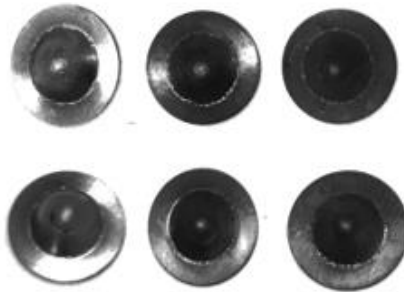




Escola Universitária de Ciências Empresariais, Saúde, Tecnologias e Engenharia

Licenciatura em Engenharia de Materiais



## **Caracterização de material pela técnica**

### **“Small Punch”**

Projeto Final de Licenciatura

Elaborado por:

Joana Coelho da Silva Gonçalves - nº de aluno 20162057

Orientado por:

Professor Doutor Tessaleno Devezas

Barcarena

Julho de 2019





Escola Universitária de Ciências Empresariais, Saúde, Tecnologias e Engenharia

Licenciatura em Engenharia de Materiais

## **Caracterização de material pela técnica**

### **“Small Punch”**

Projeto Final de Licenciatura

Elaborado por:

Joana Coelho da Silva Gonçalves - nº de aluno 20162057

Orientado por:

Orientador: Professor Doutor Tessaleno Devezas

Barcarena

Julho de 2019



A autora é a única responsável pelas ideias expressas neste relatório.



## **Agradecimentos**

É com enorme prazer que expresso aqui os meus agradecimentos a todos aqueles que, de alguma forma, permitiram que este trabalho se concretizasse.

Gostaria de começar por agradecer a toda a equipa do LABMAT do Instituto de Soldadura e Qualidade pela oportunidade que me proporcionaram em realizar este trabalho e ajuda prestada na fase experimental.

Um especial agradecimento à Eng.<sup>a</sup> Marta Freitas, responsável técnica da Unidade de Ensaios Mecânicos do Laboratório de Materiais, pois sem a sua competência profissional, paciência, atenção, conhecimento técnico, apoio e incentivo não teria conseguido realizar os ensaios SP.

Ao Professor Doutor Tessaleno Devezas, pelo seu incentivo, orientação e ajuda neste projeto.

Por fim o mais profundo agradecimento ao meu companheiro de vida, Pedro Feire, que me acompanha e incentiva incondicionalmente o meu desenvolvimento pessoal e profissional. Pela compreensão nas ausências e, principalmente, pelo amor que sinto cada dia ao seu lado.

## Resumo

Este trabalho incidiu na realização de ensaios em provetes miniatura do tipo Small Punch (SP) para determinar a tensão de cedência, tensão máxima e alongamento do aço A335 P22. Este tipo de ensaios tem como objetivo obter informação sobre o estado de degradação dos equipamentos que se encontram em serviço na indústria, sujeitos a fenómenos de degradação dependentes do tempo. O principal objetivo consistiu no desenvolvimento e possível validação do procedimento de ensaio no Laboratório de Materiais da Unidade de Ensaios Mecânicos (LabMat – UEM) do Instituto de Soldadura e Qualidade (ISQ).

Para realizar os ensaios SP foi necessário projetar um dispositivo de ensaio e adaptá-lo para que fosse possível ser utilizado numa máquina eletromecânica com um forno acoplado que permitisse realizar ensaios a alta temperatura e à temperatura ambiente.

Para determinar as propriedades mecânicas utilizaram-se provetes miniatura cujas dimensões, 8 mm de diâmetro e 0,5 mm de espessura, estas medidas foram retiradas de vários autores presente na bibliografia deste trabalho. Foi necessário calcular os coeficientes das equações que permitem de forma empírica determinar as propriedades mecânicas, através dos resultados obtidos com os ensaios convencionais de tração e SP.

Não foi possível validar o procedimento de ensaio, devido ao facto que os resultados obtidos nos ensaios SP apresentarem erros significativos em relação aos convencionais. Estes erros estão diretamente associados à classe do extensómetro usado. Para futuros desenvolvimentos neste tema será necessária a aquisição de um extensómetro de maior precisão, mínimo Classe 0,5.

É relevante referir que não foi possível, para já, validar a implementação deste ensaio em serviço, mas foi possível identificar pontos-chaves para melhorar.

Palavras-chave:

- Ensaio “Small Punch”; -Provetes miniatura; - Propriedades mecânicas



## **Abstract**

This work was carried out in Small Punch (SP) miniature test specimens to determine the yield strength, tensile strength and elongation of A335 P22 steel. The purpose of this type of test is to obtain information regarding the state of degradation of industrial equipment in service, which are subject to degradation phenomena. The main objective consisted in the development and possible validation of the test procedure in the Materials Laboratory of the Mechanical Testing Unit (LabMat - UEM) of the “Instituto de Soldadura e Qualidade” (ISQ).

In order to perform the SP tests, it was necessary to design a test device and adapt it so that it could be used in a electromechanical machine with a coupled oven that allowed to carry out tests at high and room temperature.

To determine the mechanical properties were used miniature specimens with the dimensions of 8 mm in diameter and 0.5 mm in thickness, based on data from several authors presented in the bibliography of this work. It was necessary to determine empirically, through conventional traction and SP tests, the coefficients of the equations that allow to determine the desired mechanical properties.

It was not possible to validate the test procedure, because the results obtained in the SP tests presented significant errors when compared with the conventional ones. These errors are directly associated with the class of the extensometer used. For future developments in this topic it will be necessary to acquire a strain gauge of greater accuracy, minimum Class 0.5.

It is important to note that, although it was not possible to validate the implementation of this miniature test procedure, it was possible to identify key points to improve the technique.

Keywords:

- Small Punch Test; - Miniature specimens; -Mechanical properties

# Índice

|                                                                                          |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Introdução.....                                                                          | 1  |
| Desenvolvimento.....                                                                     | 3  |
| 1. Revisão bibliográfica.....                                                            | 3  |
| 1.1. Ensaios convencionais .....                                                         | 3  |
| 1.1.1. Ensaio convencional de tração .....                                               | 3  |
| 1.1.2. Ensaio convencional de impacto .....                                              | 4  |
| 1.2. Ensaios em provetes miniatura .....                                                 | 5  |
| 1.2.1. Ensaio ‘Impression Creep’ (IC).....                                               | 6  |
| 1.2.2. Ensaio de ‘Small Ring’ (SR) .....                                                 | 6  |
| 1.2.3. Ensaio ‘Conventional Sub-Size Uniaxial’ (CSSU) .....                              | 7  |
| 1.3. Ensaio ‘Small Punch’ (SP).....                                                      | 8  |
| 1.3.1. Introdução à técnica de ensaio.....                                               | 8  |
| 1.3.2. Princípio de funcionamento do SP .....                                            | 8  |
| 1.3.3. Dados obtidos no ensaio .....                                                     | 9  |
| 1.3.4. Conversão de dados dos ensaios SP para as respetivas propriedades mecânicas ..... | 11 |
| 1.4. Tecnologia de remoção de amostras miniatura.....                                    | 19 |
| 1.4.1. Corte tipo concha.....                                                            | 19 |
| 1.4.2. Sistema de maquinagem de amostras por descarga elétrica .....                     | 21 |
| 2. Dispositivo de ensaio e provetes SP.....                                              | 23 |
| 3. Fase experimental – Resultados .....                                                  | 25 |
| 3.1. Ensaio convencional de tração.....                                                  | 25 |
| 3.2. Ensaio Small Punch .....                                                            | 28 |

|                                                                           |    |
|---------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.2.1. Preparação dos provetes SP .....                                   | 28 |
| 3.2.2. Equipamento utilizado nos ensaios SP.....                          | 29 |
| 3.2.3. Resultados e cálculo das propriedades mecânicas .....              | 30 |
| 3.2.1. Comparação entre resultados de ensaios convencionais e SP.....     | 42 |
| Conclusão.....                                                            | 48 |
| Bibliografia .....                                                        | 49 |
| Anexos .....                                                              | 52 |
| Anexo I – Tabela de conversão de dureza .....                             | 54 |
| Anexo II – Controlo dimensional dos provetes SP.....                      | 56 |
| Anexo III – Certificado de calibração máquina eletromecânica.....         | 58 |
| Anexo IV – Certificado de calibração do calibrador de extensómetros ..... | 64 |
| Anexo V – Calibração Interna do extensómetro.....                         | 70 |
| Anexo VI - Catálogo de características dos termopares .....               | 72 |

## Índice de figuras

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 – Provete de tração com secção circular. Adaptado de (ISO 6892, 2016). .....                                                                                                                                                                                                                                             | 3  |
| Figura 2 – Esquema de uma máquina de ensaio de impacto Charpy com detalhe superior da posição do provete. Adaptado de (Callister & Rethwisch, 2010). .....                                                                                                                                                                        | 4  |
| Figura 3 – Efeito da temperatura na energia absorvida para diferentes materiais durante o ensaio de impacto. Adaptado de (Askeland, Fulay, & Wright, 2011). .....                                                                                                                                                                 | 4  |
| Figura 4 – (a) Ensaio IC com o punção retangular, de dimensões $d = 1\text{mm}$ e $b = 10\text{mm}$ ; (b) provete de ensaio, de dimensões $d = 1\text{mm}$ , $b = 10\text{mm}$ , $w = 10\text{mm}$ e $h = 2.5\text{mm}$ . Adaptado de (Bridges & Purdy, 2018). .....                                                              | 6  |
| Figura 5 – (a) Montagem do ensaio SR. Adaptado de (Kazakeviciute, Rouse, Focatiis, & Hyde, 2018). (b) detalhe do provete de SR (dimensões $R = 5\text{mm}$ e $d = 1\text{mm}$ ). Adaptado de (Hyde, Hyde, & Sun, 2012). .....                                                                                                     | 7  |
| Figura 6 – Exemplo de um provete de CSSU, de dimensões $D = 2.5\text{mm}$ , $R = 2\text{mm}$ , $G = 10\text{mm}$ e $A = 16\text{mm}$ (ASTM A370, 2018). .....                                                                                                                                                                     | 7  |
| Figura 7 - Esquema do dispositivo de ensaio SP: (1) Punção esférico, (2) Matriz superior, (3) Matriz inferior, (4) Provete miniatura. Adaptado de (Bruchhausen, et al., 2018). .....                                                                                                                                              | 9  |
| Figura 8 – Curva típica ‘carga vs deslocamento’ do punção num ensaio SP. Adaptado de (CEN, 2006). .....                                                                                                                                                                                                                           | 10 |
| Figura 9 – Imagem ilustrativa do efeito membrana, em que: (superior) - desenho esquemático do provete SP fissurado; (esquerda)- vista superior do provete SP fissurado; (direita): vista transversal do provete SP com indicação da espessura inicial ( $t_f$ ) e final ( $t_0$ ). Adaptado de (Matocha & Purmenský, 2007). ..... | 11 |
| Figura 10 - Diferentes propostas para a determinação de $P_y$ . Adaptado de (García, Rodríguez, Belzuno, & Suárez, 2014). .....                                                                                                                                                                                                   | 12 |
| Figura 11 – Relação entre $P_y/t^2$ e tensão de cedência para a obtenção de $\alpha_1$ : (a) método de Mao, (b) método de CEN, (c) método de $t/10$ . Adaptado de (García, Rodríguez, Belzuno, & Suárez, 2014). .....                                                                                                             | 15 |
| Figura 12 – Relação entre a tensão máxima e (a) $P_{\max}/t^2$ , (b) $P_{\max}/t$ e (c) $P_{\max}/(t.d_m)$ para a obtenção de $\beta_1$ (García, Rodríguez, Belzuno, & Suárez, 2014). .....                                                                                                                                       | 17 |

|                                                                                                                                                                                                                                                 |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 13 – Relação entre o Alongamento e (a) $d_m$ e (b) $d_m/t$ . Adaptado de (García, Rodríguez, Belzuno, & Suárez, 2014) .....                                                                                                              | 18 |
| Figura 14 – (a) Máquina de recolha de amostras criada pela Rolls-Royce (CEN, 2006). (b) Princípio de funcionamento do equipamento de remoção de amostras. Adaptado de (Matocha & Purmenský, 2007).....                                          | 20 |
| Figura 15 – Provetes SP obtidos a partir de uma amostra removida pelo equipamento da Rolls-Royce (CEN, 2006).....                                                                                                                               | 20 |
| Figura 16 - Princípio de funcionamento do equipamento para obtenção de amostras pelo método de descarga elétrica: (a) início do trabalho, (b) o trabalho, (c) fim do trabalho. Adaptado de (Okamoto, Kitagawa, Kusumoto, & Kanaya, 2009). ..... | 21 |
| Figura 17 – Amostra típica obtida pelo método da descarga elétrica (Okamoto, Kitagawa, Kusumoto, & Kanaya, 2009).....                                                                                                                           | 21 |
| Figura 18 - Equipamento de recolha de amostras por descarga elétrica: (a) placa de base e corpo principal, (b) painel de controlo, (c) máquina de líquido, (d) eletrodo (Okamoto, Kitagawa, Kusumoto, & Kanaya, 2009).....                      | 22 |
| Figura 19 - (a) Esquema do dispositivo do ensaio SP com vista em corte. Adaptado de (CEN, 2006). (b) detalhe do provete SP (Hyde, Hyde, & Sun, 2012).....                                                                                       | 23 |
| Figura 20 - Curvas de tensão-deformação dos ensaios de tração, para os dois tipos de materiais em 3 condições de temperatura. ....                                                                                                              | 27 |
| Figura 21 - (a) Máquina de corte de precisão, (b) lixas SiC, (c) micrómetro utilizado para o controlo dimensional da espessura dos provetes SP. ....                                                                                            | 28 |
| Figura 22 - Equipamento para o ensaio SP com detalhes de: célula de carga, extensómetro, termopar e dispositivo de ensaio. ....                                                                                                                 | 30 |
| Figura 23 – Determinação da carga para obtenção da tensão de cedência do material segundo o método de Mao e CEN. ....                                                                                                                           | 31 |
| Figura 24 - Determinação da carga para obtenção da tensão de cedência do material segundo o método de $t/10$ . ....                                                                                                                             | 31 |
| Figura 25 – Determinação da carga máxima e deslocamento correspondente para a obtenção da tensão máxima. ....                                                                                                                                   | 32 |
| Figura 26 – Curva carga vs deslocamento dos 4 provetes ensaiados nas três condições de temperatura (a) 23°C, (b) 450°C e (c) 550°C para o material do reator. ....                                                                              | 33 |

|                                                                                                                                                               |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 27 – Curva carga vs deslocamento dos 4 provetes ensaiados nas três condições de temperatura (a) 23°C, (b) 450°C e (c) 550°C para o material novo. .... | 34 |
| Figura 28 – Relação entre $P_y/t^2$ vs tensão de cedência para a obtenção de $\alpha_1$ através dos métodos de (a) Mao, (b) CEN e (c) t/10.....               | 36 |
| Figura 29 - Relação entre a tensão máxima e (a) $P_{max}/t^2$ , (b) $P_{max}/t$ e (c) $P_{max}/(t.dm)$ para a obtenção de $\beta_1$ e $\beta_2$ . ....        | 37 |
| Figura 30 - Relação entre o alongamento e (a) $d_m$ e (b) $d_m/t$ para a obtenção de $y$ .....                                                                | 38 |
| Figura 31 – Tensão de cedência vs temperatura de cada material em estudo. ....                                                                                | 42 |
| Figura 32 – Tensão máxima vs temperatura de cada material em estudo.....                                                                                      | 43 |
| Figura 33 – Alongamento vs temperatura de cada material em estudo. ....                                                                                       | 44 |

## **Índice de tabelas**

|                                                                                                                                                  |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1 – Composição química do aço A335 P22. ....                                                                                              | 25 |
| Tabela 2 – Propriedades mecânicas do aço A335 P22. ....                                                                                          | 25 |
| Tabela 3– Propriedades do material do reator e material novo. ....                                                                               | 26 |
| Tabela 4 - Cargas para determinação da tensão de cedência, tensão máxima e<br>percentagem de alongamento obtidas através dos ensaios de SP. .... | 35 |
| Tabela 5 - Valores das constantes para o cálculo das propriedades mecânicas.....                                                                 | 39 |
| Tabela 6 – Propriedades mecânicas obtidas nos ensaios SP.....                                                                                    | 41 |
| Tabela 7 – Tabela comparativa entre ensaios convencionais e SP do material do reator.<br>.....                                                   | 45 |
| Tabela 8 - Tabela comparativa entre ensaios convencionais e SP do material novo.....                                                             | 46 |

## **Lista de abreviaturas e siglas**

|        |                                                                                            |
|--------|--------------------------------------------------------------------------------------------|
| ASTM   | American Society for Testing and Materials                                                 |
| CEN    | Comissão Europeia de Normalização                                                          |
| CSSU   | Conventional Sub-Size Uniaxial                                                             |
| EMA    | Erro Máximo Admissível                                                                     |
| GL     | Gauge Length (Comprimento de referência)                                                   |
| HB     | Dureza Brinell                                                                             |
| HRC    | Dureza Rockwell escala C                                                                   |
| HV     | Dureza Vickers                                                                             |
| IC     | Impression Creep                                                                           |
| ISO    | International Organization for Standardization (Organização Internacional de Normalização) |
| kN     | Kilo Newton                                                                                |
| LABMAT | Laboratório de Materiais                                                                   |
| mm     | milímetro                                                                                  |
| MPa    | Mega Pascal                                                                                |
| N      | Newton                                                                                     |
| SP     | Small Punch                                                                                |
| SPBT   | Small Punch Bulge Test                                                                     |
| SPDT   | Small Punch Drawing Test                                                                   |
| SR     | Small Ring                                                                                 |
| UEM    | Unidade de Ensaio Mecânicos                                                                |



## Lista de símbolos

|                |                                                                                        |
|----------------|----------------------------------------------------------------------------------------|
| A              | Alongamento                                                                            |
| A e $L_c$      | Comprimento da zona útil                                                               |
| b e w          | Largura                                                                                |
| d              | Largura do punção                                                                      |
| D e d          | Diâmetro do provete                                                                    |
| $d_0$          | Diâmetro inicial                                                                       |
| $d_m$          | Deslocamento correspondente à carga máxima                                             |
| E              | Módulo de elasticidade                                                                 |
| G e $L_0$      | Comprimento de referência inicial                                                      |
| P              | Carga                                                                                  |
| $P_{max}$      | Carga máxima do ensaio SP                                                              |
| $P_y$          | Carga correspondente à cedência do material no ensaio SP                               |
| $P_{y\_CEN}$   | Carga correspondente à cedência do material no ensaio SP pelo método de CEN            |
| $P_{y\_inf}$   | Carga no primeiro ponto de inflexão correspondente à cedência do material no ensaio SP |
| $P_{y\_Mao}$   | Carga correspondente à cedência do material no ensaio SP pelo método de Mao            |
| $P_{y\_t/10}$  | Carga correspondente à cedência do material no ensaio SP pelo método de t/10           |
| $P_{y\_t/100}$ | Carga correspondente à cedência do material no ensaio SP pelo método de t/100          |
| R e r          | Raio                                                                                   |
| T              | Temperatura                                                                            |

|                        |                                       |
|------------------------|---------------------------------------|
| $t$ e $h$              | Espessura do provete                  |
| $t_0$                  | Espessura inicial do provete          |
| $t_f$                  | Espessura final do provete            |
| $U$                    | Deflexão                              |
| $v$                    | Velocidade                            |
| $y$                    | Constante de conversão do alongamento |
| $\alpha$ e $\beta$     | Constante de conversão da tensão      |
| $\sigma_{UTS}$         | Tensão máxima                         |
| $\sigma_y, R_{p0.2\%}$ | Tensão de cedência                    |

## **Introdução**

É de fundamental importância a avaliação da potencial vida restante de equipamentos industriais, de forma a prevenir sua possível falha quando sujeitos a condições de serviço que introduzem fenômenos de degradação dependentes do tempo. Os avanços no conhecimento metalúrgico e das metodologias analíticas atualmente disponíveis para a gestão de ativos necessitam de técnicas para reduzir os fatores de segurança e assim prolongar a vida útil dos componentes estruturais. (Hurst e Matocha 2015).

A vida útil restante de um componente raramente pode ser avaliada com sucesso com as técnicas convencionais e bem padronizadas de ensaios mecânicos, tais como a tração, fluência, Charpy ou tenacidade à fratura, pois geralmente há material insuficiente para amostragem não invasiva do componente. Portanto, a necessidade de avaliar as propriedades mecânicas reais dos componentes estruturais por meio de métodos de teste direto levou à introdução de técnicas inovadoras baseadas em amostras miniaturizadas (Hurst e Matocha 2015).

Nas últimas três décadas os ensaios em provetes miniatura que têm vindo a ser desenvolvidos e com maior relevância são Small Punch, Impression Creep, Small Ring e Conventional Sub-Size Uniaxial, sendo que os que têm vindo a ter maior aplicação na caracterização dos equipamentos em serviço são o Small Punch e o Impression Creep (Hyde, Hyde e Sun 2012).

O objetivo deste trabalho incidiu na realização de ensaios SP (Small Punch) a fim de determinar algumas propriedades mecânicas como a tensão de cedência, a tensão máxima e alongamento do aço A335 P22. Os provetes foram obtidos a partir de amostras de material retiradas de um reator de uma refinaria que foi desmantelado no final de vida e também a partir de amostras de material novo. O principal objetivo consistiu no desenvolvimento e possível validação do procedimento de ensaio no Laboratório de Materiais da Unidade de Ensaios Mecânicos (LabMat – UEM) do Instituto de Soldadura e Qualidade (ISQ). Para além dos ensaios SP foram realizados ensaios convencionais de tração para efeitos de comparação.

O trabalho encontra-se organizado em 4 partes; a introdução, o desenvolvimento, que está dividido em 3 capítulos, a conclusão e a bibliografia.

O capítulo 1 do desenvolvimento apresenta uma revisão bibliográfica de ensaios convencionais e dos principais tipos de ensaios em provetes miniatura, tendo como foco essencial o ensaio SP. A revisão bibliográfica dá uma perspetiva dos ensaios miniatura em geral, onde se inclui o aparecimento das técnicas, em que consistem, o seu procedimento de ensaio, que resultados se obtém e como são tratados os dados.

No capítulo 2 apresenta-se o dispositivo para os ensaios SP, bem como a definição das características dos provetes a ensaiar.

No capítulo 3 são descritos todos os procedimentos efetuados para a preparação e realização dos ensaios SP. Também são apresentados, de forma resumida, os ensaios convencionais realizados e os respetivos resultados. Por fim são apresentados os resultados obtidos nos ensaios SP e discussão dos mesmos.

Nas conclusões são identificados os principais resultados do projeto realizado e apontadas algumas evoluções que possam ser efetuadas em trabalhos futuros.

## Desenvolvimento

### 1. Revisão bibliográfica

#### 1.1. Ensaios convencionais

É importante em aplicações de engenharia conhecer as propriedades mecânicas dos materiais. A avaliação destas propriedades é realizada por ensaios mecânicos padronizados tais como, ensaio de tração, ensaios de impacto (Charpy e Izod) e tenacidade à fratura.

##### 1.1.1. Ensaio convencional de tração

O ensaio de tração é utilizado para a determinação da resistência mecânica de metais e ligas metálicas. Este ensaio consiste na tração de um provete até à fratura, num dado intervalo de tempo e com dois tipos de velocidade, sendo que a primeira será mais baixa e no regime elástico e a segunda mais elevada no regime plástico. A aquisição de dados (registo) da força aplicada ao provete é efetuada pelo software da máquina de ensaio, e a deformação correspondente é adquirida por um extensómetro ligado também ao software. O provete de ensaio é maquinado de acordo com normas padrão, como por exemplo a norma ISO 6892-1, que define um provete padrão como ilustrado na Figura 1.

As propriedades mecânicas obtidas a partir deste ensaio são as tensões de cedência e máxima (ou resistência à tração), o módulo de elasticidade, alongamento percentual até à fratura e percentagem de redução de área à fratura (Callister & Rethwisch, 2010).

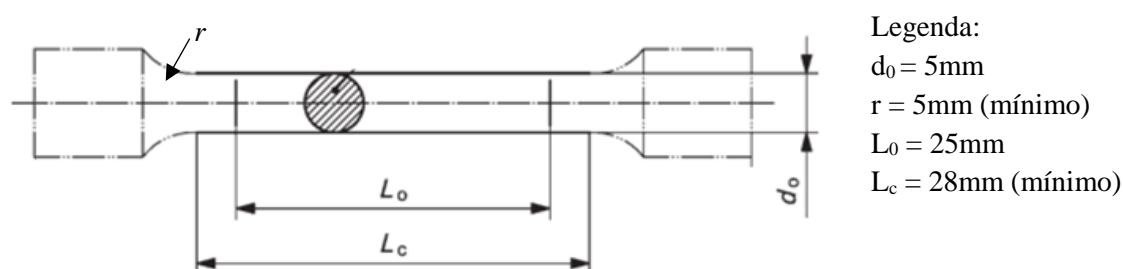


Figura 1 – Provete de tração com secção circular. Adaptado de (ISO 6892, 2016).

### 1.1.2. Ensaio convencional de impacto

O ensaio de impacto permite-nos medir a tenacidade, ou seja, a quantidade de energia que um material pode absorver antes de fraturar. Dentro dos ensaios de impacto existem o ensaio Izod e o ensaio Charpy, sendo o segundo o mais comum. Este ensaio consiste em colocar um provete com entalhe em V (Figura 2) transversalmente aos apoios paralelos da máquina. Neste ensaio, um pêndulo pesado é solto de uma altura conhecida até embater na amostra, e assim durante o seu balanço descendente fratura o provete. Sendo a massa do pêndulo e a diferença entre as alturas inicial e final conhecidas, determina-se a energia absorvida pelo provete (Callister & Rethwisch, 2010). Na Figura 3, está uma comparação do efeito da temperatura na energia de impacto para diferentes materiais (Askeland, Fulay, & Wright, 2011).

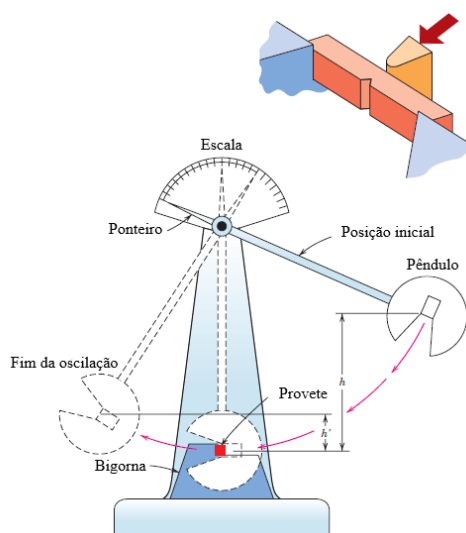


Figura 2 – Esquema de uma máquina de ensaio de impacto Charpy com detalhe superior da posição do provete. Adaptado de (Callister & Rethwisch, 2010).

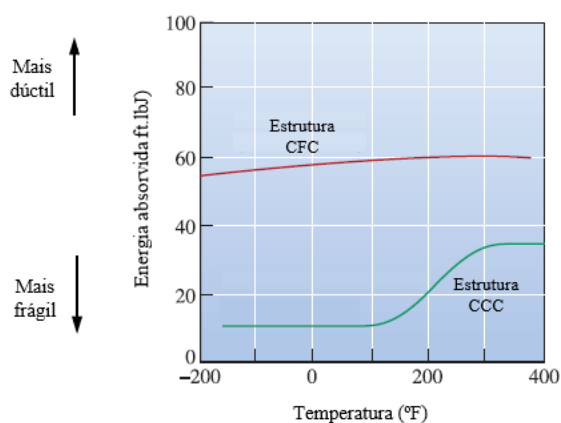


Figura 3 – Efeito da temperatura na energia absorvida para diferentes materiais durante o ensaio de impacto. Adaptado de (Askeland, Fulay, & Wright, 2011).

Estes ensaios convencionais permitem obter valores comparativos muito úteis com provetes de materiais como fabricados e equipamento simples. No entanto, estes ensaios não permitem obter valores de propriedades de peças com fissuras ou fendas, que já estiveram em serviço. Com base na mecânica da fratura e utilizando outra conceção de ensaios podem ser realizadas avaliações teórica e experimental da fratura de materiais estruturais com fissuras ou fendas prévias.

## **1.2. Ensaio em provetes miniatura**

Este subcapítulo iniciar-se-á com a apresentação e descrição do avanço na tecnologia dos ensaios a provetes miniatura em relação aos ensaios convencionais, para que servem e que tipos de ensaios em provetes miniatura existem. Será dada maior ênfase à técnica Small Punch utilizada neste trabalho. As seguintes questões devem ser abordadas:

- Qual o mecanismo de ensaio?
- Como é o dispositivo de ensaio?
- Que informação se retira deste ensaio?
- Que relações (equações) existem para determinar as propriedades mecânicas?
- Existe alguma normalização para este tipo de ensaio?

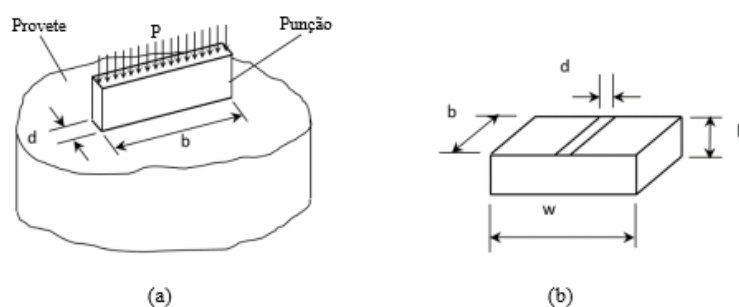
Os ensaios em provetes miniatura servem para obter informação relativa à resistência mecânica dos aços presentes nos equipamentos em serviço, sujeitos a fenómenos de degradação ao longo do tempo e, com isso, determinar a vida restante dos mesmos com base nos resultados obtidos. Estes ensaios permitem determinar propriedades como a tensão de cedência, tensão máxima, alongamento, tenacidade à fratura e propriedades de fluência a partir de pequenas amostras de materiais.

Os ensaios em provetes miniatura podem ser considerados não destrutivos, pois são retiradas amostras com dimensões muito pequenas com relação às dimensões dos componentes de equipamentos, não tendo assim efeitos significativos (negativos) na resistência dos mesmos, permitindo a continuidade do trabalho dos equipamentos em serviço.

### 1.2.1. Ensaio ‘Impression Creep’ (IC)

O IC apareceu com intuito de ser uma alternativa aos ensaios de fluência convencionais, permitindo assim caracterizar os materiais à fluência a partir de amostras de materiais muito pequenas. A propriedade de fluência do material é a resistência à deformação que este oferece quando está a ser solicitado sob tensão constante e a temperaturas elevadas. Esta técnica consiste na aplicação de uma carga constante através de um punção retangular sobre um provete de superfície plana a temperaturas elevadas (Hyde, Hyde, & Sun, 2012).

Neste tipo de ensaio existe uma relação que consiste no deslocamento do punção (profundidade de penetração) em função do tempo de ensaio em condições de temperaturas elevadas e pressão constante para a determinação da propriedade de fluência. A profundidade de penetração do ensaio IC deve ser muito pequena de modo a ficar apenas uma impressão superficial (Hyde, Hyde, & Sun, 2012).



**Figura 4 – (a) Ensaio IC com o punção retangular, de dimensões  $d = 1\text{mm}$  e  $b = 10\text{mm}$ ; (b) provete de ensaio, de dimensões  $d = 1\text{mm}$ ,  $b = 10\text{mm}$ ,  $w = 10\text{mm}$  e  $h = 2.5\text{mm}$ . Adaptado de (Bridges & Purdy, 2018).**

### 1.2.2. Ensaio de ‘Small Ring’ (SR)

A técnica de SR foi desenvolvida em 2009 por *Hyde et al*, portanto uma das técnicas de ensaios miniatura mais recente e que apresenta potencial para determinar grande parte das propriedades mecânicas dos materiais. Presentemente, entretanto, tem sido mais usado em ensaios de fluência. Como demonstra a Figura 5, a técnica consiste em carregar um pequeno anel diametralmente a partir de duas superfícies de contacto côncavas ou convexas, estando estas posicionadas de forma oposta e paralelas ao eixo do provete. A carga a aplicar ao provete a fim de o deformar pode ser de tração ou de compressão (Kazakeviciute, Rouse, Focatiis, & Hyde, 2018).



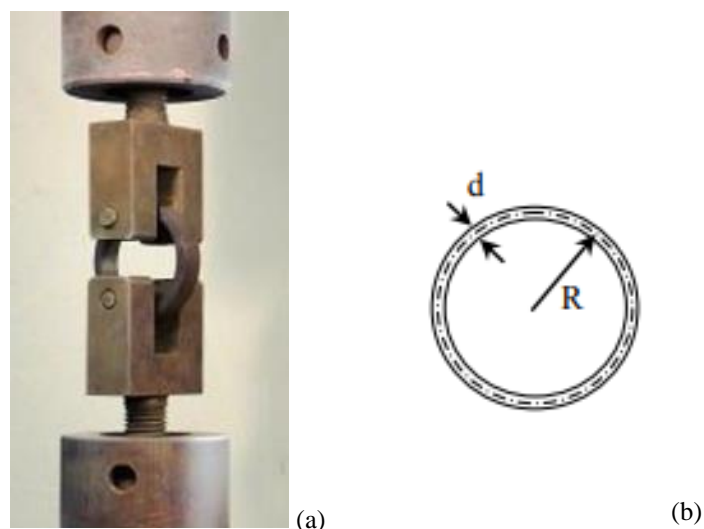


Figura 5 – (a) Montagem do ensaio SR. Adaptado de (Kazakeviciute, Rouse, Focatiis, & Hyde, 2018). (b) detalhe do provete de SR (dimensões  $R = 5\text{mm}$  e  $d = 1\text{mm}$ ). Adaptado de (Hyde, Hyde, & Sun, 2012).

### 1.2.3. Ensaio ‘Conventional Sub-Size Uniaxial’ (CSSU)

Em 1924 a técnica de ensaio CSSU foi normalizada pela *American Society for Testing and Materials* (ASTM), tendo vindo a sofrer atualizações ao longo do tempo.

A técnica de ensaio CSSU, como o próprio nome indica, é em tudo semelhante ao ensaio de tração convencional, exceto na dimensão do provete. Este tipo de provetes (chamados também de *não standard*) podem ser de vários tamanhos em algumas normas, como por exemplo ASTM E8/E8M-16 e ASTM A370-18, onde alguns deles podem ser utilizados para a avaliação de equipamentos em serviço.

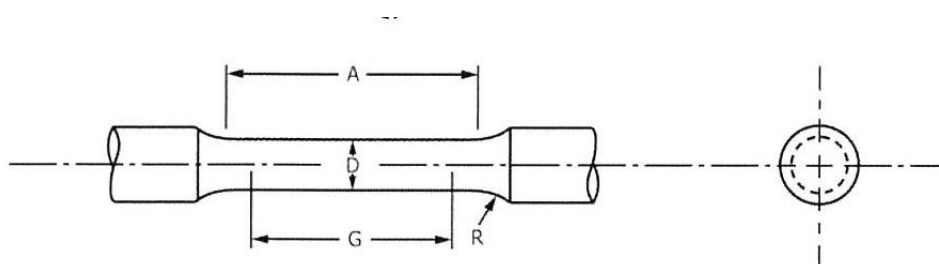


Figura 6 – Exemplo de um provete de CSSU, de dimensões  $D = 2.5\text{mm}$ ,  $R = 2\text{mm}$ ,  $G = 10\text{mm}$  e  $A = 16\text{mm}$  (ASTM A370, 2018).

### **1.3. Ensaio ‘Small Punch’ (SP)**

#### **1.3.1. Introdução à técnica de ensaio**

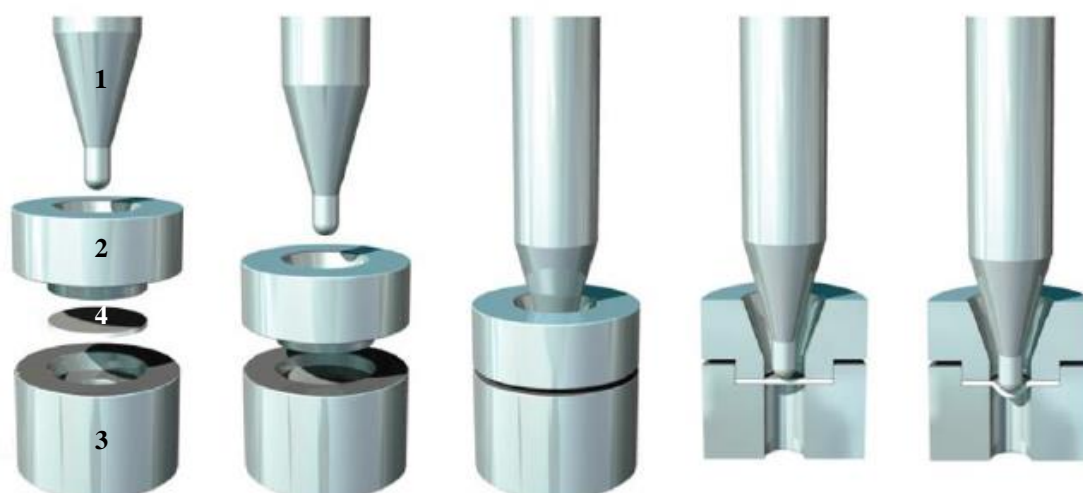
Em 1981 foi publicado pela primeira vez um artigo com a descrição da técnica SP, mas só em 1986 foi registada como sua patente. Estes autores sugeriram esta técnica como uma alternativa aos métodos dos ensaios convencionais de caracterização mecânica, o que reduziria significativamente o volume de material necessário para a caracterização. O seu objetivo incidia na obtenção das propriedades mecânicas dos materiais presentes em equipamentos de centrais termonucleares, para a avaliação do seu estado de degradação quando estes operam sob condições de radiação (Manahan, Argon, & Harling, 1981).

O maior impulso no desenvolvimento desta técnica pode-se dizer que surgiu em 2006 no Workshop da Comissão Europeia de Normalização (CEN) com a elaboração do documento CWA 15627:2006 D/F/E, onde estão apresentadas algumas diretrizes para a realização dos ensaios SP. Este documento, conhecido como um Código Europeu de Boas Práticas, recomenda não só as características geométricas do provete, mas também do dispositivo, parâmetros de ensaio e análise dos resultados, o que fez com que este se tornasse padrão na indústria (CEN, 2006).

Atualmente, a técnica de SP é utilizada para a caracterização de materiais estruturais para centrais nucleares, elétricas, termoelétricas, refinarias, etc. (Kopriva, Eliasova, & Kytka, 2016) (Petzová, Březina, Kapusňák, & Kupča, 2015). É cada vez mais utilizada também em outras indústrias, como aeroespacial (Hurst, Lancaster, Jeffs, & Bache, 2016), automotiva (Fernández, Rodríguez, Belzunce, & García, 2017) ou off-shore (Walters, Bruchhausen, Lapetite, & Duvalois, 2017) e para materiais não metálicos como polímeros (Rodríguez, Cuesta, MasPOCH, & Belzunce, 2016) ou ossos (Singh, Sharma, & Sehgal, 2017).

#### **1.3.2. Princípio de funcionamento do SP**

Um punção com ponta esférica é empurrado através do provete miniatura ao longo de seu eixo como mostrado na Figura 7. O ensaio SP é controlado por deslocamento, isto é, o punção é empurrado a uma velocidade constante da cabeça transversal através da amostra e a carga  $P$  necessária para manter o movimento do punção é medida como uma função da velocidade  $v$  de deslocamento do punção (na ponta do punção) ou pela deflexão  $u$  da amostra (medida no lado inferior da amostra, oposta ao ponto de contato entre o punção e o provete miniatura) (Bruchhausen, et al., 2018).



**Figura 7 - Esquema do dispositivo de ensaio SP: (1) Punção esférico, (2) Matriz superior, (3) Matriz inferior, (4) Provete miniatura. Adaptado de (Bruchhausen, et al., 2018).**

De acordo com Código Europeu de Boas Práticas existem 2 tipos de ensaios SP:

- ❖ *Small Punch Bulge Test* (SPBT) – Neste ensaio o provete é encastrado firmemente entre as matrizes de aperto, impondo assim que a deformação ocorra apenas na zona de contacto com a esfera.
- ❖ *Small Punch Drawing Test* (SPDT) – Neste ensaio o provete é apertado entre as matrizes de forma a permitir o seu escorregamento na direção radial, impondo apenas um constrangimento vertical.

Para a realização deste estudo o tipo de ensaio a ser utilizado será o SPBT. Mais à frente está ilustrada na Figura 9 a deformação que ocorre apenas na zona de contacto do punção (esfera) obtendo uma espessura final ( $t_f$ ) e nas extremidades do provete observamos a sua espessura inicial ( $t_0$ ).

### **1.3.3. Dados obtidos no ensaio**

Na Figura 8 está apresentada uma curva típica ‘carga vs deslocamento’ do punção de um ensaio SP, que permite, em geral, a determinação de diversas propriedades mecânicas, tal como referido anteriormente (Bruchhausen, et al., 2018) e (CEN, 2006).

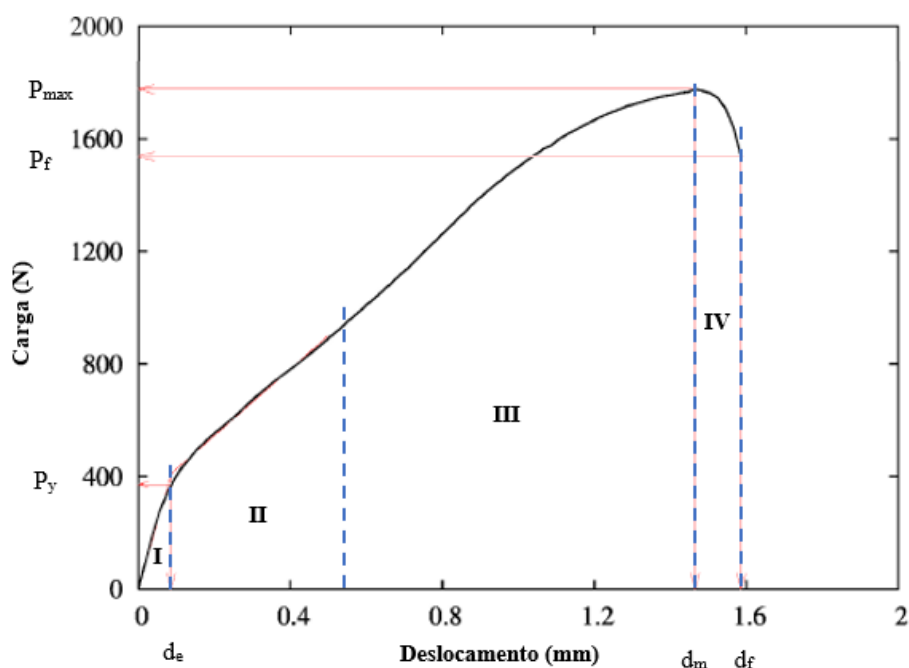
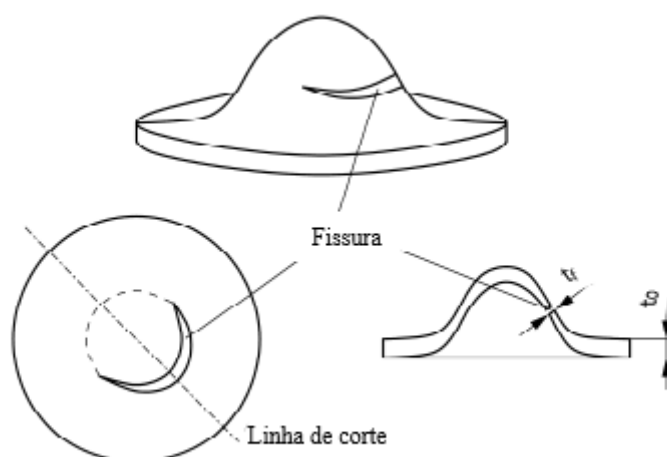


Figura 8 – Curva típica ‘carga vs deslocamento’ do punção num ensaio SP. Adaptado de (CEN, 2006).

De acordo com *Fleury & Ha* a curva ‘carga vs deslocamento’ tem quatro fases distintas, tal como indicado na Figura 8. A primeira fase (I) corresponde à deformação elástica que o provete sofre, na segunda fase (II) dá-se a deformação plástica. A terceira fase (III) corresponde ao alongamento em membrana, na qual a deformação não está associada às tensões provocadas pela flexão do provete, mas sim devido a uma tensão em membrana. Ao aproximar-se da carga máxima, a inclinação da curva começa a diminuir à medida que o mecanismo de falha (em escala microscópica) começa a desenvolver-se (estiramento e fissuras internas), dando origem à quarta fase (IV) onde o estiramento e em seguida uma visível fenda são finalmente produzidos, levando a uma diminuição da carga, até à rotura total da amostra (*Fleury & Ha, 1998*).

No regime de alongamento da membrana, o fluxo de plástico radial torna-se dominante na região não fixa do disco e, conseqüentemente, ocorre uma redução rápida da espessura. Os componentes de tensão de tração tornam-se dominantes, e as distribuições de tensão e de deformação através da espessura tornam-se uniformes à medida que o fluxo plástico progride, ou seja, nesta fase existe uma deformação uniforme biaxial do provete (*Sokolov, Landes, & Lucas, 2002*).



**Figura 9 – Imagem ilustrativa do efeito membrana, em que: (superior) - desenho esquemático do provete SP fissurado; (esquerda)- vista superior do provete SP fissurado; (direita): vista transversal do provete SP com indicação da espessura inicial ( $t_i$ ) e final ( $t_0$ ). Adaptado de (Matocha & Purmenský, 2007).**

### 1.3.4. Conversão de dados dos ensaios SP para as respetivas propriedades mecânicas

Foram desenvolvidas equações para se poder obter os valores de tensão de cedência ( $\sigma_y$ ), tensão máxima ( $\sigma_{UTS}$ ), alongamento<sup>1</sup> (A) e módulo de elasticidade (E), com base na curva carga vs deslocamento do punção. *Fleury e Ha* mostraram a correlação linear entre os valores obtidos com base na curva de ensaio SP e os resultados dos ensaios uniaxiais convencionais para diferentes temperaturas com diferentes aços Cr-Mo. Os autores, a partir desses resultados, observaram uma diferença entre a inclinação das retas, que posteriormente seriam utilizadas para o desenvolvimento de equações empíricas de correlação de carga e tensão, para os diferentes materiais (Fleury & Ha, 1998).

A curva (Figura 8) obtida no ensaio é relacionada com as propriedades mecânicas por meio de correlações matemáticas, que dependem das propriedades do material, assim como da geometria da amostra e do punção utilizado no ensaio (Hyde, Sun, & Becker, 1996). Neste caso, alguns pontos são de importância extrema (Rodríguez, García Cabezas, & Cárdena, 2009):

$P_y$  é a carga onde se considera que a deformação plástica começa. Pode ser obtida por diferentes técnicas ainda em estudo.

<sup>1</sup> Ductilidade - grau de deformação plástica que o material sofre até à fratura (expresso em percentagem de alongamento).

$P_{max}$  é a carga máxima obtida durante todo o ensaio e onde se considera o valor para calcular a tensão máxima.

$d_m$  é o deslocamento utilizado para cálculo do alongamento. A escolha desse ponto é ainda discutida, pois há uma grande dificuldade em determinar com precisão quando é que há a rotura do provete durante o ensaio. Desse modo, alguns autores relatam que o ponto de alongamento relativo à carga máxima é mais preciso do que o valor final do deslocamento (García, Rodríguez, Belzuno, & Suárez, 2014).

A determinação desses pontos ainda é muito explorada, especificamente para o  $P_y$  pois é com base nesses dados que as equações são desenvolvidas para uma melhor aproximação dos valores de tensão resultantes de ensaios convencionais de tração. Em 2014 *García et al.* apresentou resumidamente os 5 métodos já desenvolvidos para a obtenção do valor de  $P_y$  com base em pesquisas anteriores, como *Mao et al.* em 1987 e *Rodríguez et al.* em 2009. O objetivo desses estudos era tentar desenvolver uma maneira de obter o valor de  $P_y$  que resultasse numa equação para o cálculo da tensão de cedência sendo menos dependente do material e que obtivesse uma aproximação boa com os valores adquiridos através dos ensaios convencionais de tração, tanto em temperatura ambiente quanto em altas temperaturas. A Figura 10 apresenta graficamente o processo de obtenção de  $P_y$  por cada um dos métodos, conforme é descrito a seguir.

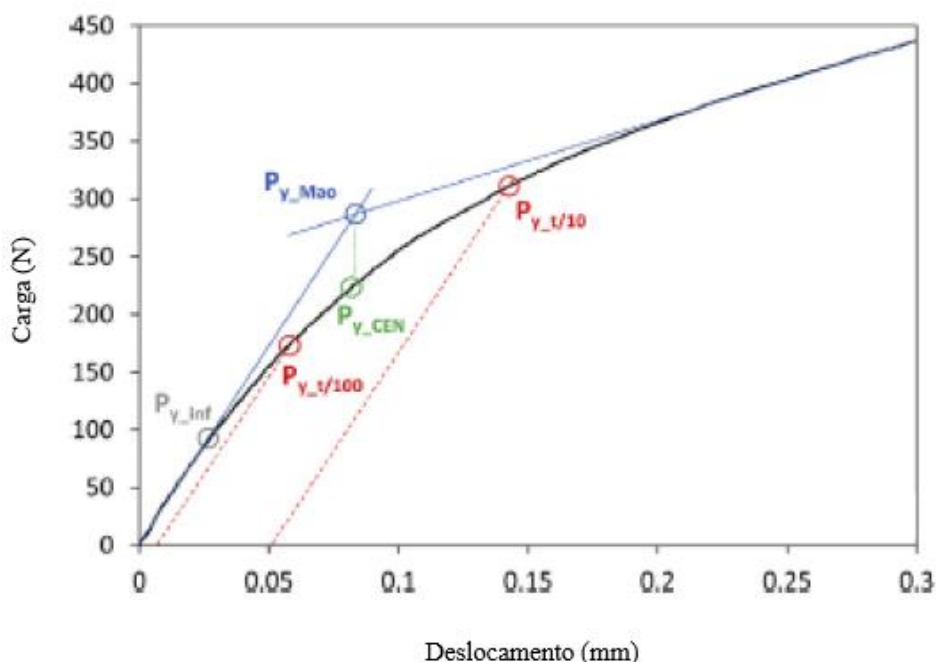


Figura 10 - Diferentes propostas para a determinação de  $P_y$ . Adaptado de (García, Rodríguez, Belzuno, & Suárez, 2014).

Em 1987 *Mao & Takahashi* definiram  $P_y$  como o ponto de interseção de duas tangentes definidas no regime elástico (região I) e do regime plástico (zona II) – denominado  $P_{y\_Mao}$ . O Código Europeu de Boas Práticas propôs que  $P_y$  fosse definido como a projeção vertical do ponto de interseção das duas tangentes descritas por *Mao & Takahashi* em 1987 – chamando de  $P_{y\_CEN}$ . Nos trabalhos apresentados por *Rodríguez et al.* em 2009 a carga  $P_y$  é obtida através do ponto de interseção entre a curva de ensaio SP e uma reta paralela à inclinação inicial do gráfico (obtida apenas na região elástica), com um deslocamento de  $t/10$  ou  $t/100$  ( $P_{y\_t/10}$  e  $P_{y\_t/100}$ , respetivamente), onde  $t$  é a espessura do provete ensaiado. Esse método ( $P_{y\_t/10}$  e  $P_{y\_t/100}$ ) é muito semelhante ao aplicado nos ensaios convencionais. Uma proposta mais recente determina  $P_y$  como a carga correspondente ao primeiro ponto de inflexão localizado na zona I,  $P_{y\_inf}$  (*García, Rodríguez, Belzuno, & Suárez, 2014*).

Todos os autores referidos anteriormente descrevem  $P_{max}$  como ponto em que o valor máximo de carga é obtido durante o ensaio. Em relação ao alongamento, devido à dificuldade de determinar o ponto exato de rotura do provete do ensaio SP, o valor  $d_m$  é definido melhor como o valor de deslocamento onde a carga é máxima tendo em vista que após esse ponto o provete colapsa rapidamente (*García, Rodríguez, Belzuno, & Suárez, 2014*).

Depois da aquisição dos dados de  $P_y$  e  $P_{max}$ , em 1987 *Mao & Takahashi* apresentaram equações para adquirir os valores de tensão de cedência ( $\sigma_y$ ) e tensão máxima ( $\sigma_{UTS}$ ), que posteriormente seriam descritas conforme mostrou *García et al.* em 2014. As equações 1 e 2 representam as relações entre carga e a tensão de cedência ( $\sigma_y$ ) e tensão de máxima ( $\sigma_{UTS}$ ) respetivamente.

$$\sigma_y = \alpha_1 \cdot \frac{P_y}{t^2} + \alpha_2 \quad [1]$$

$$\sigma_{UTS} = \beta_1 \cdot \frac{P_{max}}{t^2} + \beta_2 \quad [2]$$

Os coeficientes  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $\beta_1$  e  $\beta_2$  são constantes dependentes principalmente do tipo de material, das dimensões do provete e dos parâmetros de ensaio e  $t$  é a espessura do provete utilizado, sendo considerado padrão  $t = 0,5$  mm. Conforme apresentado por *García et al.* em 2014, pesquisas recentes levaram ao desenvolvimento de duas equações alternativas para o cálculo da tensão máxima, uma com base na espessura do provete e a outra com o

produto entre a espessura do provete e o valor do deslocamento onde a carga é máxima ( $d_m$ ). Dessa forma, o cálculo pode ser descrito conforme mostram as equações 3 e 4.

$$\sigma_{UTS} = \beta'_1 \cdot \frac{P_{max}}{t} + \beta'_2 \quad [3]$$

$$\sigma_{UTS} = \beta''_1 \cdot \frac{P_{max}}{(t \cdot d_m)} + \beta''_2 \quad [4]$$

Segundo *García et al.* existem duas relações que podem ser encontradas na literatura para o cálculo do alongamento. *Fleury e Ha* obtiveram uma relação linear usando a equação 5, enquanto que *Rodríguez et al.* propuseram uma versão normalizada desta dividindo  $d_m$  por  $t$ , equação 6 (García, Rodríguez, Belzuno, & Suárez, 2014).

$$A(\%) = \gamma \cdot d_m \quad [5]$$

$$A(\%) = \gamma' \cdot \frac{d_m}{t} \quad [6]$$

Com base em dados experimentais foram determinadas as constantes para cada método apresentado na Figura 10. Vários materiais foram ensaiados e o valor da constante para a tensão de cedência foi obtido através da razão entre  $\sigma_y$  de cada material com o valor  $P_y/t^2$ , sendo o valor de  $P_y$  obtido de modos diferentes, dependendo do método. A Figura 11 mostra a relação entre  $P_y/t^2$  e  $\sigma_y$  para os vários métodos (García, Rodríguez, Belzuno, & Suárez, 2014)



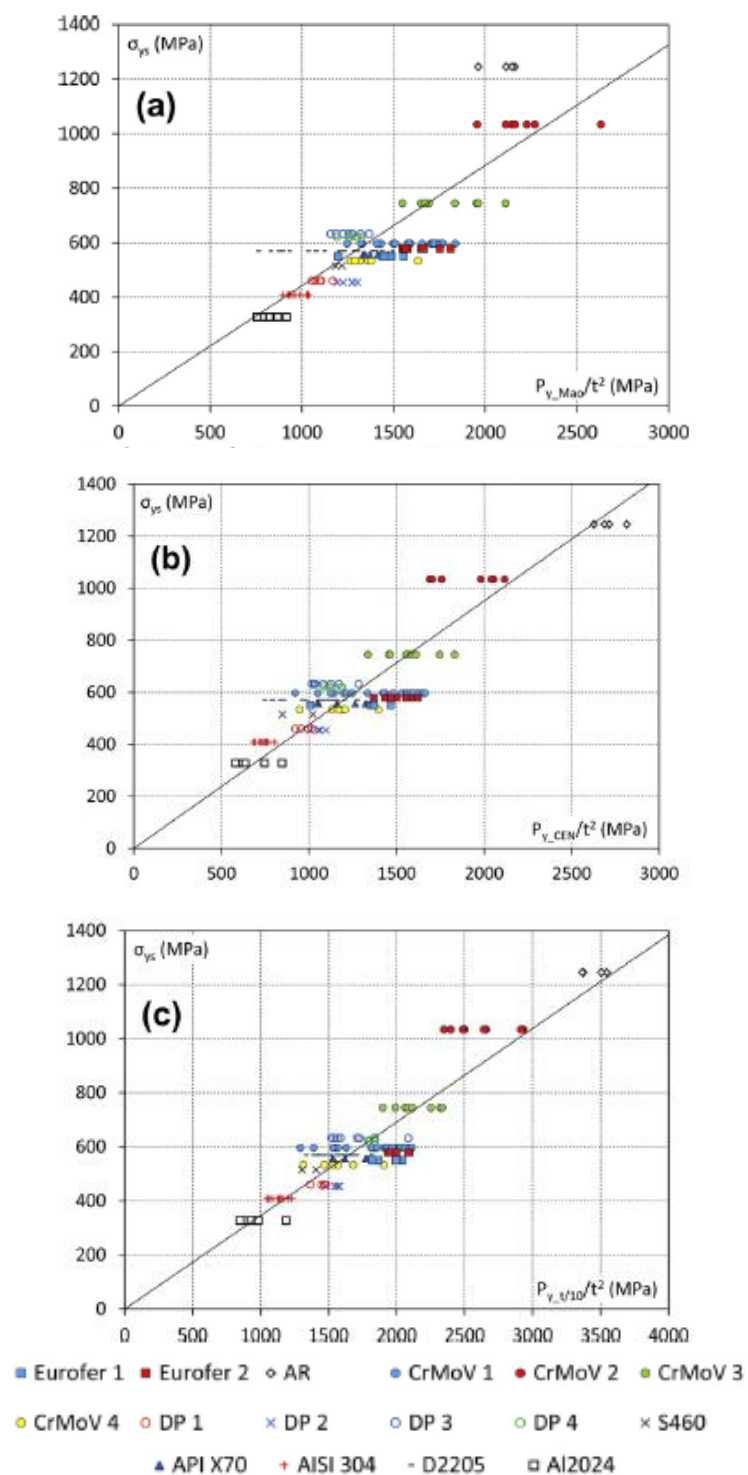


Figura 11 – Relação entre  $P_y/t^2$  e tensão de cedência para a obtenção de  $\sigma_1$ : (a) método de Mao, (b) método de CEN, (c) método de  $t/10$ . Adaptado de (García, Rodríguez, Belzuno, & Suárez, 2014).

De acordo com *García et al.* uma regressão linear que passa pela origem foi obtida nas três avaliações, considerando  $\alpha_1$  menos dependente do material e  $\alpha_2$  nulo, obtendo as equações 7, 8 e 9, que se referem aos métodos de Mao, CEN e t/10 (García, Rodríguez, Belzuno, & Suárez, 2014).

$$\sigma_y = 0,442 \frac{P_{y-Mao}}{t^2} \quad (R^2 = 0,772) \quad [7]$$

$$\sigma_y = 0,476 \frac{P_{y-CEN}}{t^2} \quad (R^2 = 0,889) \quad [8]$$

$$\sigma_y = 0,376 \frac{P_{y-t/10}}{t^2} \quad (R^2 = 0,992) \quad [9]$$

A obtenção da tensão máxima realizada com o mesmo processo acima referido, para a determinação de  $\beta_1$  e  $\beta_2$  em relação aos três critérios de divisão de  $P_{max}$  por  $t^2$ ,  $t$  e  $t.d_m$  (Figura 12) resultando nas equações 10, 11 e 12 (García, Rodríguez, Belzuno, & Suárez, 2014).

$$\sigma_{UTS} = 0,065 \frac{P_{max}}{t^2} + 268,81 \quad (R^2 = 0,456) \quad [10]$$

$$\sigma_{UTS} = 0,129 \frac{P_{max}}{t} + 286,7 \quad (R^2 = 0,422) \quad [11]$$

$$\sigma_{UTS} = 0,277 \frac{P_{max}}{(t.d_m)} \quad (R^2 = 0,940) \quad [12]$$

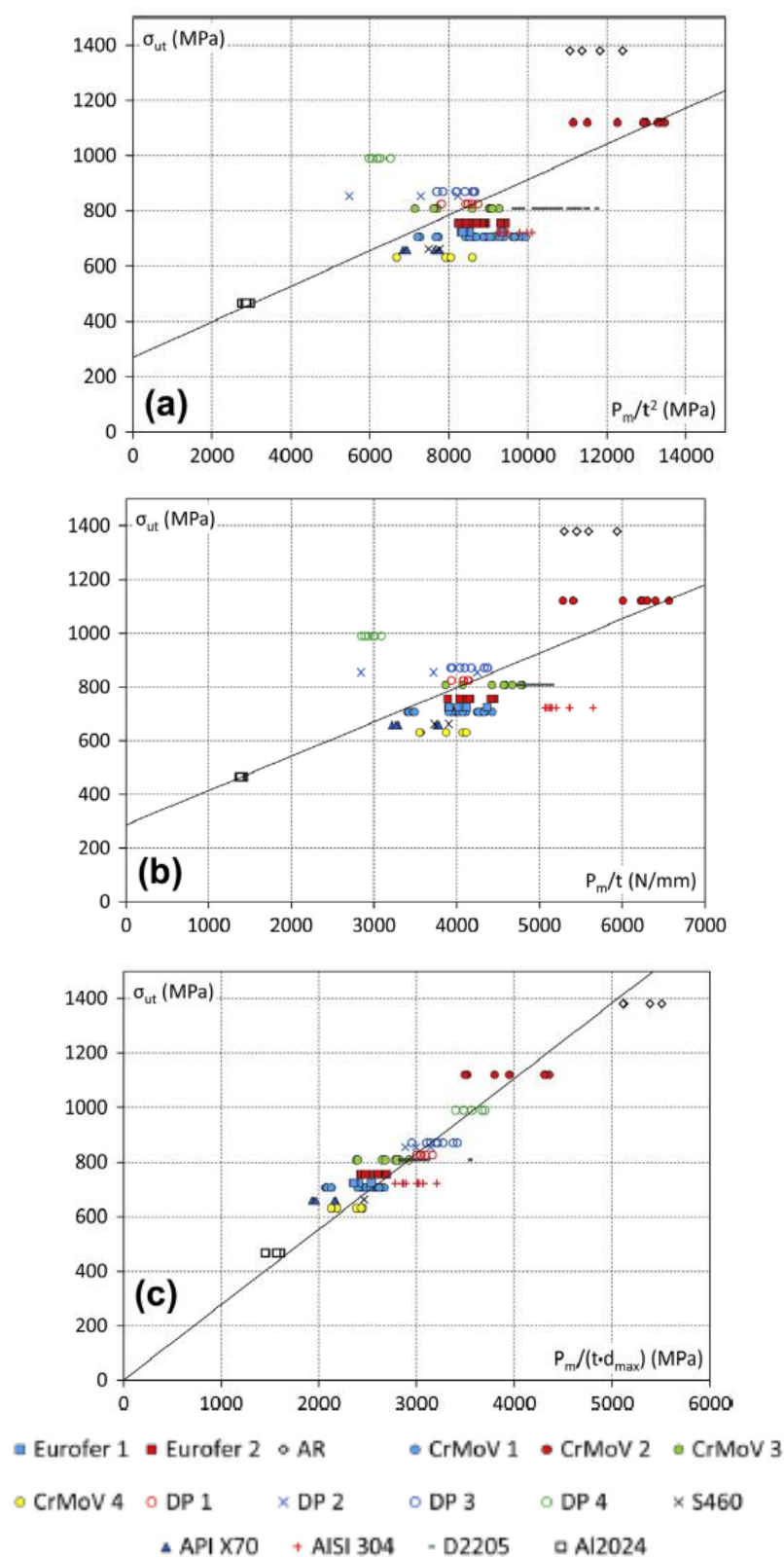


Figura 12 – Relação entre a tensão máxima e (a)  $P_{max}/t^2$ , (b)  $P_{max}/t$  e (c)  $P_{max}/(t \cdot d_m)$  para a obtenção de  $\beta_1$  (García, Rodríguez, Belzuno, & Suárez, 2014).

Segundo *García et al.* a percentagem de alongamento sofreu do mesmo modo as correlações realizadas tanto para a tensão de cedência como para a tensão máxima mostradas na Figura 13 dando origem às equações 13 e 14.

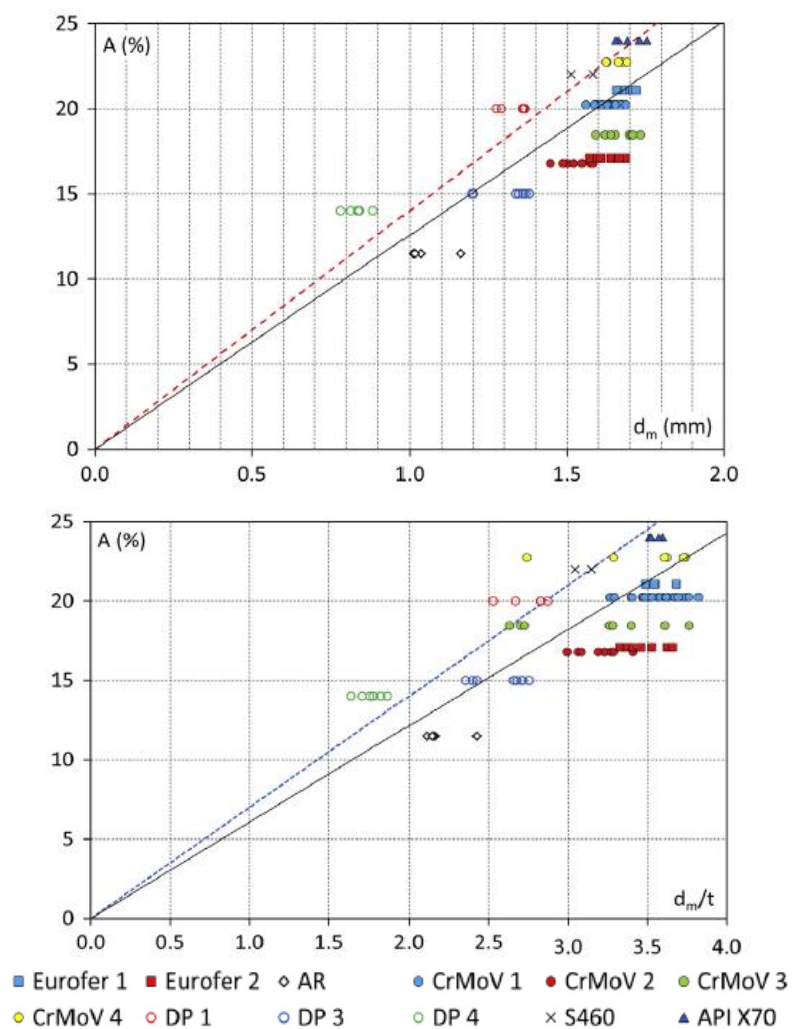


Figura 13 – Relação entre o Alongamento e (a)  $d_m$  e (b)  $d_m/t$ . Adaptado de (García, Rodríguez, Belzuno, & Suárez, 2014)

$$A(\%) = 12,57 d_m \quad (R^2 = 0,554) \quad [13]$$

$$A(\%) = 6,07 \frac{d_m}{t} \quad (R^2 = 0,534) \quad [14]$$

Segundo *Rodríguez et al*, (2009) o módulo de elasticidade  $E$  do material pode ser relacionado com a informação da primeira fase de deformação da curva carga-deslocamento da Figura 8, em que o  $E$  pode ser estimado usando a seguinte relação:

$$E = \frac{\left(\frac{P}{d}\right)_{ini}}{t} \quad [15]$$

onde,  $(P/d)_{ini}$  é o declive da curva carga-deslocamento na primeira fase de deformação e  $t$  a espessura inicial do provete (Rodríguez, García Cabezas, & Cárdena, 2009).

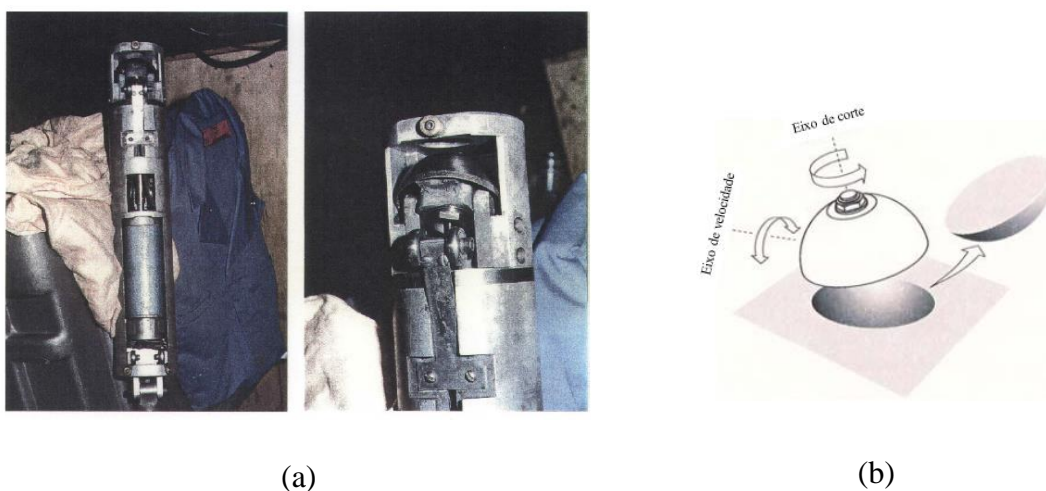
#### 1.4. Tecnologia de remoção de amostras miniatura

Como referido anteriormente os ensaios SP estão ligados à capacidade de extrair amostras miniatura de equipamentos em serviço. Nos últimos 15 anos a indústria de energia elétrica e, em menor escala, a indústria de processos petroquímicos, observaram a aplicação da técnica de remoção de amostras miniatura e o ensaio SP para a avaliação da condição do equipamento. A aplicação foi motivada pela necessidade de avaliar a condição do equipamento envelhecido e sua adequação para o serviço contínuo. Abaixo encontram-se dois exemplos de tecnologias que foram aplicadas e estão atualmente disponíveis (CEN, 2006).

##### 1.4.1. Corte tipo concha

A Rolls-Royce desenvolveu em 1997 uma máquina de recolha de amostras pequenas tipo concha (CEN, 2006). Este equipamento tem como princípio de funcionamento a rotação de dois eixos como demonstra a Figura 14.

Um dos eixos é responsável pela rotação da concha de corte ou taça hemisférica e o segundo pela rotação de avanço ou penetração da taça hemisférica no material a recolher. O corte é efetuado sob um banho de líquido refrigerante que é direcionado para a taça hemisférica, para que o material não sofra alterações provocadas pela temperatura desenvolvida pelo corte. A taça hemisférica roda a alta velocidade e ao mesmo tempo penetra no material lentamente abastecendo a taça, extraindo uma amostra aproximadamente com 25mm de diâmetro e 2.5mm de espessura (Matocha & Purmenský, 2007).



**Figura 14 – (a) Máquina de recolha de amostras criada pela Rolls-Royce (CEN, 2006). (b) Princípio de funcionamento do equipamento de remoção de amostras. Adaptado de (Matocha & Purmenský, 2007).**

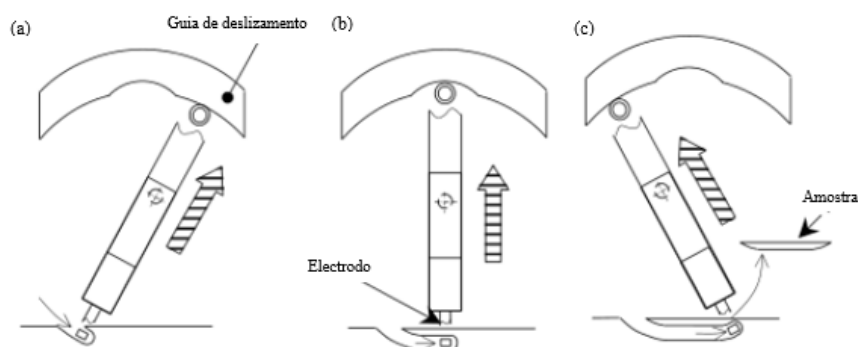
Este equipamento tem como vantagem o facto de se conseguir obter vários provetes numa só amostra recolhida por este processo (Figura 15). Este processo de remoção pode ser considerado não destrutivo, uma vez que o volume da amostra retirada é muito pequeno em relação ao componente em estudo (CEN, 2006).



**Figura 15 – Provetes SP obtidos a partir de uma amostra removida pelo equipamento da Rolls-Royce (CEN, 2006).**

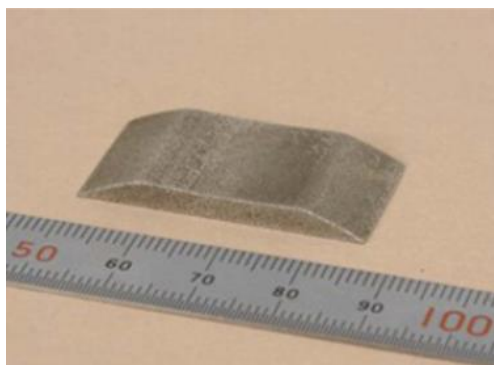
### 1.4.2. Sistema de maquinagem de amostras por descarga elétrica

Okamoto *et al* (2009) desenvolveram um novo equipamento para recolha de amostras. As amostras são removidas por um processo de descarga elétrica entre um eléctrodo e o material a remover, como mostrado na figura 16.



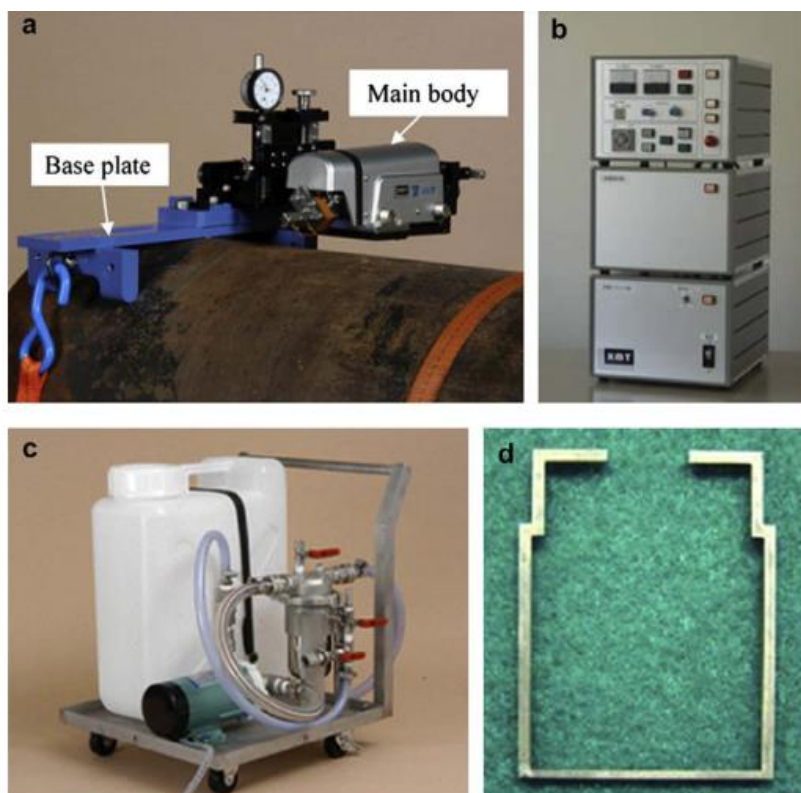
**Figura 16 - Princípio de funcionamento do equipamento para obtenção de amostras pelo método de descarga elétrica: (a) início do trabalho, (b) o trabalho, (c) fim do trabalho. Adaptado de (Okamoto, Kitagawa, Kusumoto, & Kanaya, 2009).**

Na Figura 17 está ilustrada uma amostra típica extraída do material efetuada pelo equipamento de descarga elétrica (Okamoto, Kitagawa, Kusumoto, & Kanaya, 2009).



**Figura 17 – Amostra típica obtida pelo método da descarga elétrica (Okamoto, Kitagawa, Kusumoto, & Kanaya, 2009).**

A Figura 18 mostra a composição do equipamento. O equipamento está dividido em quatro partes: (a) a placa de base que é responsável pela fixação do corpo principal que conduz o eléctrodo ao componente (b) um painel de controlo que controla a condição da descarga elétrica; (c) um reservatório com líquido refrigerante; e (d) um eléctrodo (Okamoto, Kitagawa, Kusumoto, & Kanaya, 2009).



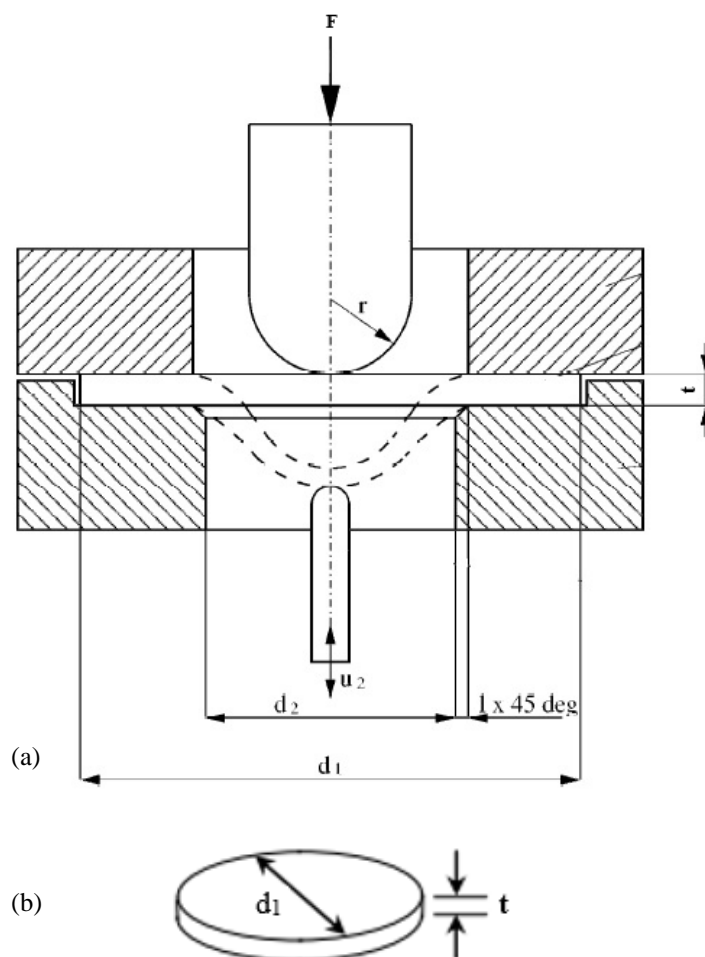
**Figura 18 - Equipamento de recolha de amostras por descarga elétrica: (a) placa de base e corpo principal, (b) painel de controlo, (c) máquina de líquido, (d) eletrodo (Okamoto, Kitagawa, Kusumoto, & Kanaya, 2009).**



## 2. Dispositivo de ensaio e provetes SP

O dispositivo de ensaio foi projetado com base nas recomendações do Código Europeu de Boas Práticas, de forma a possibilitar a realização de ensaios a baixa e alta temperatura e à temperatura ambiente. Os provetes foram também definidos de acordo com o mesmo código e artigos de estudo referidos anteriormente.

Na Figura 19 encontra-se um esquema do dispositivo de ensaio com vista em corte transversal do suporte do provete, do punção esférico e provete de ensaio. Para um provete com 8mm de diâmetro  $d_1$  e 0.5mm de espessura  $t$ , raio  $r$  da ponta do punção igual a 1.25mm e 4mm de diâmetro do orifício da matriz inferior (recetora)  $d_2$ . No Código Europeu de Boas Práticas a aresta do orifício da matriz inferior (recetora) apresenta um chanfro de 0.2mm a 45° na aresta (CEN, 2006), porém outras publicações utilizam um raio de concordância de 0,5mm (Hurst & Matocha, 2015).



**Figura 19 - (a) Esquema do dispositivo do ensaio SP com vista em corte. Adaptado de (CEN, 2006).  
(b) detalhe do provete SP (Hyde, Hyde, & Sun, 2012).**

Quanto ao material do dispositivo de ensaio, o Código Europeu de Boas Práticas recomenda que as matrizes (superior e inferior) e o punção tenham pelo menos uma dureza de 55 HRC (ou 555 HB – tabela de conversão apresentada no Anexo I), para permitir ensaiar uma maior amplitude de aços sem sofrer qualquer deformação durante o ensaio que influencie os resultados (CEN, 2006).

O material utilizado para o dispositivo do presente trabalho foi um aço inoxidável AISI 316. Este material tem uma dureza de 95 HRB (ou 210 HB - tabela de conversão Anexo I) inferior ao recomendado. Escolheu-se este material pelas seguintes razões:

- É um material austenítico, o que faz com que tenha uma boa resistência a altas temperaturas e ao mesmo tempo não fragilize a baixas temperaturas, permitindo assim realizar ensaios numa vasta gama de temperaturas.
- Embora apresente uma dureza inferior à recomendada, tem uma dureza razoavelmente superior à do material de ensaio (aço A335 P22) que tem uma dureza de 122 HV e 174 HV (ou 116 HB E 167 HB – tabela de conversão Anexo I), para o material do reator e material novo, respetivamente.
- Mais económico nesta fase de projeto.

### 3. Fase experimental – Resultados

#### 3.1. Ensaio convencional de tração

Os ensaios de tração foram realizados segundo as normas ISO 6892-1 e ISO 6892-2 para a temperatura ambiente e alta temperatura, respetivamente. De acordo com as normas podem ser usados dois métodos para a determinação da velocidade de ensaio.

Para o ensaio de tração à temperatura ambiente o LABMAT-UEM, utiliza dois tipos de velocidade: até à cedência é usado controlo de deformação (1.5 %/min), e após atingir a cedência do material o ensaio passa a ser realizado em controlo de posição (0,4Lc mm/min); a mudança de controlo dá-se quando a deformação atinge os 1,5%. No que respeita ao ensaio de tração em altas temperaturas foram utilizadas também dois tipos de velocidade, sendo que: até à cedência é usado o controlo de força (2,0 kN/min) e após atingir a cedência do material o ensaio passa para controlo de posição (4,0 mm/min). A mudança de controlo dá-se quando a deformação atinge os 3% de deformação.

Na Tabela 1 e Tabela 2 são apresentadas a composição química e propriedades mecânicas, respetivamente, para o aço A335 P22.

Na Tabela 3 e Figura 20, encontram-se os resultados obtidos e as curvas de tensão-deformação dos ensaios de tração, para os dois materiais examinados, conforme descritos na introdução.

**Tabela 1 – Composição química do aço A335 P22.**

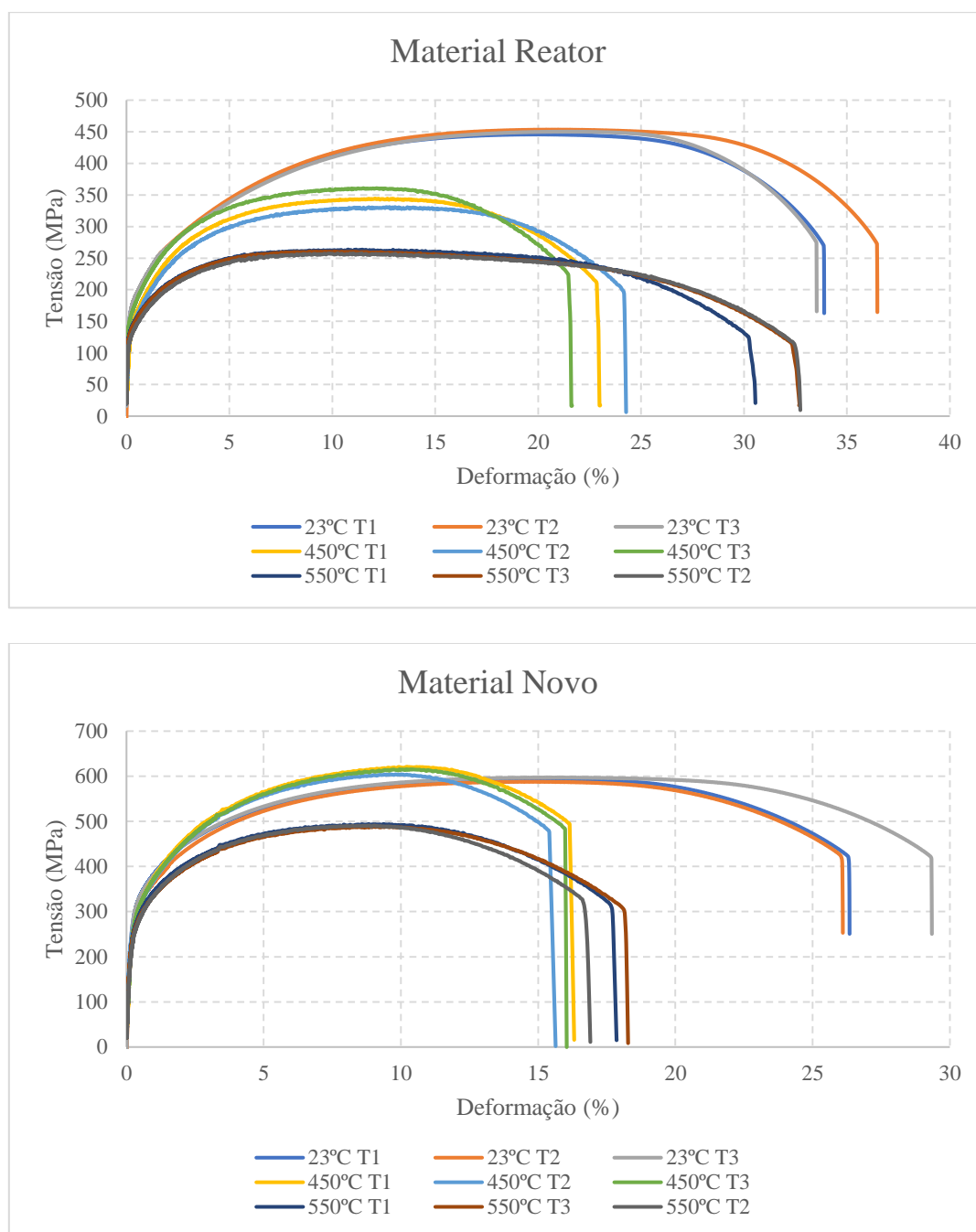
| Carbono (%) | Manganés (%) | Fósforo (%) | Enxofre (%) | Silício (%) | Crómio (%) | Molibdénio (%) |
|-------------|--------------|-------------|-------------|-------------|------------|----------------|
| 0,05-0,15   | 0,30-0,60    | 0,025 (máx) | 0,025 (máx) | 0,50 (máx)  | 1,90-2,60  | 0,87-1,13      |

**Tabela 2 – Propriedades mecânicas do aço A335 P22.**

| Tensão máxima (MPa) | Tensão de cedência (MPa) | Alongamento (%) |
|---------------------|--------------------------|-----------------|
| 415 (min)           | 205 (min)                | 30 (min)        |

**Tabela 3– Propriedades do material do reator e material novo.**

| Material               | Temp.ensaio<br>T<br>(°C) | Tensão de<br>Cedência 0,2%<br>$\sigma_y$<br>(MPa) | Tensão Máxima<br>$\sigma_{UTS}$<br>(MPa) | Alongamento<br>A<br>(%) |
|------------------------|--------------------------|---------------------------------------------------|------------------------------------------|-------------------------|
| Aço A335 P22<br>Reator | 22                       | 182,9                                             | 450,2                                    | 31,1                    |
|                        |                          | 182,8                                             | 453,4                                    | 37,2                    |
|                        |                          | 180,3                                             | 445,8                                    | 33,4                    |
|                        | 450                      | 155,3                                             | 344,2                                    | 26,5                    |
|                        |                          | 143,3                                             | 330,9                                    | 27,8                    |
|                        |                          | 162,1                                             | 360,6                                    | 25,9                    |
|                        | 550                      | 142,3                                             | 263,7                                    | 37,1                    |
|                        |                          | 130,5                                             | 257,5                                    | 38,4                    |
|                        |                          | 140,4                                             | 260,7                                    | 34,5                    |
| Aço A335 P22<br>Novo   | 22                       | 327,0                                             | 593,1                                    | 27,1                    |
|                        |                          | 314,7                                             | 587,8                                    | 26,2                    |
|                        |                          | 326,3                                             | 597,2                                    | 28,9                    |
|                        | 450                      | 305,3                                             | 620,8                                    | 18,6                    |
|                        |                          | 292,6                                             | 604,1                                    | 18,6                    |
|                        |                          | 306,4                                             | 615,4                                    | 18,0                    |
|                        | 550                      | 285,4                                             | 494,2                                    | 19,9                    |
|                        |                          | 274,5                                             | 490,8                                    | 19,1                    |
|                        |                          | 277,0                                             | 489,0                                    | 20,1                    |



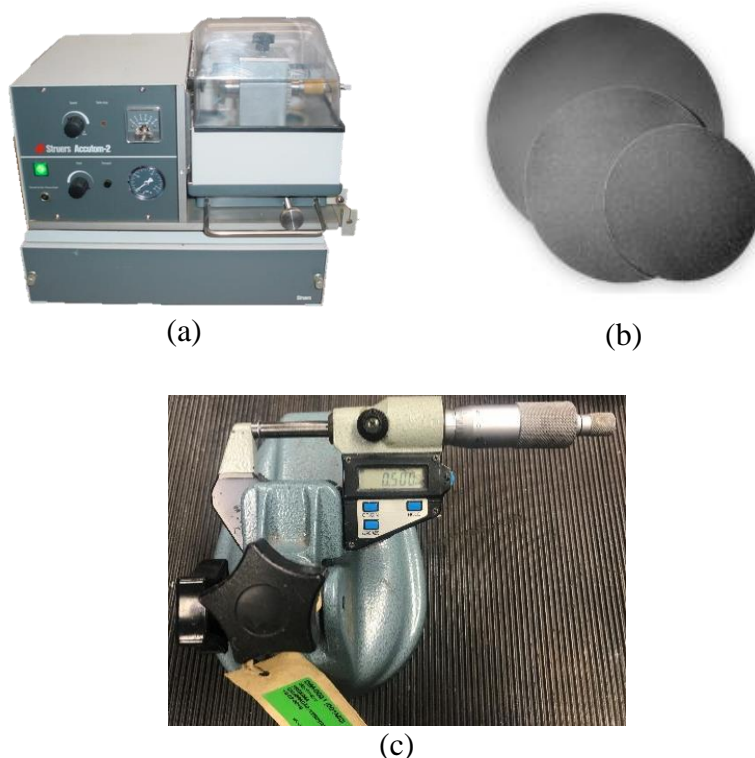
**Figura 20 - Curvas de tensão-deformação dos ensaios de tração, para os dois tipos de materiais em 3 condições de temperatura.**

## 3.2. Ensaio Small Punch

### 3.2.1. Preparação dos provetes SP

Devido às pequenas dimensões de amostras para este estudo, tubos de  $\text{Ø}50 \times 12$  mm e  $\text{Ø}152,4 \times 21$  mm, não foi possível aplicar o método de corte disponível em laboratório, sistema de maquinagem de amostras por descarga elétrica. Por esse motivo, os provetes SP foram maquinados da seguinte forma.

De cada material objeto de estudo, foram maquinados cilindros de 8,0 mm de diâmetro e 100 mm de comprimento. Através de uma máquina de corte de precisão foi possível obter provetes com cerca de 0,6 – 0,7 mm de espessura, que posteriormente foram lixados/polidos com lixas SiC de grão P500 a P1200, até à espessura final de 0,5 mm com uma tolerância de  $\pm 1\%$ , como recomendado do Código Europeu de Boas Práticas (CEN 2006). A figura 21 abaixo mostra o equipamento utilizado nesta fase.



**Figura 21 - (a) Máquina de corte de precisão, (b) lixas SiC, (c) micrómetro utilizado para o controlo dimensional da espessura dos provetes SP.**

O controlo dimensional efetuado aos provetes de ensaio encontra-se no Anexo II.

### 3.2.2. Equipamento utilizado nos ensaios SP

De acordo com as recomendações do Código Europeu de Boas Práticas (CEN 2006), a instrumentação dos ensaios SP foi realizada de acordo com os seguintes pontos:

- ❖ O controlo de carga deve ser feito com uma precisão de  $\pm 1\%$  da carga aplicada.

A máquina eletromecânica, marca INSTRON e modelo 8562H0773, utilizada nos ensaios está equipada com uma célula de carga de 100kN, no entanto está calibrada em classe 0,5<sup>2</sup> (alta precisão) na gama dos ensaios realizados (Anexo III – Certificado de calibração da máquina eletromecânica).

- ❖ O controlo do deslocamento do punção deve ser feito com uma precisão de  $\pm 1\%$  da espessura do provete.

O controlo do deslocamento é efetuado a partir de um extensómetro dinâmico, (marca SJB e modelo 8562Plus, (Figura 22) adaptado ao dispositivo de ensaio, e que funciona à compressão, calibrado em classe 1<sup>3</sup> (Anexo IV – Certificado de calibração do calibrador de extensómetro e Anexo V - Calibração Interna do extensómetro).

- ❖ O controlo da temperatura deve ser feito a partir de sistemas de medição devidamente localizados a fim de medir a temperatura na secção de ensaio.

Para a medição da temperatura utilizou-se um termopar do tipo R (Figura 22), dado que a sua gama de medição vai de 0°C a 1600°C (Anexo VI – Catálogo de características dos termopares).

Para os ensaios de alta temperatura foi utilizado um forno que está acoplado à máquina de ensaio e ligado ao mesmo controlador de temperatura do termopar.

---

<sup>2</sup> Classe 0,5 – Erro máximo admissível (% da amplitude de medição) de  $\pm 0,5\%$ .

<sup>3</sup> Classe 1 – Erro máximo admissível (% da amplitude de medição) de  $\pm 1\%$ .

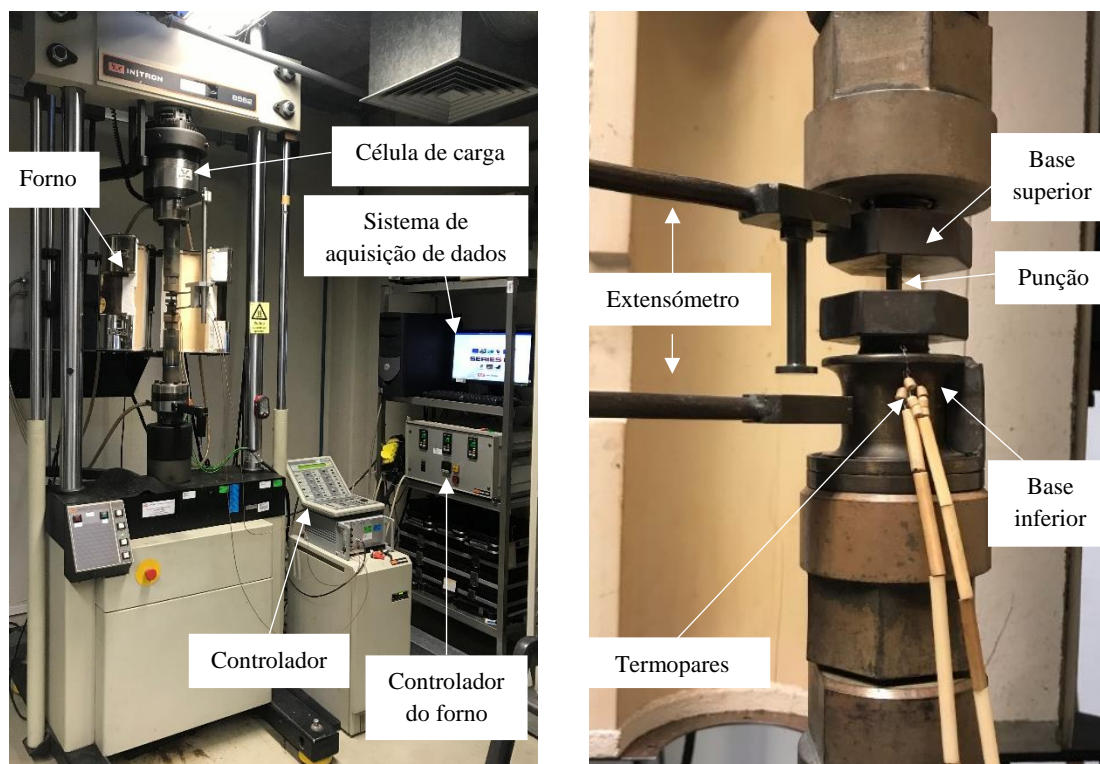


Figura 22 - Equipamento para o ensaio SP com detalhes de: célula de carga, extensómetro, termopar e dispositivo de ensaio.

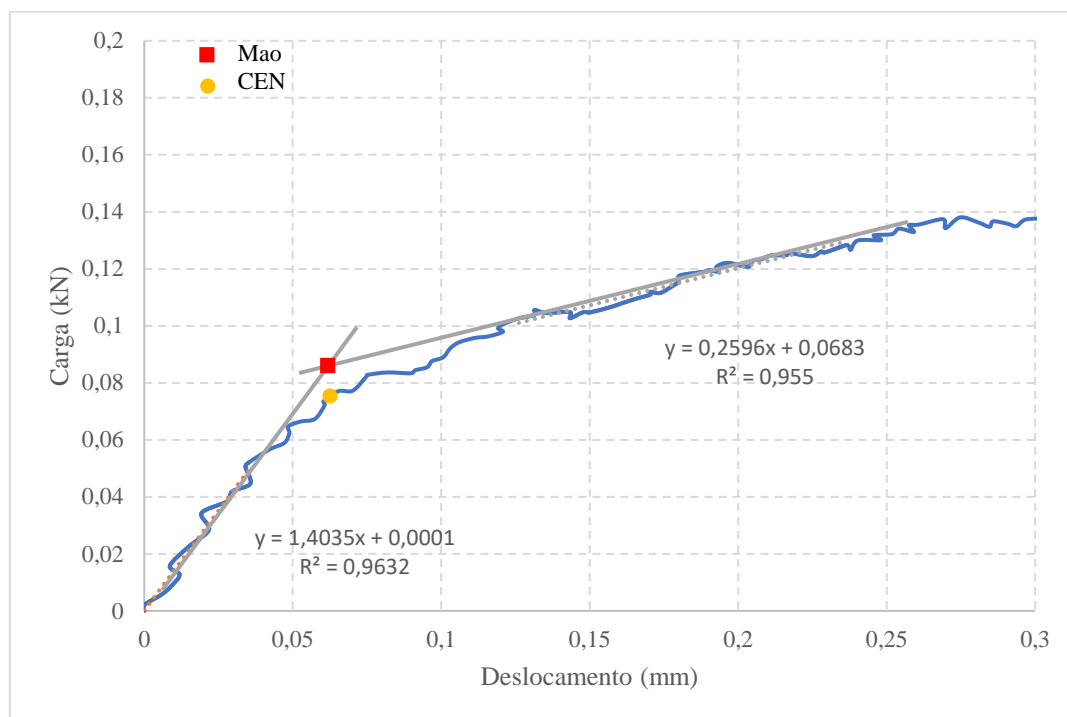
### 3.2.3. Resultados e cálculo das propriedades mecânicas

Com base nos resultados dos ensaios convencionais e dos ensaios SP, houve a necessidade de calcular os coeficientes  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  e  $\gamma$  para o material objeto deste estudo. Os coeficientes que aparecem na literatura consultada podem não ser os mais corretos para o material A335 P22.

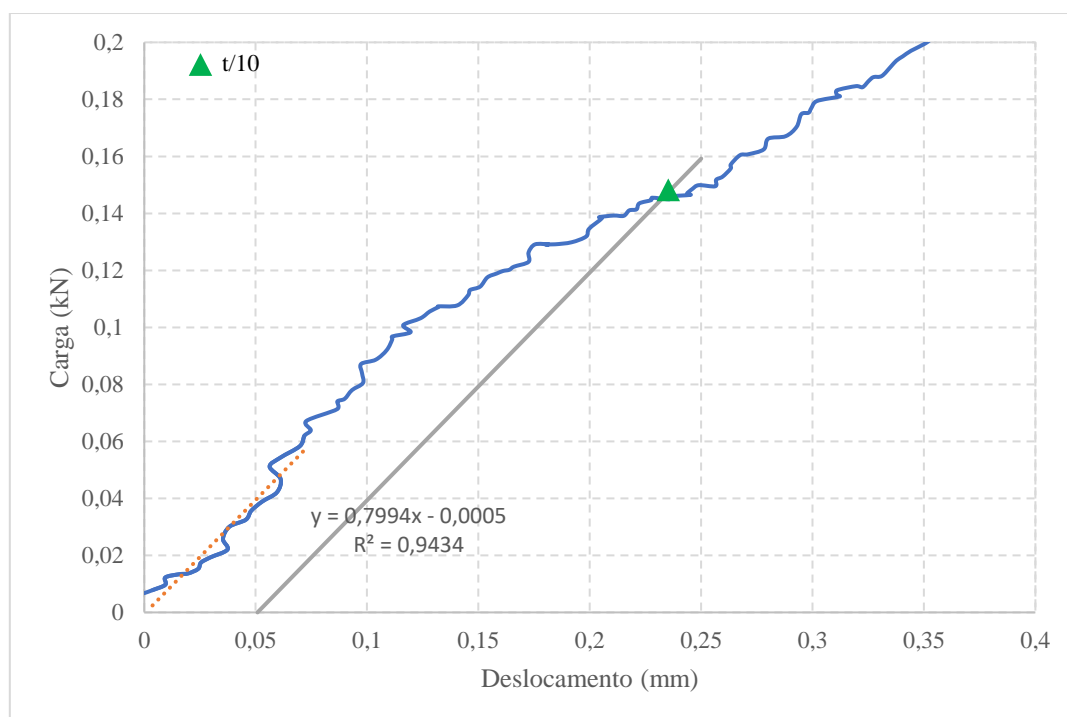
As Figura 23 e 24 exemplificam como foram obtidos os valores de carga para a determinação da tensão de cedência através do ensaio de SP, com base nas três técnicas utilizadas neste trabalho: Mao, CEN e  $t/10$ , conforme descrito anteriormente.

Segundo alguns autores, nomeadamente *Garcia et al*, a cargas  $P_{y,t/100}$  e  $P_{y,inf}$  são obtidas sempre no início da curva, sendo esta uma região mais influenciada pelas imprecisões de medição do extensómetro e da célula de carga, pelo entalhe produzido pelo punção na superfície de contato do provete ou pelo ajuste das diferentes partes do dispositivo de ensaio. Portanto, por estes motivos estas cargas são descartadas para esta análise (García, Rodríguez, Belzuno, & Suárez, 2014).



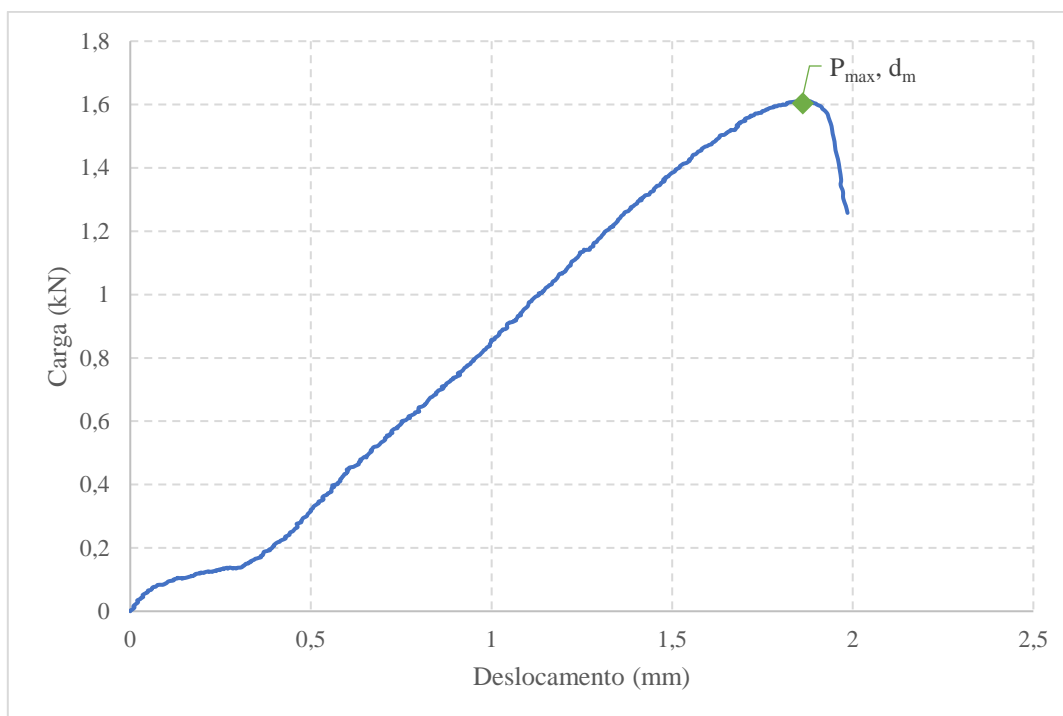


**Figura 23 – Determinação da carga para obtenção da tensão de cedência do material segundo o método de Mao e CEN.**



**Figura 24 - Determinação da carga para obtenção da tensão de cedência do material segundo o método de t/10.**

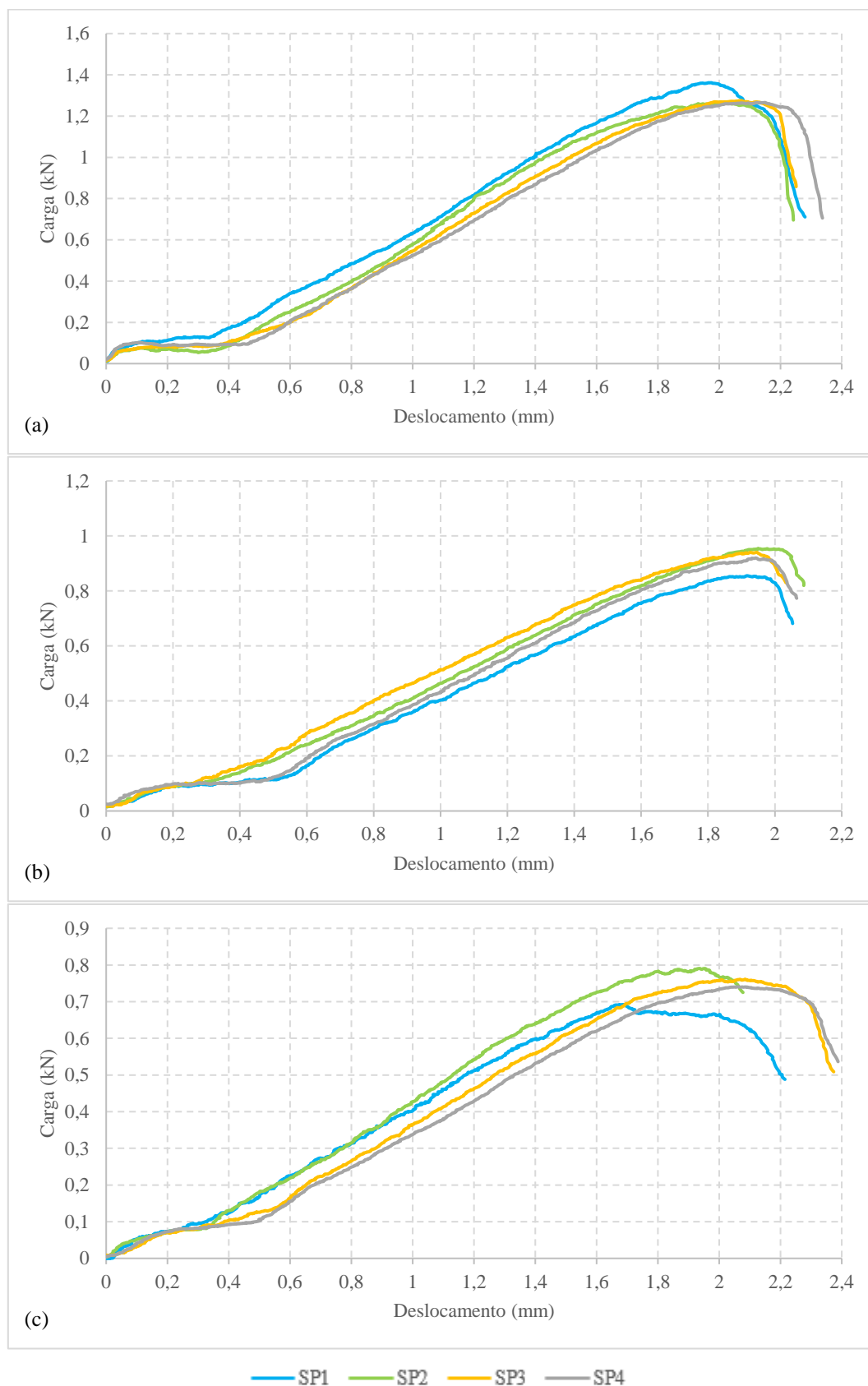
Como se pode verificar a Figura 25 dá um exemplo de como é obtido o valor de carga máxima e deslocamento correspondente para os cálculos de tensão máxima e percentagem de alongamento, respetivamente.



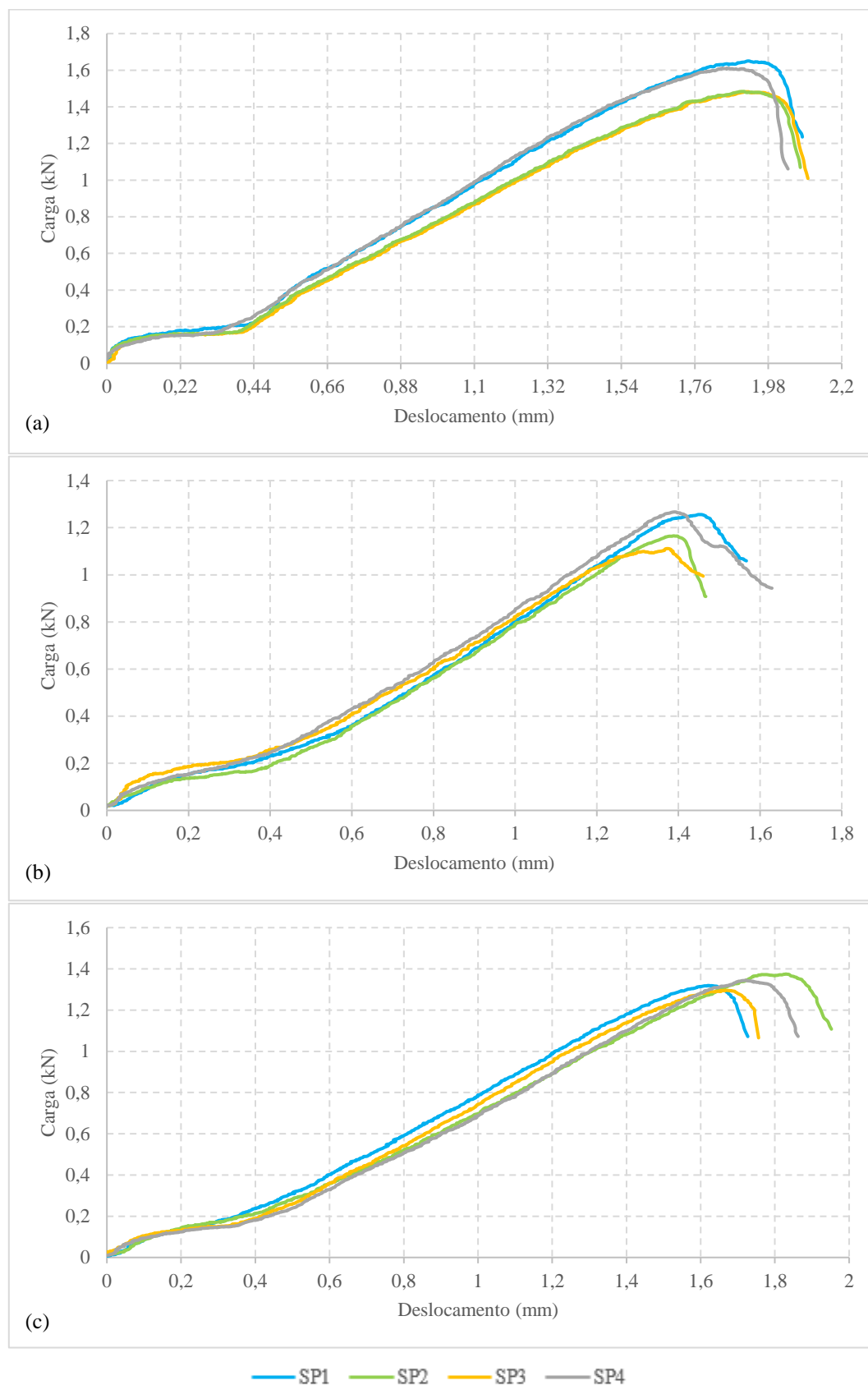
**Figura 25 – Determinação da carga máxima e deslocamento correspondente para a obtenção da tensão máxima.**

Cada um dos dois materiais, reator e novo, foram sujeitos a três condições de ensaio, em termos de temperatura, ensaios à temperatura ambiente, a 450°C e a 550°C. A Tabela 2 apresenta os valores de carga  $P_{y\_Mao}$ ,  $P_{y\_CEN}$ ,  $P_{y\_t/10}$ ,  $P_{max}$  e deslocamento  $d_m$  correspondente à carga máxima obtidos para cada condição de ensaio. Como mostrado na Figura 23, 24 e 25 os valores de carga são muitos baixos e, por esta razão, foram apresentados na Tabela 4 em unidade N. De todos os ensaios realizados foram considerados quatro ensaios válidos para cada condição, designados nas figuras como SP1, SP2, SP3 e SP4.

De um modo geral, como se pode verificar na Figura 26 e Figura 27 as curvas obtidas demonstram uma boa repetibilidade de resultados.



**Figura 26 – Curva carga vs deslocamento dos 4 provetes ensaiados nas três condições de temperatura (a) 23°C, (b) 450°C e (c) 550°C para o material do reator.**

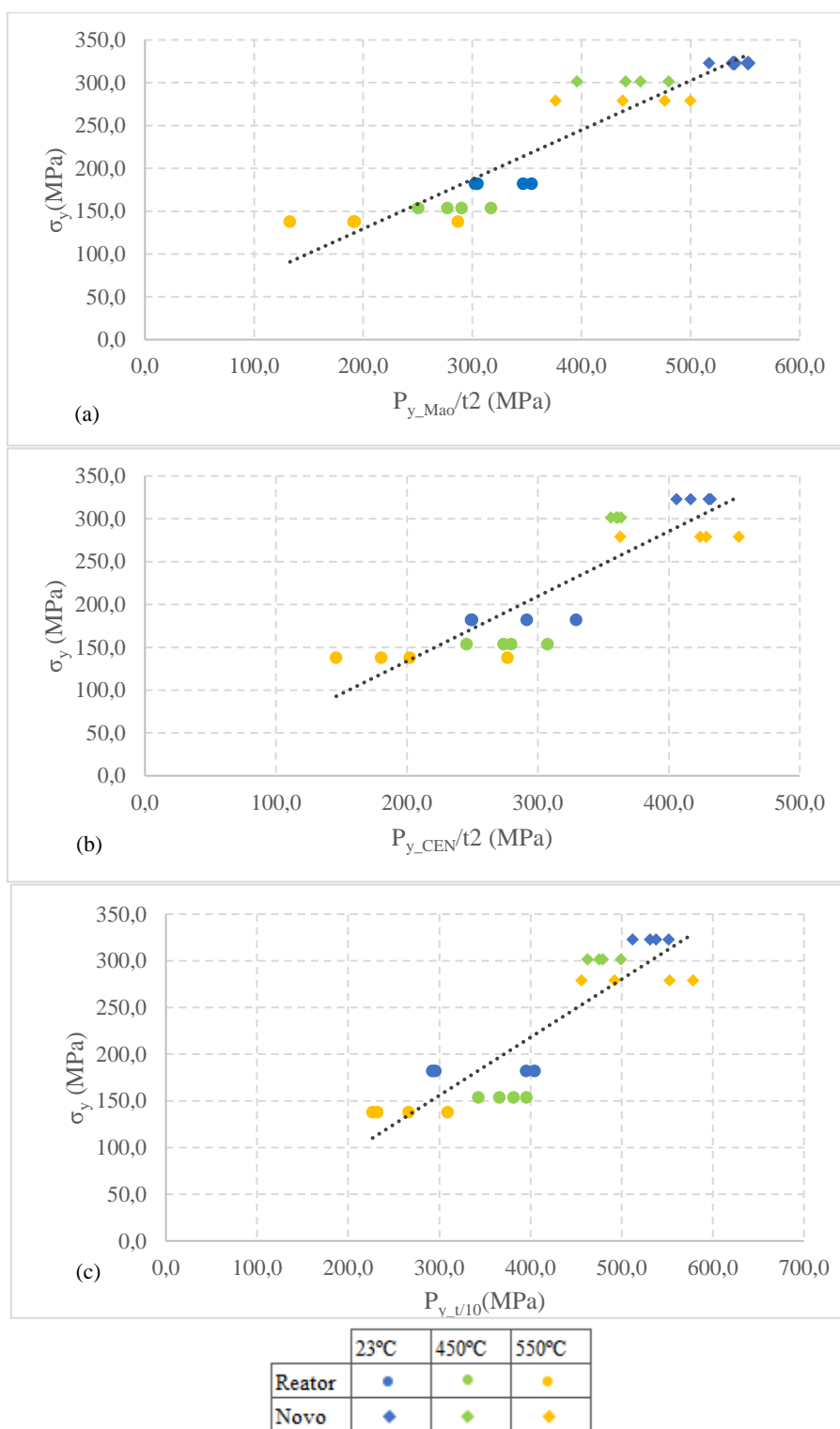


**Figura 27 – Curva carga vs deslocamento dos 4 provetes ensaiados nas três condições de temperatura (a) 23°C, (b) 450°C e (c) 550°C para o material novo.**

**Tabela 4 - Cargas para determinação da tensão de cedência, tensão máxima e percentagem de alongamento obtidas através dos ensaios de SP.**

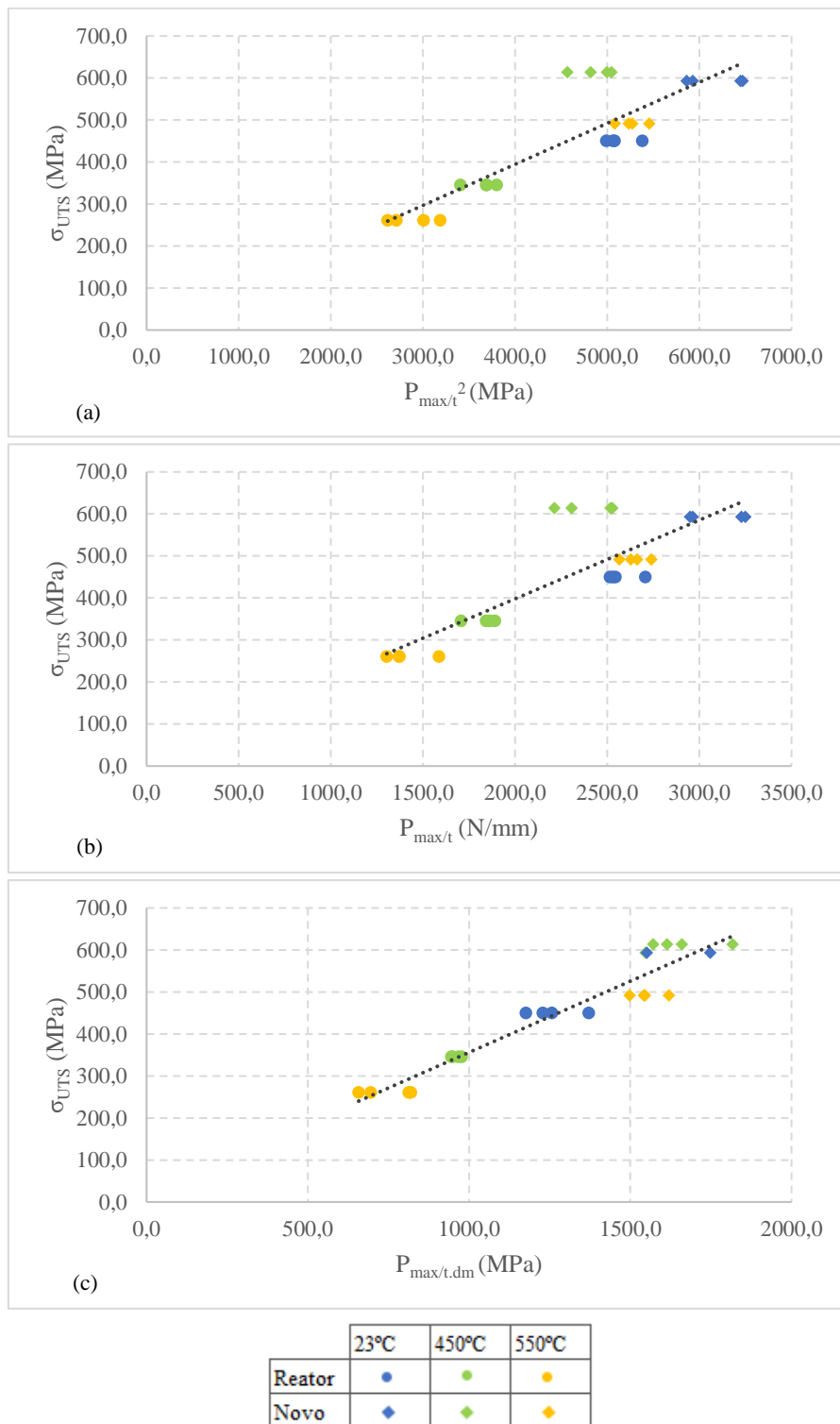
| Referência          |     | Temp. ensaio T (°C) | Carga (N)          |                    |                     |                  | Deslocamento (mm) |
|---------------------|-----|---------------------|--------------------|--------------------|---------------------|------------------|-------------------|
|                     |     |                     | P <sub>y_Mao</sub> | P <sub>y_CEN</sub> | P <sub>y_t/10</sub> | P <sub>max</sub> | d <sub>m</sub>    |
| Aço A335 P22 Reator | SP1 | 23                  | 76,6               | 73,8               | 100,0               | 1361,7           | 1,9740            |
|                     | SP2 |                     | 88,1               | 63,3               | 75,1                | 1267,8           | 2,0011            |
|                     | SP3 |                     | 76,5               | 62,7               | 73,4                | 1275,1           | 2,0712            |
|                     | SP4 |                     | 88,6               | 82,3               | 101,1               | 1265,6           | 2,1508            |
|                     | SP1 | 450                 | 72,8               | 70,2               | 91,9                | 855,3            | 1,9167            |
|                     | SP2 |                     | 85,9               | 85,6               | 99,3                | 954,4            | 1,9494            |
|                     | SP3 |                     | 70,7               | 69,8               | 87,4                | 940,4            | 1,9260            |
|                     | SP4 |                     | 79,0               | 78,4               | 95,0                | 919,6            | 1,9420            |
|                     | SP1 | 550                 | 49,1               | 46,0               | 67,9                | 692,1            | 1,6839            |
|                     | SP2 |                     | 71,1               | 50,1               | 56,2                | 790,5            | 1,9365            |
|                     | SP3 |                     | 73,9               | 71,7               | 78,2                | 761,3            | 2,0847            |
|                     | SP4 |                     | 78,3               | 70,1               | 78,6                | 740,5            | 2,0593            |
| Aço A335 P22 Novo   | SP1 | 23                  | 140,4              | 109,8              | 140,1               | 1638,0           | 1,8590            |
|                     | SP2 |                     | 135,1              | 104,2              | 132,9               | 1482,4           | 1,9147            |
|                     | SP3 |                     | 136,4              | 108,9              | 136,1               | 1484,0           | 1,9011            |
|                     | SP4 |                     | 128,7              | 101,1              | 127,6               | 1610,8           | 1,8424            |
|                     | SP1 | 450                 | 140,5              | 125,8              | 153,8               | 1255,9           | 1,4485            |
|                     | SP2 |                     | 115,8              | 91,8               | 118,0               | 1165,3           | 1,3894            |
|                     | SP3 |                     | 121,0              | 131,9              | 156,9               | 1111,2           | 1,3707            |
|                     | SP4 |                     | 110,6              | 90,7               | 125,3               | 1266,9           | 1,3912            |
|                     | SP1 | 550                 | 120,0              | 114,3              | 145,8               | 1319,2           | 1,6218            |
|                     | SP2 |                     | 126,0              | 108,0              | 139,3               | 1375,2           | 1,8288            |
|                     | SP3 |                     | 111,7              | 108,2              | 125,6               | 1296,4           | 1,6648            |
|                     | SP4 |                     | 96,0               | 92,6               | 116,3               | 1344,6           | 1,7221            |

Com base nos dados apresentados nas Tabela 3 e Tabela 4 foram determinados os valores  $P_y/t^2$  para cada método apresentado, assim como o valor da constante  $\alpha_1$ , que correlaciona  $P_y/t^2$  e a tensão de cedência do material. A Figura 28 apresenta as curvas  $P_y/t^2$  vs tensão de cedência para os materiais estudados neste trabalho e para o método utilizado na determinação da carga de cedência.

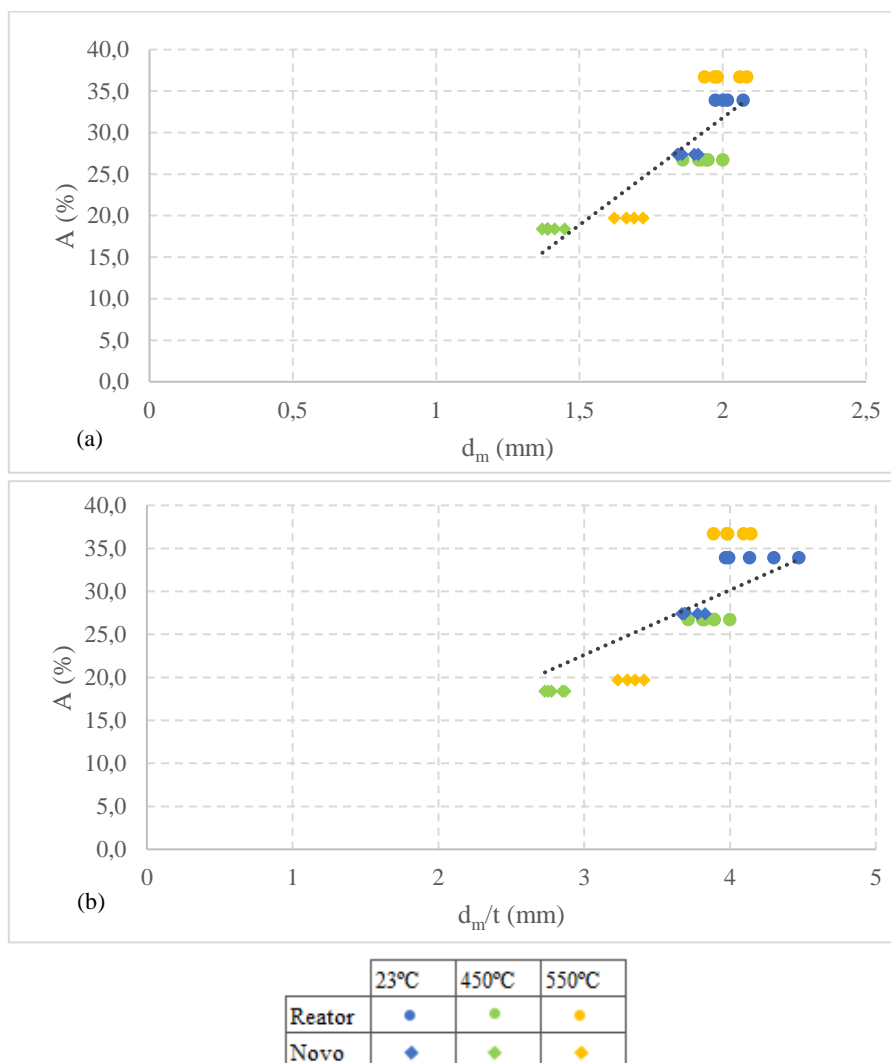


**Figura 28 – Relação entre  $P_y/t^2$  vs tensão de cedência para a obtenção de  $\sigma_1$  através dos métodos de (a) Mao, (b) CEN e (c) t/10.**

Para a tensão máxima e percentagem de alongamento foram realizados processos semelhantes ao apresentado para a tensão de cedência. A Figura 29 apresenta as curvas obtidas para a determinação das constantes  $\beta_1$  e  $\beta_2$  para os métodos  $P_{\max}/t^2$ ,  $P_{\max}/t$  e  $P_{\max}/(t.dm)$  e a Figura 30 para a constante  $y$ .



**Figura 29 - Relação entre a tensão máxima e (a)  $P_{\max}/t^2$ , (b)  $P_{\max}/t$  e (c)  $P_{\max}/(t.dm)$  para a obtenção de  $\beta_1$  e  $\beta_2$ .**



**Figura 30 - Relação entre o alongamento e (a)  $d_m$  e (b)  $d_m/t$  para a obtenção de  $y$ .**

A Tabela 5 resume os valores para as constantes  $\alpha_1$ ,  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  e  $y$  adquiridas através dos gráficos de cada método anteriormente apresentados. É possível observar que os valores obtidos pelas técnicas de Mao e  $t/10$  são muito próximos, contudo, a melhor aproximação (regressão linear) obtida é a de Mao para a tensão de cedência e  $t \cdot d_m$  para a tensão máxima. Quanto ao alongamento as constantes obtidas são semelhantes, tendo em conta que uma é apenas o valor de  $d_m$  e a outra  $d_m/t$ .



**Tabela 5 - Valores das constantes para o cálculo das propriedades mecânicas.**

| Cálculo            | Método            | Constante  |        | Regressão linear (R <sup>2</sup> ) |
|--------------------|-------------------|------------|--------|------------------------------------|
| Tensão de cedência | Mao               | $\alpha_1$ | 0,572  | 0,858                              |
|                    | CEN               |            | 0,768  | 0,771                              |
|                    | t/10              |            | 0,622  | 0,793                              |
| Tensão máxima      | t <sup>2</sup>    | $\beta_1$  | 0,098  | 0,736                              |
|                    |                   | $\beta_2$  | 3,906  |                                    |
|                    | t                 | $\beta_1$  | 0,187  | 0,710                              |
|                    |                   | $\beta_2$  | 23,161 |                                    |
|                    | t.d <sub>m</sub>  | $\beta_1$  | 0,339  | 0,917                              |
|                    |                   | $\beta_2$  | 17,267 |                                    |
| Alongamento        | d <sub>m</sub>    | y          | 14,801 | 0,572                              |
|                    | d <sub>m</sub> /t |            | 7,538  | 0,660                              |

Para a determinação das propriedades mecânicas estas constantes dão origem a novas equações (16 a 23), em função das constantes agora obtidas. A Tabela 6 mostra as propriedades mecânicas calculadas a partir destas equações e dos valores apresentados na Tabela 4.

❖ Tensão de cedência,  $\sigma_y$

$$\sigma_y(\text{MPa}) = 0,572 \frac{P_{y\_Mao}}{t^2} \quad (R^2 = 0,858) \quad [16]$$

$$\sigma_y(\text{MPa}) = 0,768 \frac{P_{y\_CEN}}{t^2} \quad (R^2 = 0,771) \quad [17]$$

$$\sigma_y(\text{MPa}) = 0,622 \frac{P_{y\_t/10}}{t^2} \quad (R^2 = 0,793) \quad [18]$$

❖ Tensão máxima,  $\sigma_{UTS}$

$$\sigma_{UTS}(\text{MPa}) = 0,098 \frac{P_{max}}{t^2} + 3,906 \quad (R^2 = 0,736) \quad [19]$$

$$\sigma_{UTS}(\text{MPa}) = 0,187 \frac{P_{max}}{t} + 23,16 \quad (R^2 = 0,710) \quad [20]$$

$$\sigma_{UTS}(\text{MPa}) = 0,339 \frac{P_{max}}{(t \cdot d_m)} + 17,267 \quad (R^2 = 0,917) \quad [21]$$

❖ Alongamento, A

$$A(\%) = 14,801 d_m \quad (R^2 = 0,572) \quad [22]$$

$$A(\%) = 7,538 \frac{d_m}{t} \quad (R^2 = 0,660) \quad [23]$$

**Tabela 6 – Propriedades mecânicas obtidas nos ensaios SP.**

| Referência          |     | Temp. ensaio (°C) | Tensão de Cedência $\sigma_y$ (MPa) |       |       | Tensão Máxima $\sigma_{UTS}$ (MPa) |       |                  | Alongamento A (%) |                   |
|---------------------|-----|-------------------|-------------------------------------|-------|-------|------------------------------------|-------|------------------|-------------------|-------------------|
|                     |     |                   | Mao                                 | CEN   | t/10  | t <sup>2</sup>                     | t     | d <sub>m,t</sub> | d <sub>m</sub>    | d <sub>m</sub> /t |
| Aço A335 P22 Reator | SP1 | 23                | 178,9                               | 187,1 | 206,3 | 529,2                              | 530,5 | 481,9            | 29,2              | 29,6              |
|                     | SP2 |                   | 174,8                               | 160,0 | 154,4 | 491,0                              | 494,6 | 443,2            | 29,6              | 29,9              |
|                     | SP3 |                   | 180,2                               | 160,5 | 152,7 | 499,7                              | 500,1 | 433,6            | 30,7              | 31,2              |
|                     | SP4 |                   | 209,4                               | 211,2 | 211,1 | 498,0                              | 497,5 | 416,0            | 31,8              | 32,4              |
|                     | SP1 | 450               | 171,6                               | 179,5 | 191,1 | 336,5                              | 343,1 | 319,0            | 28,4              | 28,8              |
|                     | SP2 |                   | 202,2                               | 218,7 | 206,4 | 375,0                              | 380,1 | 348,3            | 28,9              | 29,3              |
|                     | SP3 |                   | 164,0                               | 175,8 | 179,0 | 363,8                              | 372,1 | 344,9            | 28,5              | 28,7              |
|                     | SP4 |                   | 187,5                               | 202,0 | 199,1 | 364,4                              | 368,5 | 338,8            | 28,7              | 29,3              |
|                     | SP1 | 550               | 113,9                               | 116,1 | 139,2 | 268,8                              | 280,0 | 293,0            | 24,9              | 25,1              |
|                     | SP2 |                   | 169,6                               | 130,0 | 118,6 | 315,0                              | 320,6 | 295,0            | 28,7              | 29,3              |
|                     | SP3 |                   | 172,8                               | 181,8 | 161,4 | 297,6                              | 306,8 | 263,3            | 30,9              | 31,2              |
|                     | SP4 |                   | 183,0                               | 177,8 | 162,3 | 289,6                              | 299,0 | 259,5            | 30,5              | 30,9              |
| Aço A335 P22 Novo   | SP1 | 23                | 326,3                               | 277,0 | 287,6 | 633,3                              | 632,2 | 609,6            | 27,5              | 27,8              |
|                     | SP2 |                   | 319,1                               | 267,2 | 277,1 | 582,6                              | 578,8 | 541,9            | 28,3              | 28,9              |
|                     | SP3 |                   | 318,2                               | 276,0 | 280,5 | 576,4                              | 576,0 | 543,0            | 28,1              | 28,5              |
|                     | SP4 |                   | 305,2                               | 260,2 | 267,1 | 635,3                              | 628,1 | 610,9            | 27,3              | 27,8              |
|                     | SP1 | 450               | 325,3                               | 316,0 | 314,4 | 484,5                              | 489,2 | 598,9            | 21,4              | 21,6              |
|                     | SP2 |                   | 268,3                               | 230,8 | 241,4 | 449,9                              | 455,6 | 580,0            | 20,6              | 20,7              |
|                     | SP3 |                   | 283,5                               | 335,3 | 324,5 | 434,3                              | 438,0 | 564,4            | 20,3              | 20,6              |
|                     | SP4 |                   | 260,2                               | 231,6 | 260,4 | 496,5                              | 497,0 | 633,1            | 20,6              | 20,9              |
|                     | SP1 | 550               | 281,3                               | 290,6 | 301,7 | 514,8                              | 515,6 | 566,2            | 24,0              | 24,4              |
|                     | SP2 |                   | 295,2                               | 274,8 | 288,2 | 536,5                              | 536,5 | 524,8            | 27,1              | 27,5              |
|                     | SP3 |                   | 258,7                               | 271,9 | 256,8 | 500,0                              | 504,2 | 539,7            | 24,6              | 24,8              |
|                     | SP4 |                   | 222,4                               | 232,7 | 237,9 | 518,5                              | 522,1 | 541,1            | 25,5              | 25,7              |

### 3.2.1. Comparação entre resultados de ensaios convencionais e SP

Na Figura 31, Figura 32 e Figura 33 está encontra-se graficamente a comparação entre os vários métodos para a obtenção da tensão de cedência, tensão máxima e alongamento entre os ensaios convencionais e os ensaios SP para os dois materiais utilizados neste estudo.

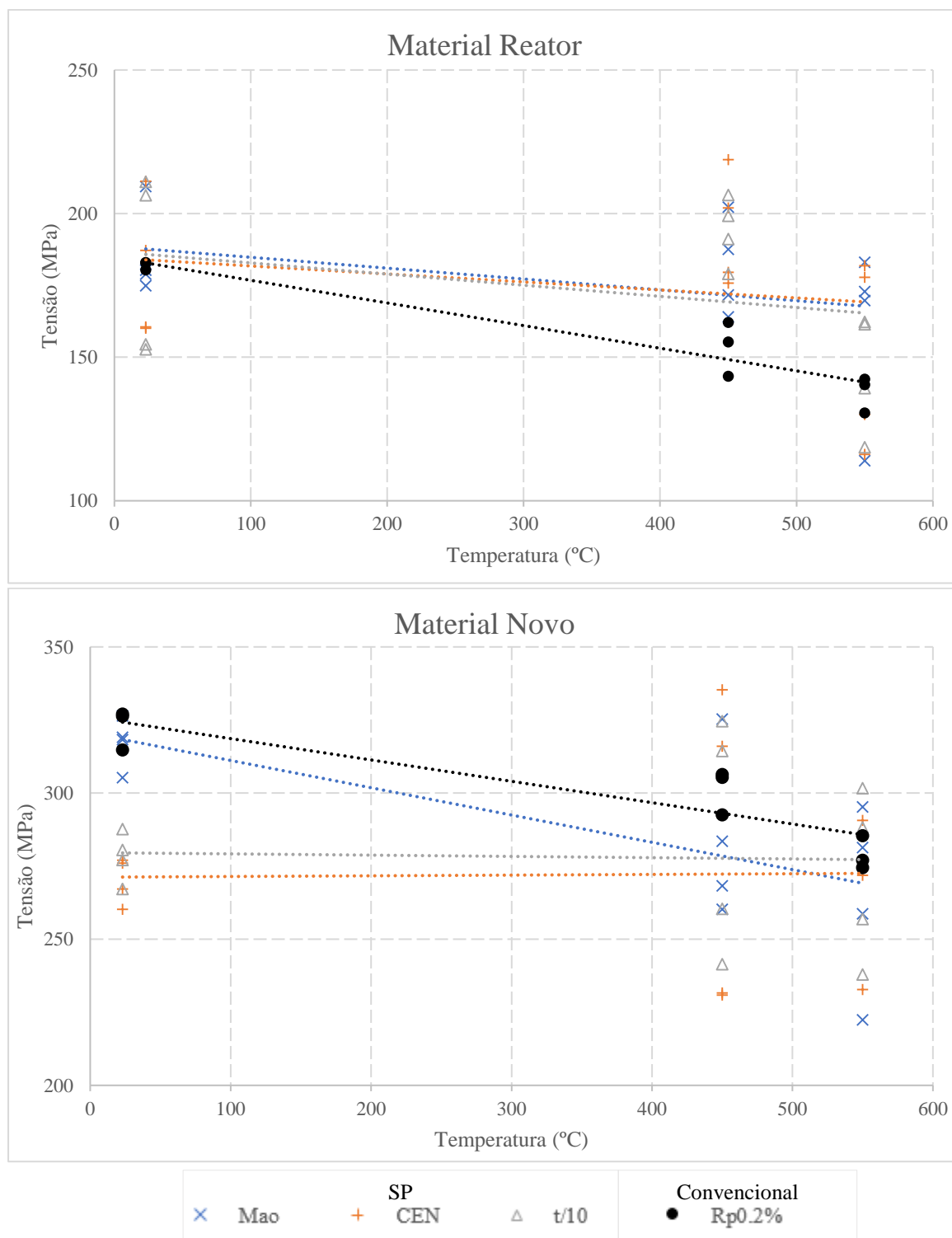


Figura 31 – Tensão de cedência vs temperatura de cada material em estudo.

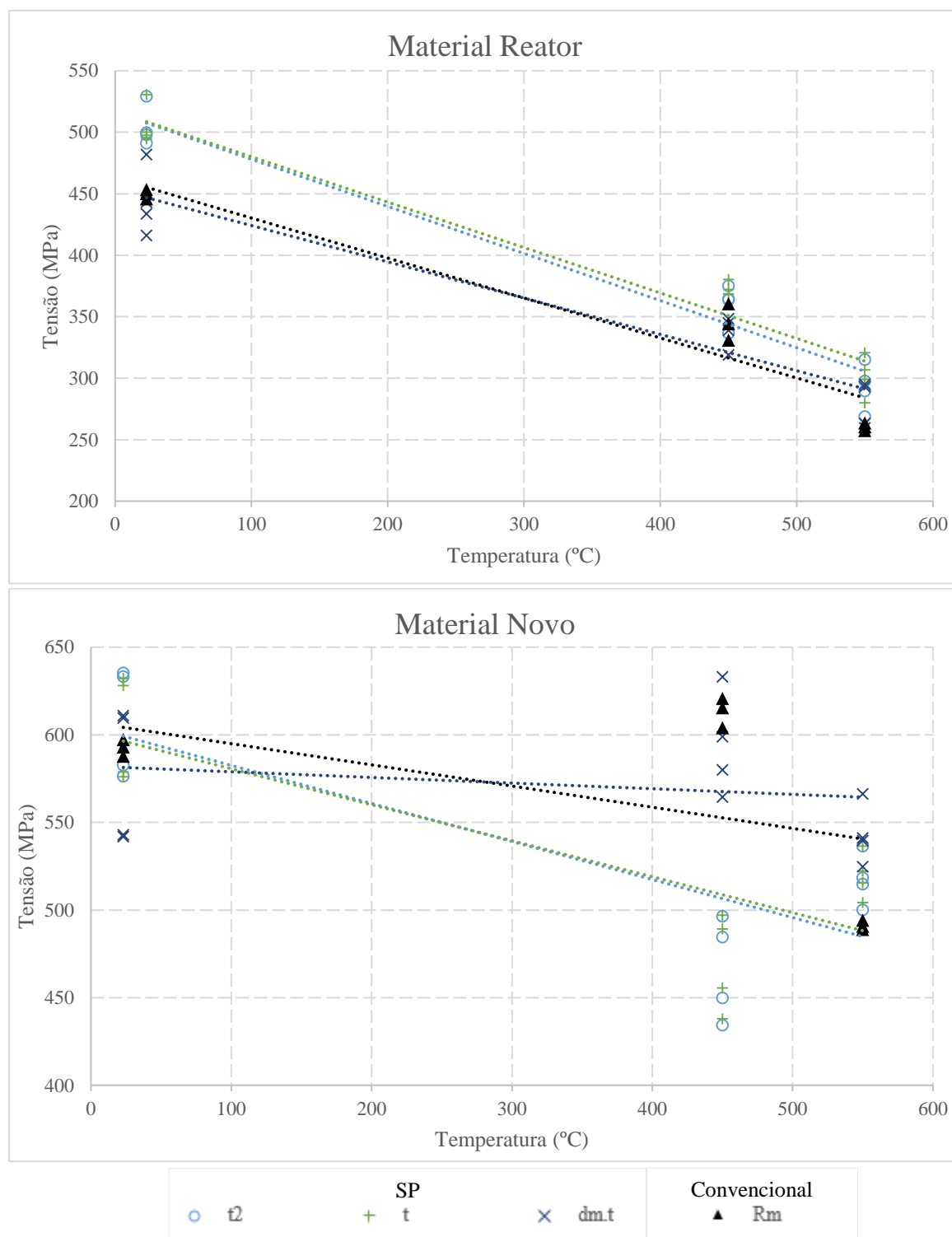


Figura 32 – Tensão máxima vs temperatura de cada material em estudo.

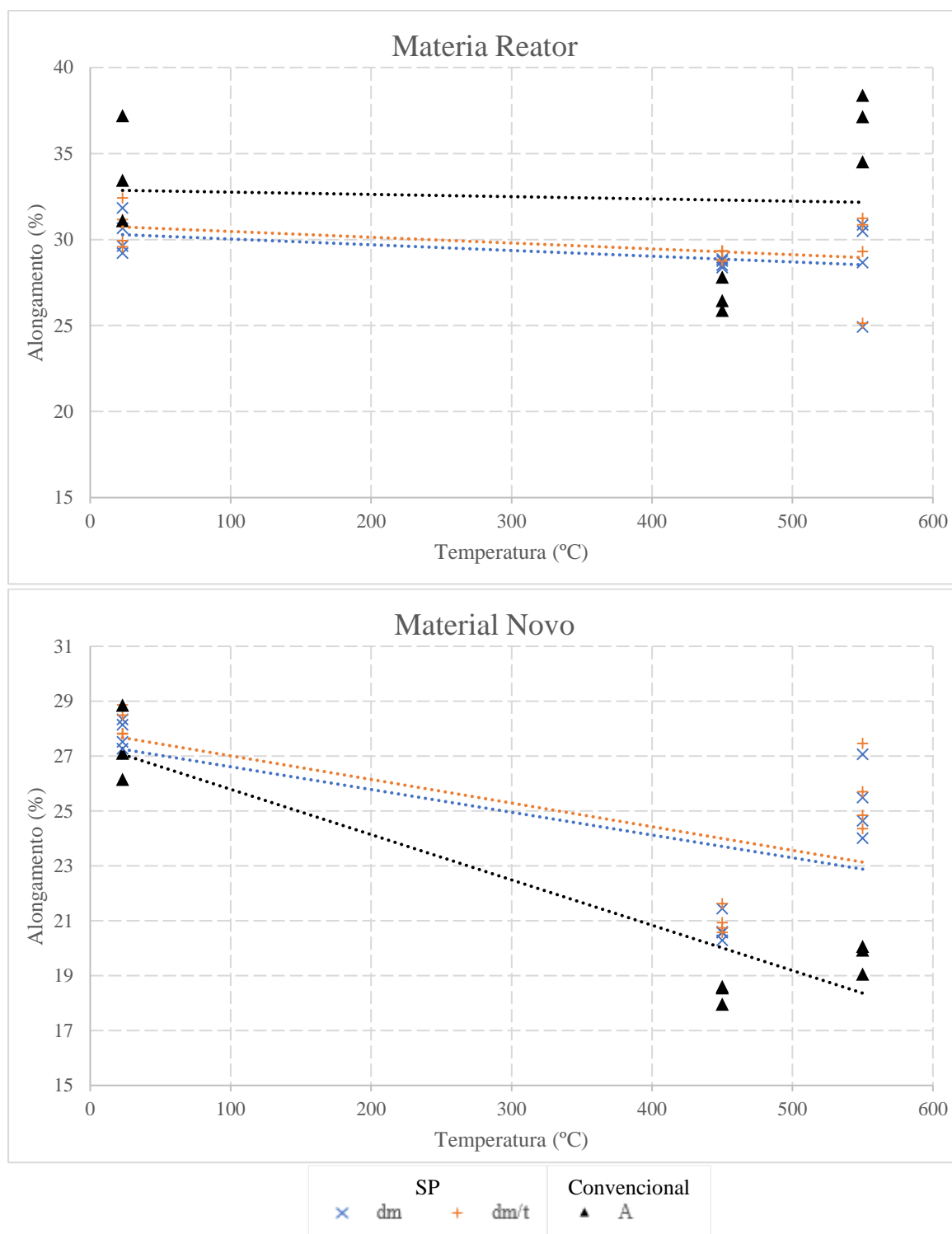


Figura 33 – Alongamento vs temperatura de cada material em estudo.

Com base nos resultados obtidos nos ensaios experimentais das diversas técnicas é intenção proceder à validação das mesmas. Para esse efeito usa-se a técnica do EMA, Erro Máximo Admissível, baseado nos valores dos erros absolutos e relativos (o maior deles). O LabMat estipulou um Erro Absoluto Máximo de 6 MPa (tensões de cedência e máxima) e 3% (alongamento) e Erro Relativo Máximo de 1%. Na Tabela 7 e Tabela 8 é feita essa análise verificando-se que os erros entre os ensaios convencionais e o SP são demasiado elevados para permitir a implementação imediata do ensaio como serviço.

Os valores apresentados de tensões (cedência e máxima) e alongamento são valores médios dos ensaios realizados pelas técnicas de ensaios convencionais e SP.

**Tabela 7 – Tabela comparativa entre ensaios convencionais e SP do material do reator.**

| Material Reator - 23°C          |              |                                           |     |      |                                          |     |                   |                         |                   |
|---------------------------------|--------------|-------------------------------------------|-----|------|------------------------------------------|-----|-------------------|-------------------------|-------------------|
| Resultados                      |              | Tensão de Cedência<br>$\sigma_y$<br>(MPa) |     |      | Tensão Máxima<br>$\sigma_{UTS}$<br>(MPa) |     |                   | Alongamento<br>A<br>(%) |                   |
|                                 |              | Mao                                       | CEN | t/10 | t <sup>2</sup>                           | t   | d <sub>m</sub> .t | d <sub>m</sub>          | d <sub>m</sub> /t |
| Convencionais                   |              | 182                                       | 182 | 182  | 450                                      | 450 | 450               | 33,9                    | 33,9              |
| Small Punch                     |              | 186                                       | 180 | 181  | 505                                      | 506 | 444               | 30,3                    | 30,8              |
| Erro Absoluto (MPa)             |              | 4                                         | 2   | 1    | 55                                       | 56  | 6                 | 3,6                     | 3,1               |
| Erro Relativo (%)               |              | 2                                         | 1   | 1    | 12                                       | 12  | 1                 | 11,0                    | 9,0               |
| Erros<br>Máximos<br>Admissíveis | Absoluto     | 6                                         | 6   | 6    | 6                                        | 6   | 6                 | 3                       | 3                 |
|                                 | Relativo (%) | 1                                         | 1   | 1    | 1                                        | 1   | 1                 | 1                       | 1                 |

| Material Reator - 450°C         |              |                                           |     |      |                                          |     |                   |                         |                   |
|---------------------------------|--------------|-------------------------------------------|-----|------|------------------------------------------|-----|-------------------|-------------------------|-------------------|
| Resultados                      |              | Tensão de Cedência<br>$\sigma_y$<br>(MPa) |     |      | Tensão Máxima<br>$\sigma_{UTS}$<br>(MPa) |     |                   | Alongamento<br>A<br>(%) |                   |
|                                 |              | Mao                                       | CEN | t/10 | t <sup>2</sup>                           | t   | d <sub>m</sub> .t | d <sub>m</sub>          | d <sub>m</sub> /t |
| Convencionais                   |              | 154                                       | 154 | 154  | 345                                      | 345 | 345               | 26,7                    | 26,7              |
| Small Punch                     |              | 181                                       | 194 | 194  | 360                                      | 366 | 338               | 28,6                    | 29,1              |
| Erro Absoluto (MPa)             |              | 27                                        | 40  | 40   | 15                                       | 21  | 7                 | 1,9                     | 2,4               |
| Erro Relativo (%)               |              | 18                                        | 26  | 26   | 4                                        | 6   | 2                 | 7,0                     | 9,0               |
| Erros<br>Máximos<br>Admissíveis | Absoluto     | 6                                         | 6   | 6    | 6                                        | 6   | 6                 | 3                       | 3                 |
|                                 | Relativo (%) | 1                                         | 1   | 1    | 1                                        | 1   | 1                 | 1                       | 1                 |

**Tabela 7 (cont)– Tabela comparativa entre ensaios convencionais e SP do material do reator.**

| Material Reator - 550°C   |              |                                           |     |      |                                          |     |                   |                         |                   |
|---------------------------|--------------|-------------------------------------------|-----|------|------------------------------------------|-----|-------------------|-------------------------|-------------------|
| Resultados                |              | Tensão de Cedência<br>$\sigma_y$<br>(MPa) |     |      | Tensão Máxima<br>$\sigma_{UTS}$<br>(MPa) |     |                   | Alongamento<br>A<br>(%) |                   |
|                           |              | Mao                                       | CEN | t/10 | t <sup>2</sup>                           | t   | d <sub>m</sub> .t | d <sub>m</sub>          | d <sub>m</sub> /t |
| Convencionais             |              | 138                                       | 138 | 138  | 261                                      | 261 | 261               | 36,7                    | 36,7              |
| Small Punch               |              | 160                                       | 151 | 145  | 293                                      | 302 | 278               | 28,7                    | 29,1              |
| Erro Absoluto (MPa)       |              | 22                                        | 13  | 7    | 32                                       | 41  | 17                | 8,0                     | 7,6               |
| Erro Relativo (%)         |              | 16                                        | 9   | 5    | 12                                       | 16  | 7                 | 22,0                    | 21,0              |
| Erros Máximos Admissíveis | Absoluto     | 6                                         | 6   | 6    | 6                                        | 6   | 6                 | 3                       | 3                 |
|                           | Relativo (%) | 1                                         | 1   | 1    | 1                                        | 1   | 1                 | 1                       | 1                 |

**Tabela 8 - Tabela comparativa entre ensaios convencionais e SP do material novo.**

| Material Novo - 23°C      |              |                                           |     |      |                                          |     |                   |                         |                   |
|---------------------------|--------------|-------------------------------------------|-----|------|------------------------------------------|-----|-------------------|-------------------------|-------------------|
| Resultados                |              | Tensão de Cedência<br>$\sigma_y$<br>(MPa) |     |      | Tensão Máxima<br>$\sigma_{UTS}$<br>(MPa) |     |                   | Alongamento<br>A<br>(%) |                   |
|                           |              | Mao                                       | CEN | t/10 | t <sup>2</sup>                           | t   | d <sub>m</sub> .t | d <sub>m</sub>          | d <sub>m</sub> /t |
| Convencionais TA          |              | 323                                       | 323 | 323  | 593                                      | 593 | 593               | 27,4                    | 27,4              |
| Small Punch TA            |              | 321                                       | 273 | 282  | 597                                      | 596 | 565               | 28,0                    | 28,4              |
| Erro Absoluto (MPa)       |              | 2                                         | 50  | 41   | 4                                        | 3   | 28                | 0,6                     | 1,0               |
| Erro Relativo (%)         |              | 1                                         | 15  | 13   | 1                                        | 1   | 5                 | 2,0                     | 4,0               |
| Erros Máximos Admissíveis | Absoluto     | 6                                         | 6   | 6    | 6                                        | 6   | 6                 | 3                       | 3                 |
|                           | Relativo (%) | 1                                         | 1   | 1    | 1                                        | 1   | 1                 | 1                       | 1                 |

| Material Novo - 450°C     |              |                                           |     |      |                                          |     |                   |                         |                   |
|---------------------------|--------------|-------------------------------------------|-----|------|------------------------------------------|-----|-------------------|-------------------------|-------------------|
| Resultados                |              | Tensão de Cedência<br>$\sigma_y$<br>(MPa) |     |      | Tensão Máxima<br>$\sigma_{UTS}$<br>(MPa) |     |                   | Alongamento<br>A<br>(%) |                   |
|                           |              | Mao                                       | CEN | t/10 | t <sup>2</sup>                           | t   | d <sub>m</sub> .t | d <sub>m</sub>          | d <sub>m</sub> /t |
| Convencionais             |              | 301                                       | 301 | 301  | 613                                      | 613 | 613               | 18,4                    | 18,4              |
| Small Punch               |              | 284                                       | 278 | 285  | 466                                      | 470 | 594               | 20,7                    | 21,0              |
| Erro Absoluto (MPa)       |              | 17                                        | 23  | 16   | 147                                      | 143 | 19                | 2,3                     | 2,6               |
| Erro Relativo (%)         |              | 6                                         | 8   | 5    | 24                                       | 23  | 3                 | 13,0                    | 14,0              |
| Erros Máximos Admissíveis | Absoluto     | 6                                         | 6   | 6    | 6                                        | 6   | 6                 | 3                       | 3                 |
|                           | Relativo (%) | 1                                         | 1   | 1    | 1                                        | 1   | 1                 | 1                       | 1                 |



**Tabela 8 (cont) - Tabela comparativa entre ensaios convencionais e SP do material novo.**

| Material Novo - 550°C     |                                     |     |      |                                    |     |                   |                   |                   |   |
|---------------------------|-------------------------------------|-----|------|------------------------------------|-----|-------------------|-------------------|-------------------|---|
| Resultados                | Tensão de Cedência $\sigma_y$ (MPa) |     |      | Tensão Máxima $\sigma_{UTS}$ (MPa) |     |                   | Alongamento A (%) |                   |   |
|                           | Mao                                 | CEN | t/10 | t <sup>2</sup>                     | t   | d <sub>m</sub> .t | d <sub>m</sub>    | d <sub>m</sub> /t |   |
| Convencionais             | 279                                 | 279 | 279  | 491                                | 491 | 491,0             | 19,7              | 19,7              |   |
| Small Punch               | 264                                 | 268 | 271  | 517                                | 520 | 543,0             | 25,3              | 25,6              |   |
| Erro Absoluto (MPa)       | 15                                  | 11  | 8    | 26                                 | 29  | 52                | 5,6               | 5,9               |   |
| Erro Relativo (%)         | 5                                   | 4   | 3    | 5                                  | 6   | 11                | 28,0              | 30,0              |   |
| Erros Máximos Admissíveis | Absoluto                            | 6   | 6    | 6                                  | 6   | 6                 | 6                 | 3                 | 3 |
|                           | Relativo (%)                        | 1   | 1    | 1                                  | 1   | 1                 | 1                 | 1                 | 1 |

Neste momento todo o procedimento de ensaio e respetiva técnica está desenvolvida. A única fragilidade encontrada no método, que é a causa imediata das discrepâncias dos resultados, é a precisão do extensómetro usado (Classe 1<sup>4</sup>). No caso de um ensaio de tração convencional a precisão do extensómetro de 1% permite um erro de 0,05 mm numa tensão de cedência a 0,2% usando um extensómetro com um GL de 25 mm. Tendo em conta que um aço deforma até à rotura cerca de 7/8 mm, o erro de 0,05 é de facto pequeno. No entanto, o SP deforma no máximo cerca de 2 mm, logo o erro de 0,05 mm torna-se bem relevante nesta técnica.

Comparando os resultados do material novo e o material do reator com tempo de serviço, verifica-se que no SP os erros são ainda maiores. De fato, o material que já esteve em serviço encontra-se degradado e nos resultados dos ensaios mecânicos convencionais essa degradação é visível. Quando passamos para a técnica de SP, sendo as amostras de dimensão tão reduzida, a degradação não uniforme devida ao tempo de serviço do material é ainda mais refletida nos resultados apresentado variações enormes nas propriedades e elevados erros absoluto e relativo. Neste caso, os resultados, quer dos convencionais quer do SP para o material do reator, não podem ser tidos em conta para a validação da técnica.

<sup>4</sup> Classe 1 – Erro máximo admissível (% da amplitude de medição) de  $\pm 1\%$ .

## **Conclusão**

O pressuposto deste trabalho em realizar ensaios Small Punch (SP) para caracterização de material em termos de propriedades mecânicas de um aço tornou-se num desafio. Apesar de a conclusão mais imediata deste trabalho ser o facto de, para já, a técnica não estar pronta para implementação em serviço, o mesmo permitiu que se identificassem pontos chave para melhorar e aperfeiçoar a mesma.

O SP trata-se de uma técnica relativamente recente e que ainda se encontra em desenvolvimento.

Neste momento a informação existente ainda não permite definir com precisão qual o melhor procedimento para determinar as propriedades mecânicas propostas. Existe muito trabalho efetuado nesta área dos ensaios a provetes miniatura, no entanto, existem diversas opiniões diferentes sobre as várias questões associadas ao tema. Por consequência, houve a necessidade de efetuar uma pesquisa exigente, a fim de se conseguir definir um procedimento de ensaio que possibilitasse a determinação das propriedades mecânicas em questão.

Não foi possível validar o procedimento de ensaio devido aos resultados obtidos nos ensaios SP apresentarem erros significativos em relação aos convencionais. Estes erros estão diretamente associados à classe do extensómetro usado. Para futuros desenvolvimentos neste tema será necessária a aquisição de um extensómetro de maior precisão, mínimo Classe 0,5.

Por fim, recomenda-se que para a validação desta técnica sejam usados materiais de referência de produção controlada e de elevada qualidade, para que assim os resultados e técnicas validadas não tenham influências desfavoráveis provenientes de materiais que são muito heterogêneos. Os ensaios SP devido às suas reduzidas dimensões, 8 mm de diâmetro e 0.5 mm de espessura, são muito sensíveis a alterações microscópicas devidas à microestrutura não homogênea.

## Bibliografia

- Askeland, D. R., Fulay, P. P., & Wright, W. J. (2011). *The Science and Engineering of Materials*. EUA: Cengage Learning.
- ASTM A370. (2018). *Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products*. ASTM (American Society for Testing and Materials).
- ASTM E8 / E8M. (2016). *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*. ASTM (American Society for Testing and Materials).
- Bridges, A., & Purdy, D. (2018). Post-test impression creep evaluation methods and findings for improved code of practice. *6th International Small Sample Test Techniques Conference*. Swansea University, Bay Campus.
- Bruchhausen, M., Holmström, S., Simonovski, I., Austin, T., Lapetite, J.-M., Ripplinger, S., & Haan, F. (2016). Recent developments in small punch testing: Tensile properties and DBTT. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics* 86, 2-10.
- Bruchhausen, M.; Altstadt, E.; Austin, T.; Dymacek, P.; Holmström, S.; Jeffs, S.; Lacalle, R.; Lancaster, R.; Matocha, K.; Petzova, J. (2018). European standard on small punch testing of metallic materials. *6th International Small Sample Test Techniques Conference*, (pp. 2-15). Swansea University, Bay Campus.
- Callister, J. W., & Rethwisch, D. G. (2010). *Materials Science and Engineering An Introduction* (8 ed.). John Wiley & Son.
- CEN. (2006). CWA 15627 - Small Punch Test Method for Metallic Materials. *Workshop Agreement Small Punch Test Method for Metallic Materials* (pp. pp. 1–38 Part A and 1–32 Part B). Comité Européen de Normalisation.
- Fernández, M., Rodríguez, C., Belzunce, F., & García, T. (2017). Use of small punch test to estimate the mechanical properties of sintered products and application to synchronizer hubs. *Metal Powder Report*.
- Fleury, E., & Ha, J. (1998). Small punch tests to estimate the mechanical properties of steels for steam. *International Journal of Pressure Vessels and Piping* 75, 699-706.
- García, T. E., Rodríguez, C., Belzuno, F. J., & Suárez, C. (2014). Estimation of the mechanical properties of metallic materials by means of the small punch test. *Journal of Alloys and Compounds*, 582, 708-717.

- Hurst, R. C., & Matocha, K. (2015). A renaissance in the use of the small punch testing. *23rd Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology*. Manchester, United Kingdom.
- Hurst, R., Lancaster, R. J., Jeffs, S. P., & Bache, M. R. (2016). The contribution of small punch testing towards the development of materials for aero-engine applications. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 86, Part A.
- Hyde, T. H., Sun, W., & Becker, A. A. (1996). Analysis of the impression creep test method using a rectangular indenter for determining the creep properties in welds. *International Journal Mechanical Science*, 38, 1089-1102.
- Hyde, T. H., Hyde, C., & Sun, W. (2012). Theoretical basis and practical aspects of small specimen creep testing. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 48(2), 112–125.
- ISO 6892-1. (2016). *Metallic materials - Tensile testing - Part 1: Method of test at room temperature*. ISO (International Organization for Standardization).
- ISO 6892-2. (2018). *Metallic materials - Tensile testing - Part 2: Method of test at elevated temperature*. ISO (International Organization for Standardization).
- Kazakeviciute, J., Rouse, J., Focatiis, D. D., & Hyde, C. (2018). The development of a novel technique for small ring specimen tensile testing. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 99, 131–139.
- Kopriva, R., Eliasova, I., & Kytka, M. (2016). Implementation of Small Punch Testing and Automated Ball Indentation in the Process of Irradiated NPP Materials Degradation Evaluation. *International Conference on Nuclear Engineering*. Charlotte, North Carolina, USA: ASME.
- Manahan, O. K., Argon, M. P., & Harling, A. S. (1981). The development of a miniaturized disk bend test for the determination of postirradiation mechanical properties. *Journal of Nuclear Materials*, 104, 1545–1550.
- Matocha, K., & Purmenský, J. (2007). Non destructive evaluation of mechanical characteristics of in - service components materials by small punch tests. *NDT for Safety*, 145-152.
- Okamoto, K., Kitagawa, H., Kusumoto, J., & Kanaya, A. (Setembro de 2009). Development of electric discharge equipment for small specimen sampling. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 86, 633–636.
- Petzová, J., Březina, M., Kapušňák, M., & Kupča, L. (2015). Application of small punch testing methods for thermal ageing monitoring at primary circuit components in

nuclear power plant. *Proceedings of ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference*,. Boston, Massachusetts, USA: ASME.

Rodríguez, C., Cuesta, I., Maspocho, M., & Belzunce, F. (2016). Application of the miniature small punch test for the mechanical characterization of polymer materials. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 76-83.

Rodríguez, C., García Cabezas, J., & Cárdena, E. B. (2009). Mechanical Properties Characterization of Heat-Affected Zone Using the Small Punch. *Welding Research*, 88, 188-192.

Singh, J., Sharma, N., & Sehgal, S. (2017). Small Punch Testing: an alternative testing technique to evaluate tensile behavior of cortical bone. *Journal of Mechanics in Medicine and Biology*, 17.

Sokolov, M. A., Landes, J. D., & Lucas, G. E. (2002). *Small Specimen Test Techniques: fourth volume*. West Conshohocken, PA: ASTM International.

Walters, C. L., Bruchhausen, M., Lapetite, J. M., & Duvalois, W. (2017). Fracture Testing of Existing Structures Without the Need for Repairs. *International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*. Trondheim, Norway: ASME.

## **Anexos**



## **Anexo I – Tabela de conversão de dureza**



# TABELA DE COMPARAÇÃO DE DUREZA

| NÚMERO DA CONVERSÃO DE DUREZA DE AÇOS                         |                         |                   |                                                     |                                              |                                                      |                                                      |                 |                                              |                                                               |                         |                   |                                                     |                                              |                                                      |                                                      |                 |                                              |     |
|---------------------------------------------------------------|-------------------------|-------------------|-----------------------------------------------------|----------------------------------------------|------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|-----------------|----------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|-------------------------|-------------------|-----------------------------------------------------|----------------------------------------------|------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|-----------------|----------------------------------------------|-----|
| Dureza Brinell (HB)<br>Esfera de 10mm<br>Pré-Carga: 3.000 kgf |                         | Dureza<br>Vickers | Dureza Rockwell                                     |                                              |                                                      |                                                      | Dureza<br>Shore | Resistência<br>à Tração<br>(Aproxim.)<br>Mpa | Dureza Brinell (HB)<br>Esfera de 10mm<br>Pré-Carga: 3.000 kgf |                         | Dureza<br>Vickers | Dureza Rockwell                                     |                                              |                                                      |                                                      | Dureza<br>Shore | Resistência<br>à Tração<br>(Aproxim.)<br>Mpa |     |
| Esfera<br>Standard                                            | Esfera de<br>Metal Duro |                   | Escala A<br>Pré-Carga 60kgf<br>Ponta de<br>Diamante | Escala B<br>Pré-Carga 100kgf<br>Esfera 1/16" | Escala C<br>Pré-Carga 150kgf<br>Ponta de<br>Diamante | Escala D<br>Pré-Carga 100kgf<br>Ponta de<br>Diamante |                 |                                              | Esfera<br>Standard                                            | Esfera de<br>Metal Duro |                   | Escola A<br>Pré-Carga 60kgf<br>Ponta de<br>Diamante | Escola B<br>Pré-Carga 100kgf<br>Esfera 1/16" | Escola C<br>Pré-Carga 150kgf<br>Ponta de<br>Diamante | Escola D<br>Pré-Carga 100kgf<br>Ponta de<br>Diamante |                 |                                              |     |
|                                                               |                         | (HV)              | (HRA)                                               | (HRB)                                        | (HRC)                                                | (HRD)                                                | (HS)            |                                              |                                                               | (HV)                    | (HRA)             | (HRB)                                               | (HRC)                                        | (HRD)                                                | (HS)                                                 |                 |                                              |     |
| —                                                             | —                       | 940               | 85.6                                                | —                                            | 68.0                                                 | 76.9                                                 | 97              | —                                            | 429                                                           | 429                     | 455               | 73.4                                                | —                                            | 45.7                                                 | 59.7                                                 | 61              | 1510                                         |     |
| —                                                             | —                       | 920               | 85.3                                                | —                                            | 67.5                                                 | 76.5                                                 | 96              | —                                            | 415                                                           | 415                     | 440               | 72.8                                                | —                                            | 44.5                                                 | 58.8                                                 | 59              | 1460                                         |     |
| —                                                             | —                       | 900               | 85.0                                                | —                                            | 67.0                                                 | 76.1                                                 | 95              | —                                            | 401                                                           | 401                     | 425               | 72.0                                                | —                                            | 43.1                                                 | 57.8                                                 | 58              | 1390                                         |     |
| —                                                             | (767)                   | 880               | 84.7                                                | —                                            | 66.4                                                 | 75.7                                                 | 93              | —                                            | 388                                                           | 388                     | 410               | 71.4                                                | —                                            | 41.8                                                 | 56.8                                                 | 56              | 1330                                         |     |
| —                                                             | (757)                   | 860               | 84.4                                                | —                                            | 65.9                                                 | 75.3                                                 | 92              | —                                            | 375                                                           | 375                     | 396               | 70.6                                                | —                                            | 40.4                                                 | 55.7                                                 | 54              | 1270                                         |     |
| —                                                             | (745)                   | 840               | 84.1                                                | —                                            | 65.3                                                 | 74.8                                                 | 91              | —                                            | 363                                                           | 363                     | 383               | 70.0                                                | —                                            | 39.1                                                 | 54.6                                                 | 52              | 1220                                         |     |
| —                                                             | (733)                   | 820               | 83.8                                                | —                                            | 64.7                                                 | 74.3                                                 | 90              | —                                            | 352                                                           | 352                     | 372               | 69.3                                                | (110.0)                                      | 37.9                                                 | 53.8                                                 | 51              | 1180                                         |     |
| —                                                             | (722)                   | 800               | 83.4                                                | —                                            | 64.0                                                 | 73.8                                                 | 88              | —                                            | 341                                                           | 341                     | 360               | 68.7                                                | (109.0)                                      | 36.6                                                 | 52.8                                                 | 50              | 1130                                         |     |
| —                                                             | (712)                   | —                 | —                                                   | —                                            | —                                                    | —                                                    | —               | —                                            | 331                                                           | 331                     | 350               | 68.1                                                | (108.5)                                      | 35.5                                                 | 51.9                                                 | 48              | 1095                                         |     |
| —                                                             | (710)                   | 780               | 83.0                                                | —                                            | 63.3                                                 | 73.3                                                 | 87              | —                                            | 321                                                           | 321                     | 339               | 67.5                                                | (108.0)                                      | 34.3                                                 | 51.0                                                 | 47              | 1060                                         |     |
| —                                                             | (698)                   | 760               | 82.6                                                | —                                            | 62.5                                                 | 72.6                                                 | 86              | —                                            | 311                                                           | 311                     | 328               | 66.9                                                | (107.5)                                      | 33.1                                                 | 50.0                                                 | 46              | 1025                                         |     |
| —                                                             | (684)                   | 740               | 82.2                                                | —                                            | 61.8                                                 | 72.1                                                 | —               | —                                            | 302                                                           | 302                     | 319               | 66.3                                                | (107.0)                                      | 32.1                                                 | 49.3                                                 | 45              | 1005                                         |     |
| —                                                             | (682)                   | 737               | 82.2                                                | —                                            | 61.7                                                 | 72.0                                                 | 84              | —                                            | 293                                                           | 293                     | 309               | 65.7                                                | (106.0)                                      | 30.9                                                 | 48.3                                                 | 43              | 970                                          |     |
| —                                                             | (670)                   | 720               | 81.8                                                | —                                            | 61.0                                                 | 71.5                                                 | 83              | —                                            | 285                                                           | 285                     | 301               | 65.3                                                | (105.5)                                      | 29.9                                                 | 47.6                                                 | —               | 950                                          |     |
| —                                                             | (656)                   | 700               | 81.3                                                | —                                            | 60.1                                                 | 70.8                                                 | —               | —                                            | 277                                                           | 277                     | 292               | 64.6                                                | (104.5)                                      | 28.8                                                 | 46.7                                                 | 41              | 925                                          |     |
| —                                                             | (653)                   | 697               | 81.2                                                | —                                            | 60.0                                                 | 70.7                                                 | 81              | —                                            | 269                                                           | 269                     | 284               | 64.1                                                | (104.0)                                      | 27.6                                                 | 45.9                                                 | 40              | 895                                          |     |
| —                                                             | (647)                   | 690               | 81.1                                                | —                                            | 59.7                                                 | 70.5                                                 | —               | —                                            | 262                                                           | 262                     | 276               | 63.6                                                | (103.0)                                      | 26.6                                                 | 45.0                                                 | 39              | 875                                          |     |
| —                                                             | (638)                   | 680               | 80.8                                                | —                                            | 59.2                                                 | 70.1                                                 | 80              | —                                            | 255                                                           | 255                     | 269               | 63.0                                                | (102.0)                                      | 25.4                                                 | 44.2                                                 | 38              | 850                                          |     |
| —                                                             | 630                     | 670               | 80.6                                                | —                                            | 58.8                                                 | 69.8                                                 | —               | —                                            | 248                                                           | 248                     | 261               | 62.5                                                | (101.0)                                      | 24.2                                                 | 43.2                                                 | 37              | 825                                          |     |
| —                                                             | 627                     | 667               | 80.5                                                | —                                            | 58.7                                                 | 69.7                                                 | 79              | —                                            | 241                                                           | 241                     | 253               | 61.8                                                | 100                                          | 22.8                                                 | 42.0                                                 | 36              | 800                                          |     |
| —                                                             | —                       | 677               | 80.7                                                | —                                            | 59.1                                                 | 70.0                                                 | —               | —                                            | 235                                                           | 235                     | 247               | 61.4                                                | 99.0                                         | 21.7                                                 | 41.4                                                 | 35              | 785                                          |     |
| —                                                             | 601                     | 640               | 79.8                                                | —                                            | 57.3                                                 | 68.7                                                 | 77              | —                                            | 229                                                           | 229                     | 241               | 60.8                                                | 98.2                                         | 20.5                                                 | 40.5                                                 | 34              | 765                                          |     |
| —                                                             | —                       | 640               | 79.8                                                | —                                            | 57.3                                                 | 68.7                                                 | —               | —                                            | 223                                                           | 223                     | 234               | —                                                   | 97.3                                         | (18.8)                                               | —                                                    | —               | —                                            |     |
| —                                                             | —                       | 640               | 79.8                                                | —                                            | 57.3                                                 | 68.7                                                 | —               | —                                            | 217                                                           | 217                     | 228               | —                                                   | 96.4                                         | (17.5)                                               | —                                                    | —               | 33                                           | 725 |
| —                                                             | 578                     | 615               | 79.1                                                | —                                            | 56.0                                                 | 67.7                                                 | 75              | —                                            | 212                                                           | 212                     | 222               | —                                                   | 95.5                                         | (16.0)                                               | —                                                    | —               | 705                                          |     |
| —                                                             | —                       | 607               | 78.8                                                | —                                            | 55.6                                                 | 67.4                                                 | —               | —                                            | 207                                                           | 207                     | 219               | —                                                   | 94.6                                         | (15.2)                                               | —                                                    | 32              | 690                                          |     |
| —                                                             | 555                     | 581               | 78.4                                                | —                                            | 54.7                                                 | 66.7                                                 | 73              | 2055                                         | 201                                                           | 201                     | 212               | —                                                   | 93.8                                         | (13.8)                                               | —                                                    | 31              | 675                                          |     |
| —                                                             | —                       | 579               | 78.0                                                | —                                            | 54.0                                                 | 66.1                                                 | —               | 2015                                         | 197                                                           | 197                     | 207               | —                                                   | 92.8                                         | (12.7)                                               | —                                                    | 30              | 655                                          |     |
| —                                                             | 534                     | 569               | 77.8                                                | —                                            | 53.5                                                 | 65.8                                                 | 71              | 1985                                         | 192                                                           | 192                     | 202               | —                                                   | 91.9                                         | (11.5)                                               | —                                                    | 29              | 640                                          |     |
| —                                                             | —                       | 533               | 77.1                                                | —                                            | 52.5                                                 | 65.0                                                 | —               | 1915                                         | 187                                                           | 187                     | 196               | —                                                   | 90.7                                         | (10.0)                                               | —                                                    | —               | 620                                          |     |
| —                                                             | 514                     | 547               | 76.9                                                | —                                            | 52.1                                                 | 64.7                                                 | 70              | 1890                                         | 183                                                           | 183                     | 192               | —                                                   | 90.0                                         | (9.0)                                                | —                                                    | 28              | 615                                          |     |
| —                                                             | —                       | 539               | 76.7                                                | —                                            | 51.6                                                 | 64.3                                                 | —               | 1855                                         | 179                                                           | 179                     | 188               | —                                                   | 89.0                                         | (8.0)                                                | —                                                    | 27              | 600                                          |     |
| (495)                                                         | —                       | 530               | 76.4                                                | —                                            | 51.1                                                 | 63.9                                                 | —               | 1825                                         | 174                                                           | 174                     | 182               | —                                                   | 87.8                                         | (6.4)                                                | —                                                    | —               | 585                                          |     |
| —                                                             | —                       | 495               | 76.3                                                | —                                            | 51.0                                                 | 63.8                                                 | 68              | 1820                                         | 170                                                           | 170                     | 178               | —                                                   | 86.8                                         | (5.4)                                                | —                                                    | 26              | 570                                          |     |
| —                                                             | —                       | 495               | 76.3                                                | —                                            | 51.0                                                 | 63.8                                                 | 68              | 1820                                         | 167                                                           | 167                     | 175               | —                                                   | 86.0                                         | (4.4)                                                | —                                                    | —               | 560                                          |     |
| (477)                                                         | —                       | 516               | 75.9                                                | —                                            | 50.3                                                 | 63.2                                                 | —               | 1780                                         | 163                                                           | 163                     | 171               | —                                                   | 85.0                                         | (3.3)                                                | —                                                    | 25              | 545                                          |     |
| —                                                             | —                       | 508               | 75.6                                                | —                                            | 49.6                                                 | 62.7                                                 | —               | 1740                                         | 156                                                           | 156                     | 163               | —                                                   | 82.9                                         | (0.9)                                                | —                                                    | —               | 525                                          |     |
| —                                                             | 477                     | 508               | 75.6                                                | —                                            | 49.6                                                 | 62.7                                                 | 66              | 1740                                         | 149                                                           | 149                     | 156               | —                                                   | 80.8                                         | —                                                    | —                                                    | 23              | 505                                          |     |
| —                                                             | —                       | 495               | 75.1                                                | —                                            | 48.8                                                 | 61.9                                                 | —               | 1680                                         | 143                                                           | 143                     | 150               | —                                                   | 78.7                                         | —                                                    | —                                                    | 22              | 490                                          |     |
| (461)                                                         | —                       | 491               | 74.9                                                | —                                            | 48.5                                                 | 61.7                                                 | —               | 1670                                         | 137                                                           | 137                     | 143               | —                                                   | 76.4                                         | —                                                    | —                                                    | 21              | 460                                          |     |
| —                                                             | 461                     | 491               | 74.9                                                | —                                            | 48.5                                                 | 61.7                                                 | 65              | 1670                                         | 131                                                           | 131                     | 137               | —                                                   | 74.0                                         | —                                                    | —                                                    | —               | 450                                          |     |
| —                                                             | —                       | 474               | 74.3                                                | —                                            | 47.2                                                 | 61.0                                                 | —               | 1595                                         | 126                                                           | 126                     | 132               | —                                                   | 72.0                                         | —                                                    | —                                                    | 20              | 435                                          |     |
| —                                                             | —                       | 472               | 74.2                                                | —                                            | 47.1                                                 | 60.8                                                 | —               | 1585                                         | 121                                                           | 121                     | 127               | —                                                   | 69.8                                         | —                                                    | —                                                    | 19              | 415                                          |     |
| —                                                             | 444                     | 472               | 74.2                                                | —                                            | 47.1                                                 | 60.8                                                 | 63              | 1585                                         | 116                                                           | 116                     | 122               | —                                                   | 67.6                                         | —                                                    | —                                                    | 18              | 400                                          |     |
| —                                                             | —                       | 444               | 74.2                                                | —                                            | 47.1                                                 | 60.8                                                 | 63              | 1585                                         | 111                                                           | 111                     | 117               | —                                                   | 65.7                                         | —                                                    | —                                                    | 15              | 385                                          |     |

(Nota 1) A lista acima é a mesma do manual da AMS Metais com resistência à tração em valores métricos aproximados e dureza Brinell além de um campo recomendado.

(Nota 2) 1MPa=1N/mm<sup>2</sup>




(Nota 3) Figuras entre ( ) são utilizadas raramente e são incluídas somente como referência. Esta lista foi retirada do Manual de Aço JIS.

## **Anexo II – Controlo dimensional dos provetes SP**

## Anexo II

| Referência           | Temp. ensaio | Controlo dimensional da espessura (mm) |       |       |           |       |
|----------------------|--------------|----------------------------------------|-------|-------|-----------|-------|
|                      | T            | Medição                                |       |       | Espessura |       |
|                      | (°C)         | 1                                      | 2     | 3     |           |       |
| Aço A335 P22<br>Novo | 23           | SP1                                    | 0,501 | 0,503 | 0,504     | 0,503 |
|                      |              | SP2                                    | 0,503 | 0,505 | 0,505     | 0,504 |
|                      |              | SP3                                    | 0,500 | 0,499 | 0,503     | 0,501 |
|                      |              | SP4                                    | 0,500 | 0,500 | 0,501     | 0,500 |
|                      | 450          | SP1                                    | 0,498 | 0,502 | 0,502     | 0,501 |
|                      |              | SP2                                    | 0,501 | 0,501 | 0,502     | 0,501 |
|                      |              | SP3                                    | 0,505 | 0,505 | 0,504     | 0,505 |
|                      |              | SP4                                    | 0,499 | 0,498 | 0,500     | 0,499 |
|                      | 550          | SP1                                    | 0,505 | 0,505 | 0,505     | 0,505 |
|                      |              | SP2                                    | 0,498 | 0,498 | 0,499     | 0,498 |
|                      |              | SP3                                    | 0,500 | 0,503 | 0,505     | 0,503 |
|                      |              | SP4                                    | 0,501 | 0,504 | 0,503     | 0,503 |
| Aço A335 P22<br>Novo | 23           | SP1                                    | 0,505 | 0,504 | 0,503     | 0,504 |
|                      |              | SP2                                    | 0,499 | 0,501 | 0,500     | 0,500 |
|                      |              | SP3                                    | 0,503 | 0,503 | 0,503     | 0,503 |
|                      |              | SP4                                    | 0,497 | 0,500 | 0,499     | 0,499 |
|                      | 450          | SP1                                    | 0,505 | 0,504 | 0,505     | 0,505 |
|                      |              | SP2                                    | 0,506 | 0,505 | 0,505     | 0,505 |
|                      |              | SP3                                    | 0,500 | 0,502 | 0,503     | 0,502 |
|                      |              | SP4                                    | 0,501 | 0,501 | 0,502     | 0,501 |
|                      | 550          | SP1                                    | 0,502 | 0,501 | 0,503     | 0,502 |
|                      |              | SP2                                    | 0,499 | 0,503 | 0,504     | 0,502 |
|                      |              | SP3                                    | 0,505 | 0,504 | 0,505     | 0,505 |
|                      |              | SP4                                    | 0,506 | 0,505 | 0,505     | 0,505 |

### **Anexo III – Certificado de calibração máquina eletromecânica**

|                                                                                   |                                                                                                                                                        |                                                                                                                                                                         |
|-----------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>CERTIFICATE OF CALIBRATION</b>                                                 |                                                                                                                                                        |   |
| ISSUED BY: INSTRON CALIBRATION LABORATORY                                         |                                                                                                                                                        |                                                                                                                                                                         |
| DATE OF ISSUE:<br>26-Sep-2018                                                     | CERTIFICATE NUMBER:<br>E110091918184153                                                                                                                |                                                                                                                                                                         |
|  | <b>Instron</b>                                                                                                                                         | Page 1 of 5 pages                                                                                                                                                       |
|                                                                                   | 825 University Avenue<br>Norwood, MA 02062-2643<br>Telephone: +44 (0) 1494 456815<br>Fax: +44 (0) 1494 456667<br>Email: Calibration_Europe@Instron.com | APPROVED SIGNATORY                                                                                                                                                      |
| <b>Type of Calibration:</b>                                                       | <b>Force</b>                                                                                                                                           |                                                                                                                                                                         |
| <b>Relevant Standard:</b>                                                         | <b>ISO 7500-1:2018</b>                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                         |
| <b>Date of Calibration:</b>                                                       | <b>19-Sep-2018</b>                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                         |

| * * * CALIBRATION RESULTS * * *                                                                                                                                                                        |                                        |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|
| <b>System ID:</b> 8562H0773 (TRA-0008)                                                                                                                                                                 | <b>Transducer ID:</b> 2518-111 / UK693 |
| <b>Customer Asset No.:</b> TRA-0008                                                                                                                                                                    |                                        |
| <b>Indicator 1. - Digital Readout (kN)</b>                                                                                                                                                             |                                        |
| <b>PASSED Class 0.5:</b> 100% Range in Tension mode (0.2751746 to 30.0436)                                                                                                                             |                                        |
| <b>PASSED Class 0.5:</b> 100% Range in Compression mode (-0.2960968 to -30.00778)                                                                                                                      |                                        |
| <small>System Class for a range is derived from assessment of the following: error, repeatability, return to zero, resolution, proving device classification, and reversibility if applicable.</small> |                                        |

| Customer           |                                                                         | Temperature          |         |
|--------------------|-------------------------------------------------------------------------|----------------------|---------|
| Name:              | Inst. de Soldadura e Qualidade                                          | Minimum Temperature: | 21.1 °C |
| Location:          | Av. Prof. Dr. Cavaco Silva, Nº 33, Edif. F2<br>Talaide, Oeiras 2781-951 | Maximum Temperature: | 21.3 °C |
| Country:           | PORTUGAL                                                                |                      |         |
| P.O./Contract No.: |                                                                         |                      |         |
| Contact:           | Engª Marta Freitas                                                      |                      |         |
| Email:             | MAFreitas@isq.pt                                                        |                      |         |

| Machine       |                    | Transducer    |                     |
|---------------|--------------------|---------------|---------------------|
| Manufacturer: | Instron            | Manufacturer: | Instron             |
| Type:         | Electro-Mechanical | Capacity:     | 30 kN               |
|               | Auto Range         | Type:         | Tension/Compression |
| Year of Mfg.: | 1987               |               |                     |

**Methodology**

The assessment of the testing machine was conducted on site at the above customer location in accordance with ISO 7500-1:2018 "Metallic materials -- Calibration and verification of static uniaxial testing machines -- Part 1: Tension/compression testing machines -- Calibration and verification of the force-measuring system" using Instron procedure ICA-8-19. The Simple Acceptance decision rule has been agreed to and employed in the determination of conformance to the identified metrological specification.

Instron CalproCR Version 3.39

The results indicated on this certificate and the following report relate only to the items verified. If there are methods or data included that are not covered by the NVLAP accreditation it will be identified in the comments. Any limitations of use as a result of this verification will be indicated in the comments. This report must not be used to claim product endorsement by NVLAP or the United States government. This report shall not be reproduced, except in full, without the approval of the issuing laboratory.

# CERTIFICATE OF CALIBRATION

NVLAP ACCREDITED CALIBRATION LABORATORY No. 200301-0

CERTIFICATE NUMBER:  
**E110091918184153**

Page 2 of 5 pages

## System Classification

Prior to verification, a pre-calibration inspection was conducted and the system was found to be in Good condition. The testing machine was verified in the 'As Found' condition with no adjustments or repairs carried out. This is also the 'As Left' condition.

The verification and equipment used conform to a controlled Quality Assurance program which meets the specifications outlined in ANSI/NCCL Z540.1-1994, ISO 10012:2003, ISO 9001:2015, ISO/IEC 17025:2005.

No mechanically linked accessories were fitted while performing this calibration.

## Data Summary - Indicator 1. - Digital Readout (kN)

### TENSION

| % of Range                | Relative error of (%) |        |        | Repeatability Error (%) | Error Class | Resolution ( $\pm$ kN) | Standard Class |
|---------------------------|-----------------------|--------|--------|-------------------------|-------------|------------------------|----------------|
|                           | Indication            |        |        |                         |             |                        |                |
|                           | Run 1                 | Run 2  | Run 3  |                         |             |                        |                |
| <b>100% Range (30 kN)</b> |                       |        |        |                         |             |                        |                |
| 0 Return                  | -0.015                | -0.004 | -0.027 |                         | 0.5         | 0.0001                 |                |
| 1                         | 0.244                 | 0.336  | 0.482  | 0.238                   | 0.5         | 0.0001                 | 0.5            |
| 2                         | 0.417                 | 0.284  | -0.044 | 0.461                   | 0.5         | 0.0001                 | 0.5            |
| 4                         | 0.089                 | -0.013 | -0.131 | 0.220                   | 0.5         | 0.001                  | 0.5            |
| 7                         | 0.051                 | -0.083 | -0.020 | 0.134                   | 0.5         | 0.001                  | 0.5            |
| 10                        | -0.064                | -0.162 | -0.086 | 0.098                   | 0.5         | 0.001                  | 0.5            |
| 10                        | -0.095                | -0.174 | -0.152 | 0.079                   | 0.5         | 0.001                  | 0.5            |
| 20                        | -0.164                | -0.152 | -0.173 | 0.021                   | 0.5         | 0.001                  | 0.5            |
| 40                        | -0.138                | -0.119 | -0.147 | 0.028                   | 0.5         | 0.01                   | 0.5            |
| 60                        | -0.152                | -0.152 | -0.226 | 0.074                   | 0.5         | 0.01                   | 0.5            |
| 80                        | -0.078                | -0.081 | -0.152 | 0.074                   | 0.5         | 0.01                   | 0.5            |
| 100                       | -0.024                | -0.033 | -0.145 | 0.121                   | 0.5         | 0.01                   | 0.5            |

## Data Summary - Indicator 1. - Digital Readout (kN)

### COMPRESSION

| % of Range                | Relative error of (%) |        |        | Repeatability Error (%) | Error Class | Resolution ( $\pm$ kN) | Standard Class |
|---------------------------|-----------------------|--------|--------|-------------------------|-------------|------------------------|----------------|
|                           | Indication            |        |        |                         |             |                        |                |
|                           | Run 1                 | Run 2  | Run 3  |                         |             |                        |                |
| <b>100% Range (30 kN)</b> |                       |        |        |                         |             |                        |                |
| 0 Return                  | -0.015                | -0.014 | -0.015 |                         | 0.5         | 0.0001                 |                |
| 1                         | 0.339                 | 0.176  | 0.416  | 0.240                   | 0.5         | 0.0001                 | 0.5            |
| 2                         | -0.029                | -0.021 | 0.077  | 0.106                   | 0.5         | 0.0001                 | 0.5            |
| 4                         | -0.191                | -0.135 | 0.050  | 0.241                   | 0.5         | 0.001                  | 0.5            |
| 7                         | -0.103                | -0.047 | -0.168 | 0.121                   | 0.5         | 0.001                  | 0.5            |
| 10                        | -0.083                | -0.113 | -0.064 | 0.049                   | 0.5         | 0.001                  | 0.5            |
| 10                        | -0.039                | 0.047  | -0.024 | 0.086                   | 0.5         | 0.001                  | 0.5            |
| 20                        | -0.067                | -0.024 | -0.098 | 0.074                   | 0.5         | 0.001                  | 0.5            |
| 40                        | -0.113                | -0.027 | -0.099 | 0.086                   | 0.5         | 0.01                   | 0.5            |
| 60                        | -0.103                | -0.064 | -0.074 | 0.039                   | 0.5         | 0.01                   | 0.5            |
| 80                        | -0.017                | -0.008 | -0.050 | 0.042                   | 0.5         | 0.01                   | 0.5            |
| 100                       | -0.020                | -0.023 | -0.026 | 0.006                   | 0.5         | 0.01                   | 0.5            |

Worst Resolution Class: 0.5 for 100% Range (Indicator 1: Tension), 0.5 for 100% Range (Indicator 1: Compression).

Instron CalproCR Version 3.39

## CERTIFICATE OF CALIBRATION

NVLAP ACCREDITED CALIBRATION LABORATORY No. 200301-0

CERTIFICATE NUMBER:

**E110091918184153**

Page 3 of 5 pages

### Data - Indicator 1. - Digital Readout (kN)

#### TENSION

| % of Range                | Run 1          |              | Run 2          |              | Run 3          |              | Uncertainty of Measurement* |         |
|---------------------------|----------------|--------------|----------------|--------------|----------------|--------------|-----------------------------|---------|
|                           | Indicated (kN) | Applied (kN) | Indicated (kN) | Applied (kN) | Indicated (kN) | Applied (kN) | Relative %                  | (± kN)  |
| <b>100% Range (30 kN)</b> |                |              |                |              |                |              |                             |         |
| 0 Return                  | -0.0045        |              | -0.0011        |              | -0.0082        |              |                             |         |
| 1                         | 0.3006         | 0.29986699   | 0.3167         | 0.31563828   | 0.2765         | 0.27517456   | 0.22                        | 0.00065 |
| 2                         | 0.6001         | 0.59760990   | 0.6008         | 0.59909676   | 0.6000         | 0.60026500   | 0.22                        | 0.0013  |
| 4                         | 1.200          | 1.19893695   | 1.200          | 1.20015830   | 1.205          | 1.20658364   | 0.22                        | 0.0027  |
| 7                         | 2.102          | 2.10092752   | 2.108          | 2.10974246   | 2.109          | 2.10942384   | 0.22                        | 0.0046  |
| 10                        | 3.000          | 3.00190916   | 3.006          | 3.0108834    | 3.006          | 3.00860001   | 0.22                        | 0.0066  |
| 10                        | 3.003          | 3.00586      | 3.010          | 3.01525      | 3.000          | 3.00458      | 0.20                        | 0.0060  |
| 20                        | 6.001          | 6.010865     | 6.000          | 6.009156     | 6.000          | 6.0104       | 0.20                        | 0.012   |
| 40                        | 12.00          | 12.0166      | 12.01          | 12.02429     | 12.01          | 12.02771     | 0.21                        | 0.025   |
| 60                        | 18.00          | 18.02747     | 18.00          | 18.02747     | 18.00          | 18.04071     | 0.20                        | 0.036   |
| 80                        | 24.00          | 24.01869     | 24.00          | 24.01954     | 24.00          | 24.03663     | 0.20                        | 0.048   |
| 100                       | 30.00          | 30.0073      | 30.00          | 30.00991     | 30.00          | 30.0436      | 0.20                        | 0.060   |

### Data - Indicator 1. - Digital Readout (kN)

#### COMPRESSION

| % of Range                | Run 1          |              | Run 2          |              | Run 3          |              | Uncertainty of Measurement* |         |
|---------------------------|----------------|--------------|----------------|--------------|----------------|--------------|-----------------------------|---------|
|                           | Indicated (kN) | Applied (kN) | Indicated (kN) | Applied (kN) | Indicated (kN) | Applied (kN) | Relative %                  | (± kN)  |
| <b>100% Range (30 kN)</b> |                |              |                |              |                |              |                             |         |
| 0 Return                  | 0.0046         |              | 0.0043         |              | 0.0044         |              |                             |         |
| 1                         | -0.2971        | -0.29609675  | -0.3005        | -0.29997319  | -0.3097        | -0.30841641  | 0.22                        | 0.00066 |
| 2                         | -0.6028        | -0.60297321  | -0.6003        | -0.60042431  | -0.6020        | -0.60153945  | 0.22                        | 0.0013  |
| 4                         | -1.202         | -1.20430025  | -1.204         | -1.20562780  | -1.210         | -1.20939805  | 0.22                        | 0.0027  |
| 7                         | -2.108         | -2.11016727  | -2.107         | -2.10799009  | -2.100         | -2.10352952  | 0.22                        | 0.0046  |
| 10                        | -3.012         | -3.01449433  | -3.008         | -3.01141442  | -3.008         | -3.00992756  | 0.22                        | 0.0066  |
| 10                        | -3.000         | -3.00116     | -3.003         | -3.00159     | -3.003         | -3.00372     | 0.22                        | 0.0067  |
| 20                        | -6.000         | -6.00403     | -6.003         | -6.004459    | -6.005         | -6.010865    | 0.22                        | 0.013   |
| 40                        | -12.00         | -12.01362    | -12.01         | -12.01319    | -12.00         | -12.01191    | 0.23                        | 0.027   |
| 60                        | -18.00         | -18.0185     | -18.01         | -18.02149    | -18.02         | -18.0334     | 0.23                        | 0.041   |
| 80                        | -24.00         | -24.00417    | -24.00         | -24.00204    | -24.00         | -24.0119     | 0.22                        | 0.054   |
| 100                       | -30.00         | -30.00607    | -30.00         | -30.00692    | -30.00         | -30.00778    | 0.22                        | 0.067   |

\* The reported expanded uncertainty is based on a standard uncertainty multiplied by a coverage factor  $k = 2$ , providing a level of confidence of approximately 95%.

The uncertainty stated refers to values obtained during the calibration and makes no allowances for factors such as long term drift, temperature and alignment effects - the influence of such factors should be taken into account by the user of the force-measuring device.

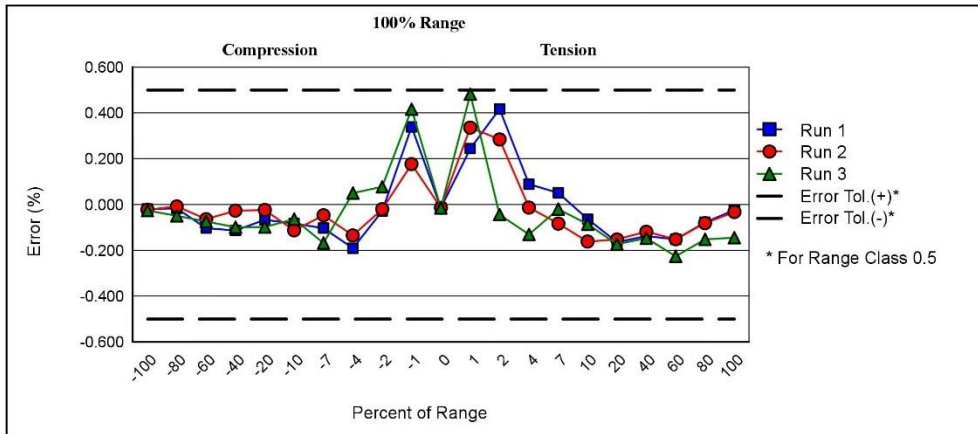
# CERTIFICATE OF CALIBRATION

NVLAP ACCREDITED CALIBRATION LABORATORY No. 200301-0

CERTIFICATE NUMBER:  
**E110091918184153**

Page 4 of 5 pages

## Graphical Data - Indicator 1. - Digital Readout (kN)



## Verification Equipment

The measurement results produced with Instron standards are traceable to the SI (The International System of Units) through internationally recognized National Metrology Institutes (NIST, NPL, PTB, Inmetro, etc.).

| Equipment ID | Description     | Capacity  | Cal Date    | Cal Due     | Certificate Ref. |
|--------------|-----------------|-----------|-------------|-------------|------------------|
| N80-100K     | load cell       | 22500 lbf | 10-Jul-2018 | 11-Jul-2020 | 07102018KDA      |
| N80-10K      | load cell       | 10000 N   | 02-May-2018 | 02-Jun-2020 | E258020518102445 |
| N8B-T        | temp. indicator | NA        | 13-Jun-2017 | 14-Jun-2019 | 20170613B        |
| R75-081      | force indicator | NA        | 08-Dec-2017 | 09-Dec-2018 | E255121117120325 |

The class of the verification equipment was equal to or better than the class to which this testing machine has been verified.

## Verification Equipment Usage

| Range      | Mode                | Equipment ID | Percent(s) of Range     | Accuracy (+/-)   |
|------------|---------------------|--------------|-------------------------|------------------|
| Full Scale | Tension             | N80-10K      | 1/ 2/ 4/ 7/ 10          | 0.16% of reading |
|            |                     | N80-100K     | 10/ 20/ 40/ 60/ 80/ 100 | 0.16% of reading |
| 100        | Compression         | N80-10K      | 1/ 2/ 4/ 7/ 10          | 0.16% of reading |
|            |                     | N80-100K     | 10/ 20/ 40/ 60/ 80/ 100 | 0.16% of reading |
| All        | Tension-Compression | N8B-T        | All                     | 1 °C             |

The accuracy of the force indicator used with an elastic device is incorporated into the device's stated accuracy.

The accuracy of the verification equipment used was equal to or better than the accuracy indicated in the table above.

## Comments

No comments.

Instron CalproCR Version 3.39



## CERTIFICATE OF CALIBRATION

NVLAP ACCREDITED CALIBRATION LABORATORY No. 200301-0

CERTIFICATE NUMBER:  
**E110091918184153**

Page 5 of 5 pages

Verified by: Vitor Filipe  
Senior Field Service Engineer

NOTE: Clause 9 of ISO 7500-1 states; The time between verifications depends on the type of testing machine, the standard of maintenance and the amount of use. Unless otherwise specified, it is recommended that verification be carried out at intervals not exceeding 12 months. The machine shall in any case be verified if it is moved to a new location necessitating dismantling or if it is subject to major repairs or adjustments.

## **Anexo IV – Certificado de calibração do calibrador de extensómetros**



Instalações de  
Oeiras

Signature Not  
Verified

Digitally signed by  
LABMETRO ONLINE  
Date: 2018.08.19  
18:23:21 +01:00  
Reason: Documento  
aprovado  
electronicamente

## Certificado de calibração

Data de emissão 2018-08-14

Certificado nº. CDIM6042/18

Página 1 de 5

Equipamento **CABEÇA MICROMÉTRICA (CALBRADOR DE EXTENSÓMETROS)**

|            |         |                           |           |
|------------|---------|---------------------------|-----------|
| Marca:     | Instron | Indicação:                | Analógica |
| Modelo:    | ---     | Intervalo de indicação:   | 0-25 mm   |
| Nº ident.: | 01CEAX  | Resolução:                | 0,0005 mm |
| Nº série:  | ---     | (do dispositivo afixador) |           |

Ciente **ISQ - LABORATÓRIO DE MATERIAIS**

AV. PROF. DR. CAVACO SILVA, 33 - APARTADO 119  
2740-120 TAGUS PARK

Data de  
calibração **2018-08-14**

Condições ambientais  
Temperatura: 19.7 Humidade relativa: 53,7 %hr

Procedimento PO.M-DM/DIM 036 Ed. D Rev. 00

Rastreabilidade Comparador electrónico, com o nº ident. LD046, rastreado ao IPQ e ISQ (Portugal) e ao VSL (Holanda)

Estado do equipamento Não foram identificados aspectos relevantes que afectassem os resultados.

Resultados Encontra-se apresentados nas páginas seguintes.

"A incerteza expandida apresentada, está expressa pela incerteza-padrão multiplicada pelo factor de expansão  $k=2$ , o qual para uma distribuição normal corresponde a uma probabilidade de, aproximadamente, 95%. A incerteza foi calculada de acordo com o documento EA 4/02."

Calibrado por

José Godinho

Responsável pela Validação

Sara Leonardo (Responsável Técnico)

DM/065.2/07

instituto de soldadura  
e qualidade

Lisboa: Av. Prof. Cavaco Silva, 33 • Taguspark • 2740-120 Oeiras • Portugal  
Tels.: +351 21 422 90 34/ 81 86/ 80 20 • Fax: +351 21 422 81 02

labmetro@isq.pt

http://metrologia.isq.pt

Porto: Rua do Mirante, 258 • 4415-491 Grijó • Portugal  
Tels.: +351 22 747 19 10/50 • Fax: +351 22 747 19 19/745 57 76

Este documento não pode ser reproduzido, excepto integralmente, sem autorização por escrito do ISQ.



## Certificado de calibração

Certificado n.º. CDIM6042/18

Página 2 de 5

**Medição dos erros no sentido ascendente** (o valor de referência é resultante da média de 3 medições)

| Valor do equipamento | Valor de referência | Erro       | Erro Relativo | Incerteza expandida |
|----------------------|---------------------|------------|---------------|---------------------|
| 0,0 mm               | 0,0000 mm           | 0,0000 mm  | 0,00 %        | ± 0,0013 mm         |
| 0,1 mm               | 0,1003 mm           | -0,0002 mm | -0,20 %       | ± 0,0013 mm         |
| 0,2 mm               | 0,2005 mm           | -0,0004 mm | -0,20 %       | ± 0,0013 mm         |
| 0,3 mm               | 0,3003 mm           | -0,0005 mm | -0,17 %       | ± 0,0013 mm         |
| 0,4 mm               | 0,4004 mm           | -0,0005 mm | -0,13 %       | ± 0,0013 mm         |
| 0,5 mm               | 0,5004 mm           | -0,0003 mm | -0,06 %       | ± 0,0013 mm         |
| 0,6 mm               | 0,6004 mm           | -0,0004 mm | -0,07 %       | ± 0,0013 mm         |
| 0,7 mm               | 0,7004 mm           | -0,0004 mm | -0,06 %       | ± 0,0013 mm         |
| 0,8 mm               | 0,8003 mm           | -0,0003 mm | -0,04 %       | ± 0,0013 mm         |
| 0,9 mm               | 0,9005 mm           | -0,0005 mm | -0,06 %       | ± 0,0013 mm         |
| 1,0 mm               | 1,0007 mm           | -0,0008 mm | -0,08 %       | ± 0,0013 mm         |

**Medição dos erros no sentido descendente** (o valor de referência é resultante da média de 3 medições)

| Valor do equipamento | Valor de referência | Erro       | Erro Relativo | Incerteza expandida |
|----------------------|---------------------|------------|---------------|---------------------|
| 0,0 mm               | 0,0001 mm           | -0,0001 mm | 0,00 %        | ± 0,0013 mm         |
| 0,1 mm               | 0,1002 mm           | -0,0002 mm | -0,20 %       | ± 0,0013 mm         |
| 0,2 mm               | 0,2003 mm           | -0,0003 mm | -0,15 %       | ± 0,0013 mm         |
| 0,3 mm               | 0,3004 mm           | -0,0004 mm | -0,13 %       | ± 0,0013 mm         |
| 0,4 mm               | 0,4005 mm           | -0,0005 mm | -0,13 %       | ± 0,0013 mm         |
| 0,5 mm               | 0,5007 mm           | -0,0007 mm | -0,14 %       | ± 0,0013 mm         |
| 0,6 mm               | 0,6005 mm           | -0,0005 mm | -0,08 %       | ± 0,0013 mm         |
| 0,7 mm               | 0,7008 mm           | -0,0008 mm | -0,11 %       | ± 0,0013 mm         |
| 0,8 mm               | 0,8008 mm           | -0,0008 mm | -0,10 %       | ± 0,0013 mm         |
| 0,9 mm               | 0,9009 mm           | -0,0009 mm | -0,10 %       | ± 0,0013 mm         |
| 1,0 mm               | 1,0009 mm           | -0,0009 mm | -0,09 %       | ± 0,0013 mm         |

Este documento não pode ser reproduzido, excepto integralmente, sem autorização por escrito do ISQ.

Calibrado por

José Godinho

Responsável pela Validação

Sara Leonardo (Responsável Técnico)

DM/065.2/07

**instituto de soldadura e qualidade**

lisboa: Av. Prof. Cavaco Silva, 33 • Taguspark • 2740-120 Oeiras • Portugal  
Tels.: +351 21 422 90 34/ 81 86/ 90 20 • Fax: +351 21 422 81 02

[labmetro@isq.pt](mailto:labmetro@isq.pt)

<http://metrologia.isq.pt>

Porto: Rua do Mirante, 258 • 4415-491 Grijó • Portugal  
Tels.: +351 22 747 19 10/50 • Fax: +351 22 747 19 19/745 57 76

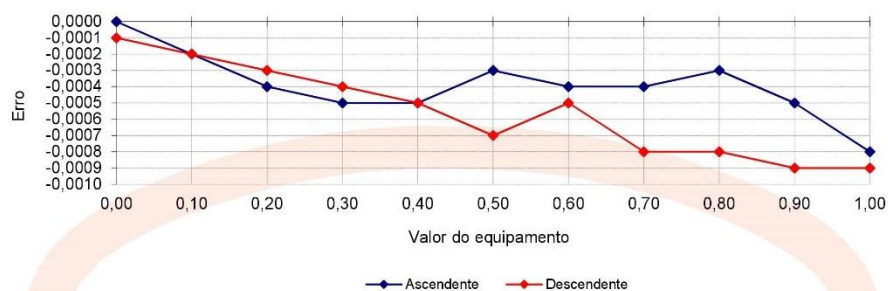


## Certificado de calibração

Certificado n.º. CDIM6042/18

Página 3 de 5

### Representação gráfica da medição dos erros (valores em mm)



### Determinação dos erros

|                             | Valor de referência |
|-----------------------------|---------------------|
| <b>Sentido ascendente:</b>  |                     |
| - Erro máximo (G)           | -0,0008 mm          |
| - Amplitude máxima do Erro  | 0,0008 mm           |
| - Repetibilidade            | 0,0003 mm           |
| <b>Sentido descendente:</b> |                     |
| - Erro máximo (G)           | -0,0009 mm          |
| - Amplitude máxima do Erro  | 0,0008 mm           |
| - Repetibilidade            | 0,0003 mm           |
| Histerese                   | 0,0005 mm           |

Este documento não pode ser reproduzido, excepto integralmente, sem autorização por escrito do ISQ.

Calibrado por

José Godinho

Responsável pela Validação

Sara Leonardo (Responsável Técnico)

DM/065.2/07

**instituto de soldadura e qualidade**

Lisboa: Av. Prof. Cavaco Silva, 33 • Taguspark • 2740-120 Oeiras • Portugal  
Tels.: +351 21 422 90 34/ 81 86/ 90 20 • Fax: +351 21 422 81 02

[labmetro@isq.pt](mailto:labmetro@isq.pt)

<http://metrologia.isq.pt>

Porto: Rua do Mirante, 258 • 4415-491 Grijó • Portugal  
Tels.: +351 22 747 19 10/50 • Fax: +351 22 747 19 19/745 57 76



## Certificado de calibração

Certificado n.º. CDIM6042/18

Página 4 de 5

**Medição dos erros no sentido ascendente** (o valor de referência é resultante da média de 3 medições)

| Valor do equipamento | Valor de referência | Erro       | Erro Relativo | Incerteza expandida |
|----------------------|---------------------|------------|---------------|---------------------|
| 0,0 mm               | 0,0000 mm           | 0,0000 mm  | 0,00 %        | ± 0,0013 mm         |
| 0,5 mm               | 0,5004 mm           | -0,0004 mm | -0,08 %       | ± 0,0013 mm         |
| 1,0 mm               | 1,0005 mm           | -0,0005 mm | -0,05 %       | ± 0,0013 mm         |
| 1,5 mm               | 1,5003 mm           | -0,0003 mm | -0,02 %       | ± 0,0013 mm         |
| 2,0 mm               | 2,0003 mm           | -0,0003 mm | -0,02 %       | ± 0,0013 mm         |
| 2,5 mm               | 2,5003 mm           | -0,0003 mm | -0,01 %       | ± 0,0013 mm         |
| 3,0 mm               | 3,0003 mm           | -0,0003 mm | -0,01 %       | ± 0,0013 mm         |
| 3,5 mm               | 3,5003 mm           | -0,0003 mm | -0,01 %       | ± 0,0013 mm         |
| 4,0 mm               | 4,0003 mm           | -0,0003 mm | -0,01 %       | ± 0,0013 mm         |
| 4,5 mm               | 4,5003 mm           | -0,0003 mm | -0,01 %       | ± 0,0013 mm         |
| 5,0 mm               | 5,0008 mm           | -0,0008 mm | -0,02 %       | ± 0,0013 mm         |

**Medição dos erros no sentido descendente** (o valor de referência é resultante da média de 3 medições)

| Valor do equipamento | Valor de referência | Erro       | Erro Relativo | Incerteza expandida |
|----------------------|---------------------|------------|---------------|---------------------|
| 0,0 mm               | -0,0002 mm          | 0,0002 mm  | 0,00 %        | ± 0,0013 mm         |
| 0,5 mm               | 0,5008 mm           | -0,0008 mm | -0,16 %       | ± 0,0013 mm         |
| 1,0 mm               | 1,0006 mm           | -0,0006 mm | -0,06 %       | ± 0,0013 mm         |
| 1,5 mm               | 1,5006 mm           | -0,0006 mm | -0,04 %       | ± 0,0013 mm         |
| 2,0 mm               | 2,0005 mm           | -0,0005 mm | -0,03 %       | ± 0,0013 mm         |
| 2,5 mm               | 2,5009 mm           | -0,0009 mm | -0,04 %       | ± 0,0013 mm         |
| 3,0 mm               | 3,0008 mm           | -0,0008 mm | -0,03 %       | ± 0,0013 mm         |
| 3,5 mm               | 3,5003 mm           | -0,0003 mm | -0,01 %       | ± 0,0013 mm         |
| 4,0 mm               | 4,0002 mm           | -0,0002 mm | -0,01 %       | ± 0,0013 mm         |
| 4,5 mm               | 4,5009 mm           | -0,0009 mm | -0,02 %       | ± 0,0013 mm         |
| 5,0 mm               | 5,0009 mm           | -0,0009 mm | -0,02 %       | ± 0,0013 mm         |

Este documento não pode ser reproduzido, excepto integralmente, sem autorização por escrito do ISQ.

Calibrado por

José Godinho

Responsável pela Validação

Sara Leonardo (Responsável Técnico)

DM/065.2/07

**instituto de soldadura e qualidade**

lisboa: Av. Prof. Cavaco Silva, 33 • Taguspark • 2740-120 Oeiras • Portugal  
Tels.: +351 21 422 80 34/ 81 86/ 80 20 • Fax: +351 21 422 81 02

[labmetro@isq.pt](mailto:labmetro@isq.pt)

<http://metrologia.isq.pt>

Porto: Rua do Mirante, 258 • 4415-491 Grijó • Portugal  
Tels.: +351 22 747 18 10/50 • Fax: +351 22 747 18 19/745 57 76

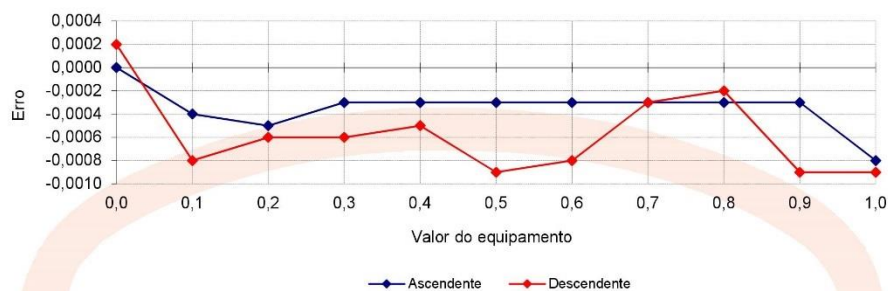


## Certificado de calibração

Certificado n.º. CDIM6042/18

Página 5 de 5

### Representação gráfica da medição dos erros (valores em mm)



### Determinação dos erros

|                             | Valor de referência |
|-----------------------------|---------------------|
| <b>Sentido ascendente:</b>  |                     |
| - Erro máximo (G)           | 0,0008 mm           |
| - Amplitude máxima do Erro  | 0,0008 mm           |
| - Repetibilidade            | 0,0005 mm           |
| <b>Sentido descendente:</b> |                     |
| - Erro máximo (G)           | 0,0009 mm           |
| - Amplitude máxima do Erro  | 0,0011 mm           |
| - Repetibilidade            | 0,0008 mm           |
| Histerese                   | 0,0006 mm           |

Este documento não pode ser reproduzido, excepto integralmente, sem autorização por escrito do ISQ.

Calibrado por

José Godinho

Responsável pela Validação

Sara Leonardo (Responsável Técnico)

DM/065.2/07

**instituto de soldadura e qualidade**

Lisboa: Av. Prof. Cavaco Silva, 33 • Taguspark • 2740-120 Oeiras • Portugal  
Tels.: +351 21 422 90 34/ 81 86/ 80 20 • Fax: +351 21 422 81 02

[labmetro@isq.pt](mailto:labmetro@isq.pt)

<http://metrologia.isq.pt>

Porto: Rua do Mirante, 258 • 4415-491 Grijó • Portugal  
Tels.: +351 22 747 19 10/50 • Fax: +351 22 747 19 19/745 57 76

## **Anexo V – Calibração Interna do extensómetro**





**LABMAT**  
Calibração Interna de extensómetros dinâmicos

Referência Extensómetro: 0EAX-0039 (03EAX)  
Equipamento Associado: TRA-0008 (002FFL) - INSTRON 8562

Data: 21-05-2019

Resolução = 0,1 mm para  $l_i < 1$  mm e igual a 1 mm para  $l_i \geq 1$  mm  
50.00 =  $L_e$  (mm) - (Valor Nominal de Comprimento do Extensómetro)  
50.00 =  $L'e$  (mm) - (Valor Real de Comprimento do Extensómetro)

$q_{0.5} = ((L'_e - L_e) / L_e) \times 100 = 0.00$  CLASSE 1 de acordo com ISO 9513: 2007

PRIMEIRA GAMA DE VERIFICAÇÃO (0,05% - 0,5% ou 0,0025 a 0,25 mm)

| Deslocamento nominal (It) ( $\mu\text{m}$ ) | 1ª Leitura $l_i$ ( $\mu\text{m}$ ) | $l_i - l_t$ (Erro Absoluto) ( $\mu\text{m}$ ) | q (Erro Relativo) (%) | Valor Relativo $r / l_i$ (%) | 2ª Leitura $l_i$ ( $\mu\text{m}$ ) | $l_i - l_t$ (Erro Absoluto) ( $\mu\text{m}$ ) | q (Erro Relativo) (%) | Valor Relativo $r / l_i$ (%) | Conformidade Classe 1 ISO 9513: 2007 |
|---------------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------------------|-----------------------|------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------------------|-----------------------|------------------------------|--------------------------------------|
| 2.5                                         | 1.8                                | 0.7                                           | 28.0                  | 5.56                         | 2.1                                | 0.4                                           | 16.0                  | 4.76                         | Conforme                             |
| 5.0                                         | 4.2                                | 0.8                                           | 16.0                  | 2.38                         | 4.6                                | 0.4                                           | 8.0                   | 2.17                         | Conforme                             |
| 7.5                                         | 6.9                                | 0.6                                           | 8.0                   | 1.45                         | 7.1                                | 0.4                                           | 5.3                   | 1.41                         | Conforme                             |
| 10.0                                        | 9.7                                | 0.3                                           | 3.0                   | 1.03                         | 9.8                                | 0.2                                           | 2.0                   | 1.02                         | Conforme                             |
| 12.5                                        | 12.3                               | 0.2                                           | 1.6                   | 0.81                         | 12.4                               | 0.1                                           | 0.8                   | 0.81                         | Conforme                             |
| 15.0                                        | 14.7                               | 0.3                                           | 2.0                   | 0.68                         | 14.7                               | 0.3                                           | 2.0                   | 0.68                         | Conforme                             |
| 17.5                                        | 17.1                               | 0.4                                           | 2.3                   | 0.58                         | 17.2                               | 0.3                                           | 1.7                   | 0.58                         | Conforme                             |
| 20.0                                        | 20.1                               | 0.1                                           | 0.5                   | 0.50                         | 19.9                               | 0.1                                           | 0.5                   | 0.50                         | Conforme                             |
| 22.5                                        | 22.3                               | 0.2                                           | 0.9                   | 0.45                         | 22.3                               | 0.2                                           | 0.9                   | 0.45                         | Conforme                             |
| 25.0                                        | 24.3                               | 0.7                                           | 2.8                   | 0.41                         | 24.8                               | 0.2                                           | 0.8                   | 0.40                         | Conforme                             |

SEGUNDA GAMA DE VERIFICAÇÃO (0,5% - 5% ou 0,025 a 0,25 mm)

| Deslocamento nominal (It) ( $\mu\text{m}$ ) | 1ª Leitura $l_i$ ( $\mu\text{m}$ ) | $l_i - l_t$ (Erro Absoluto) ( $\mu\text{m}$ ) | q (Erro Relativo) (%) | Valor Relativo $r / l_i$ (%) | 2ª Leitura $l_i$ ( $\mu\text{m}$ ) | $l_i - l_t$ (Erro Absoluto) ( $\mu\text{m}$ ) | q (Erro Relativo) (%) | Valor Relativo $r / l_i$ (%) | Conformidade Classe 1 ISO 9513: 2007 |
|---------------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------------------|-----------------------|------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------------------|-----------------------|------------------------------|--------------------------------------|
| 25.0                                        | 24.3                               | 0.7                                           | 2.8                   | 0.41                         | 24.8                               | 0.2                                           | 0.8                   | 0.40                         | Conforme                             |
| 50.0                                        | 49.9                               | 0.1                                           | 0.2                   | 0.20                         | 49.7                               | 0.3                                           | 0.6                   | 0.20                         | Conforme                             |
| 75.0                                        | 74.5                               | 0.5                                           | 0.7                   | 0.13                         | 74.9                               | 0.1                                           | 0.1                   | 0.13                         | Conforme                             |
| 100.0                                       | 99.5                               | 0.5                                           | 0.5                   | 0.10                         | 99.6                               | 0.4                                           | 0.4                   | 0.10                         | Conforme                             |
| 125.0                                       | 124.9                              | 0.1                                           | 0.1                   | 0.08                         | 124.8                              | 0.2                                           | 0.2                   | 0.08                         | Conforme                             |
| 150.0                                       | 149.9                              | 0.1                                           | 0.1                   | 0.07                         | 150.0                              | 0.0                                           | 0.0                   | 0.07                         | Conforme                             |
| 175.0                                       | 175.1                              | 0.1                                           | 0.1                   | 0.06                         | 174.8                              | 0.2                                           | 0.1                   | 0.06                         | Conforme                             |
| 200.0                                       | 200.1                              | 0.1                                           | 0.1                   | 0.05                         | 200.0                              | 0.0                                           | 0.0                   | 0.05                         | Conforme                             |
| 225.0                                       | 224.9                              | 0.1                                           | 0.0                   | 0.04                         | 224.8                              | 0.2                                           | 0.1                   | 0.04                         | Conforme                             |
| 250.0                                       | 249.9                              | 0.1                                           | 0.0                   | 0.04                         | 250.2                              | 0.2                                           | 0.1                   | 0.04                         | Conforme                             |

TERCEIRA GAMA DE VERIFICAÇÃO (5% - 50% ou 0,25 a 2,5 mm)

| Deslocamento nominal (It) ( $\mu\text{m}$ ) | 1ª Leitura $l_i$ (mm) | $l_i - l_t$ (Erro Absoluto) ( $\mu\text{m}$ ) | q (Erro Relativo) (%) | Valor Relativo $r / l_i$ (%) | 2ª Leitura $l_i$ (mm) | $l_i - l_t$ (Erro Absoluto) ( $\mu\text{m}$ ) | q (Erro Relativo) (%) | Valor Relativo $r / l_i$ (%) | Conformidade Classe 1 ISO 9513: 2007 |
|---------------------------------------------|-----------------------|-----------------------------------------------|-----------------------|------------------------------|-----------------------|-----------------------------------------------|-----------------------|------------------------------|--------------------------------------|
| 250.0                                       | 249.9                 | 0.1                                           | 0.0                   | 0.04                         | 250.2                 | 0.2                                           | 0.1                   | 0.04                         | Conforme                             |
| 500.0                                       | 499.0                 | 1.0                                           | 0.2                   | 0.02                         | 500.2                 | 0.2                                           | 0.0                   | 0.02                         | Conforme                             |
| 750.0                                       | 749.0                 | 1.0                                           | 0.1                   | 0.01                         | 750.6                 | 0.6                                           | 0.1                   | 0.01                         | Conforme                             |
| 1000.0                                      | 997                   | 2.6                                           | 0.3                   | 0.01                         | 999.1                 | 0.9                                           | 0.1                   | 0.10                         | Conforme                             |
| 1250.0                                      | 1247                  | 3.0                                           | 0.2                   | 0.08                         | 1249                  | 1.0                                           | 0.1                   | 0.08                         | Conforme                             |
| 1500.0                                      | 1497                  | 3.0                                           | 0.2                   | 0.07                         | 1499                  | 1.0                                           | 0.1                   | 0.07                         | Conforme                             |
| 1750.0                                      | 1749                  | 1.0                                           | 0.1                   | 0.06                         | 1750                  | 0.0                                           | 0.0                   | 0.06                         | Conforme                             |
| 2000.0                                      | 2001                  | 1.0                                           | 0.1                   | 0.05                         | 2001                  | 1.0                                           | 0.1                   | 0.05                         | Conforme                             |
| 2250.0                                      | 2254                  | 4.0                                           | 0.2                   | 0.04                         | 2254                  | 4.0                                           | 0.2                   | 0.04                         | Conforme                             |
| 2500.0                                      | 2508                  | 8.0                                           | 0.3                   | 0.04                         | 2508                  | 8.0                                           | 0.3                   | 0.04                         | Conforme                             |

QUARTA GAMA DE VERIFICAÇÃO (10% - 100% ou 0,5 a 5 mm)

| Deslocamento nominal (It) (mm) | 1ª Leitura $l_i$ (mm) | $l_i - l_t$ (Erro Absoluto) (mm) | q (Erro Relativo) (%) | Valor Relativo $r / l_i$ (%) | 2ª Leitura $l_i$ (mm) | $l_i - l_t$ (Erro Absoluto) (mm) | q (Erro Relativo) (%) | Valor Relativo $r / l_i$ (%) | Conformidade Classe 1 ISO 9513: 2007 |
|--------------------------------|-----------------------|----------------------------------|-----------------------|------------------------------|-----------------------|----------------------------------|-----------------------|------------------------------|--------------------------------------|
| 500.0                          | 501.1                 | 1.1                              | 0.2                   | 0.02                         | 500.0                 | 0.0                              | 0.0                   | 0.20                         | Conforme                             |
| 1000.0                         | 998.5                 | 3.5                              | 0.4                   | 0.10                         | 995                   | 5.2                              | 0.5                   | 0.10                         | Conforme                             |
| 1500.0                         | 1495                  | 5.0                              | 0.3                   | 0.07                         | 1493                  | 7.0                              | 0.5                   | 0.07                         | Conforme                             |
| 2000.0                         | 2002                  | 2.0                              | 0.1                   | 0.05                         | 1999                  | 1.0                              | 0.1                   | 0.05                         | Conforme                             |
| 2500.0                         | 2516                  | 16.0                             | 0.6                   | 0.04                         | 2515                  | 15.0                             | 0.6                   | 0.04                         | Conforme                             |
| 3000.0                         | 3009                  | 9.0                              | 0.3                   | 0.03                         | 3008                  | 8.0                              | 0.3                   | 0.03                         | Conforme                             |

Efectuado:  
Joana Gonçalves

Verificado e Validado:  
Marta Freitas  
Responsável Técnica (LABMAT UEM)

## **Anexo VI - Catálogo de características dos termopares**

| SELECTING SENSOR CABLES: GUIDE TO INSULATION & COVERING |                          |                                                                                                                                                          |
|---------------------------------------------------------|--------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Which insulation Material?                              | usable temperature range | Application Notes                                                                                                                                        |
| PVC                                                     | -10°C to 105°C           | Good general purpose insulation for 'light' environments. Waterproof and very flexible.                                                                  |
| PFA (extruded)                                          | -75°C to 250°C           | Resistant to oils, acids other adverse agents and fluids. Good mechanical strength and flexibility. PTFE better for steam/elevated pressure environments |
| PTFE (taped & wrapped)                                  | -75°C to 250/300°C       | Resistant to oils, acids other adverse agents and fluids. Good mechanical strength and flexibility.                                                      |
| Glassfibre (varnished)                                  | -60°C to 350/400°C       | Good temperature range but will not prevent ingress of fluids. Fairly flexible but does not provide good mechanical protection.                          |
| High temperature glassfibre                             | -60°C to 700°C           | Will withstand temperature up to 700°C but will not prevent ingress of fluids. Fairly flexible, not good protection against physical disturbance.        |
| Ceramic Fibre                                           | 0 to 1000°C              | Will withstand high temperature, up to 1000°C. Will not protect against fluids or physical disturbance.                                                  |
| Glassfibre (varnished) stainless steel overbraid        | -60°C to 350/400°C       | Good resistance to physical disturbance and high temperature (up to 400°C). Will not prevent ingress of fluids.                                          |

**Screened or unscreened?** With long cable runs, the cable may need to be screened and earthed at one end (at the instrument) to minimise noise pick-up (interference) on the measuring circuit. Alternative types of screened cable construction are available and these include the use of copper or mylar screening. Twisted pair configurations are offered and these can incorporate screening as required.

| THERMOCOUPLE ACCURACIES                                                          |         |                                                                      |         |       |           |
|----------------------------------------------------------------------------------|---------|----------------------------------------------------------------------|---------|-------|-----------|
| Tolerance classes for thermocouples to IEC 60584-1 : 2013 / BS EN 60584-1 : 2013 |         |                                                                      |         |       |           |
| <b>Fe-Con (J)</b>                                                                | Class 1 | - 40 +750°C:                                                         | ±0.004  | . t   | or ±1.5°C |
|                                                                                  | Class 2 | - 40 +750°C:                                                         | ±0.0075 | . t   | or ±2.5°C |
|                                                                                  | Class 3 | - - -                                                                | - - -   | - - - | - - -     |
| <b>Cu-Con (T)</b>                                                                | Class 1 | - 40 +350°C:                                                         | ±0.004  | . t   | or ±0.5°C |
|                                                                                  | Class 2 | - 40 +350°C:                                                         | ±0.0075 | . t   | or ±1.0°C |
|                                                                                  | Class 3 | -200 + 40°C:                                                         | ±0.015  | . t   | or ±1.0°C |
| <b>NiCr -Ni (K) and NiCrSi-NiSi (N)</b>                                          | Class 1 | - 40 +1000°C:                                                        | ±0.004  | . t   | or ±1.5°C |
|                                                                                  | Class 2 | - 40 +1200°C:                                                        | ±0.0075 | . t   | or ±2.5°C |
|                                                                                  | Class 3 | -200 + 40°C:                                                         | ±0.015  | . t   | or ±2.5°C |
| <b>NiCr-Con (E)</b>                                                              | Class 1 | - 40 +800°C:                                                         | ±0.004  | . t   | or ±1.5°C |
|                                                                                  | Class 2 | - 40 +900°C:                                                         | ±0.0075 | . t   | or ±2.5°C |
|                                                                                  | Class 3 | -200 + 40°C:                                                         | ±0.015  | . t   | or ±2.5°C |
| <b>Pt10Rh-Pt (S) and Pt13Rh-Pt (R)</b>                                           | Class 1 | 0 +1600°C: 1 for t < 1100°C, [1 + 0.003 x (t - 1100)] for t > 1100°C | ±0.0025 | . t   | or ±1.5°C |
|                                                                                  | Class 2 | 0 +1600°C:                                                           | - - -   | - - - | - - -     |
|                                                                                  | Class 3 | - - -                                                                | - - -   | - - - | - - -     |
| <b>Pt30Rh-Pt6Rh (B)</b>                                                          | Class 1 | - - -                                                                | - - -   | - - - | - - -     |
|                                                                                  | Class 2 | +600 +1700°C:                                                        | ±0.0025 | . t   | or ±1.5°C |
|                                                                                  | Class 3 | +600 +1700°C:                                                        | ±0.005  | . t   | or ±4.0°C |

Note: t = actual temperature Use the larger of the two deviation values

| COLOUR CODES: THERMOCOUPLE CONNECTORS, EXTENSION AND COMPENSATING WIRES AND CABLES |                                                                                                                                                     |                     |                       |                          |            |  |
|------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|-----------------------|--------------------------|------------|--|
| INSULATION COLOUR CODES Extension & Compensating Leads                             |                                                                                                                                                     |                     |                       |                          |            |  |
| TYPE                                                                               | CONDUCTORS +/-                                                                                                                                      | FORMER STANDARD     |                       |                          | CABLE CODE |  |
|                                                                                    |                                                                                                                                                     | BRITISH BS1842-1952 | AMERICAN ANSI/MC 36.1 | GERMAN DIN 43713 / 43714 |            |  |
| EX                                                                                 | NICKEL CHROMIUM/CONSTANTAN (Nickel Chromium/Copper Nickel, Chromel/Constantan, Ti/Advance, NiCr/Constantan)                                         |                     |                       |                          | EX         |  |
| J                                                                                  | IRON / CONSTANTAN (Iron/Copper Nickel, Fe/Konst Iron/Advance, Fe/Constantan I/C)                                                                    |                     |                       |                          | JX         |  |
| K                                                                                  | NICKEL CHROMIUM/NICKEL ALUMINIUM (NiCr/Al, Chromel/ Alumel, C/A, Ti/T2, NiCr/Ni, NiCr/ NIAL)                                                        |                     |                       |                          | KX         |  |
| N                                                                                  | NICROSIL/NISIL                                                                                                                                      |                     |                       |                          | NX<br>NC   |  |
| T                                                                                  | COPPER/CONSTANTAN (Copper/Copper Nickel, Cu/Con, Copper/Advance)                                                                                    |                     |                       |                          | TX         |  |
| Vx                                                                                 | COPPER/CONSTANTAN (LOW NICKEL) (Cu/Constantan) Compensating for K (Cu/Constantan)                                                                   |                     |                       |                          | KCB        |  |
| U                                                                                  | COPPER/COPPER NICKEL Compensating for Platinum 10% or 13% Rhodium/Platinum (Codes S & R respectively) (Copper/Cupronic Cu/CNi, Copper/No. 11 Alloy) |                     |                       |                          | RCA<br>SCA |  |

\* Magnetic, ( )  
Alternative & Trade Name

FOR THERMOCOUPLE CONNECTORS body colours are similar to outer sheath colours

FOR THERMOCOUPLE CONNECTORS body colours are similar to outer sheath colours

| CALIBRATION GUIDE |       |        |        |        |        |        |
|-------------------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Thermocouple Type | 100°C | 400°C  | 800°C  | 1000°C | 1200°C | 1500°C |
| T                 | 4.279 | 20.872 | -      | -      | -      | -      |
| E                 | 6.319 | 28.946 | 61.017 | 76.373 | -      | -      |
| J                 | 5.269 | 21.848 | 45.494 | 57.953 | 69.553 | -      |
| K                 | 4.096 | 16.397 | 33.275 | 41.276 | 48.838 | -      |
| N                 | 2.774 | 12.974 | 28.455 | 36.256 | 43.846 | -      |
| R                 | 0.647 | 3.408  | 7.950  | 10.506 | 13.228 | 17.451 |
| S                 | 0.646 | 3.259  | 7.345  | 9.587  | 11.951 | 15.582 |
| B                 | 0.033 | 0.787  | 3.154  | 4.834  | 6.786  | 10.099 |