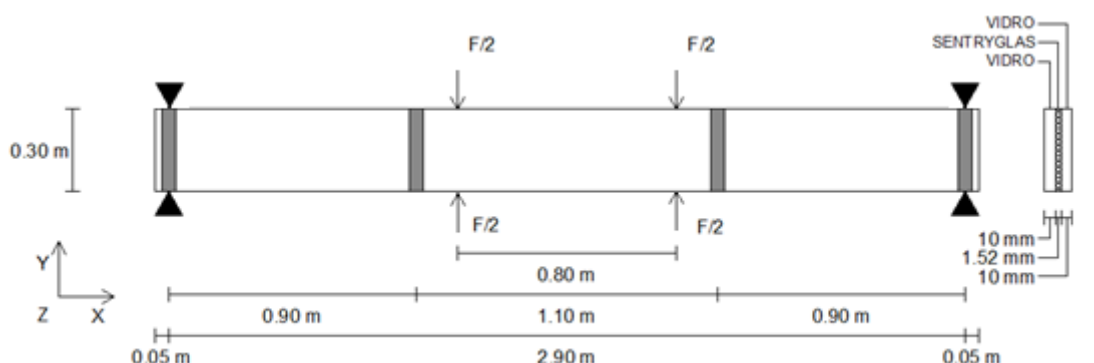


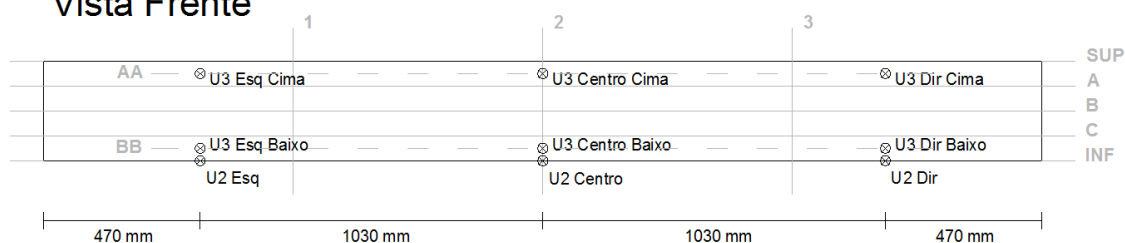
Fig. 123 – Pormenor do layout de ensaios antes do ensaio cíclico.

7.3.1. Geometria e instrumentação

A instrumentação é feita do mesmo modo que o ensaio anterior, tendo apenas uma pequena alteração nos pontos 1B e 3B na face de trás, visto se ter substituído uma roseta¹² por um extensómetro normal no primeiro e no último se ter rodado a roseta 45°, sendo agora possível a leitura de 2 diagonais.



Vista Frente



¹² Conjunto de 3 extensómetros para medições em diferentes sentidos no mesmo ponto.

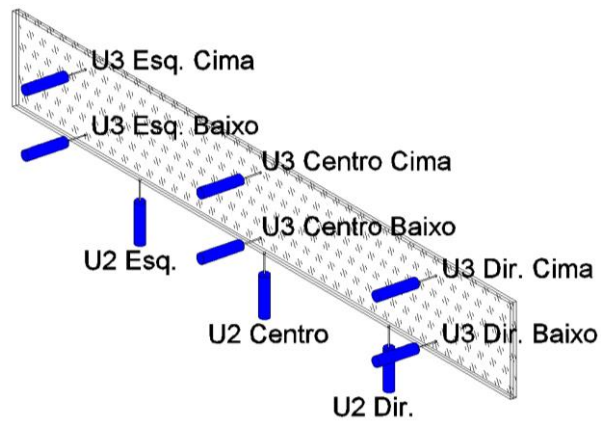


Fig. 124 - Mapeamento da localização dos deflectómetros.

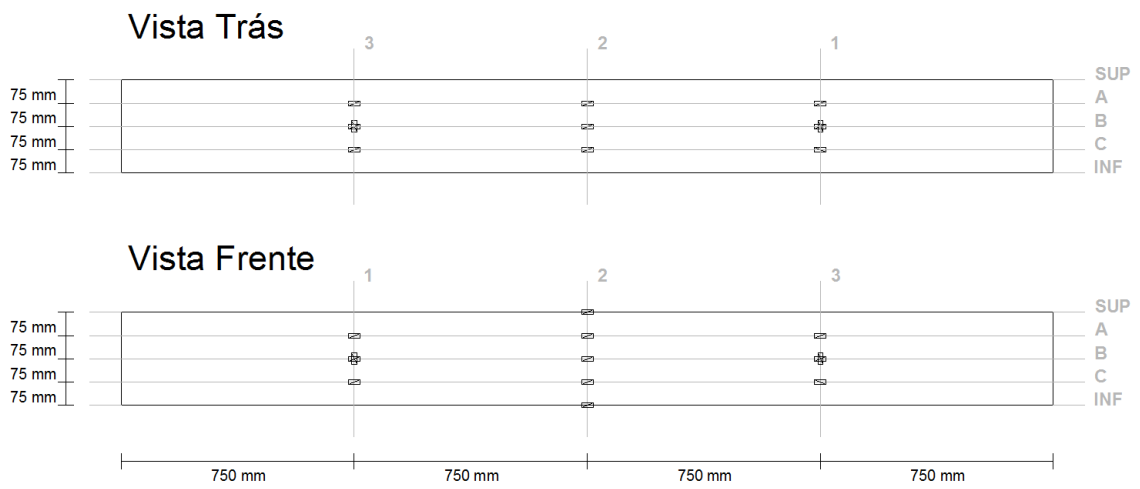


Fig. 125 - Mapeamento da localização dos extensómetros.

| Nome do Agrupamento | Pontos de leitura | Parâmetro medido |
|----------------------------|--|----------------------------|
| P1 | 1A-Frente 3A-Frente 1A-Trás 3A-Trás | Extensão na horizontal |
| P2 | 1B-Horizontal-Frente 3B-Horizontal-Frente 1B-Horizontal-Trás 3B-Horizontal-Trás | Extensão na horizontal |
| P3 | 1C-Frente 3C-Frente 1C-Trás 3C-Trás | Extensão na horizontal |
| P4 | 2A-Frente 2A-Trás | Extensão na horizontal |
| P5 | 2B-Frente 2B-Trás | Extensão na horizontal |
| P6 | 2C-Frente 2C-Trás | Extensão na horizontal |
| P7 | 1B-Vertical-Frente 3B-Vertical-Frente | Extensão na vertical |
| P8 | 1B-Diagonal-Frente 3B-Diagonal-Frente 3B-Diagonal-Trás 3B-Diagonal 135° -Trás | Extensão na diagonal (45°) |
| P9 | U2 Esq U2 Dir | Deformação vertical |
| P10 | U2 Centro | Deformação vertical |
| P11 | U3 Esq Cima U3 Dir Cima | Deformação horizontal |
| P12 | U3 Centro Cima | Deformação horizontal |
| P13 | U3 Esq Baixo U3 Dir Baixo | Deformação horizontal |
| P14 | U3 Centro Baixo | Deformação horizontal |
| P15 | 2SUP Frente | Extensão na horizontal |
| P16 | 2INF Frente | Extensão na horizontal |

Tab. 13- Composição dos agrupamentos e parâmetros medidos.

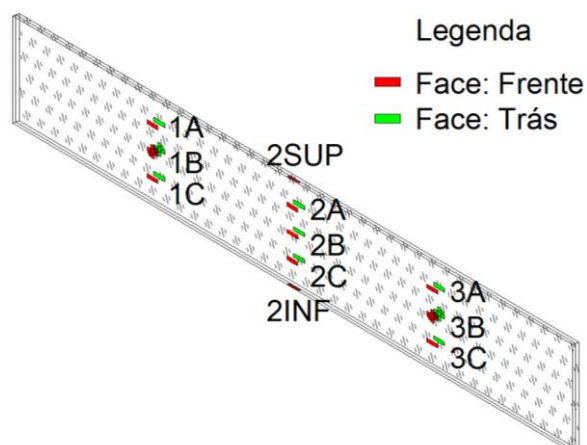


Fig. 126 - Posição dos extensómetros no ensaio cíclico.

7.3.2. Análise do ensaio

A estratégia de carga foi definida tendo em conta o ensaio monotónico ensaiado anteriormente, ou seja, nos 3 primeiros ciclos de carga foram definidas curvas sinusoidais com amplitude de $\frac{1}{4}$ da deformação máxima do provete no ensaio monotónico, antes da ruptura, sendo incrementado em series de 3 ciclos até cerca de 2 vezes a deformação máxima. A tabela e a figura seguinte ilustram bem a estratégia aplicada.

| Nº Ciclos | Amplitude (mm) | Tempo (s) |
|-----------|----------------|-----------|
| 3 | $\pm 0,625$ | 125 |
| 3 | $\pm 1,250$ | 250 |
| 3 | $\pm 1,875$ | 375 |
| 3 | $\pm 2,187$ | 437,4 |
| 3 | $\pm 2,5$ | 500 |
| 3 | $\pm 2,8125$ | 562,5 |
| 3 | $\pm 3,125$ | 625 |
| 3 | $\pm 3,4378$ | 687,56 |
| 3 | $\pm 3,750$ | 750 |
| 5 | ± 5 | 750 |

Tab. 14 – Estratégia de carga do ensaio cíclico

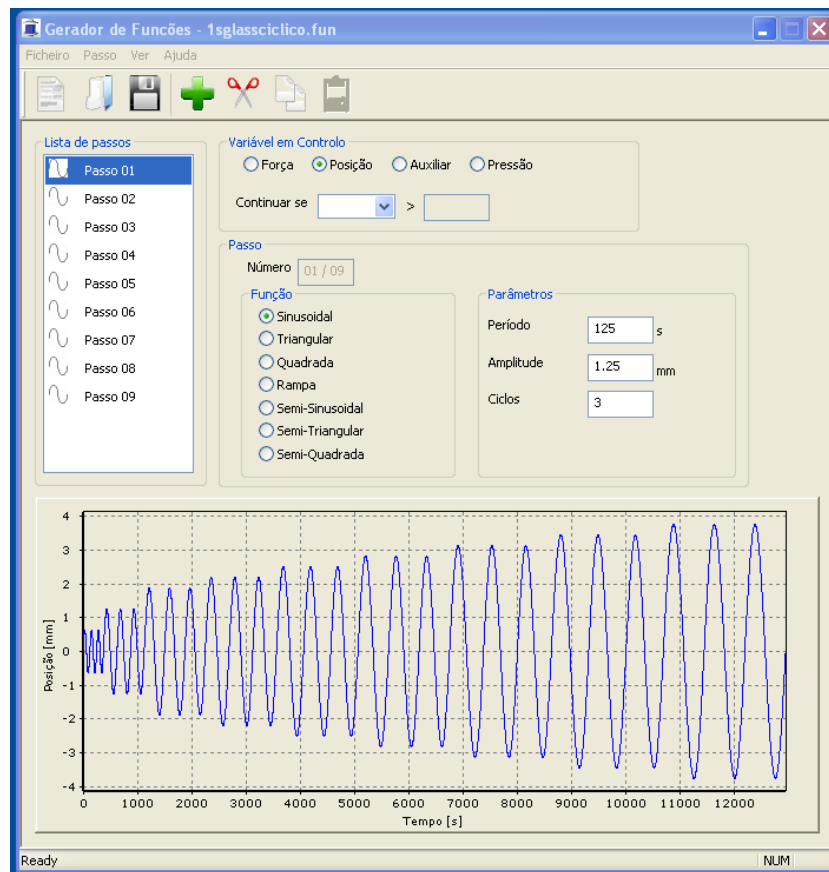


Fig. 127 – Representação gráfica da estratégia de carga utilizada no ensaio cíclico.

A análise deste ensaio centra-se sobretudo nos novos componentes do ensaio, nomeadamente no registo de carga. Verifica-se no gráfico seguinte, uma deslocação das sinusóides no sentido de compressão (negativo), sendo as mesmas motivadas provavelmente por folgas no sistema.

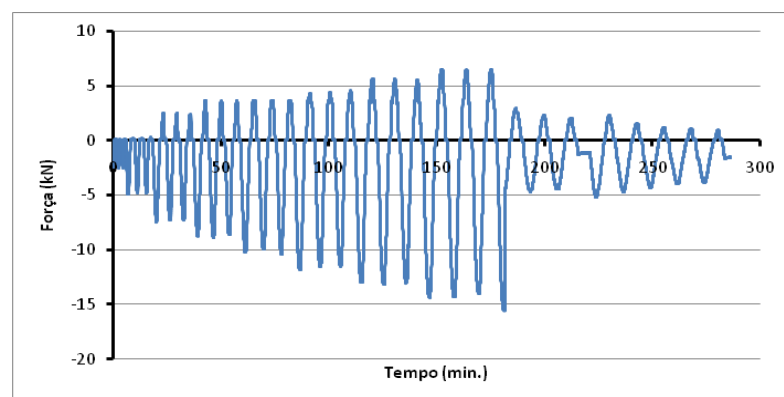


Fig. 128 - Registo de carga na célula central durante o ensaio cíclico

Notou-se também que a primeira fractura do provete se localizou num dos apoios, sendo motivada pela má colocação ou deslocamento da placa de alumínio intercalar, visível na figura seguinte.

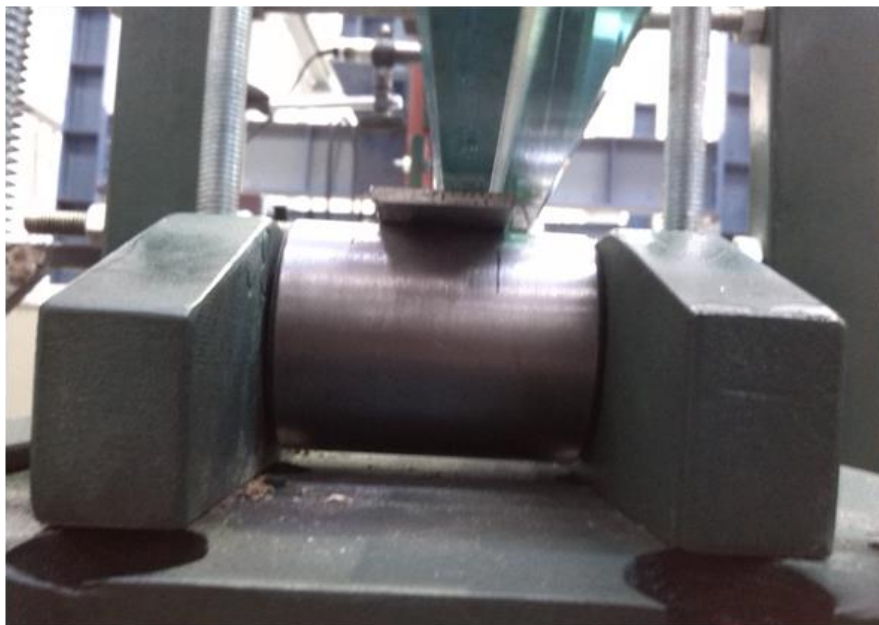


Fig. 129 - Pormenor da centragem da placa de alumínio intercalar.

Constatou-se novamente com este ensaio que é de extrema importância a centragem de todas as peças envolvidas, sendo até de considerar a elaboração de uma lista de verificação de pontos estratégicos e se necessário repetir todos os passos até se atingir a perfeição. Também deve ser tido em conta que no dimensionamento das peças, se tenha especial cuidado, não só no cálculo à resistência dos materiais, mas também quanto à sua rigidez.

7.3.3. Optimização do layout

- Aumentar rigidez global do sistema com especial atenção às placas de suporte dos roletes, pois sofrem efeito de punçoamento¹³.
- Criar uma *check-list* de verificação de pontos críticos.
- Nas roscas dos pernos, parafusos e varões deve ser utilizado sistema de contra-porca de maneira a eliminar as folgas decorrentes da inversão do sentido do carregamento.
- Substituir o controlo por deslocamento do actuador, por controlo por força ou extensão.

¹³ Esforço estrutural que decorre do encontro de um elemento estrutural linear, com um elemento laminar.

7.4. Ensaio térmico monotónico a 70° C

Tendo como base o primeiro ensaio, este apenas difere na inclusão no layout de uma câmara térmica para possibilitar os ensaios às diferentes temperaturas propostas no projecto, nomeadamente, 20°C, 50°C e 70°C. O principal objectivo é verificar o comportamento estrutural do provete, mais propriamente a possível alteração da película interlaminar de *SentryGlass* mediante efeitos térmicos e verificar possíveis melhorias a introduzir no layout.



Fig. 130 – Provete antes do ensaio térmico.

7.4.1. Geometria e instrumentação

A diferença em relação aos ensaios anteriores na instrumentação apenas é notada com a aplicação de termopares no provete conforme ilustra a figura anterior e pela colocação de 9 deflectómetros no exterior da câmara devido à temperatura de ensaio ser próxima do limite de operação determinada pelo fabricante. Foram utilizados 6 defletómetros para monitorizar a possível instabilização da viga fora do plano e outros 3 para medir a deformação da viga durante o ensaio. Os deflectómetros utilizados foram uns *TML SDP 200*, visíveis na figura seguinte, com um curso de 200mm, superior aos utilizados nos anteriores ensaios, esta alteração apenas foi devida à necessidade de ter sempre os fios metálicos que ligam o provete aos deflectómetros sempre tencionados. Também com o recurso a roldanas foi possível a mudança de sentido desses mesmos fios metálicos para medição da deformação da viga.



Fig. 131 – Pormenor dos deflectómetros fora da câmara térmica.

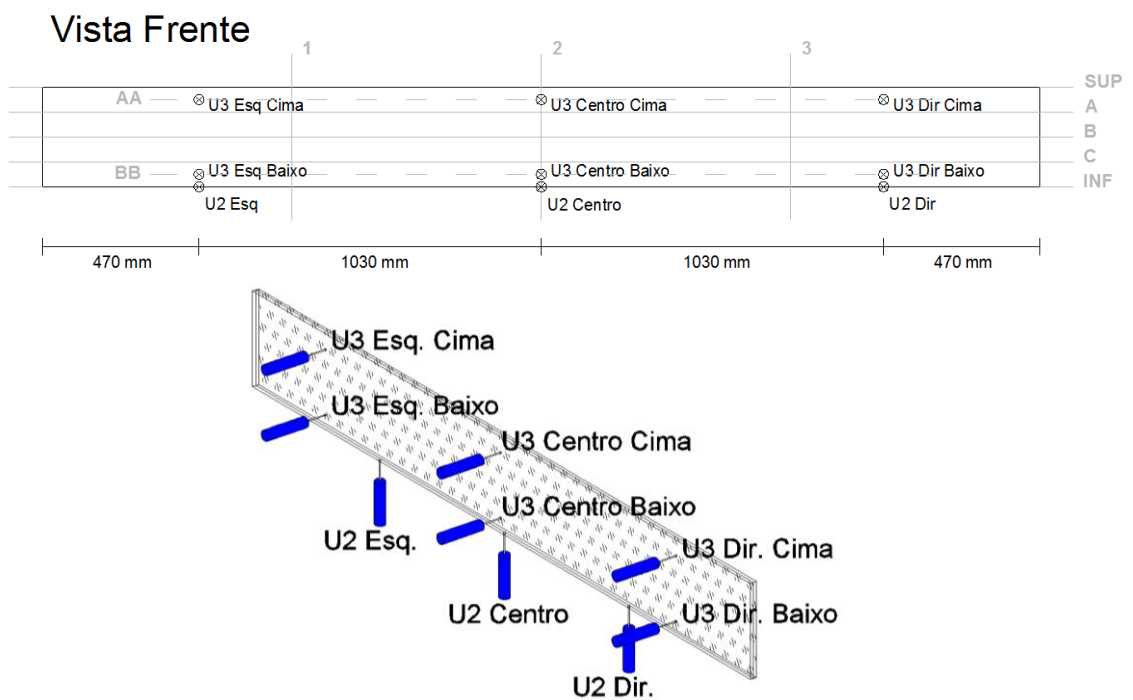


Fig. 132 - Mapeamento da localização dos deflectómetros.

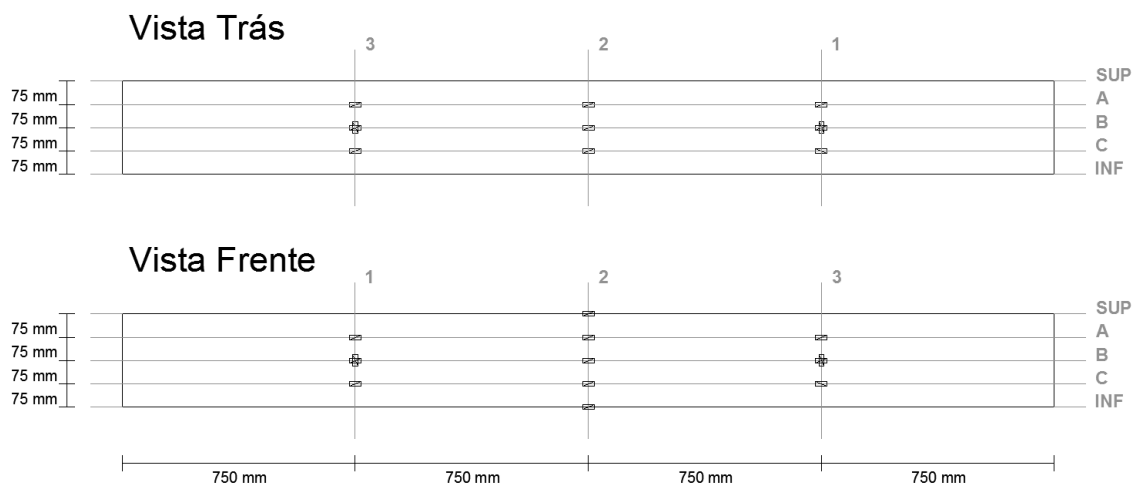


Fig. 133 - Mapeamento da localização dos extensómetros.

| Nome do Agrupamento | Pontos de leitura | Parâmetro medido |
|---------------------|--|----------------------------|
| P1 | 1A-Frente 3A-Frente 1A-Trás 3A-Trás | Extensão na horizontal |
| P2 | 1B-Horizontal-Frente 3B-Horizontal-Frente 1B-Horizontal-Trás 3B-Horizontal-Trás | Extensão na horizontal |
| P3 | 1C-Frente 3C-Frente 1C-Trás 3C-Trás | Extensão na horizontal |
| P4 | 2A-Frente 2A-Trás | Extensão na horizontal |
| P5 | 2B-Frente 2B-Trás | Extensão na horizontal |
| P6 | 2C-Frente 2C-Trás | Extensão na horizontal |
| P7 | 1B-Vertical-Frente 3B-Vertical-Frente 1B-Vertical-Trás 3B-Vertical-Trás | Extensão na vertical |
| P8 | 1B-Diagonal-Frente 3B-Diagonal-Frente 1B-Diagonal-Trás 3B-Diagonal-Trás | Extensão na diagonal (45°) |
| P9 | U2 Esq U2 Dir | Deformação vertical |
| P10 | U2 Centro | Deformação vertical |
| P11 | U3 Esq Cima U3 Dir Cima | Deformação horizontal |

| | | |
|-----|------------------------------|------------------------|
| P12 | U3 Centro Cima | Deformação horizontal |
| P13 | U3 Esq Baixo U3 Dir Baixo | Deformação horizontal |
| P14 | U3 Centro Baixo | Deformação horizontal |
| P15 | 2SUP Frente | Extensão na horizontal |
| P16 | 2INF Frente | Extensão na horizontal |

Tab. 15 - Composição dos agrupamentos e parâmetros medidos.

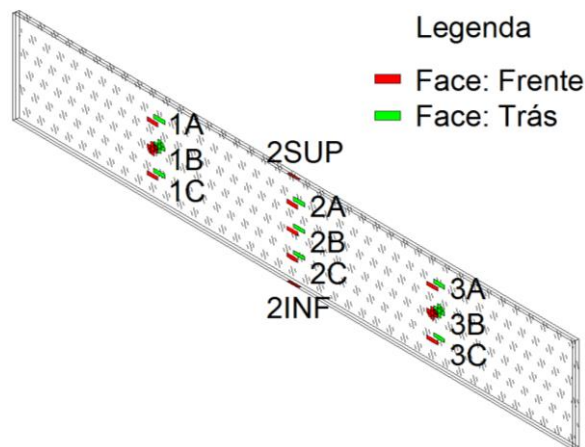


Fig. 134 - Posição dos extensómetros do ensaio termico.

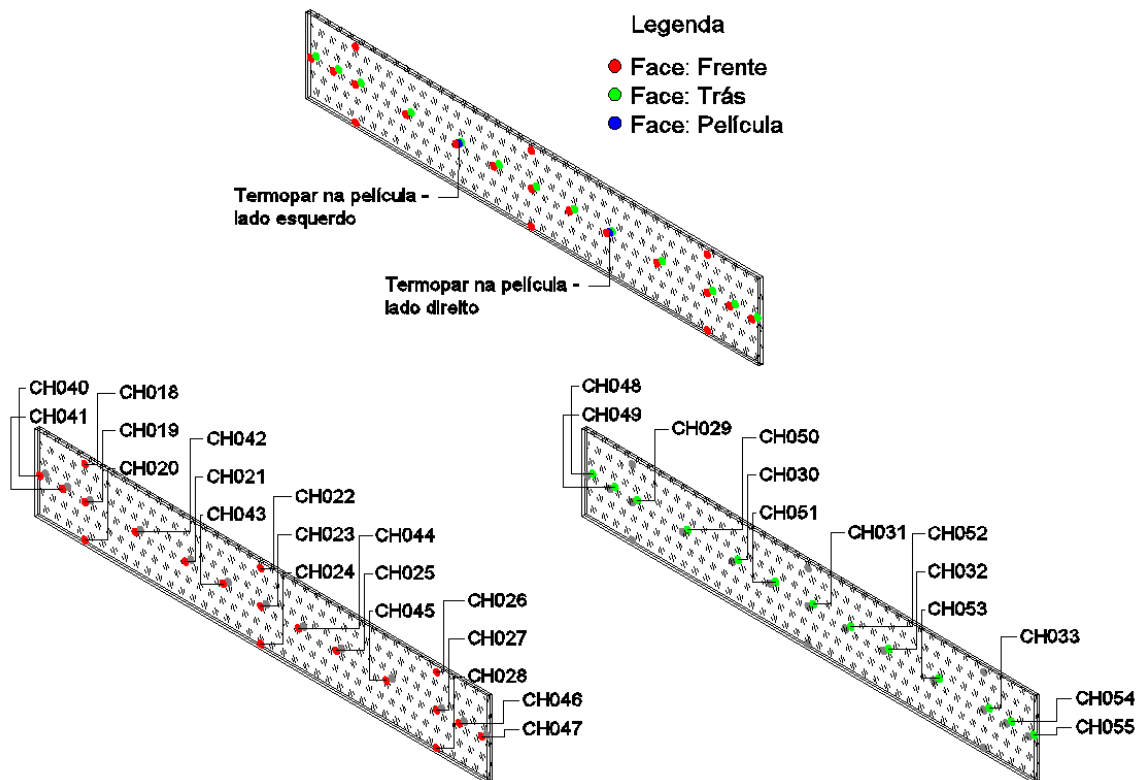


Fig. 135 – Posição dos termopares no provete para o ensaio térmico.

7.4.2. Análise do ensaio

Com o aumento da temperatura para 70°C no ensaio, notou-se que as propriedades de rigidez da película de SentryGlass se alteraram ao ponto de provocar a ruptura em momentos diferentes dos 2 vidros (frente e trás), ora então para se ter informação de ambos os vidros, é necessário também que sejam simetricamente instrumentados, não sendo neste caso redundante a utilização de mais extensómetros e defletómetros nas posições opostas. Notou-se também que os fios metálicos utilizados nos defletómetros deveriam ser mais facilmente esticados para não possibilitarem a incorrecta leitura dos deslocamentos. As aberturas na caixa térmica para passagem dos fios metálicos apenas foram dimensionadas para medirem até à ruptura, não sendo possível tirar dados da possível instabilização do provete na pós-ruptura. O provete apresentou ainda algumas variações de temperatura, talvez motivadas por pontuais maus isolamentos da câmara térmica e caudais de circulação do ar interno na câmara diferentes.

7.4.3. Optimização do layout

-A instrumentação deve ser colocada como que 2 vidros isolados se estivessem a ensaiar.

-Substituir os fios metálicos utilizados para as medições dos deslocamentos por outros mais flexíveis com coeficiente de dilatação térmica conhecido.

-Alargar mais as aberturas na câmara térmica para a passagem dos fios metálicos para o exterior, tendo em conta que será necessário estarem isolados e o mesmo isolamento não provocar interferências na medição dos deslocamentos.

-Substituir os ventiladores internos da câmara por outros, de maneira a terem todos o mesmo poder de circulação de ar.

-Isolar melhor a câmara nas aberturas do actuador, prumos e lintéis com recurso a tampas tipo *sandwich* com isolamento de lã de rocha.

-Sendo economicamente e estruturalmente viável, a frente da câmara térmica deveria ser toda em vidro duplo com isolamento para possibilitar melhor a visualização do provete durante o ensaio.

8. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Neste capítulo são apresentadas em síntese os principais aspectos abordados ao longo desta dissertação. Procura-se também deixar sugestões para desenvolvimentos futuros.

8.1. Conclusões

Este trabalho centrou-se maioritariamente na divulgação de técnicas e estratégias para o ensaio de vidro, tendo em conta estes objectivos, os resultados foram bastante satisfatórios.

O motivo deste trabalho surgiu da crescente procura do vidro para fins arquitectónicos e na conseqüentemente da sua utilização como elemento estrutural, para isso é necessário dar um contributo para a criação de normas que regulem a utilização do vidro de forma segura.

Para melhor compreensão começou-se por dar a conhecer as principais características do vidro assim como as técnicas de fabrico e reforço.

Explicados alguns conceitos básicos relativos às características do vidro, seguiu-se a descrição do material utilizado na realização dos ensaios, sua correcta aplicação e fornecido sugestões para medição com equipamentos alternativos nomeadamente através de fotogrametria. Foi ainda dado a conhecer a metodologia envolvida na construção de uma célula de carga.

Para que se consiga ter bons e fiáveis resultados nos ensaios foi necessário garantir que os equipamentos estavam correctamente calibrados e afinados, foi então no Capítulo “Parametrização” explicado alguns procedimentos adoptados.

A fase preparativa dos ensaios foi aquela que envolveu mais tempo, pois foi nesta fase que se idealizou tudo o que envolveu a realização dos ensaios, desde o layout à execução de todos os componentes, dando especial realce à complexidade para a concepção de uma câmara térmica.

Seguidamente foi caracterizado o vidro com o objectivo de calibrar o modelo numérico por elementos finitos, tendo-se revelado também uma tarefa com alguma complexidade, no entanto depois de realizadas melhorias, foram adquiridos dados com grande exactidão.

Depois de tudo preparado, foi dado inicio a uma serie de ensaios piloto, tendo sido ensaiadas vigas de vidro laminado, à temperatura ambiente e com carregamento monotónico, uma delas com cabo de pré-esforço. Foram ainda ensaiadas mais 2 vigas, uma com solicitação cíclica à temperatura ambiente e outra com carga térmica de 70°C e carregamento monotónico.

Em todos os ensaios foram detectados pontos a melhorar, tendo sido solucionados no decorrer dos mesmos. Devido às características muito próprias do vidro, o mesmo revela-se um material que exige grande cuidado e rigor em todas as tarefas envolvidas para se ter sucesso na sua análise.

8.2. Desenvolvimentos futuros

Qualquer trabalho de investigação é incompleto e também este não fugiu à regra.

-Serão ainda realizados mais ensaios, nas suas diversas combinações, dando destaque aos ensaios de vigas de vidro laminado com banzos metálicos, estas também com e sem cabos de pré-esforço.

-A aplicação em *Matlab* de fotogrametria desenvolvida apresenta alguns aspectos a ser melhorados nomeadamente a nível da precisão.

-Estando em vista a aquisição de novo equipamento de medição da HBM com maior precisão e maior frequência de amostragem é de todo interesse utilizar nos próximos ensaios.

-Está a ser ponderado a aquisição de sensores laser para medição por triangulação e software para caracterização por correlação de imagem.

-Para a medição das imperfeições do vidro também está em curso a aquisição de equipamento e logo novos testes estarão em agenda.

BIBLIOGRAFIA

- Abib, A. (1983). *Aerofotogrametria*.
- Cruz, P. (2010). *Candidatura S-Glass*.
- Haldimann, M., Luible, A., & Overend, M. (2008).
- Henriques, P. (2010). *Comportamento ao fogo do vidro estrutural*. Aveiro: UA.
- Jordão, S. (2013). *Relatório do projecto S-Glass*.
- Marinho, B. (2012). *Caracterização experimental do vidro laminado como material estrutural - Avaliação da influência dos elementos intercalares e da temperatura*.
- Novus. (2003). Introdução ao Controle PID.
- Ogata, K. (1993). *Engenharia de controlo moderno*.
- Pinho, M. (2014). *Modelação de vigas de vidro por elementos finitos*.
- Rolo, G. (2013). *Caracterização de Ensaios em Vigas de Vidro*. Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra.
- Roseiro, L. (2013). Apontamentos da aula de Calculo Automático de Sistemas Mecânicos ISEC.
- Saber, E. (2013). <http://www.mecatronicaatual.com.br/>.
- Sanches, J. (2013). *Análise e Dimensionamento de Sistemas Estruturais de Vidro*.
- TML. (2013). *Strain Gauges*.
- Valarinho, L. (2010). *Comportamento estrutural de vigas mistas vidro-GFRP*.
- www.cebrace.com.br. (s.d.). Obtido em 09 de 06 de 2014, de <http://www.cebrace.com.br/>