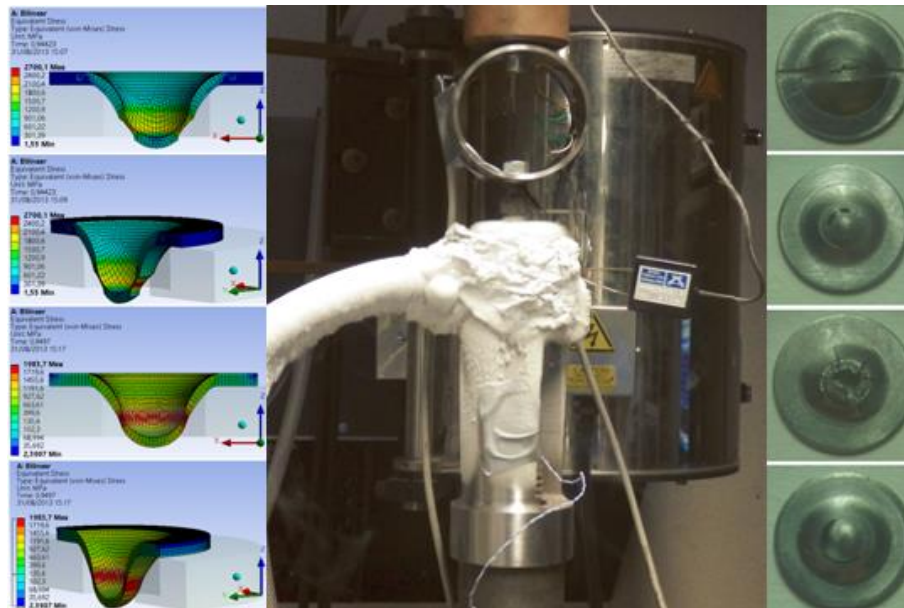




ISEL

INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA

Área Departamental de Engenharia Mecânica



Determinação de propriedades mecânicas através de ensaios de provetes miniatura, “Small Punch”

NUNO MIGUEL DE ALMEIDA RIBEIRO
(Licenciado em Engenharia Mecânica)

Trabalho Final de Mestrado para obtenção do grau de Mestre
em Engenharia Mecânica

Orientadores: Prof. António Fernando Barata Correia da Cruz
Prof. Afonso Manuel da Costa de Sousa Leite
Doutor Manuel Real Gomes

Júri:

Presidente: Doutor João Carlos Quaresma Dias

Vogais: Doutora Maria Luísa Coutinho Gomes de Almeida
Doutor João Manuel Candeias Travassos
Prof. António Fernando Barata Correia da Cruz
Doutor Manuel Real Gomes

Setembro 2013



INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA

Área Departamental de Engenharia Mecânica

Determinação de propriedades mecânicas através de ensaios de provetes miniatura, “Small Punch”

NUNO MIGUEL DE ALMEIDA RIBEIRO
(Licenciado em Engenharia Mecânica)

Trabalho Final de Mestrado para obtenção do grau de Mestre
em Engenharia Mecânica

Orientadores: Prof. António Fernando Barata Correia da Cruz
Prof. Afonso Manuel da Costa de Sousa Leite
Doutor Manuel Real Gomes

Júri:

Presidente: Doutor João Carlos Quaresma Dias

Vogais: Doutora Maria Luísa Coutinho Gomes de Almeida
Doutor João Manuel Candeias Travassos
Prof. António Fernando Barata Correia da Cruz
Doutor Manuel Real Gomes

Setembro de 2013

Agradecimentos

É com enorme prazer que expresso aqui o mais profundo agradecimento a todos aqueles que tornaram este trabalho possível.

Gostaria de começar por agradecer ao meu orientador Eng.º António Correia da Cruz e aos coorientadores Eng.º Afonso Leite e Dr. Manuel Gomes por todo o apoio e incentivo que me deram durante a realização deste trabalho.

Um especial agradecimento ao Instituto de Soldadura e Qualidade (ISQ) pela oportunidade que me proporcionou em realizar este trabalho.

Queria também agradecer a todos os colaboradores do Lab.MAT do Instituto de Soldadura e Qualidade pela ajuda prestada na fase experimental do presente trabalho.

Agradeço também aos meus colegas Frederico Caldas e Luís Martins não só por todos os momentos vividos mas também pela troca de conhecimentos, amizade e de apoio.

Por fim o mais profundo agradecimento aos meus pais, aos meus irmãos, ao meu avô e à minha namorada pelo incentivo incondicional e pelo apoio financeiro que me proporcionaram, uma vez que sem eles nada disto seria possível.

Um grande obrigado a todos!

Resumo

O presente trabalho incide na realização de ensaios a provetes miniatura do tipo *Small Punch* (SP) para determinar a tensão de cedência, tensão de rotura e tenacidade à fratura do aço A 335 P11. Este tipo de ensaio 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. A posse desta informação é de extrema importância para se poder programar, com mais informação, e para a melhor altura, a manutenção da máquina/equipamento ou inclusive o seu abate. Por exemplo, numa paragem geral da linha faz-se a manutenção daquela máquina.

Para realizar os ensaios SP foi necessário projetar um dispositivo, o qual que fosse possível de ser utilizado numa máquina de ensaio eletromecânica (*Instron 6562*) e que permitisse efetuar ensaios a temperatura alta, baixa e ambiente. Também foi necessário selecionar e adaptar todo o sistema de instrumentação necessário para a medição e aquisição dos dados.

Para determinar as propriedades mecânicas utilizou-se provetes SP convencionais (sem entalhe) e provetes com dois tipos de entalhe diferente: entalhe circular e entalhe linear. As dimensões dos entalhes tiveram como base a bibliografia utilizada no presente trabalho, exceto o diâmetro do entalhe circular que foi otimizado para evitar a deformação do provete em modo de carregamento misto (Modo II), que constituiu uma das limitações na determinação da tenacidade à fratura em trabalhos anteriores. Este estudo da determinação ótima do diâmetro do entalhe circular foi levado a cabo através do programa comercial de elementos finitos (Ansys). Assim passou-se de um diâmetro de 2.5 mm (trabalho anterior) para um de 1.6 mm (presente trabalho).

De modo geral obteve-se bons resultados dado que as relações utilizadas na determinação das propriedades mecânicas foram obtidas por métodos empíricos.

Palavras-chave:

Provetes miniatura, Small Punch, Propriedades mecânicas, Tensão de cedência, Tensão de rotura e Tenacidade à fratura

Abstract

The present work focuses on testing Small Punch miniature specimens to determine yield strength, tensile strength and fracture toughness of A 335 P11 steel. This type of test is aimed to obtain information on the state of degradation of the equipment that is in service of industry, being subject to degradation phenomena dependent on time. Achieving this information is extremely important to be able to program, with more accuracy and at the best time, the maintenance of machinery/equipment or even its substitution. This is useful, for example, when occurs a general stop line to make the maintenance of a specific machine.

To perform the SP tests, it was necessary to design a device which can be used in an electromechanical testing machine (Instron 6562), and allow to carry out tests at high temperature, low temperature and room temperature. It was also necessary to select and adapt whole the instrumental system needed for measurement and data acquisition.

To determine the mechanical properties it was used conventional SP specimens (unnotched) and specimens with two different types of notch: circular notch and linear notch. The notch's dimensions were based on the bibliography used in this work, except the diameter of the circular notch that was optimized to avoid deformation of the specimen in the mixed mode loading (mode II), which was one of the limitations in the determination of fracture toughness in previous works. This study that aimed the determination of the best circular notch diameter was done throw the commercial program of finite elements (software ANSYS). Thus, it was possible to come up with a diameter of 2.5mm (previously used) to a diameter of 1.6 mm (used in this work).

Generally, good results were achieved as the ratios used in the determination of the mechanical properties have been used obtained by empirical methods.

Keywords

Miniature specimens, Small Punch, Mechanical properties, Yield strength, Tensile strength and Fracture toughness.

Índice

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO	III
ABSTRACT	V
LISTA DE FIGURAS	XI
LISTA DE TABELAS	XVII
LISTA DE ABREVIATURAS	XIX
LISTA DE SÍMBOLOS	XXI
1 INTRODUÇÃO	1
MOTIVAÇÃO	5
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
2.1 TIPOS DE ENSAIO DE PROVETES MINIATURA	7
2.1.1 Ensaio <i>Impression Creep</i> (EIC)	8
2.1.2 Ensaio <i>Small Ring</i> (ESR)	13
2.1.3 Ensaio <i>Conventional Sub-Size Uniaxial</i> (ECSSU)	17
2.1.4 Ensaio <i>Small Punch</i> (ESP)	20
2.2 PROCESSO DE EXTRAÇÃO DAS AMOSTRAS DOS EQUIPAMENTOS	55
2.3 COMPARAÇÃO ENTRE OS ENSAIOS APRESENTADOS	58
3 PROJETO DO DISPOSITIVO PARA OS ESP E DEFINIÇÃO DOS RESPETIVOS PROVETES	61
3.1 DISPOSITIVO PARA OS ESP	61
3.2 PROVETES PARA OS ESP	64
4 SIMULAÇÕES NUMÉRICAS	69
4.1 CURVAS CARGA-DESLOCAMENTO DOS PROVETES SP	71
4.2 DETERMINAÇÃO DO INTEGRAL J	73
4.2.1 Provette com entalhe linear	74
4.2.2 Provette com entalhe circular	76

5	FASE EXPERIMENTAL	79
5.1	ENSAIO CONVENCIONAL DE TRAÇÃO	79
5.2	ENSAIO CONVENCIONAL DE FLEXÃO A TRÊS PONTOS	80
5.3	ENSAIO CONVENCIONAL DE IMPACTO CHARPY V	81
5.4	ENSAIO <i>SMALL PUNCH</i>	82
5.4.1	Preparação dos provetes SP	82
5.4.2	Equipamento utilizado nos ESP	83
5.4.3	Plano experimental dos ESP	85
5.4.4	Resultados e cálculo das propriedades	86
5.4.5	Comparação entre os resultados experimentais e os numéricos	97
6	CONCLUSÃO	99
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	103
	APÊNDICES	109
	APÊNDICE I – DESENHOS TÉCNICOS 2D DO DISPOSITIVO DE ENSAIO	111
	APÊNDICE II – ANÁLISE DE CONVERGÊNCIA DA MALHA	113
	APÊNDICE III – CARACTERÍSTICAS DOS PROVETES SP E ENSAIOS EFETUADOS	115
	APÊNDICE IV – PROCEDIMENTO UTILIZADO PARA A CONSTRUÇÃO DO ANEL DINAMOMÉTRICO	117
	ANEXOS	119
	ANEXO 1 - TABELA DE CONVERSÃO DE DUREZA	121
	ANEXO 2 – CURVA DE DEFORMAÇÃO PLÁSTICA DO AÇO A 335 P11	123
	ANEXO 3 – CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO DO CALIBRADOR DOS EXTENSÓMETROS DINÂMICOS	125
	ANEXO 4 – CURVA DE TRANSFORMAÇÃO DE VOLTS PARA MILÍMETROS	127

**ANEXO 5 – CATÁLOGO DAS CARACTERÍSTICAS DOS
TERMOPARES**

129

Lista de Figuras

Figura 2. 1 - Amostra tipo concha. (a) Dimensões. (b) Foto do provete [3].	8
Figura 2. 2 – Princípio do EIC. Adaptado de [6].	9
Figura 2. 3 - Provete IC ensaiado [7].	9
Figura 2. 4 - Tipos de geometria dos provetes EIC. Adaptado de [7].	10
Figura 2. 5 - (a) Punção circular. (b) Punção retangular.	10
Figura 2. 6 -Dispositivo de EIC. Adaptado de [3].	11
Figura 2. 7 - Curvas típicas do EIC [9].	12
Figura 2. 8 - (a) Princípio de funcionamento do ESR. (b) Provete circular. (c) Provete elíptico. Adaptado de [10].	13
Figura 2. 9 - Dispositivo de ESR. Adaptado [11].	15
Figura 2. 10 -(a) Curvas do ESR do aço P91 a 650°C provete circular. (b) Curvas do ESR do aço P91 a 650°C provete Elíptico. Adaptado de [11].	15
Figura 2. 11 - Variação dos fatores de conversão com a relação (a_{sr}/b_{sr}). Adaptado de [10].	16
Figura 2. 12 - Comparação do tamanho do provete de ECSSU com uma caneta [14].	17
Figura 2. 13 -Provete de tração uniaxial [3].	18
Figura 2. 14 -(a) Provetes de tração não standards (dimensões em mm) [15]. (b) Provete de tração não standard [3].	18
Figura 2. 15 -Esquema do dispositivo de ESP. Adaptado de [27].	21
Figura 2. 16 - Provetes de ESP. (a) Geometria quadrangular [26]. (b) Geometria circular [28].	22
Figura 2. 17 - Equipamento de ESP. Adaptado de [29].	23
Figura 2. 18 - Curvas típicas dos ESP. (a) Curva carga-deslocamento [27]. (b) Curva deslocamento-tempo de ensaio [22].	24
Figura 2. 19 - Relação da tensão de cedência com a carga P_y [20].	25
Figura 2. 20 - Relação da tensão de rotura e a carga máxima ($P_{máx}$) [20].	25
Figura 2. 21 - Relação entre a tenacidade à fratura com a taxa de deformação de fratura equivalente [32].	27
Figura 2. 22 - (a) Propagação de fissuras circunferenciais. (b) Diminuição da espessura. Adaptado de [20].	28

Figura 2. 23 – (a) Geometria e localização do entalhe (a) Provete SP com entalhe central. [26].	30
Figura 2. 24 - Placa infinita com uma fenda de comprimento $2a$ e sujeita a flexão uniforme [26].	30
Figura 2. 25 - Esquema de uma placa circular carregada concêntricamente [26].	31
Figura 2. 26 - Esquema da metodologia utilizada para obter a tenacidade à fratura [33].	35
Figura 2. 27 - Provete SP entalhado. (a) Geometria do provete SP. (b) Imagem metalográfica do entalhe [33].	36
Figura 2. 28 - Imagem microscópica do entalhe obtido a laser [33].	36
Figura 2. 29 - Curva carga deslocamento do ESP. Adaptado de [33].	37
Figura 2. 30 - ESP interrompido a 85% da carga máxima. Adaptado de [33].	38
Figura 2. 31 - Cuvas obtidas nos ESP entalhados [33].	38
Figura 2. 32 - Modelo 3D da análise em elementos finitos, usado para o cálculo da PU [33].	39
Figura 2. 33 - Malha do provete SP entalhado e os elementos gerados na ponta da fenda [33].	40
Figura 2. 34 - (a) Entalhe circular. (b) Secção transversal do provete. [25].	41
Figura 2. 35 - Modo de carregamento misto [25].	42
Figura 2. 36 - Esquema de um provete entalhado sujeito a carregamento misto [34].	43
Figura 2. 37 - Provete SP com entalhe linear [24].	44
Figura 2. 38 - (a) Esquema da forma como a fenda se propaga. (b) Digitalização microscópica do provete ensaiado [24].	44
Figura 2. 39 - Imagem microscópica da vista inferior dos provetes SP. (a) Ensaio interrompido a 75% da carga máxima. (b) Ensaio interrompido a 65% da carga máxima [24].	45
Figura 2. 40 - Esquema da deformação do ensaio de fluência SP. (a) Forma inicial e deformação do provete SP (assumindo a espessura constante). (b) Representação esquemática da curva deslocamento em função do tempo de ensaio de fluência SP, onde mostra diferentes regiões de deformação (em que Δ_i representa a deformação elástica e plástica instantânea). Adaptado de [35].	47
Figura 2. 41 - Dados da temperatura de transição obtidos pelo ESP e impacto Charpy [23].	50
Figura 2. 42 - Esquema da malha utilizada para a análise de elementos finitos [16].	51

Figura 2. 43 - Modelo 3D utilizado na análise de elementos finitos [28].	51
Figura 2. 44 - Comparação das curvas do ESP carga-deslocamento obtidas a partir da AEF e experimentalmente. (b) Influência do coeficiente de atrito nos estudos de elementos finitos [28].	52
Figura 2. 45 - Evolução da falha no provete SP [28].	53
Figura 2. 46 - Análise elástica plástica efetuada no ANSYS 11. (a) 0.25 mm de deslocamento. (b) 0.55 mm de deslocamento. (c) 1.68 mm de deslocamento [25].	53
Figura 2. 47 - Micrografias da propagação das fendas. (a) Fratura frágil. (b) Fratura dúctil. (c) Tensão principal. (d) distribuição de tensões na ponta do entalhe (as setas vermelhas e verdes representam as tensões de compressão e tração respetivamente) [25].	54
Figura 2. 48 - (a) Segunda máquina de recolha de amostras criada pela Rolls-Royce. (b) Amostra de material extraída. Adaptado de [36].	55
Figura 2. 49 -Princípio de funcionamento do dispositivo de recolha de amostras [36].	55
Figura 2. 50 - (a) Provetes SP obtidos a partir de uma amostra recolhida SSam TM-2 [36]. (b) Zona da extração da amostra [37].	56
Figura 2. 51 - Esquema do princípio de funcionamento do equipamento. (a) Primeira fase da operação. (b) Segunda fase da operação (c) Operação executada. [38].	56
Figura 2. 52 - Equipamento de recolha de amostras por descarga elétrica. (a) Placa de base e corpo principal. (b) Painel de controlo. (c) Eléctrodo. (d) Máquina de líquido. [38].	57
Figura 2. 53 - Amostra típica [38].	57
Figura 3. 1 - Dimensões principais do dispositivo de ESP.	61
Figura 3. 2 - (a) Tenacidade de diferentes grupos de materiais. (b) Resistência de diferentes grupos de materiais a diferentes temperaturas. Adaptado de [39].	62
Figura 3. 3 - (a) - Modelação 3D do dispositivo de ESP. (b) - Modelação 3D do Sistema de fixação do dispositivo à máquina.	63
Figura 3. 4 -Distribuição das tensões equivalentes de um provete SP convencional.	65
Figura 3. 5 - Deformação do provete em diferentes zonas da curva carga-deslocamento.	66
Figura 3. 6 - Deformação plástica dos provetes entalhados. (a) Diâmetro de entalhe D=2.5 mm. (b) Diâmetro de entalhe D=2.5 mm. (c) Diâmetro de entalhe D=1.6 mm. (d) Diâmetro de entalhe D=1.6 mm.	67

Figura 3. 7 - (a) - Provete com entalhe circular. (b) - Provete com entalhe linear (c) – Provete SP convencional.-----	68
Figura 4. 1 - (a) – Modelos disponíveis no Ansys. (b) – Análises disponíveis no Ansys. [43]. -----	69
Figura 4. 2 - Elemento SOLID 186 [43]. -----	70
Figura 4. 3 - Curvas de convergência da malha.-----	70
Figura 4. 4 - Curvas carga-deslocamento de ambos entalhes. -----	71
Figura 4. 5 – (a) Distribuição das tensões equivalentes de von-Mises num provete sem entalhe. (b) Distribuição das tensões equivalentes de von-Mises num provete com entalhe circular. (c) Distribuição das tensões equivalentes de von-Mises num provete com entalhe linear. -----	72
Figura 4. 6 - (a) Esquema da geometria da fenda 3-D. (b) Zona de avaliação dos deslocamentos na ponta da fenda [43]. -----	73
Figura 4. 7 - Análise de convergência da malha. -----	74
Figura 4. 8 - Integral J na frente da fenda [43].-----	75
Figura 4. 9 - Gradiente das tensões máximas principais (σ_1).-----	75
Figura 4. 10 - Integral J na frente da fenda[43]. -----	76
Figura 4. 11 - Gradiente das tensões máximas principais (σ_1). -----	76
Figura 5. 1 - (a) Material do reator. (b) Esquema da zona e direção da extração dos provetes. -----	79
Figura 5. 2 - Ensaio de tração.-----	79
Figura 5. 3 - (a) Ensaio de flexão a três pontos (SENB). (b) Superfície de fratura. ----	80
Figura 5. 4 - (a) Máquina de ensaio de impacto Charpy V. Provete do ensaio de impacto Charpy V. -----	81
Figura 5. 5 - Provetes utilizados na fase experimental. (a) Provete com entalhe circular. (b) Provete com entalhe linear. (c) Provete SP convencional.-----	82
Figura 5. 6 - (a) Máquina de polir. (b) Micrómetro utilizado para o controlo dimensional da espessura. -----	82
Figura 5. 7 - Equipamento para o ESP. -----	83
Figura 5. 8 - Termopar do tipo T.-----	84
Figura 5. 9 - Soprador de Azoto.-----	85

Figura 5. 10 - Curvas carga-deslocamento dos provetes sem entalhe e 0.5 mm de espessura.-----	86
Figura 5. 11 - Curva carga deslocamento do provete 3. -----	87
Figura 5. 12 - Vista em corte da secção transversal do provete 3. -----	88
Figura 5. 13 - Curvas carga-deslocamento dos provetes sem entalhe e 0.5 mm de espessura.-----	89
Figura 5. 14 - ESP a baixa temperatura. -----	90
Figura 5. 15 - Curvas carga-deslocamento dos provetes com entalhe circular e 0.5 mm de espessura. -----	90
Figura 5. 16 - Ponto de iniciação da fenda do provete 8.-----	91
Figura 5. 17 - Energia absorvida até ao ponto de iniciação da fenda do provete 8. ----	92
Figura 5. 18 - Curvas carga-deslocamento dos provetes com entalhe circular e 0.5 mm espessura.-----	93
Figura 5. 19 -Curvas carga-deslocamento dos provetes com entalhe linear e 0.5 mm de espessura.-----	94
Figura 5. 20 - Ponto de iniciação da fenda do provete 14. -----	94
Figura 5. 21 - Energia absorvida até ao ponto de iniciação da fenda do provete 14.----	95
Figura 5. 22 - Curvas carga-deslocamento dos provetes com entalhe linear e 0.5 mm de espessura -----	96
Figura 5. 23 - Entalhe mecânico. -----	96
Figura 5. 24 – (a) - Provetes sem entalhe. (b) – Provete com entalhe circular. (c) – Provete com entalhe linear. -----	97
Figura 5. 25 - Curvas carga-deslocamento dos provetes com entalhe linear. -----	98

Lista de Tabelas

Tabela 2. 1 - Dimensões dos provetes do ESR.-----	14
Tabela 2. 2 - Principais aspetos de cada um dos ensaios miniatura.-----	58
Tabela 3. 1 - Dimensões dos provetes e respetivos entalhes.-----	68
Tabela 5. 1 - Propriedades do material retirado do reator.-----	80
Tabela 5. 2 - Material do reator.-----	81
Tabela 5. 3 - Resultados dos ensaios de impacto Charpy V.-----	81
Tabela 5. 4 – ESP realizados.-----	85
Tabela 5. 5 - Comparação dos resultados obtidos pelos métodos convencionais e pelos ESP.-----	88
Tabela 5. 6 - Comparação dos resultados convencionais com os SP.-----	92
Tabela 5. 7 - Comparação dos resultados convencionais com os SP.-----	95

Lista de Abreviaturas

ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BS	<i>British Standard</i>
BLIH	<i>Bilinear Isotropic Hardening</i>
CSSU	<i>Conventional Sub-Size Uniaxial</i>
CTOD	<i>Crack-Tip Opening Displacement</i>
CEN	Comissão Europeia de Normalização
DP	Estado de Deformação Plana
DAF	Diagrama de Avaliação de Falhas
EUA	Estado Unidos da América
EGL	<i>Equivalent Gauge Length</i> (Comprimento de referência equivalente)
EIC	Ensaio <i>Impression Creep</i>
ESR	Ensaio <i>Small Ring</i>
ESP	Ensaio <i>Small Punch</i>
ECSSU	Ensaio <i>Conventional Sub-Size Uniaxial</i>
FATT	Temperatura de Transição da Aparência da Fratura
GL	<i>Gauge Length</i> (Comprimento de referência)
IC	<i>Impression Creep</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LEIE	<i>Linear Elastic Isotropic Elasticity</i>
LVDT	<i>Linear Variable Differential Transformer</i>
MEF	Método de Elementos Finitos
MFLE	Mecânica da Fratura Linear Elástica
MFEP	Mecânica da Fratura Elásto-Plástica

SENB	<i>Single Edge Notched Bend Specimen</i>
SR	<i>Small Ring</i>
SPBT	<i>Small Punch Bulge Test</i>
SPDT	<i>Small Punch Drawing Test</i>
SP	<i>Small Punch</i>
TP	Estado de Tensão Plana
TTDF	Temperatura de Transição de Dúctil-Frágil
ZTA	Zona Termicamente Afetada
3D	Três dimensões
2D	Duas dimensões

Lista de Símbolos

∂A	Área da fenda
P_{sr}	Carga aplicada no ensaio SR
P_y	Carga correspondente à cedência do material no ensaio SP
$P_u, P_{m\acute{a}x}$ e P_U	Carga máxima do ensaio SP
P	Carga
P_{ini} e P_{app}	Carga correspondente à iniciação da fenda
L_r	Carga relativa
w_{IC}	Comprimento lateral do provete IC
b_{0sr}	Comprimento do provete SR
K_0, J_0	Constantes de caracterização do material
a	Comprimento da fenda
ν	Coefficiente de Poisson
l	Comprimento do elemento
K_{SP}	Constante de proporcionalidade das características geométricas
K_S	Constante do material
C_{SP}	Constante relacionada com a escala
C	Constante do nível de constringimento em torno da ponta da fenda
Δ^c	Deslocamento de fluência
Δ	Deslocamento do punção SP ou deformação central do provete
v_i	Deslocamentos nodais perpendiculares à direção da fenda
d_{ini}	Deslocamento do punção correspondente à carga de iniciação da propagação da fenda
β_{SP}	Deslocamento ou offset da temperatura de transição
ϕ	Diâmetro do provete IC

d_{IC}	Dimensão característica do punção do ensaio IC
d_{cssu}	Diâmetro do provete
L	Distância entre o apoio e centro do provete
d	Distância entre o ponto de aplicação da carga e o centro do provete
s	Distância entre o ponto de aplicação da carga e a ponta da fenda
∂U	Energia potencial
W_{ini}	Energia consumida até se iniciar a propagação da fenda
d_{sr}	Espessura do provete SR
t_0, h e w	Espessura do provete
t	Espessura final na zona de rotura
ϵ^c	Extensão uniaxial de fluência
\mathcal{E}_{true}	Extensão real
\mathcal{E}	Extensão
\mathcal{E}_{qf}	Extensão equivalente biaxial
\mathcal{E}_θ	Extensão circunferencial
\mathcal{E}_r	Extensão radial
\mathcal{E}_t	Extensão da espessura
K_I e K_{II}	Fator de intensidade de tensões obtido em modo I e em modo II respetivamente
K	Fator de intensidade de tensões
K_{eff}	Fator de intensidade de tensões efetivo
α	Fator de correlação mecânico diretamente relacionado com o estado de tensão
F_{cssu}, F e Q	Força
r	Linha do contorno fechado ao redor da fenda
a_{sr}	Maior dimensão interior do provete SR

b_{sr}	Menor dimensão interior do provete elíptico SR
E	Módulo de elasticidade
M_0	Momento fletor
D	Módulo de rigidez à flexão
η	Parâmetro de conversão da tensão
β	Parâmetro de conversão da extensão
$F_I(a/w)$	Parâmetro adimensional que caracteriza geometria da fenda e do provete quando sujeito ao modo de carregamento I
$F_{II}(a/w)$	Parâmetro adimensional que caracteriza geometria da fenda e do provete quando sujeito ao modo de carregamento II
$f(a/w)$	Parâmetro adimensional que caracteriza geometria da fenda e do provete
\dot{P}	Pressão média exercida sob o punção IC
$L_{r(max)}$	Propriedade do material que define o limite no DAF
R_{sr}	Raio interior do provete SR
r, c, b	Raio da zona de carregamento, raio de contacto e raio do orifício de receção respetivamente
R_s	Raio da ponta do punção SP
a_p	Raio do orifício da matriz de receção
r_y	Raio de ponta da fenda
\mathcal{E}_{eq}	Sensibilidade da medição da deformação no provete SP ou extensão equivalente
$\dot{\Delta}_v$	Taxa de deslocamento de fluência
$\dot{\mathcal{E}}_v$	Taxa de extensão uniaxial de fluência
σ_{ref}	Tensão de referência
σ	Tensão
σ_{true}	Tensão real
σ_y e σ_{ys}	Tensão de cedência

σ_{uts} ou σ_u	Tensão de rotura
J_{IC} e J_{ini}	Tenacidade à fratura elásto-plástica
K_{C} e K_{mat}	Tenacidade à fratura linear elástica
K_r	Tenacidade relativa
σ_m	Tensão de membrana
T_{SP}	Temperatura de transição do ensaio SP
τ	Tensão de corte
Δ_{GL}	Varição do GL
J_e e J	Valores do integral J para análises lineares elásticas e elásto-plásticas respetivamente

1 Introdução

Os equipamentos da indústria de processo estão frequentemente sujeitos a condições de serviço que introduzem fenómenos de degradação dependentes do tempo, pelo que a gestão da integridade, implica uma monitorização dessa degradação ao longo de todo o ciclo de vida daqueles equipamentos. Assim as modernas abordagens de gestão de ativos necessitam de técnicas de monitorização da degradação dos materiais por forma a otimizar as decisões relacionadas com a substituição ou extensão da vida dos equipamentos. Desse modo a monitorização da degradação deve utilizar de técnicas não destrutivas, que permitam determinar as propriedades relevantes dos materiais em serviço, sem comprometer a sua continuidade em serviço [1].

As técnicas de ensaio miniatura permitem determinar propriedades mecânicas como a tensão de cedência, tensão de rotura, tenacidade à fratura e propriedades de fluência a partir de pequenas amostras de materiais retiradas de equipamentos em serviço por métodos não destrutivos. Os ensaios miniatura podem ser considerados não destrutivos, quando as amostras extraídas são retiradas de componentes com dimensões suficientemente elevadas em relação às da amostra [2].

Os ensaios miniatura que têm vindo a ser desenvolvidos nas últimas três décadas 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* [3].

Atualmente formar uma opinião em relação ao estado operacional de um equipamento que se aproxima do final de vida, é algo que não é fácil, uma vez que não se dispõe de parâmetros que caracterizam o seu nível de degradação. Por vezes, por falta de informação procede-se à substituição prematura dos equipamentos devido ao risco que eles representam. No entanto, em determinadas situações e com o conhecimento do seu estado de degradação, estes ainda poderiam operar em segurança durante algum tempo. Assim neste sentido, pretende-se estudar o ensaio “*Small Punch*” (SP) a fim de conseguir obter mais informação sobre o estado operacional dos equipamentos e assim oferecer melhores condições no que diz respeito às decisões acerca do mesmo.

Este tipo de tecnologia tem aplicação prática em todos os equipamentos que possuam componentes mecânicos de elevadas dimensões, sujeitos a fenómenos de degradação dependentes do tempo, como elevadas variações de temperatura, ambientes corrosivos e elevados estados de tensão. A sua maior aplicação tem sido, essencialmente, na indústria petrolífera e nuclear.

O presente trabalho incidiu na realização de ensaios SP a fim de determinar propriedades mecânicas como a tensão de cedência, a tensão de rotura e a tenacidade à fratura do aço A 335 P11. Os provetes foram obtidos a partir de amostras de material retiradas de um reator de uma refinaria, que foi desmantelado no final de vida. O principal objetivo consistiu no desenvolvimento do procedimento de ensaio e respetivo dispositivo de ensaio.

Para além dos ensaios SP, foram realizados ensaios convencionais, como o ensaio de tração, ensaio de Integral J (proвете *Single Edge Notched Bend - SENB*) e ensaios de impacto *Charpy V*, a fim de servir de auxílio às simulações numéricas bem como para comparar com os resultados obtidos nos ensaios SP.

A tenacidade à fratura foi obtida com base em ensaios de Integral J. Para se proceder à definição dos provetes foram efetuadas simulações numéricas recorrendo ao método dos elementos finitos, a fim de procurar respostas no que diz respeito às dimensões e geometria do proвете e respetivo entalhe.

O presente trabalho encontra-se dividido em seis capítulos, incluindo a introdução que se situa no capítulo 1.

O capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica dos principais tipos de ensaios em provetes miniatura focando-se essencialmente no 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. Na parte sobre o ensaio SP está detalhada a sua evolução.

No capítulo 3 apresenta-se o desenvolvimento do dispositivo para os ensaios SP, bem como a definição das características dos provetes a ensaiar. Esta definição consistiu otimização das dimensões dos provetes e respetivos entalhes, recorrendo a simulação numérica por elementos finitos.

No capítulo 4, são apresentadas as simulações numéricas efetuadas a fim de analisar o comportamento do provete durante o ensaio. Também foi determinada a energia absorvida por unidade de área (integral J) para as diferentes geometrias de entalhe.

No capítulo 5, são apresentados todos os procedimentos efetuados para a preparação e realização dos ensaios SP. Também são apresentados, de forma resumida os ensaios convencionais realizados e os respectivos resultados. Por fim são apresentados os resultados obtidos nos ensaios SP e discussão dos mesmos.

O capítulo 6 contém as conclusões do presente trabalho.

Motivação

Atualmente existe uma grande necessidade de otimização de custos, sendo o prolongamento da vida dos equipamentos em serviço bastante vantajoso para a indústria, principalmente quando se trata de equipamentos de grande investimento. A caracterização dos equipamentos em serviço, por métodos não destrutivos, permite obter uma maior segurança na tomada de decisão relativa à sua continuação em operação, necessidade de substituição e otimização do tempo para a substituição dos equipamentos sujeitos a fenómenos de degradação dependentes do tempo. O conhecimento do estado efetivo dos equipamentos ou componentes também permitirá usufruir dos mesmos até ao final de vida em condições de segurança.

Sendo que a remoção das amostras para a utilização da técnica de ensaio SP não compromete, na maior parte dos casos, o futuro desempenho dos componentes ou equipamentos poder-se-á então dizer que é uma técnica não destrutiva.

A minha motivação pessoal passa por tudo o que foi anteriormente referido, mas também, porque é uma técnica que se encontra em desenvolvimento e ainda é pouco conhecida em Portugal.

2 Revisão Bibliográfica

Na revisão bibliográfica pretende-se dar a conhecer ao leitor, o estado atual da tecnologia dos ensaios a provetes miniatura “Small Punch”. Para isso abordou-se as seguintes questões:

- ✓ Para que servem os ensaios a provetes miniatura?
- ✓ Que tipo de ensaios a provetes miniatura existem?
- ✓ Qual o seu mecanismo de ensaio?
- ✓ Como são os respetivos dispositivos de ensaio?
- ✓ Que informação se retira dos ensaios?
- ✓ Que relações (equações) existem para determinar as propriedades mecânicas?
- ✓ Já existe alguma normalização para este tipo de ensaio?
- ✓ Como e com que processos são extraídas as amostras de materiais dos equipamentos?

Os ensaios a provetes miniatura servem para obter informação relativa à resistência mecânica dos aços e outros materiais metálicos, como por exemplo compósitos de matriz metálica, presentes nos equipamentos em serviço, sujeitos a fenómenos de degradação ao longo do tempo e, com isso, determinar a vida residual dos mesmos com base nos resultados obtidos. Estes ensaios permitem determinar propriedades como a tensão de cedência, tensão de rotura, tenacidade à fratura e propriedades de fluência a partir de pequenas amostras de materiais retiradas de equipamentos em serviço por métodos não destrutivos. Estes ensaios podem ser considerados não destrutivos, quando as amostras extraídas são retiradas de componentes com dimensões suficientemente superiores às da amostra, não tendo assim efeitos significativos na resistência dos mesmos, o que garante a continuidade dos equipamentos em serviço [2].

2.1 Tipos de ensaio de provetes miniatura

Os provetes dos ensaios apresentados no presente trabalho, podem ser obtidos a partir de uma amostra de material do tipo “concha” ou similar (Figura 2. 1).

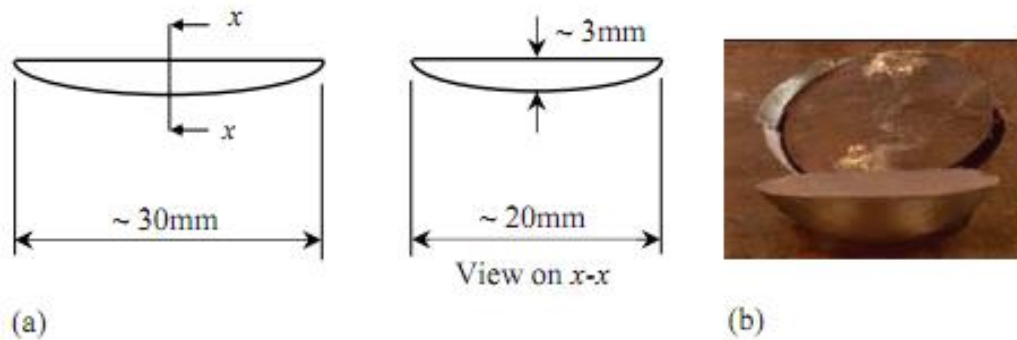


Figura 2. 1 - Amostra tipo concha. (a) Dimensões. (b) Foto do provete [3].

Dependentemente do tipo de ensaio, sendo os provetes de diferentes geometrias e dimensões, cada amostra permitirá consoante o tipo de ensaio extrair um ou mais provetes.

O aspeto mais importante para a criação de um provete miniatura é o tamanho do comprimento de referência equivalente (EGL)¹, sendo que este tem de ser suficientemente elevado em relação às características metalúrgicas do material (ex: o tamanho do grão) para que as propriedades obtidas sejam representativas do material e não somente as propriedades do provete em questão. O tamanho do EGL traduz a sensibilidade de medição do ensaio [4].

2.1.1 Ensaio *Impression Creep* (EIC)

❖ Introdução à técnica de ensaio

A técnica de EIC foi publicada pela primeira vez por *Chu et al* em 1977, nos Estados Unidos da América (EUA) [5]. Esta técnica surgiu 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 a tensão constante e a temperaturas elevadas.

¹ EGL- é semelhante ao comprimento inicial de referência do material que é marcado nos provetes convencionais de tração para posteriormente ser feita a medição da variação do comprimento, ou seja contabilizar a extensão que o provete sofreu.

❖ Princípio de funcionamento do ensaio e respectivo equipamento

A técnica EIC consiste na aplicação de uma carga constante através de um punção de ponta plana sobre um provete de superfície plana a temperaturas elevadas Figura 2. 2 [6].

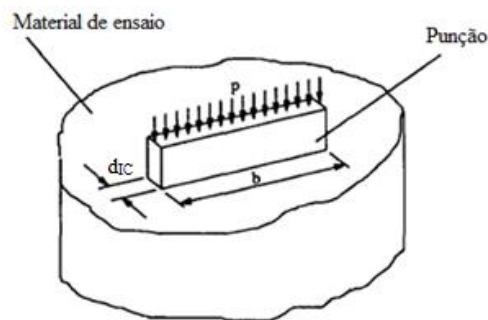


Figura 2. 2 – Princípio do EIC. Adaptado de [6].

A relação que existe neste tipo de ensaio para a determinação da propriedade de fluência consiste no deslocamento do punção (profundidade de penetração) em função do tempo de ensaio em condições de temperaturas elevadas e a pressão constante. A “profundidade de penetração” do EIC deve ser muito pequena de forma a ficar apenas uma impressão superficial Figura 2. 3, daí o nome de *Impression Creep* [5].

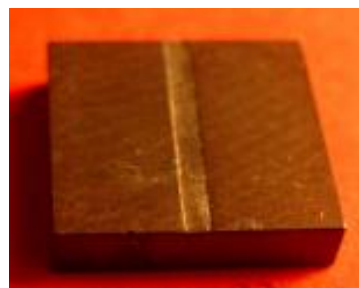


Figura 2. 3 - Provete IC ensaiado [7].

Na Figura 2. 4, estão apresentadas duas geometrias de provetes que podem ser utilizados nos EIC. Ambos os provetes têm a mesma capacidade de produzir dados de fluência, uma vez já que foi demonstrado a coerência entre os resultados de ambas as geometrias [8].

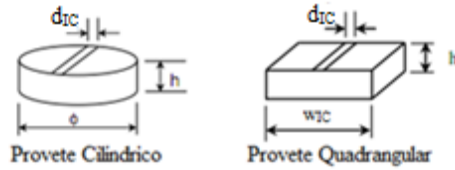


Figura 2. 4 - Tipos de geometria dos provetes EIC. Adaptado de [7].

As dimensões *standard* para estes provetes foram estudadas por diversos autores. Desses trabalhos resultaram as seguintes dimensões recomendadas: w_{IC} ou $\phi=10\text{mm}$ e $h=2.5\text{mm}$ para um punção com $d_{IC}=1\text{mm}$, sendo que quando a amostra de material a analisar é insuficiente para a obtenção de provetes com estas dimensões, então podem ser utilizados provetes com, w_{IC} ou $\phi=8\text{mm}$ e $h=2\text{mm}$ para um punção com $d_{IC}=0.8\text{mm}$ [9].

Tal como os provetes os punções também podem ser de geometria circular ou então retangular como demonstra a Figura 2. 5.

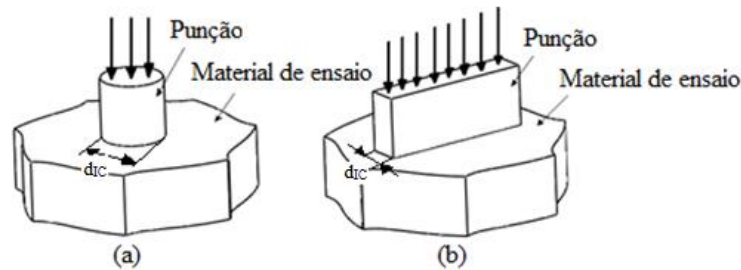


Figura 2. 5 - (a) Punção circular. (b) Punção retangular.

Quando a técnica EIC surgiu, a geometria do punção utilizada foi a circular [9], contudo nos últimos 10 anos a geometria mais utilizada tem sido a retangular, pelo facto de dispor de maior área de deformação o que assegura de melhor forma que o EGL é suficientemente elevado em relação às características metalúrgicas do material [9]. O valor do EGL para as dimensões do provete recomendado é dado pela (Eq. 1) [4]:

$$\text{EGL} = 2. d \quad (\text{Eq. 1})$$

Na Figura 2. 6, está apresentado um equipamento de ensaio IC que é composto pelos seguintes sistemas:

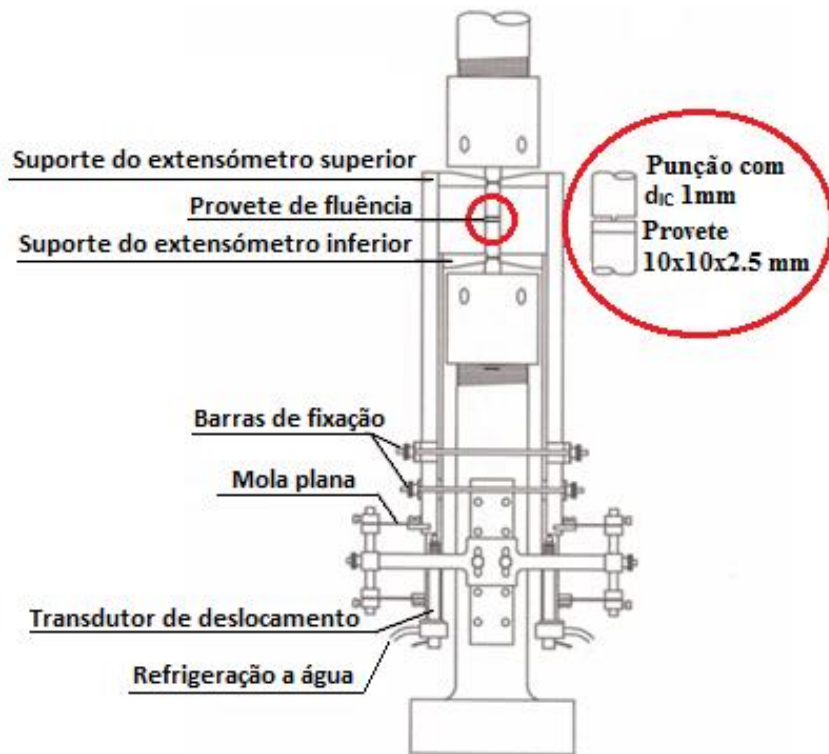


Figura 2. 6 -Dispositivo de EIC. Adaptado de [3].

- Sistema de carregamento.
- Sistema de recolha de dados.
- Sistema de aquecimento e controlo da temperatura ao longo do ensaio.
- Sistema de medição da deformação.
- Sistema que permite proteger o provete da atmosfera com a aplicação de um gás inerte se for necessário.

❖ Dados obtidos dos ensaios

A Figura 2. 7, apresenta algumas curvas obtidas a partir do EIC onde se relaciona a profundidade de penetração com o tempo de ensaio a carga constante.

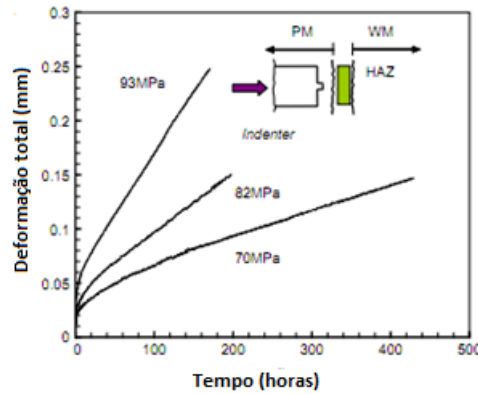


Figura 2. 7 - Curvas típicas do EIC [9].

❖ Conversão dos dados dos EIC para as respectivas propriedades

Após obtidas as curvas acima referidas é necessário fazer a sua conversão para obter as taxas mínimas de fluência. A conversão é feita aplicando o método da tensão de referência (σ_{ref}) que correspondente à tensão uniaxial nos testes convencionais de tração, sendo determinada a partir da pressão média (\dot{P}) exercida sob o punção a multiplicar pelo fator (η) que corresponde ao parâmetro de conversão da tensão [8].

$$\sigma_{ref} = \eta \dot{P} \quad (\text{Eq. 2})$$

Assim, para converter o deslocamento de fluência do EIC (Δ^c), para a correspondente extensão uniaxial de fluência (ϵ^c), divide-se o deslocamento de fluência IC pelo diâmetro (d_{IC}) do punção a multiplicar pelo parâmetro de conversão da extensão (β). No caso de um punção retangular (d_{IC}) corresponderá à sua largura Figura 2. 5.

$$\epsilon^c = \frac{\Delta^c}{\beta d_{IC}} \quad (\text{Eq. 3})$$

Os parâmetros de conversão (β) e (η), podem ser determinados pelo método de elementos finitos assumindo que o material tem um comportamento à fluência de acordo com a lei de Norton [6]. Os valores de (β) e (η) recomendados para os provetes de dimensões w_{IC} ou $\phi=10\text{mm}$ e $h=2.5\text{mm}$ são 2.18 e 0.430 respectivamente [4].

2.1.2 Ensaio *Small Ring* (ESR)

❖ Introdução à técnica de ensaio

A técnica de ESR é das mais recentes técnicas de ensaio miniatura, tendo sido patenteada por *Hyde et al* a 17 de Novembro de 2011 nos Estados Unidos da América. Esta técnica tem potencial para determinar grande parte das propriedades mecânicas dos materiais, mas neste momento a que se encontra mais explorada é a propriedade de fluência [4].

❖ Princípio de funcionamento do ensaio e respetivo equipamento

Como demonstra a Figura 2. 8 (a), 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 [4].

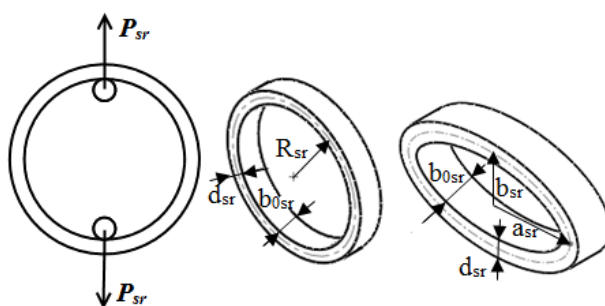


Figura 2. 8 - (a) Princípio de funcionamento do ESR. (b) Provette circular. (c) Provette elíptico. Adaptado de [10].

Neste ensaio pode-se utilizar duas geometrias de provete diferentes: a circular Figura 2. 8 (b) ou então a elíptica Figura 2. 8 (c). Este tipo de provetes permite, por ser mais flexível, que pequenas extensões possam ser relacionadas com grandes deformações. É

particularmente adequado para ensaios de fluência executados a tensões uniaxiais relativamente baixas [10].

As dimensões aconselhadas por *Hyde et al* para estes provetes estão apresentadas na Tabela 2. 1 [4]:

Tabela 2. 1 - Dimensões dos provetes do ESR.

Provete Circular	Provete Elíptico
$R_{sr}=6 \text{ mm}$	$0.5 < (a_{sr}/b_{sr}) < 2$
$b_{0sr}=2 \text{ mm}$	$a_{sr}=5-10 \text{ mm}$
$d_{sr}=1 \text{ mm}$	$b_{0sr}=2 \text{ mm}$
	$d_{sr}=1 \text{ mm}$

Para as dimensões acima apresentadas a sensibilidade deste ensaio é muito semelhante à do ensaio de fluência uniaxial convencional, uma vez que a sua área de deformação é bastante elevada. A deformação dá-se sob condições de tensão plana praticamente em todo o provete SR exceto nas zonas de contacto com as superfícies de carga. O comprimento de referência equivalente (EGL) difere com a geometria do provete, assim sendo a (Eq. 4) dá-nos o EGL_C do provete circular e a (Eq. 5) dá-nos o EGL_E do provete elíptico [4].

$$EGL_C = \frac{4R_{sr}^2\beta}{d_{sr}} \quad (\text{Eq. 4})$$

$$EGL_E = \frac{4a_{sr}b_{sr}\beta}{d_{sr}} \quad (\text{Eq. 5})$$

onde, β é um parâmetro de conversão da deformação.

Na Figura 2. 9, está representado todo o equipamento necessário para proceder a um ESR. O equipamento responsável pelo carregamento pode ser uma máquina típica dos ensaios de tração convencionais [4].

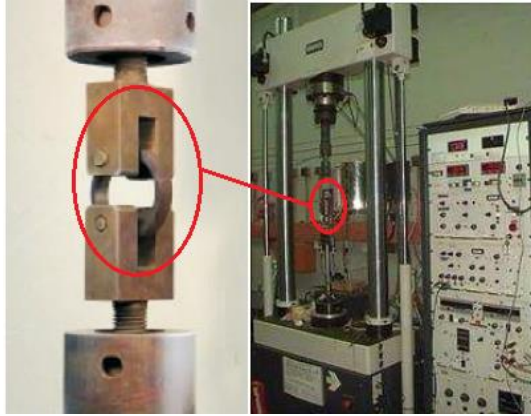


Figura 2. 9 - Dispositivo de ESR. Adaptado [11].

Na máquina de ensaio deve ser montado um dispositivo de fixação/carregamento para o provete de ESR, como o da Figura 2. 9 aplicado no caso de uma carga de tração. Este equipamento deve ainda estar equipado com um sistema aquecimento controlado para que se consiga proceder aos ensaios a altas temperaturas e também um sistema de recolha de dados [4].

❖ **Dados obtidos dos ensaios**

Na Figura 2. 10 estão apresentadas as curvas típicas de um ensaio de fluência SR para os dois tipos de provete, onde temos a deformação em função do tempo de ensaio [10].

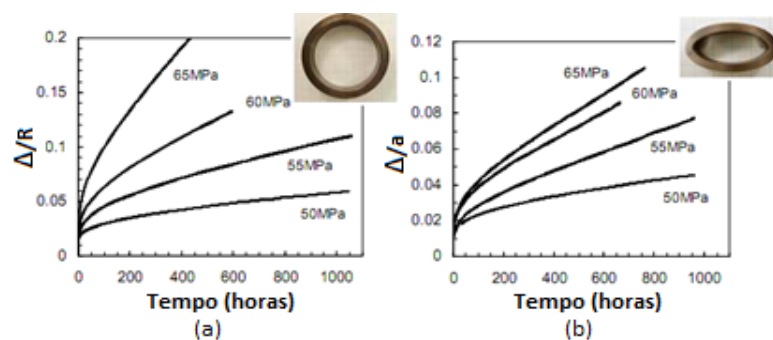


Figura 2. 10 -(a) Curvas do ESR do aço P91 a 650°C provete circular. (b) Curvas do ESR do aço P91 a 650°C provete Elíptico. Adaptado de [11].

❖ **Conversão dos dados do ESR para as respectivas propriedades**

Os dados obtidos num ESR, isto é, a taxa de deformação $\dot{\Delta}_v$ pode ser convertida em taxa de extensão ($\dot{\epsilon}^c$) correspondente ao ensaio convencional uniaxial de fluência aplicando o método da tensão de referência, (Eq. 7) ou (Eq. 9) [3].

➤ **Provete elíptico.**

$$\dot{\epsilon}^c(\sigma_{ref}) = \frac{\dot{\Delta}_v}{(4a_{sr}b_{sr}\beta)/d_{sr}} \quad (\text{Eq. 6})$$

$$\sigma_{ref} = \frac{P_{sr}a_{sr}}{b_{0sr}d_{sr}^2} \times \eta \quad (\text{Eq. 7})$$

➤ **Provete circular.**

$$\dot{\epsilon}^c(\sigma_{ref}) = \frac{\dot{\Delta}_v}{(4R_{sr}^2\beta)/d_{sr}} \quad (\text{Eq. 8})$$

$$\sigma_{ref} = \frac{P_{sr}R_{sr}}{b_{0sr}d_{sr}^2} \times \eta \quad (\text{Eq. 9})$$

onde, P_{sr} é a carga de ensaio, σ_{ref} é a tensão de referência que corresponde à tensão normal num ensaio convencional de tração uniaxial de fluência e β e η são parâmetros de conversão que podem ser obtidos a partir das curvas da Figura 2. 11 [3].

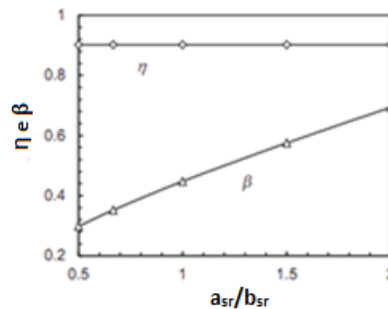


Figura 2. 11 - Variação dos fatores de conversão com a relação (a_{sr}/b_{sr}). Adaptado de [10].

Os parâmetros de conversão η e β foram determinados a partir do método da tensão de referência para uma determinada gama de relações (a_{sr}/b_{sr}), a fim de estudar a sua variação [10].

2.1.3 Ensaio *Conventional Sub-Size Uniaxial* (ECSSU)

❖ Introdução à técnica de ensaio

A técnica de ECSSU foi normalizada pela *American Society for Testing and Materials* (ASTM) em 1924, onde posteriormente tem vindo a sofrer atualizações. Nas normas ASTM E8/E8M-09 [12] e ASTM A 370-03 [13], encontram-se apresentados vários tamanhos de provetes do ECSSU, onde alguns deles podem ser utilizados na avaliação de equipamentos em serviço.

Apesar de existirem provetes de ECSSU normalizados, vários investigadores ainda estudam a hipótese de reduzir o tamanho do provete, a fim de reduzir a degradação imposta ao equipamento com extração da amostra de material. Na Figura 2. 12, está um exemplo das dimensões de um provete CSSU não *standard* que se pretende utilizar na avaliação dos equipamentos em serviço [14].



Figura 2. 12 - Comparação do tamanho do provete de ECSSU com uma caneta [14].

❖ Princípio de funcionamento do ensaio e respetivo equipamento

O ensaio *conventional sub-size uniaxial* como o próprio nome indica é em tudo semelhante ao ensaio de tração convencional, exceto na dimensão do provete. Como se pode ver na Figura 2. 13, o provete é carregado uniaxialmente nas extremidades até atingir a rotura.

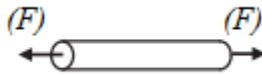


Figura 2. 13 -Provete de tração uniaxial [3].

Na Figura 2. 14 estão apresentados alguns provetes não standards do tipo “osso de cão” que têm sido estudados por diversos autores para estimar as propriedades mecânicas dos materiais.

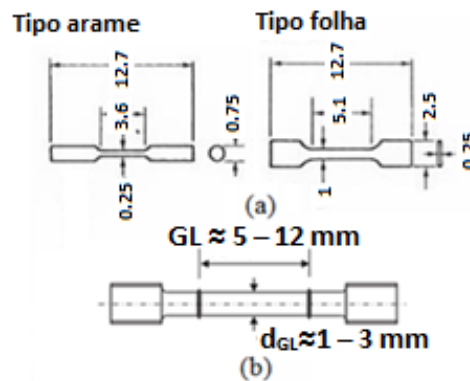


Figura 2. 14 -(a) Provetes de tração não standards (dimensões em mm) [15]. (b) Provete de tração não standard [3].

Em 1986 *N. F. Panayotou et al* utilizou os dois provetes da Figura 2. 14 (a), para estudar os materiais que estavam sujeitos a condições de irradiação, onde determinou a tensão de cedência, tensão de ruptura e o alongamento, na qual o provete do tipo chapa mostrou uma boa concordância com os provetes convencionais à temperatura de 25°C [15].

Hyde et al utilizou o provete da Figura 2. 14 (b) para determinar as propriedades de fluência, onde o provete mostra a possibilidade de caracterizar o comportamento à fluência dos materiais [3].

Segundo *Hyde et al*, a sensibilidade da medição da deformação no provete de ECSSU, é dado pelo comprimento de referência GL Figura 2. 14 (b) e se $GL < 10$, a sensibilidade da medição da extensão pode reduzir significativamente quando comparada com a dos provetes convencionais [10].

❖ Dados obtidos dos ensaios

Os dados extraídos dos ECSSU, são designados por parâmetros de engenharia que posteriormente são convertidos para as verdadeiras propriedades [3]. Estes parâmetros são exatamente os mesmos que aparecem nas curvas retiradas dos ensaios convencionais de tração, como a curva da tensão (σ) em função da extensão (\mathcal{E}) e a curva de extensão (\mathcal{E}) em função do tempo de ensaio, mas vêm em menor escala daí a necessidade da conversão.

❖ Conversão dos dados dos ECSSU para as respectivas propriedades

Segundo *Hyde et al*, são feitas as seguintes relações [3]:

A variação do GL (Δ_{GL}) é convertida em extensão através da (Eq. 10) :

$$\mathcal{E} = \frac{\Delta_{GL}}{GL} \quad (\text{Eq. 10})$$

A tensão está relacionada com a força aplicada (F_{cssu}) e a área da secção transversal do GL inicial, que é dada pela (Eq. 11):

$$\sigma = \frac{4F_{cssu}}{\pi d_{cssu}^2} \quad (\text{Eq. 11})$$

Se necessário, os parâmetros de engenharia apresentados em cima podem ser convertidas para tensão real (σ_{true}) e extensão real (\mathcal{E}_{true}), através da (Eq. 12) e da (Eq. 13) respetivamente [3].

$$\sigma_{true} = \sigma(1 + \mathcal{E}) \quad (\text{Eq. 12})$$

$$\mathcal{E}_{true} = \ln(1 + \mathcal{E}) \quad (\text{Eq. 13})$$

2.1.4 Ensaio *Small Punch* (ESP)

❖ **Introdução à técnica de ensaio**

A descrição da técnica de ESP foi publicada pela primeira vez em 1981 nos EUA com o artigo elaborado por *Manahan et al* [16], que em 1986 foi registada como sua patente [17]. *Manahan et al* sugeriu esta técnica com o intuito de ser uma alternativa aos métodos convencionais de caracterização mecânica, o que reduziria significativamente o volume de material necessário para a caracterização. O seu objetivo centrava-se na obtenção das propriedades mecânicas dos materiais presentes em componentes de equipamentos de centrais termonucleares, a fim de avaliar o seu estado de degradação quando estes operam sob condições de radiação [16]. A técnica também foi desenvolvida quase paralelamente no Japão. Pode-se dizer que o maior impulso ao seu desenvolvimento surgiu em 2006 no **Workshop** da Comissão Europeia de Normalização (CEN) com a elaboração do documento CWA 15627:2006 D/F/E [18], onde estão apresentadas algumas diretrizes para a realização dos ESP. Este documento, conhecido como um código 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 [19].

Nas últimas três décadas vários investigadores usaram esta técnica de ensaio a fim de estimar diversas propriedades mecânicas, como a tensão de rotura [20], a tensão de cedência [20], o módulo de elasticidade [21], as propriedades de fluência [3], [22], a temperatura de transição dúctil-frágil [23] e a tenacidade à fratura [24], [25], [26].

❖ **Princípio de funcionamento do ensaio e respetivo equipamento**

Na Figura 2. 15, encontra-se representado um esquema do dispositivo de ESP, onde o provete é colocado num orifício de alojamento que se encontra na matriz inferior, de seguida é apertado através da matriz superior e por fim carregado na zona central por ação de uma esfera que o irá deformar até à rotura [18].

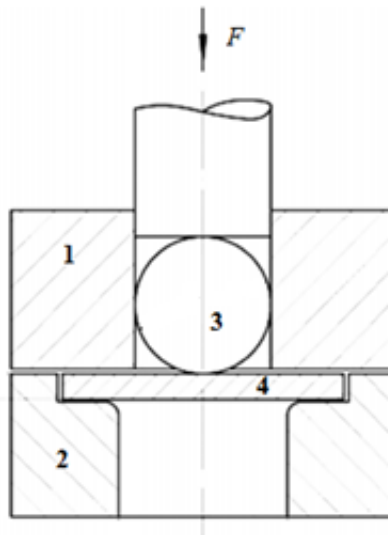


Figura 2. 15 -Esquema do dispositivo de ESP. Adaptado de [27].

Legenda:

- 1- Matriz superior de aperto
- 2- Matriz inferior de recepção
- 3- Esfera de carregamento (punção)
- 4- Provete

Pode-se dizer que existem dois tipos de ESP [18]:

- **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.

Na Figura 2. 16 estão representadas as duas geometrias de provete que podem ser utilizadas neste tipo de ensaio: a geometria quadrangular Figura 2. 16 (a) e a geometria circular, que é a mais comum Figura 2. 16 (b).

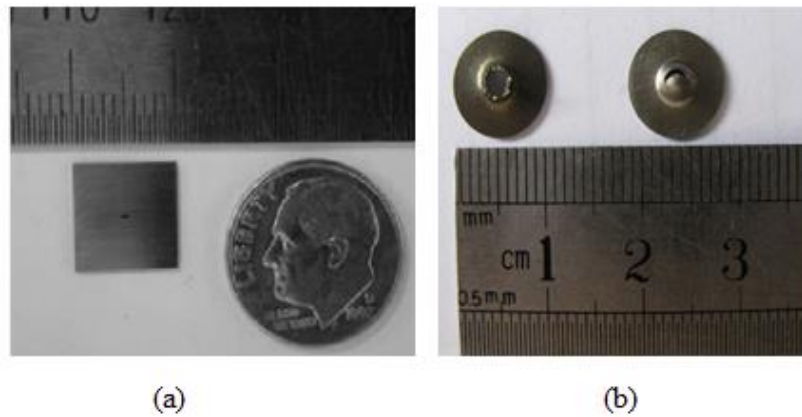


Figura 2. 16 - Provetes de ESP. (a) Geometria quadrangular [26]. (b) Geometria circular [28].

Qualquer uma destas duas geometrias pode ser utilizada nos ESP sem ter qualquer influência nos resultados. O que difere na escolha da geometria é apenas a área de contacto com as matrizes de aperto, uma vez que quando se trata do ensaio SPBT o provete de geometria quadrangular disponibiliza maior área de contacto com as matrizes o que facilita assim o seu encastramento [18]. Quanto às dimensões dos provetes, o código de boas práticas da CEN recomenda que para o provete de geometria circular o diâmetro deve ser de 8mm e a espessura de 0,5 mm. Em relação às dimensões do provete de geometria quadrangular nada é referido no código mas o que tem vindo a ser utilizado por diversos autores, como *Jang-Bog J. et al* [26], é 10 mm de lado e 0,5 mm de espessura.

A sensibilidade de medição da extensão num ESP pode ser determinada pela (Eq. 14), que representa o primeiro termo (termo dominante) da (Eq. 15), a qual relaciona o deslocamento central do provete com a extensão equivalente do mesmo na zona de contacto com o punção [3]:

$$\varepsilon_{eq} \approx \frac{\Delta}{6} \quad (\text{Eq. 14})$$

$$\varepsilon_{eq} = 0.17959\Delta + 0.09357\Delta^2 + 0.0044\Delta^3 \quad (\text{Eq. 15})$$

Assim o EGL, isto é, o comprimento inicial de referência para determinar a deformação equivalente a partir do deslocamento (Δ) é de cerca de 6mm [3].

Sendo estes provetes de dimensões muito pequenas o equipamento necessário para a realização dos ensaios é todo ele mais exigente. Assim, *T. Ishii^a et al* desenvolveu um equipamento específico para os ESP Figura 2. 17, que permite realizar ensaios em diferentes condições a fim de obter diversas propriedades mecânicas. Todo o equipamento foi projetado de forma a permitir o máximo controlo possível durante o ensaio (ex: atmosfera, temperatura, etc), podendo assim obter resultados mais precisos em diferentes condições [29].

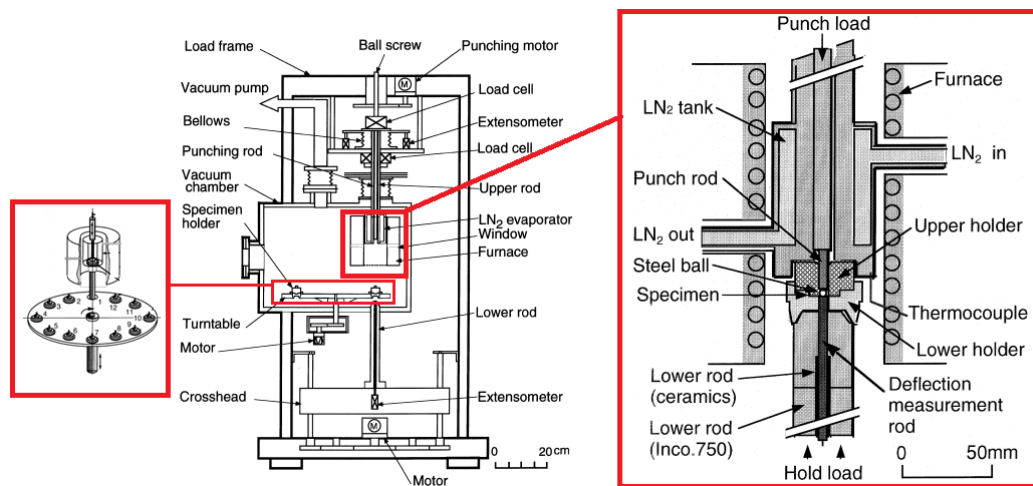


Figura 2. 17 - Equipamento de ESP. Adaptado de [29].

Os provetes são previamente instalados num prato giratório que tem capacidade para doze provetes. Os provetes que estão no prato, bem como o que está a ser ensaiado, encontram-se posicionados numa câmara de vácuo para garantir que fiquem protegidos das reações provocadas pelo meio ambiente (ex: oxidação). O equipamento contém também sistemas de alteração e controlo da temperatura, sendo eles um sistema de aquecimento “forno” e um sistema de refrigeração “câmara de azoto líquido”, permitindo assim executar ensaios a baixas e a altas temperaturas [29].

❖ **Dados obtidos nos ensaios**

Como já referido anteriormente este tipo de ensaio permite determinar diversas propriedades mecânicas, que na sua maioria está relacionada com a curva carga-deslocamento do punção Figura 2. 18 (a) ou a curva carga-deflexão do provete [20], [24].

Apenas as propriedades de fluência estão relacionadas com a curva deslocamento-tempo de ensaio Figura 2. 18 (b) [22].

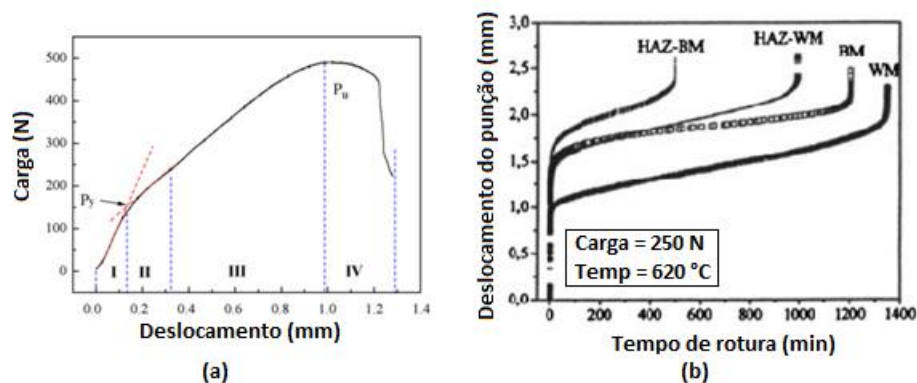


Figura 2. 18 - Curvas típicas dos ESP. (a) Curva carga-deslocamento [27]. (b) Curva deslocamento-tempo de ensaio [22].

BaiK et al em 1986 [30] identificou na curva carga-deslocamento quatro fases de deformação como indicado na Figura 2. 18 (a). Segundo o autor a primeira fase (I) corresponde à flexão elástica durante a qual todo o provete sofre deformação elástica. Na segunda fase (II) dá-se a deformação plástica, onde o volume de plasticidade que surge no centro do provete, na zona de contacto com o punção, aumenta progressivamente na direção da espessura e na direção radial. A terceira fase (III) corresponde ao alongamento de membrana, na qual a deformação não está associada às tensões provocadas pela flexão do provete mas sim devido a uma tensão membrana. Por fim, a quarta fase (IV), corresponde ao colapso final do provete, que surge com a rotura da secção resistente [27].

❖ Conversão dos dados dos ESP para as respetivas propriedades

➤ Propriedades de Tração

Em 1987 *Mao et al* estudaram provetes do tipo SP a fim de obter uma relação direta entre os dados do ensaio e a tensão de cedência (σ_y), tensão de rotura (σ_{uts}) e tenacidade à fratura (J_{IC}) para materiais isotrópicos com comportamento dúctil. O estudo foi feito utilizando quatro materiais diferentes, na qual *Mao et al* relacionaram a mudança do declive da curva entre a primeira fase e a segunda como sendo a carga (P_y) correspondente à iniciação da deformação plástica Figura 2. 18 (a). Através de um processo empírico

chegou a uma relação linear Figura 2. 19, entre a tensão de cedência dos materiais e a carga sobre a espessura inicial ao quadrado (P_y/t_0^2), na qual resultou uma equação (Eq. 16) que permite estimar a tensão de cedência em materiais dúcteis [20].

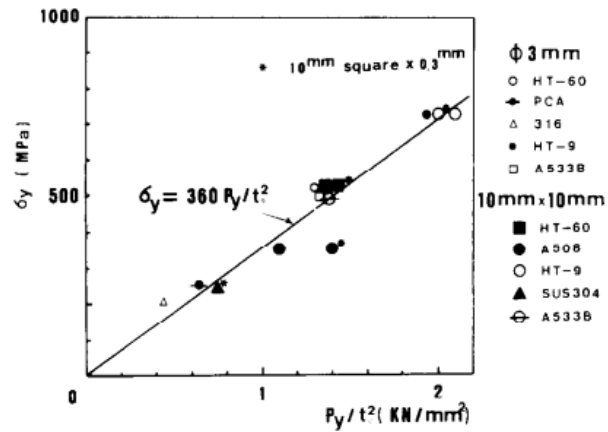


Figura 2. 19 - Relação da tensão de cedência com a carga P_y [20].

$$\sigma_y = 360 \left(\frac{P_y}{t_0^2} \right) \quad (\text{Eq. 16})$$

Mao et al também relacionou a carga máxima de ensaio (P_u) com a tensão de rotura (σ_{uts}), onde aplicou o mesmo procedimento referido anteriormente Figura 2. 20, na qual resultou uma (Eq. 12) que permite estimar a tensão de rotura [20].

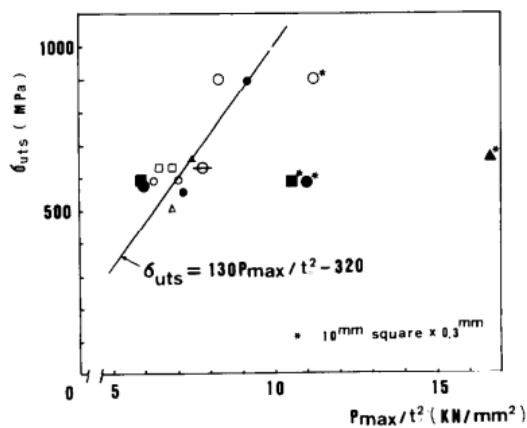


Figura 2. 20 - Relação da tensão de rotura e a carga máxima ($P_{\text{máx}}$) [20].

$$\sigma_{uts} = 130 \left(\frac{P_{max}}{t_0^2} \right) - 320 \quad (\text{Eq. 17})$$

Devido à dificuldade de se obter a carga P_y , *Brookefield et al* em 1999 desenvolveram uma nova equação que relaciona a tensão de cedência (σ_y) com a carga máxima (P_{max}). Esta foi desenvolvida a partir de uma análise de elementos finitos na qual se considerou que o material apresentava um comportamento perfeitamente elásto-plástico, onde a deformação plástica ocorre sob condições de tensão constante, fazendo com que a força de cedência e força de rotura sejam equivalentes [31].

$$\sigma_y = 130 \left(\frac{P_{max}}{2.53 \times 10^{-6}} \right) + 49.2 \quad (\text{Eq. 18})$$

Segundo *C. Rodriguez et al*, em 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 2. 18 (a), em que o E pode ser estimado usando a seguinte relação (Eq. 19):

$$E \approx \frac{\left(\frac{P}{d} \right)_{ini}}{t_0} \quad (\text{Eq. 19})$$

onde, $(P/d)_{ini}$ é o declive da curva carga-deslocamento na primeira fase de deformação e o t_0 é a espessura inicial do provete [21].

➤ Tenacidade à Fratura

A tenacidade à fratura é um parâmetro importante na avaliação da suscetibilidade à rotura frágil de materiais ou componentes mecânicos, daí ter surgido um elevado interesse nos últimos anos em determinar a tenacidade à fratura a partir de ESP. A grande dificuldade na determinação deste parâmetro a partir de ESP está no facto dos provetes não cumprirem com a geometria e as dimensões dos provetes normalizados dos ensaios

convencionais [24]. Nesse sentido diversos investigadores têm-se debruçado sobre o ESP, onde têm demonstrado através de relações empíricas a possibilidade de se obterem as propriedades de fratura neste tipo de ensaio [20], [24] a [26].

Mao et al, em 1987 começou a dar os primeiros passos na determinação da tenacidade à fratura (J_{IC}) em materiais com comportamento dúctil, onde a relacionou com a extensão de fratura equivalente biaxial ($\bar{\epsilon}_{qf}$) (Eq. 20) [20].

$$J_{IC} = K_0 \times \bar{\epsilon}_{qf} - J_0 \quad (\text{Eq. 20})$$

A correlação apresentada surgiu de uma relação aproximadamente linear que se verificou experimentalmente quando se relacionou a tenacidade à fratura (J_{IC}) com a extensão equivalente biaxial ($\bar{\epsilon}_{qf}$), o que pode ser visto na Figura 2. 21, que a partir de 0,2% de extensão o declive é linear. Os parâmetros K_0 e J_0 , são duas constantes determinadas empiricamente que estão relacionadas com o material a ensaiar [20].

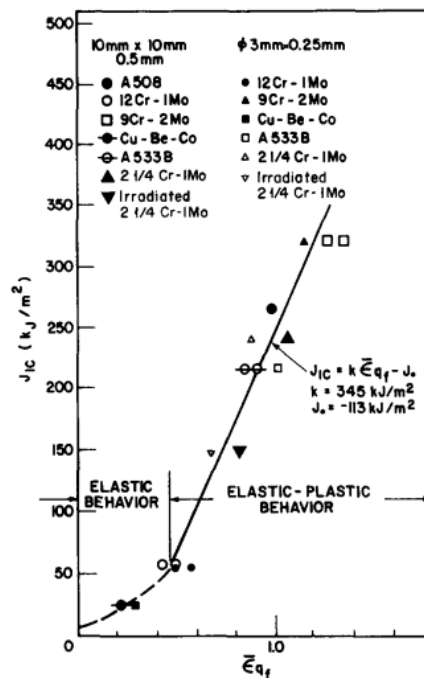


Figura 2. 21 - Relação entre a tenacidade à fratura com a taxa de deformação de fratura equivalente [32].

Esta relação surgiu com base nas curvas experimentais onde se verifica que a diminuição da carga é devida a duas causas. A primeira consiste na diminuição da

espessura na zona de contacto com o punção, que corresponde a uma diminuição localizada da secção transversal reta, onde o provete perde a sua capacidade de carga de forma gradual. A segunda é a fratura final que surge devido à diminuição da espessura e com a propagação das fissuras circunferenciais Figura 2. 22 (a).

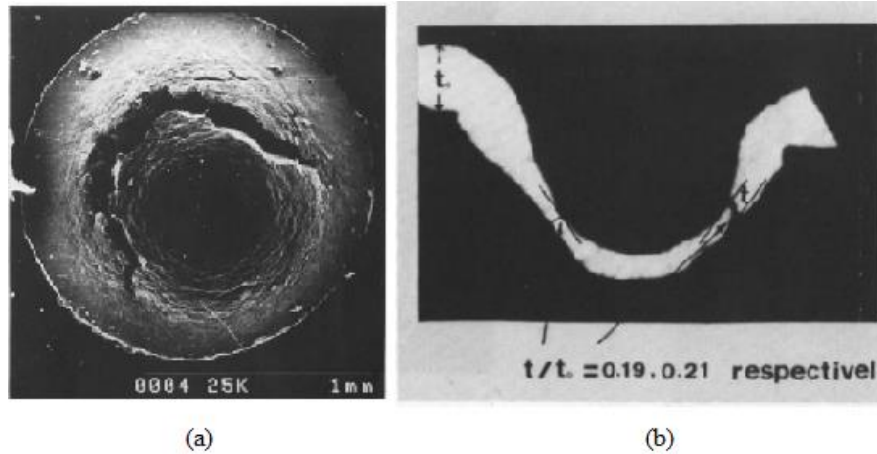


Figura 2. 22 - (a) Propagação de fissuras circunferenciais. (b) Diminuição da espessura. Adaptado de [20].

A Figura 2. 22 (b), indica que a extensão equivalente de fratura é maior no local da estricção, o que resulta na iniciação de fendas circunferenciais na superfície inferior do provete e se propagam (Figura 2. 22 (a)). Quando as fissuras se propagam, a carga aplicada pelo punção decresce rapidamente. Assim a falha final do provete SP é controlada pela extensão de fratura equivalente sob o estado de tensão biaxial. A análise de deformação plástica é feita por um método semi-analítico, na qual a extensão equivalente de fratura pode ser obtida pela equação (Eq. 21), onde t_0 é a espessura inicial do provete e t a espessura final que pode ser medida através de uma análise microscópica Figura 2. 22 (b) [20].

$$\varepsilon_{qf} = \ln \frac{t}{t_0} \quad (\text{Eq. 21})$$

A extensão equivalente de fratura teve como base a teoria da membrana proposta por *Chakrabarth*, onde a extensão radial (ε_r) e a extensão circunferencial (ε_θ) são iguais, logo a extensão da espessura (ε_t) pode ser dada pela seguinte equação (Eq. 22) [20]:

$$\varepsilon_t = \ln \frac{t}{t_0} \quad (\text{Eq. 22})$$

Considerando-se a deformação plástica incompressível, então expressa-se da seguinte forma (Eq. 23) :

$$\varepsilon_t + \varepsilon_\theta + \varepsilon_r = 0 \quad (\text{Eq. 23})$$

Então a extensão equivalente é dada pela equação (Eq. 24):

$$\overline{\varepsilon}_{qf} = (\sqrt{2/3})(\varepsilon_t^2 + \varepsilon_\theta^2 + \varepsilon_r^2)^{1/2} \quad (\text{Eq. 24})$$

Substituindo a (Eq. 22) e (Eq. 23) na (Eq. 24), a extensão equivalente de fratura é expressa pela (Eq. 25):

$$\overline{\varepsilon}_{qf} = \ln \frac{t}{t_0} \quad (\text{Eq. 25})$$

Mao et al concluiu assim, que J_{IC} pode ser linearmente relacionado com a extensão equivalente biaxial de fratura obtida no ESP [20].

Em 2003 *Jang-Bog Ju^a et al*, aplicou o conceito do fator de intensidade de tensões (K) nos provetes SP, porque segundo a análise de *SIH et al* é aplicado a placas finas sujeitas a flexão fora do plano. Num ESP convencional (provetes não entalhados), assume-se que a fratura ocorre quando se atinge a carga máxima que é correlacionada com a tenacidade à fratura. No entanto, as observações experimentais têm demonstrado que a fenda se inicia antes da carga máxima e se propaga até à fratura final. No estudo realizado por *Jang-Bog Ju^a et al*, foi introduzido um entalhe passante no provete SP (Figura 2. 23), a fim de ultrapassar este problema e chegar a um valor de tenacidade à fratura válido com base na mecânica da fratura. O fator de intensidade de tensões do entalhe foi obtido através da análise do campo de tensões elásticas junto da ponta do mesmo. O entalhe, introduzido no centro do provete foi maquinado por eletroerosão com 1mm de comprimento, 0.5mm de largura e um raio de ponta de 20 μm [26].

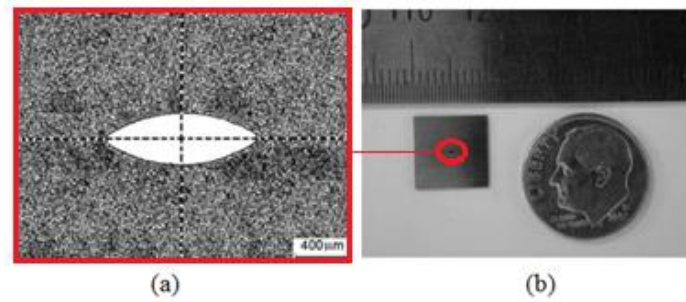


Figura 2. 23 – (a) Geometria e localização do entalhe (b) Provete SP com entalhe central. [26].

A mecânica da fratura explica o comportamento dos materiais à fratura na presença de fendas ou entalhes. A estimativa da vida residual de um equipamento ou de componentes estruturais requer o conhecimento da distribuição de tensões causada pelo aparecimento de fendas juntamente com o seu crescimento. A existência de fissuras dá origem a elevados estados de tensão na sua extremidade, podendo dar origem à sua propagação instável. Com a exceção de materiais intrinsecamente frágeis onde esse estado de tensão provoca deformação plástica na extremidade, o que permite uma maior tolerância a esse tipo de defeito. No caso de materiais frágeis, a extensão da deformação plástica é muito pequena em relação à dimensão da fenda e ao comprimento do corpo, sendo nesses casos a teoria da elasticidade mais adequada para resolver a distribuição das tensões do corpo fissurado [26].

Considerando o ESP como um problema de placas infinitas contendo uma fenda passante de comprimento $2a$ e um momento fletor M_0 aplicado em todo o seu contorno (Figura 2. 24), o fator de intensidade de tensão pode ser obtido pela equação (Eq. 26) [26].

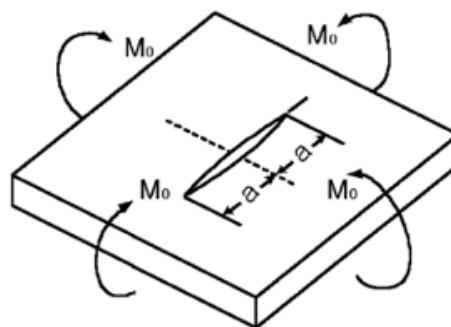


Figura 2. 24 - Placa infinita com uma fenda de comprimento $2a$ e sujeita a flexão uniforme [26].

$$K_I = \frac{6M_0}{h^2} a^{1/2} \text{ e } K_{II} = 0 \quad (\text{Eq. 26})$$

onde, $6M_0/h^2$ é a tensão (σ) na superfície da placa infinita (h é a espessura da placa), o que resulta $K_I = \sigma \cdot a^{1/2}$ [26].

Para se calcular a força devido à flexão num provete SP, deverá começar-se com o caso em que a carga é distribuída uniformemente ao longo de um círculo de raio r (Figura 2. 25 (a)), e considerar separadamente a porção da placa de dentro e fora do círculo.

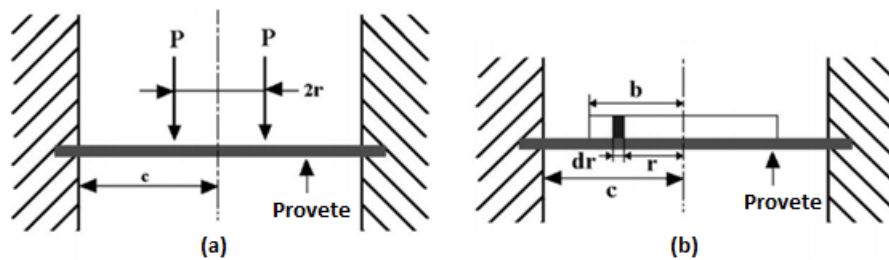


Figura 2. 25 - Esquema de uma placa circular carregada concentricamente [26].

Para cada porção, a equação geral é utilizada, sendo a tensão total (q) é igual a zero para ambas as porções, já a carga total (P) é igual a zero apenas na porção interior. As constantes arbitrárias são determinadas de modo a satisfazer as condições de continuidade do círculo $x=r$ [26].

Para a parte interior ($x < r$):

$$w = \frac{P}{8\pi D} \left[-(x^2 + r^2) \ln \frac{c}{r} + (x^2 - r^2) + \frac{1}{2} \left(1 + \frac{r^2}{c^2} \right) (c^2 - x^2) \right] \quad (\text{Eq. 27})$$

Para a parte exterior ($x > r$):

$$w = \frac{P}{8\pi D} \left[-(x^2 + r^2) \ln \frac{c}{r} + \frac{1}{2} \left(1 + \frac{r^2}{c^2} \right) (c^2 - x^2) \right] \quad (\text{Eq. 28})$$

Qualquer caso relacionado com a curvatura de uma chapa circular posicionada simetricamente em relação ao centro pode ser resolvido aplicando estas equações,

juntamente com o método da suposição. Considerando o caso apresentado na Figura 2. 25 (b), como sendo um provete SP no qual a carga é distribuída uniformemente ao longo da parte interna da placa delimitada por um círculo de raio b , substitui-se na (Eq. 27) o modo de carregamento por $dP=2\pi r q dr$ e a curvatura no centro provocada pela carga é dada pela (Eq. 29):

$$\left(\frac{d^2w}{dx^2}\right)_{x=0} = \frac{q}{4D} \int_0^b \left(-2 \ln \frac{c}{r} + 1 - \frac{r^2}{c^2}\right) r dr = -\frac{qb^2}{4D} \left(\ln \frac{c}{b} + \frac{b^2}{4c^2}\right) \quad (\text{Eq. 29})$$

A força correspondente à deflexão no centro é dada pela (Eq. 30):

$$M_0 = -D(1 + \nu) \frac{d^2w}{dx^2} = \frac{1 + \nu}{4\pi} P \left(\ln \frac{c}{b} + \frac{b^2}{4c^2}\right) \quad (\text{Eq. 30})$$

Onde b e c são o raio de contacto e raio inferior da matriz inferior respetivamente. O raio de contacto b aumenta continuamente com o aumento da carga aplicada. Assim substituindo a (Eq. 30) na (Eq. 26), e com a carga correspondente à iniciação da fenda (P_i) a tenacidade à fratura é dada pela (Eq. 31) [26].

$$K_C = \frac{3 P_i (1 + \nu)}{2 \pi h^2} \left(\ln \frac{c}{b} + \frac{b^2}{4c^2}\right) \sqrt{a} \quad (\text{Eq. 31})$$

A carga correspondente à iniciação da propagação (P_i) pode ser determinada utilizando a informação da curva carga-deslocamento (mudança de declive da curva na terceira fase de deformação do provete) [26].

Jang-Bog Ju^a et al, concluiu que a técnica de ESP com base da mecânica da fratura tem potencialidade para a determinação da tenacidade à fratura. Os resultados foram satisfatórios e o autor sugeriu ainda mais estudo em relação à ponta do entalhe, a sua geometria e o efeito da espessura [26].

Em 2010 *I.I. Cuesta et al*, utilizou o diagrama de avaliação de falha (DAF) para determinar a tenacidade à fratura a partir de ESP. O DAF é utilizado para avaliar a integridade estrutural de componentes na presença de defeitos (fissuras). Este considera o efeito da fenda, a sua geometria e as propriedades do material tal como a tenacidade à

fratura (K_{mat}), tendo em conta o comportamento plástico do componente em relação à carga (L_r). O DAF pode ser derivado para um caso específico ou então, em alternativa, usar um diagrama geral. O autor optou por utilizar o diagrama geral (código de boas práticas API 579/ASME FFS) como guia para o estudo. O código propõe três níveis de avaliação que dependem da precisão pretendida para a análise e da informação disponível. Foi usado o nível três uma vez que é o procedimento mais pormenorizado, onde a análise recorre ao auxílio da análise de elementos finitos [33].

A curva DAF representa a condição limite para aceitação de um defeito se propagar por fratura frágil ou colapso plástico. Assim a tenacidade relativa é dada pela equação (Eq. 32):

$$K_r = \frac{K_I}{K_{mat}} \quad (\text{Eq. 32})$$

onde K_I é o fator de intensidade de tensões correspondente ao defeito e K_{mat} é a tenacidade à fratura do material. À medida que se aproxima do nível da deformação plástica do provete é tida em conta o valor da carga relativa L_r .

$$L_r = \frac{\sigma_{ref}}{\sigma_y} = \frac{P_{app}}{P_U} \quad (\text{Eq. 33})$$

onde σ_{ref} é a tensão de referência, σ_y a tensão de cedência, P_{app} o valor da carga correspondente à iniciação da fenda e P_U a carga correspondente à rotura final. Por outro lado e em materiais dúcteis as condições limite de falha corresponderão ao colapso plástico.

O $L_{r(max)}$ é uma propriedade do material que define o limite no DAF e é definido pela equação (Eq. 34):

$$L_{r(max)} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{\sigma_u}{\sigma_y} \right) \quad (\text{Eq. 34})$$

onde σ_u é a tensão de rotura.

A avaliação API 579 nível 3 permite várias opções que podem ser utilizadas na avaliação das falhas, mas os mais comuns são o 3-C e 3-B. O nível 3-B dá origem a um

diagrama de avaliação de falhas com base em dados detalhados da tensão-deformação. Neste caso, o diagrama é descrito pelas seguintes equações (Eq. 35):

$$\begin{aligned}
 K_r &= 1.0 && \text{para } L_r = 0 \\
 K_r &= \left(\frac{E\varepsilon_{ref}}{L_r\sigma_y} + \frac{(L_r)^3\sigma_y}{2E\varepsilon_{ref}} \right) && \text{para } 0.0 < L_r \leq L_{r(max)} \\
 K_r &= 0 && \text{para } L_r > L_{r(max)}
 \end{aligned} \tag{Eq. 35}$$

onde ε_{ref} é a extensão obtida a partir da tração uniaxial média da curva carga-extensão a uma tensão real de $\sigma_y.L_r$.

O nível 3-C do diagrama de avaliação de falhas é baseado no integral-J obtido a partir de uma análise elásto-plástica recorrendo ao método de elementos finitos.

$$\begin{aligned}
 K_r &= \left(\frac{J_e}{J} \right)^{1/2} && \text{para } L_r \leq L_{r(max)} \\
 K_r &= 0 && \text{para } L_r > L_{r(max)}
 \end{aligned} \tag{Eq. 36}$$

onde J_e e J são valores do integral-J obtidos tanto por uma análise linear elástica como por uma análise elásto-plástica da estrutura com o defeito (fenda) para a mesma carga (L_r).

Na Figura 2. 26, encontra-se representado o esquema da metodologia utilizada para obter a tenacidade à fratura (K_{mat}) [33].

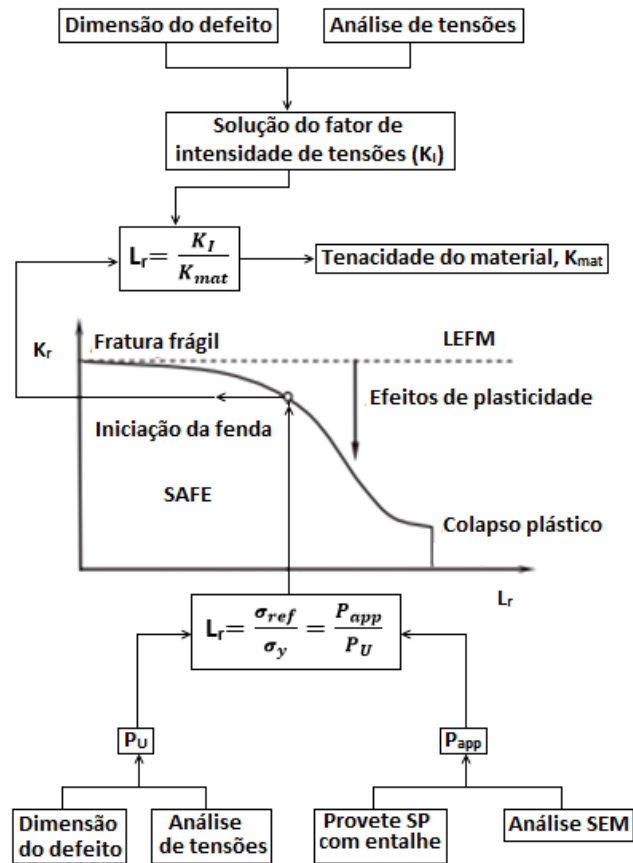


Figura 2. 26 - Esquema da metodologia utilizada para obter a tenacidade à fratura [33].

As propriedades elásto-plásticas foram determinadas recorrendo a dois métodos, um através de ensaios convencionais de acordo com a norma ASTM 8M e outro a partir de ESP com provetes não entalhados recorrendo às equações desenvolvidas anteriormente por outros autores.

A carga correspondente à iniciação da fenda (P_{app}), foi determinada a partir de ESP com provetes entalhados, onde o entalhe utilizado tem a forma de V e foi obtido por maquinaria a laser Figura 2. 27 [33].

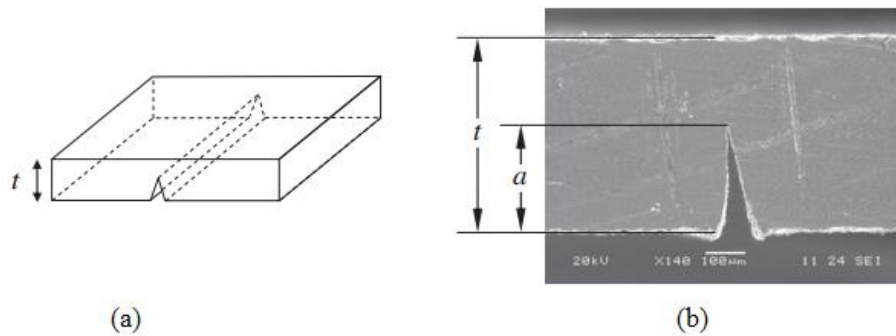


Figura 2. 27 - Provete SP entalhado. (a) Geometria do provete SP. (b) Imagem metalográfica do entalhe [33].

O corte a laser foi programado de modo a obter um raio de ponta do entalhe com cerca de $30\mu\text{m}$, onde foram maquinados vários provetes com diferentes relações de a/t que variaram entre 0.2 a 0.6 Figura 2. 27 (b). A profundidade ao longo da fenda varia ligeiramente devido às irregularidades deixadas pelo corte a laser que podem ser observadas na Figura 2. 28 [33].

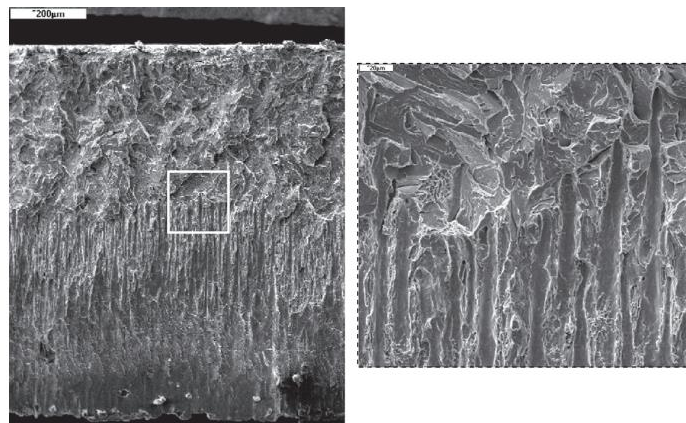


Figura 2. 28 - Imagem microscópica do entalhe obtido a laser [33].

Nas curvas obtidas nos ESP com os provetes da Figura 2. 27, podem ser observadas cinco regiões Figura 2. 29.

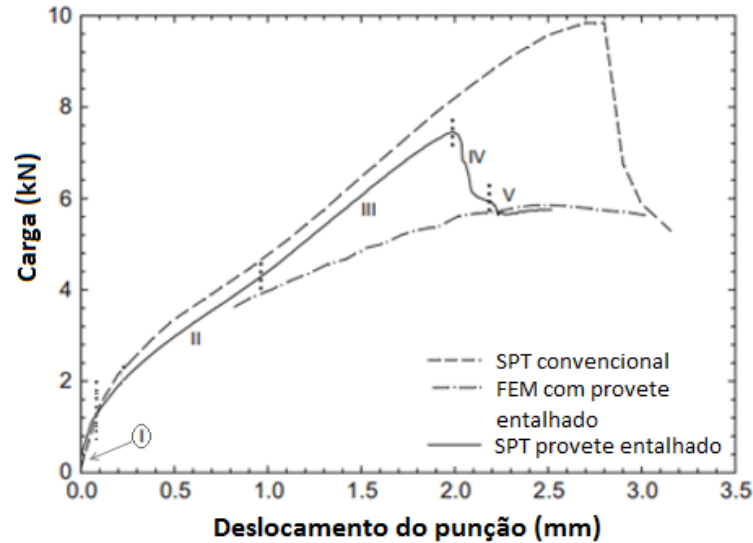


Figura 2. 29 - Curva carga deslocamento do ESP. Adaptado de [33].

A região I representa o comportamento linear elástico do provete e a região II o início do comportamento elasto-plástico, uma vez que algumas áreas do provete encontram-se em deformação plástica principalmente na zona de contacto com o punção. Na região III dá-se a plasticidade do provete e as faces do entalhe abrem gradualmente até que surge a iniciação da propagação, antes de $\approx 85\%$ da carga máxima (P_{max}). A carga máxima indica o ponto em que a fenda já percorreu toda a espessura do provete. Na região IV dá-se instantaneamente a fratura e tipicamente aparece na curva uma queda acentuada. Na região V, o provete tende a comportar-se como duas metades desacopladas [33].

Foram interrompidos vários ensaios a fim de estudar o início da propagação e a forma da fenda em cada região. A Figura 2. 30, corresponde a um ESP com provete entalhado interrompido a 85 % da carga máxima, onde mostra claramente a rotura frágil. A área central mais clara indica o início da propagação das fissuras através dos mecanismos de fratura dúctil.

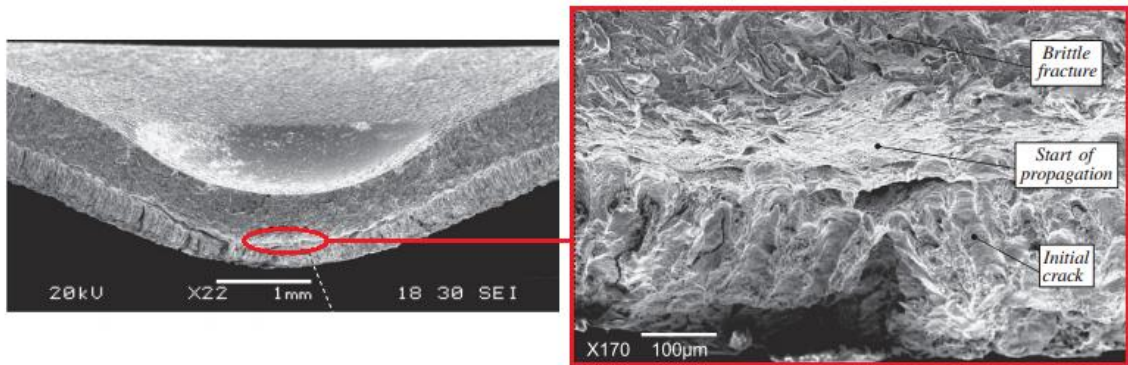


Figura 2. 30 - ESP interrompido a 85% da carga máxima. Adaptado de [33].

Para evitar a utilização dos ensaios interrompidos, o ponto de iniciação da fenda pode ser obtido usando dois métodos. O primeiro consiste em analisar a mudança do declive presente na região III imediatamente antes da carga máxima. O segundo é definido como o método de conformidade, onde o ESP com provete entalhado é parcialmente descarregado múltiplas vezes. A inclinação da descarga é uma indicação da alteração da rigidez do provete em cada ponto de descarga, e quando a fenda se iniciar irá provocar mudanças evidentes na flexibilidade do provete. A Figura 2. 31 mostra a curva carga-deslocamento de um provete entalhado com uma relação $a/t=0.26$ utilizando a segunda metodologia [33].

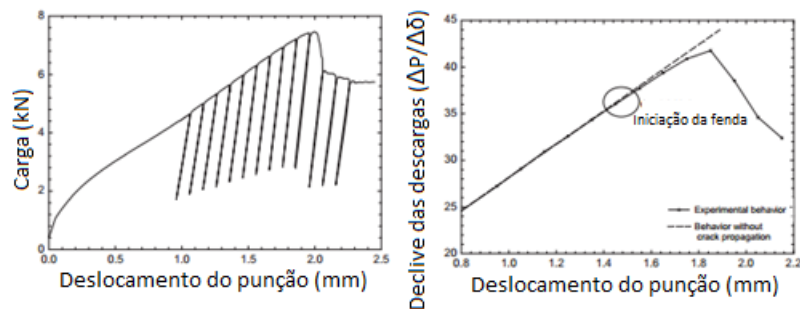


Figura 2. 31 - Cvas obtidas nos ESP entalhados [33].

Analisando a evolução da inclinação das curvas, provocada pelas descargas, pode-se identificar claramente o ponto de iniciação da propagação da fenda [33].

A carga de colapso (P_U) foi determinada a partir de uma análise em elementos finitos, onde se estudou a carga necessária para provocar o colapso plástico. Uma vez que requer uma análise elásto-plástica o *software* escolhido foi o *MSC.Marc*. Dada a simetria da

geometria do provete entalhado, apenas se modelou em 3D um quarto da sua geometria, na qual usaram 7 elementos hexaédricos e 8 nós, utilizando os planos YZ e ZX como os planos de simetria como mostra a Figura 2. 32 [33].

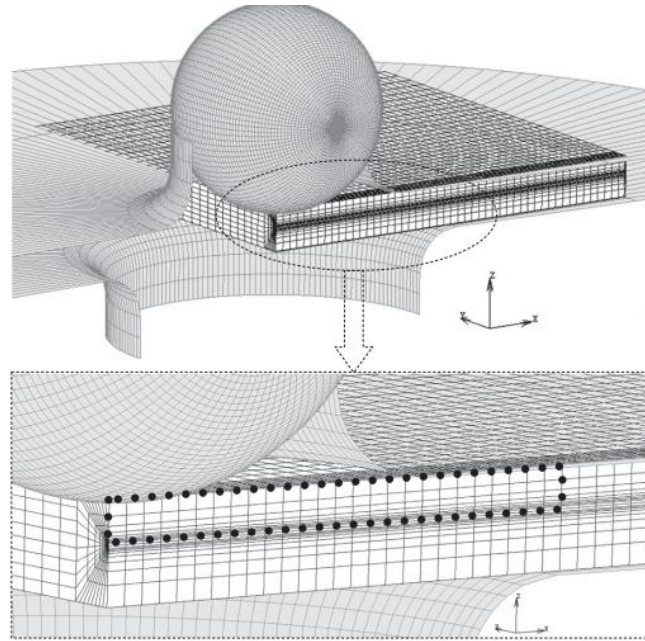


Figura 2. 32 - Modelo 3D da análise em elementos finitos, usado para o cálculo da PU [33].

O punção e as matrizes de aperto foram modeladas como superfícies rígidas. O deslocamento do punção foi o parâmetro usado para controlar o cálculo. Quando o cálculo terminou obteve-se a carga correspondente à extensão plástica generalizada na secção resistente do provete (zona a tracejado na Figura 2. 32). Este valor de carga é assumido como sendo a carga P_U , quando a extensão plástica equivalente atinge um valor de 0.002 em cada ponto da secção central [33].

O fator de intensidade de tensões foi calculado pelo método direto baseado no cálculo dos deslocamentos nodais. Em problemas elásticos, os nós da ponta da fissura estão normalmente ligados e os nós do meio da lateral movidos para $\frac{1}{4}$ de ponto. Esta modificação resulta em $1/\sqrt{r}$ da deformação singular do elemento, de modo a reproduzir a singularidade da deformação. A técnica de correlação do deslocamento foi então usada para calcular o fator de intensidade de tensão a partir da análise de elementos finitos de locais específicos. Para elementos degenerados de quarto de ponto singular, os fatores de intensidade de tensão podem ser avaliados pela equação (Eq. 37) [33].

$$K_I = \frac{\mu}{K+1} \sqrt{\frac{2\pi}{l}} [4(v_b - v_d) + v_e - v_c] \quad (\text{Eq. 37})$$

$$\mu = \frac{E}{2(1+\nu)}$$

$$K = 3 - 4\nu \quad \text{para deformação plana} \quad (\text{Eq. 38})$$

$$K = \frac{(3-\nu)}{(1+\nu)} \quad \text{para tensão plana}$$

onde E é o módulo de elasticidade, ν é o coeficiente de Poisson, l é o comprimento do elemento e v_i são os deslocamento nodais perpendiculares à direção da fenda, conforme mostrado na Figura 2. 33 [33].

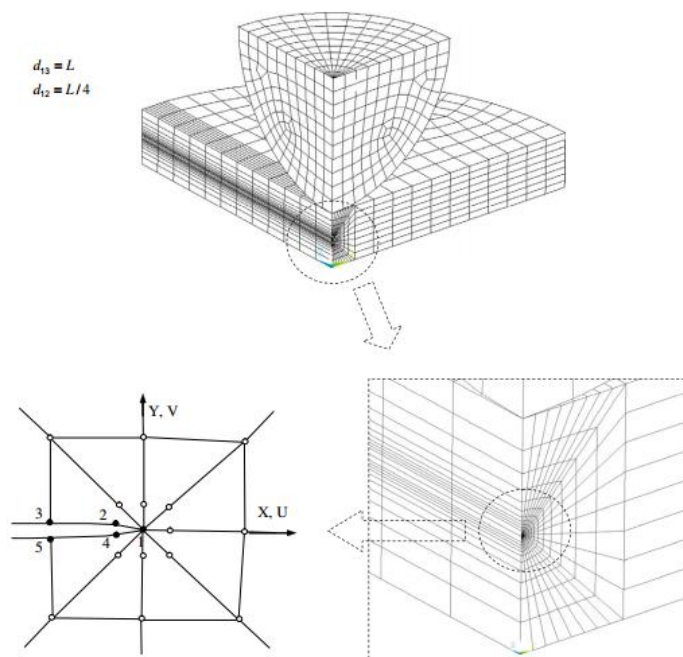


Figura 2. 33 - Malha do provete SP entalhado e os elementos gerados na ponta da fenda [33].

Na Figura 2. 33, também está representada a malha desenvolvida para os cálculos em elementos finitos do provete SP entalhado. A malha é concêntrica em torno da ponta da fenda, juntamente com os elementos elásticos degenerados que foram usados para

modelar a singularidade do campo de tensões. O código utilizado para o cálculo foi o do *Ansys 11* onde foi usado um modelo linear elástico e isotrópico [33].

I.I. Cuesta et al concluíram que metodologia utilizada no estudo consegue obter uma boa estimativa da tenacidade à fratura (K_{mat}). Também recomendam para os cálculos o uso do nível 3 do DAF, a utilização de uma relação de a/t entre 0.3 a 0.4 para o entalhe e a utilização do método da descarga a fim de obter a carga de iniciação da fenda.

Em 2011 *K. Turba^a et al*, propôs um novo modelo de entalhe para os provetes SP, onde utilizou um entalhe circular afiado Figura 2. 34 que resulta na simetria axial do estado de tensão, o que leva ao desenvolvimento de uma situação próxima de deformação plana.

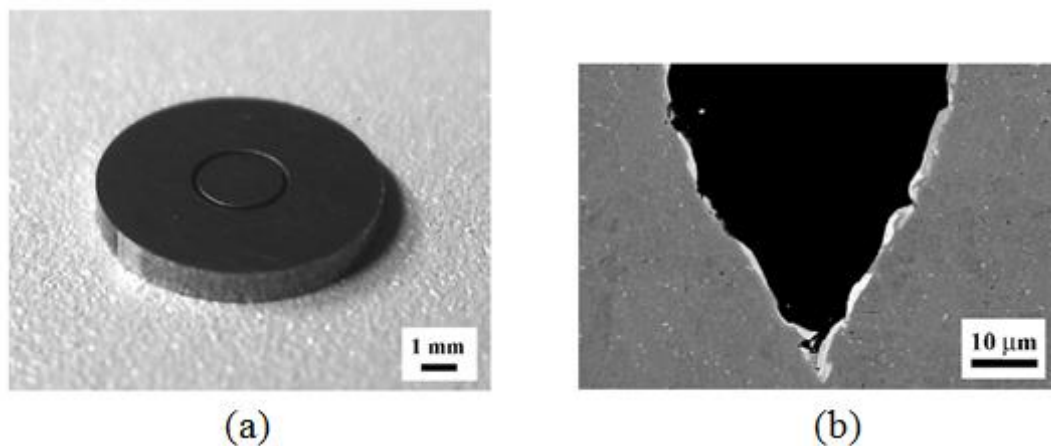


Figura 2. 34 - (a) Entalhe circular. (b) Secção transversal do provete mostrando a zona do entalhe circular afiado. [25].

O provete da Figura 2. 34, de 8mm de diâmetro e 1mm de espessura tem um entalhe com 2.5mm de diâmetro e 0.5mm de profundidade. O diâmetro do entalhe foi escolhido a partir de uma análise preliminar em elementos finitos. A análise serviu para posicionar a ponta do entalhe na zona onde se localizava a maior concentração de tensões, de modo a que o fator de intensidade de tensões tivesse mais efeito. O entalhe foi maquinado por eletroerosão a fim de se conseguir um raio de ponta muito pequeno, e assim ficar o mais próximo de uma fenda real sendo o seu raio de ponta estimado em $r < 5\mu\text{m}$ [25].

Nos ensaios experimentais foi detetado a presença do modo de carregamento misto
 Figura 2. 35.

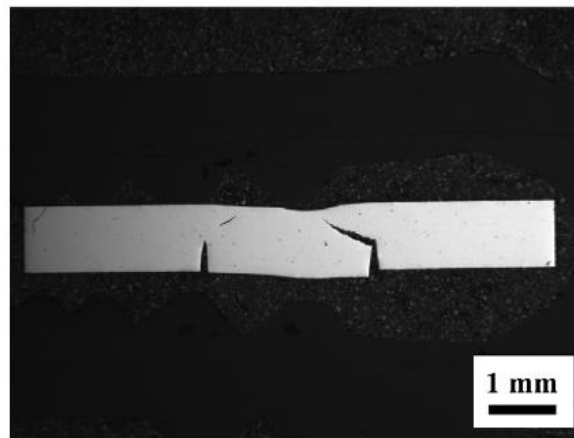


Figura 2. 35 - Modo de carregamento misto [25].

Com a presença do modo de carregamento misto a tenacidade à fratura foi obtida a partir da equação (Eq. 39) [25]:

$$K_{eff} = \sqrt{(k_I^2 + k_{II}^2)} \quad (\text{Eq. 39})$$

Sendo K_I e K_{II} , obtidos pelas (Eq. 40) e (Eq. 41) propostas por (He e Hutchinson, em 2000):

$$K_I = \frac{6Qs}{w^2} \sqrt{\pi a} F_I \left(\frac{a}{w} \right) \quad (\text{Eq. 40})$$

$$K_{II} = \frac{Q \left(\frac{a}{w} \right)^{3/2}}{w^{1/2} \left(1 - \frac{a}{w} \right)^{1/2}} F_{II} \left(\frac{a}{w} \right) \quad (\text{Eq. 41})$$

$$Q = \frac{F(L - d)}{L} \quad (\text{Eq. 42})$$

onde $F_I (a/w)$ e $F_{II} (a/w)$ são obtidos pelas (Eq. 43) e (Eq. 44) respetivamente [34].

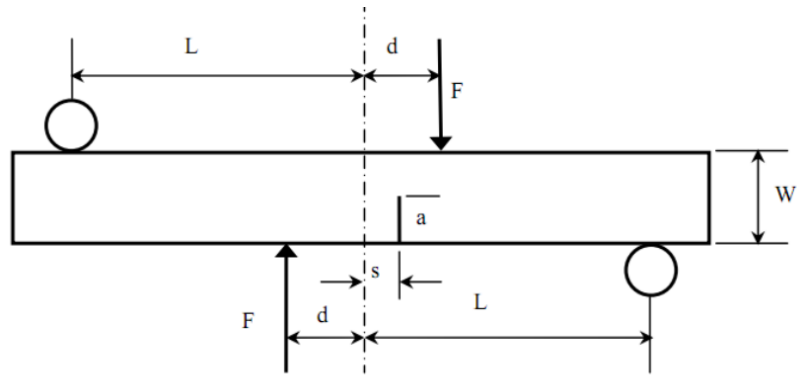


Figura 2. 36 - Esquema de um provete entalhado sujeito a carregamento misto [34].

$$F_I \left(\frac{a}{w} \right) = 1.122 + 1.121 \left(\frac{a}{w} \right) + 3.740 \left(\frac{a}{w} \right)^2 + 3.873 \left(\frac{a}{w} \right)^3 - 19.05 \left(\frac{a}{w} \right)^4 + 22.5 \left(\frac{a}{w} \right)^5 \quad \text{para } 0 \leq \left(\frac{a}{w} \right) \leq 0.7 \quad (\text{Eq. 43})$$

$$F_{II} \left(\frac{a}{w} \right) = 7.264 - 9.37 \left(\frac{a}{w} \right) + 2.74 \left(\frac{a}{w} \right)^2 + 1.87 \left(\frac{a}{w} \right)^3 - 1.04 \left(\frac{a}{w} \right)^4 \quad \text{para } 0 \leq \left(\frac{a}{w} \right) \leq 1 \quad (\text{Eq. 44})$$

Segundo *K. Turba^a et al*, este entalhe deve ser destacado como sendo uma melhoria em relação aos propostos anteriormente uma vez que apresenta uma simetria radial, o que faz com que este se aproxime das condições de deformação plana, evitando assim o estado de tensão plana que complica a determinação da tenacidade à fratura. A principal limitação deste entalhe está no facto de apresentar um modo de carregamento misto sendo que assim a tenacidade à fratura é apenas estimada e não obtida diretamente. Contudo o autor propõe que este entalhe seja mais explorado de forma a aproximar-se do Modo I de carregamento [25].

Em 2012 *C. Rodríguez et al*, sugeriu um novo método para a determinação da tenacidade à fratura (J_{IC}). O método utiliza um provete SP com um entalhe linear Figura 2. 37, que se baseia na determinação da energia necessária para o crescimento da fenda pré-existente [24].

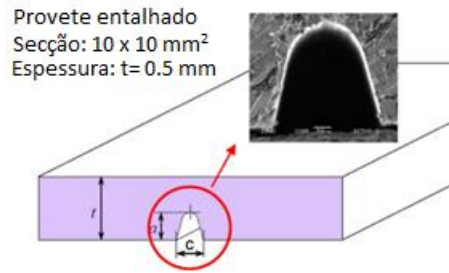


Figura 2. 37 - Provete SP com entalhe linear [24].

Os entalhes foram maquinados por micromaquinação utilizando uma ferramenta com um ângulo de corte de 30° e um raio de ponta de 100µm. Os entalhes foram maquinados com relações de $a/t = 0.3$ e 0.4 a fim de se estudar influência da relação [24].

Para determinar o valor crítico da tenacidade à fratura (J_{IC}) teve-se em consideração a seguinte expressão (Eq. 45):

$$J = - \left(\frac{\partial U}{\partial A} \right) \quad (\text{Eq. 45})$$

onde U é a energia potencial e A a área da fenda.

A metodologia utilizada para se perceber o comportamento mecânico da propagação da fenda no provete, consistiu na análise microscópica de provetes ensaiados em diferentes percentagens de carga máxima.

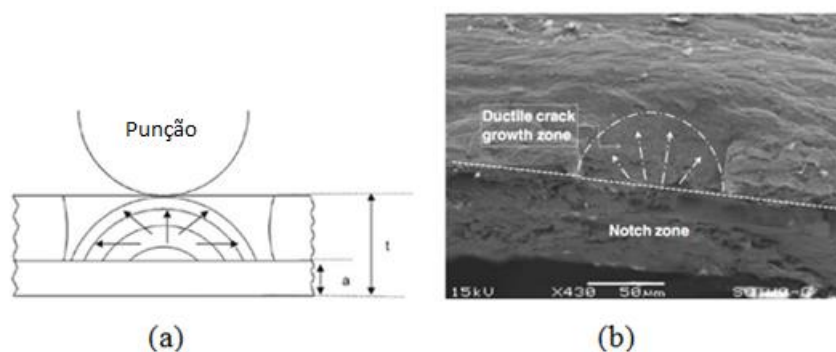


Figura 2. 38 - (a) Esquema da forma como a fenda se propaga. (b) Digitalização microscópica do provete ensaiado [24].

A Figura 2. 38 (a), mostra a forma como a fenda se inicia e se propaga. O início do crescimento da fenda ocorre sempre no centro do provete abaixo do contacto com o

punção. Na Figura 2. 38 (b) temos uma visualização microscópica da vista em corte do provete SP após o ensaio ter sido interrompido logo após ter surgido o crescimento da fenda. A parte inferior da figura apresenta um padrão ondulado que representa o entalhe maquinado, já o crescimento da fenda ocorreu de forma dúctil o que pode ser visto no centro da imagem com a presença de microvazios [24].

De acordo com a Figura 2. 38, o crescimento da fenda inicia-se sempre no centro do comprimento do entalhe e cresce ao longo da direção da espessura do provete indo ao encontro do ponto de contacto com o punção e dando origem ao crescimento de uma fenda semicircular. Assim a área de crescimento da fenda ∂A , pode ser proporcional a $(t-a)^2$. Assumindo o referido anteriormente, o valor crítico J correspondente ao início do crescimento da fenda que pode ser obtido pela seguinte equação (Eq. 46) [24]:

$$J_{ini} = K_{SP} \left[\frac{W_{ini}}{(t-a)^2} \right] \quad (\text{Eq. 46})$$

onde (W_{ini}) é a energia consumida até ao início do crescimento da fenda em joules, e pode ser calculada como sendo a área sob a curva carga-deslocamento limitada pela carga de iniciação da fenda (P_{ini}) . O (a) representa o comprimento da fenda inicial e (K_{SP}) a constante de proporcionalidade das características geométricas.

A carga correspondente à iniciação da fenda (P_{ini}) , foi determinada pela análise microscópica dos provetes retirados dos ensaios interrompidos a diferentes percentagens de carga máxima Figura 2. 39 [24].

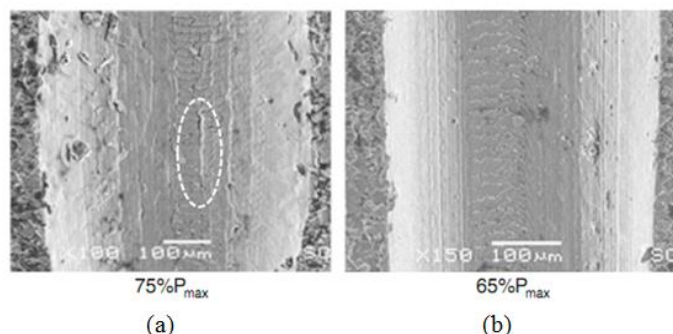


Figura 2. 39 - Imagem microscópica da vista inferior dos provetes SP. (a) Ensaio interrompido a 75% da carga máxima. (b) Ensaio interrompido a 65% da carga máxima [24].

A Figura 2. 39 (a), mostra que a fenda se iniciou com uma carga igual ou superior 75% da carga máxima, visto que a 65% a fenda ainda não se tinha iniciado como demonstra a Figura 2. 39 (b) [24].

Tendo em conta que W_{ini} é a área sob a curva SP carga-deslocamento, para o ponto de carga e deslocamento inicial da fenda (P_{ini} , d_{ini}), pode-se calcular a energia por unidade de área ($W_{ini}/(t-a)^2$) e relacionando este valor com o valor de J_{IC} medido ($J_{ini}=J_{IC}$), através da (Eq. 46) pode-se obter a constante de proporcionalidade K_{SP} [24].

C. *Rodríguez et al* concluiu que apesar dos constrangimentos existentes devido à complexidade do ESP, a metodologia utilizada proporcionou resultados de tenacidade à fratura elásto-plástica (J_{IC}) bastante bons [24].

➤ Propriedades de Fluência

Nos últimos anos vários investigadores têm vindo a trabalhar na estimativa das propriedades de fluência a partir de provetes SP. Segundo *T.H. Hyde et al*, em 2012 devido à complexidade do ESP, atualmente ainda não existe um método geral aceitável para relacionar os dados obtidos nos ensaios de fluência SP, com os dados obtidos por um ensaio de fluência convencional. A deformação que ocorre num ensaio de fluência SP envolve interações entre vários processos não lineares.

O provete começa como uma “placa plana” e ao deformar vai começar a ganhar uma forma cónica e por fim esférica. Quando se aproxima da fase final de deformação a deflexão (Δ) no centro do provete é cerca de três vezes a espessura inicial Figura 2. 40 (a) [3].

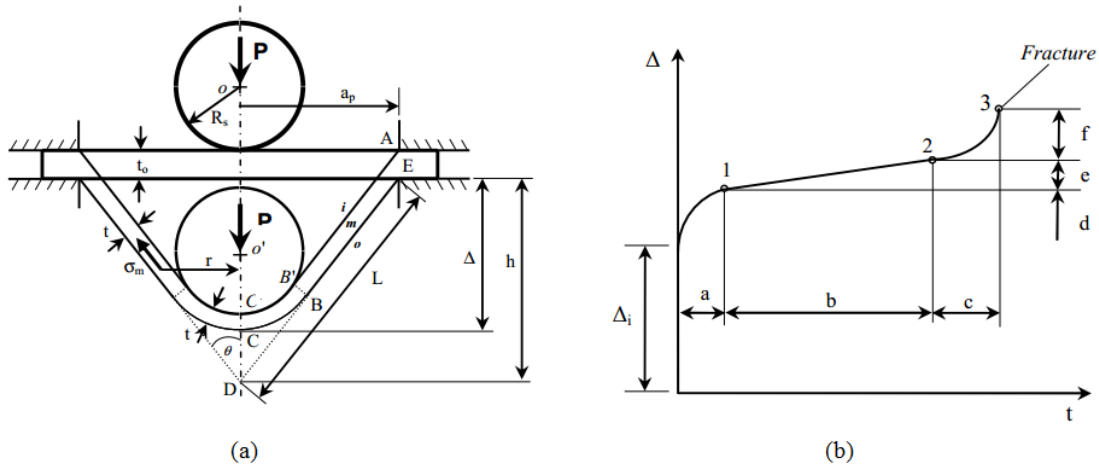


Figura 2. 40 - Esquema da deformação do ensaio de fluência SP. (a) Forma inicial e deformação do provete SP (assumindo a espessura constante). (b) Representação esquemática da curva deslocamento em função do tempo de ensaio de fluência SP, onde mostra diferentes regiões de deformação (em que Δ_i representa a deformação elástica e plástica instantânea). Adaptado de [35].

À medida que a deformação ocorre, a área de contacto entre o punção e o provete aumenta, logo as condições de atrito no contacto são alteradas [3].

Na Figura 2. 40 (b) está representada uma curva típica de um ensaio de fluência SP (deformação vs tempo de ensaio), na qual estão identificadas as diferentes regiões de deformação [35]:

- (a) Ocorre uma redução da taxa de deformação.
- (b) A taxa de deformação fica aproximadamente constante.
- (c) Aumento da taxa de deformação.
- (d) Deformação que ocorre durante a redução da taxa de deformação.
- (e) Deformação que ocorre durante a “constante” taxa de deformação.
- (f) Deformação que ocorre durante o aumento da taxa de deformação.

As grandes deformações que ocorrem podem também estar associadas grandes tensões. Estimou-se que a extensão equivalente (\mathcal{E}_{eq}) na zona do contacto do punção com o provete está relacionada com a deformação central do provete (Δ), pela seguinte relação (Eq. 47) [3]:

$$\mathcal{E}_{eq} = 0.17959\Delta + 0.09357\Delta^2 + 0.0044\Delta^3 \quad (\text{Eq. 47})$$

E a correspondente tensão membrana (σ_m) é aproximadamente dada pela equação (Eq. 48) [3]:

$$\frac{P}{\sigma_m} = 1.72476\Delta - 0.056387\Delta^2 - 0.17688\Delta^3 \quad (\text{Eq. 48})$$

Usando a (Eq. 47) quando $\Delta > 1\text{mm}$ verifica-se que o valor da extensão equivalente (\mathcal{E}_{eq}) é superior a 30%, o que é muito superior à extensão que ocorreria no ensaio de fluência convencional no momento da deformação secundária. Assim, a taxa mínima de deslocamento obtida no ensaio de fluência SP, não está diretamente relacionada com a extensão mínima de um ensaio de fluência convencional [3].

Do que se verifica até ao momento pode-se concluir que o ESP é um ensaio de “componente complexa” e não um “ensaio ao material”, o que não vai ao encontro do pretendido, uma vez que se pretendia um método simples com base mecânica que relaciona-se os dados de fluência SP com os dados de fluência de um ensaio convencional. No entanto, a técnica de ESP tem uma vantagem em relação a outros ensaios, que é o facto de obter os dados de fluência sobre a falha do provete. Por isso, a técnica demonstra potencial para a obtenção dos dados de fluência [3].

Há cada vez mais evidências da possibilidade de obter relações empíricas entre a fase experimental e análises em elementos finitos, que permitam relacionar os dados de fluência SP com os dados de fluência convencionas. O código de boas práticas da CWA 15627:2006 apresenta a seguinte relação (Eq. 49) [3]:

$$\frac{P}{\sigma_m} = 3.33K_s a_p^{-0.2} R_s^{1.2} t_0 \quad (\text{Eq. 49})$$

onde σ_m produziria o mesmo tempo de falha num provete de fluência convencional, que P produziria num ensaio de fluência SP. O K_s é um parâmetro de ajuste que depende do material e a_s , R_s e t_0 , são dimensões do ensaio que estão identificadas na Figura 2. 40 (a) [3].

➤ Temperatura de transição de dúctil para frágil

O conhecimento da temperatura de transição de dúctil para frágil (TTDF) dos materiais, é uma informação muito importante quando se trata da avaliação de componentes em serviço, uma vez que a temperatura é um dos fatores com mais influência no comportamento mecânico dos materiais. Neste sentido vários investigadores têm procurado estimar a TTDF a partir do ESP.

Alguns autores defendem que existe uma relação linear entre a temperatura de transição da aparência de fratura (FATT) obtida no ensaio convencional de impacto Charpy e a temperatura de transição do ensaio small punch (T_{SP}) a qual é expressa pela equação (Eq. 50):

$$FATT = \alpha T_{SP} + \beta_{SP} \quad (\text{Eq. 50})$$

onde, α é um fator de correlação mecânico que está diretamente relacionado com o estado de tensão e β_{SP} é o deslocamento/offset da temperatura de transição [23].

Mais tarde *Bulloch et al*, sugeriu que a temperatura de transição poderia ser melhor descrita a partir de uma relação não linear (Eq. 51):

$$FATT = \frac{C_{SP}}{(T_{SP})^2} \quad (\text{Eq. 51})$$

onde, C_{SP} é uma constante de escala [23].

Na Figura 2. 41, está representada a informação típica sobre a temperatura de transição, onde aparece a energia consumida até à fratura do material a uma dada temperatura de ensaio. A energia consumida referente ao ESP é determinada como sendo a área sob a curva carga-deslocamento até ao ponto de carga máxima [23].

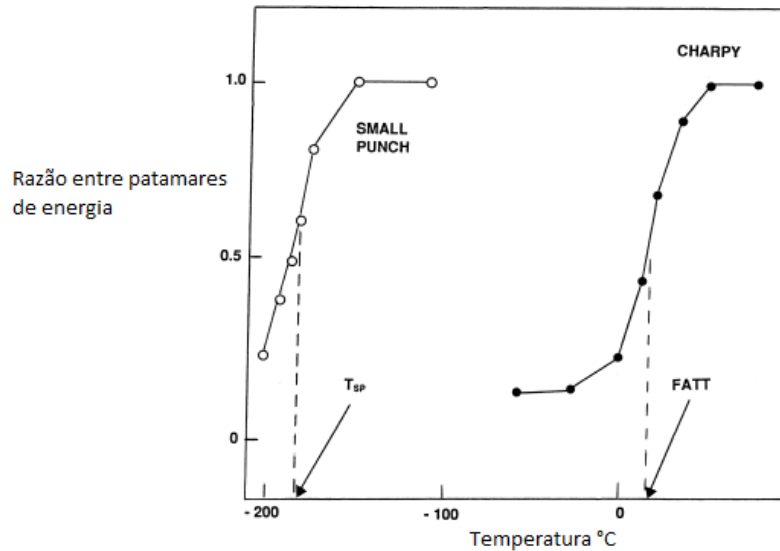


Figura 2. 41 - Dados da temperatura de transição obtidos pelo ESP e impacto Charpy [23].

Na Figura 2. 41, verifica-se que a baixas temperaturas a razão entre patamares de energia ronda os 0.3 o que demonstra um comportamento frágil, enquanto à temperatura ambiente a razão entre patamares de energia aumentou para 1 o que se verifica um comportamento dúctil. Assim a temperatura de transição de dúctil-frágil do ESP (T_{SP}), foi determinada como sendo a temperatura correspondente à energia de fratura obtida pela metade da soma dos valores de energia da zona de comportamento frágil e dúctil, como se pode ver na Figura 2. 41 [23].

➤ Método de elementos finitos aplicado ao ESP

O método de elementos finitos (MEF) é uma ferramenta que serve de auxílio à técnica de ESP. O MEF tem sido utilizado com alguma frequência por vários investigadores, a fim de determinar parâmetros importantes para o ensaio.

M. P. Manahan et al, em 1981 utilizou o MEF a fim de estudar o atrito presente nos contactos. O autor escolheu o *software Abaqus* para o cálculo, porque este permitia efetuar análises não-lineares. Foi utilizada uma típica malha de elementos finitos com dois

elementos contínuos assimétricos, que pormenorizam o atrito de deslizamento perto do suporte Figura 2. 42 [16].

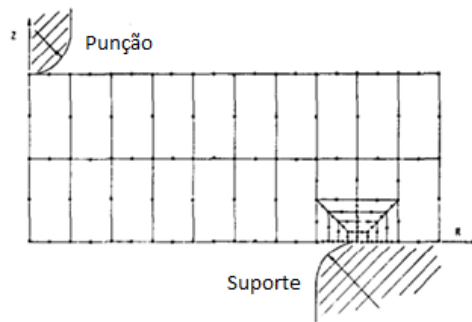


Figura 2. 42 - Esquema da malha utilizada para a análise de elementos finitos [16].

O autor conclui que apesar de os resultados obtidos serem corretos, uma vez que se verificou que o coeficiente de atrito tendia para zero, mais trabalho terá de ser feito a fim de tornar o modelo de elementos finitos mais sensível [16].

*Ruomei Hu and Xiang Ling**, em 2009 realizaram estudos em elementos finitos usando o *software Abaqus 6.5-1* de código explícito. Este estudo foi realizado com base nas equações constitutivas do dano plástico desenvolvidas por *Gurson, Tveergard e Needleman*, que são amplamente utilizadas para descrever os efeitos micromecânicos dos danos em materiais dúcteis. Na análise efetuada foi usado o modelo 3D que está representado na Figura 2. 43, onde podemos ver que o provete é encastrado na zona que corresponde ao contacto com as matrizes de aperto e o punção encontra-se livre na direção vertical. O modelo também contabiliza o atrito desenvolvido entre o punção e o provete [28].

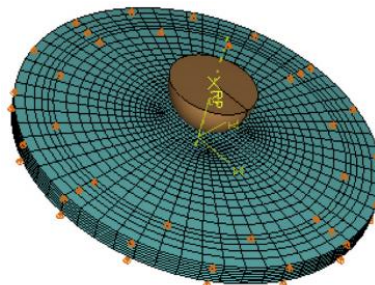


Figura 2. 43 - Modelo 3D utilizado na análise de elementos finitos [28].

Este estudo efetuado faz a comparação entre o modelo numérico obtido a partir da análise em elementos finitos (AEF) e os estudos experimentais Figura 2. 44.

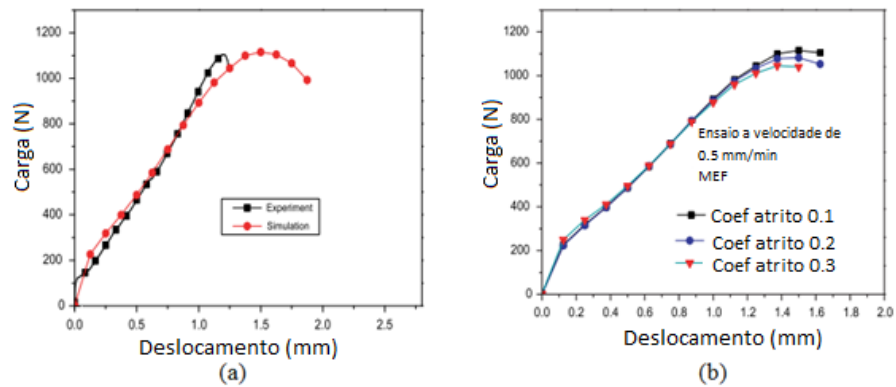


Figura 2. 44 - Comparação das curvas do ESP carga-deslocamento obtidas a partir da AEF e experimentalmente. (b) Influência do coeficiente de atrito nos estudos de elementos finitos [28].

A Figura 2. 44 (a) mostra a comparação das curvas do ESP carga-deslocamento obtidas experimentalmente e por o MEF. Verifica-se uma boa concordância entre o modelo numérico e o experimental, com exceção da fase da rotura final, o que pode estar associado à localização do dano e da propagação das fissuras. Assim, pode-se dizer que o modelo numérico baseado nas equações constitutivas do dano plástico está bem concebido. A Figura 2. 44 (b) mostra a influência do atrito na simulação numérica, onde se pode verificar que à medida que o coeficiente de atrito diminui a carga máxima do ensaio aumenta [28].

A Figura 2. 45, mostra a evolução do dano à medida que o punção se desloca.

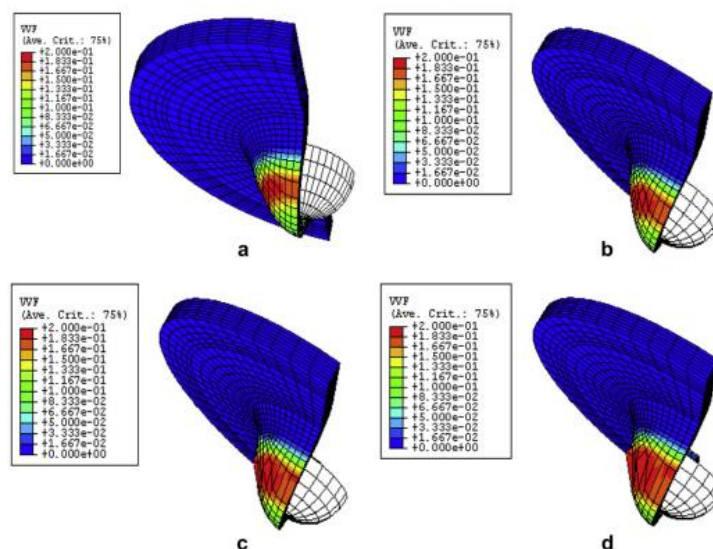


Figura 2. 45 - Evolução da falha no provete SP [28].

Os danos ocorrem na parte inferior do provete e crescem através do mesmo até à falha final, o que também se verificou na fase experimental. A falha inicia-se na superfície inferior entre 0.78 e 0.85 mm afastado do centro, o que é coerente com a fase experimental. Assim concluiu-se que este modelo numérico utilizado estava bem definido, podendo ser utilizado com êxito [28].

K. Turba^a, em 2011 para escolher o diâmetro do entalhe do provete SP, utilizou o *software Ansys* versão 11, a fim de conseguir localizar a maior concentração de tensões. Para isso foi efetuada uma análise elásto-plástica, a um provete não entalhado com 1mm de espessura para várias percentagens de deflexão como mostra a Figura 2. 46 [25].

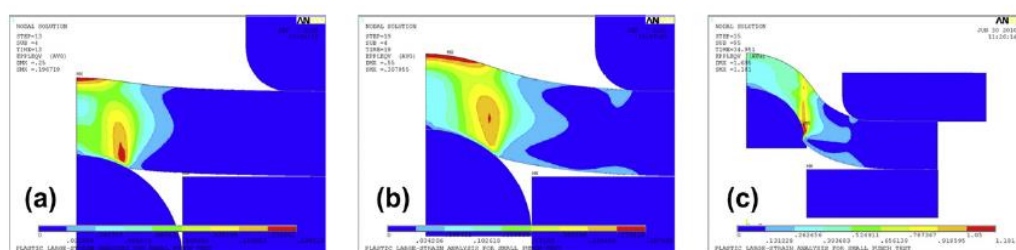


Figura 2. 46 - Análise elástica plástica efetuada no ANSYS 11. (a) 0.25 mm de deslocamento. (b) 0.55 mm de deslocamento. (c) 1.68 mm de deslocamento [25].

A análise de elementos finitos elásto-plástica, acima apresentada mostra que a área com maior deformação plástica equivalente muda gradualmente com o aumento da

deflexão, seguindo o deslocamento da fronteira de contacto como mostra a Figura 2. 46 [25].

Também foi realizada uma segunda análise linear elástica *standard* do *Ansys*, para calcular os fatores de intensidade de tensão nos provetes entalhados com os dois diâmetros de entalhe diferentes, para mostrar os elevados gradientes de tensão na vizinhança da ponta do entalhe.

Finalmente e para complementar efetuou-se uma análise elásto-plástica num provete entalhado, utilizando o *software Abaqus*, a fim de simular a distribuição de tensões e deformação nos provetes quando se encontram próximos da fratura e assim relacionar os resultados da direção da propagação da fenda com as imagens obtidas por microscopia dos provetes ensaiados Figura 2. 47 [25].

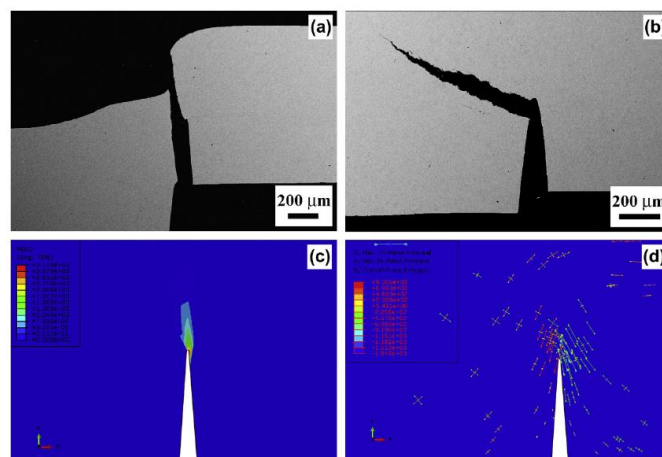


Figura 2. 47 - Micrografias da propagação das fendas. (a) Fratura frágil. (b) Fratura dúctil. (c) Tensão principal. (d) distribuição de tensões na ponta do entalhe (as setas vermelhas e verdes representam as tensões de compressão e tração respetivamente) [25].

Comparando os resultados experimentais com os numéricos obtidos na análise de elementos finitos elásto-plástica, pode-se concluir que a direção da propagação da fenda no caso de fratura dúctil corresponde à zona de deformação plástica equivalente mais elevada Figura 2. 47 (c). No caso de fratura frágil a direção da propagação da fenda é perpendicular à tensão principal máxima, na região em que a tensão principal máxima é de tração como se pode ver na Figura 2. 47 (d), assinalado pelas setas vermelhas e laranja [25].

2.2 Processo de extração das amostras dos equipamentos

Em 1997 o proprietário da Rolls-Royce SSam TM desenvolveu a segunda máquina de recolha de pequenas amostras do tipo concha Figura 2. 48 (a) [36].

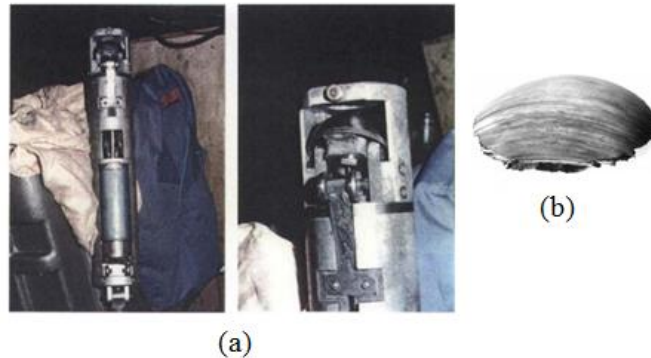


Figura 2. 48 - (a) Segunda máquina de recolha de amostras criada pela Rolls-Royce. (b) Amostra de material extraída. Adaptado de [36].

Este equipamento tem como base de funcionamento a rotação de dois eixos como demonstra a Figura 2. 49 [36].

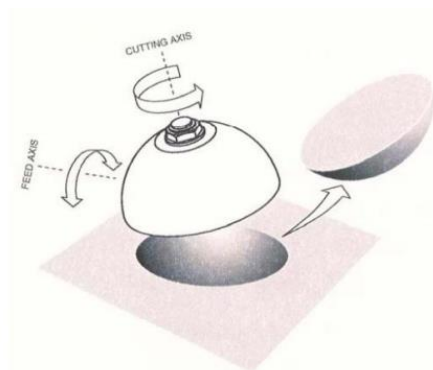


Figura 2. 49 -Princípio de funcionamento do dispositivo de recolha de amostras [36].

Um eixo 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 sobre 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 [36].



Figura 2. 50 - (a) Provetes SP obtidos a partir de uma amostra recolhida SSam TM-2 [36]. (b) Zona da extração da amostra [37].

Uma das vantagens do ESP é o facto de se conseguir obter vários provetes numa amostra recolhida por este processo Figura 2. 50 (a) [36]. Como podemos ver na Figura 2. 50 (b) o processo pode ser considerado não destrutivo uma vez que o volume de material retirado é muito pequeno em relação ao componente em estudo [37].

Em 2008 *Koji Okamoto^a et al*, desenvolveu 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 Figura 2. 51 [38].

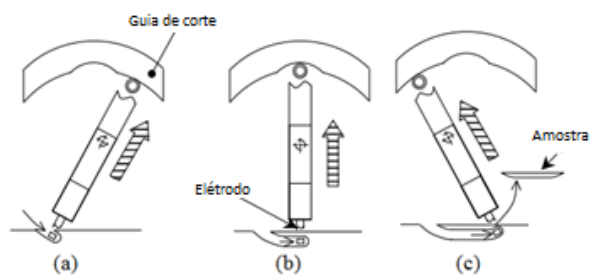


Figura 2. 51 - Esquema do princípio de funcionamento do equipamento. (a) Primeira fase da operação. (b) Segunda fase da operação (c) Operação executada. [38].

Na Figura 2. 52, está representada a composição do equipamento.

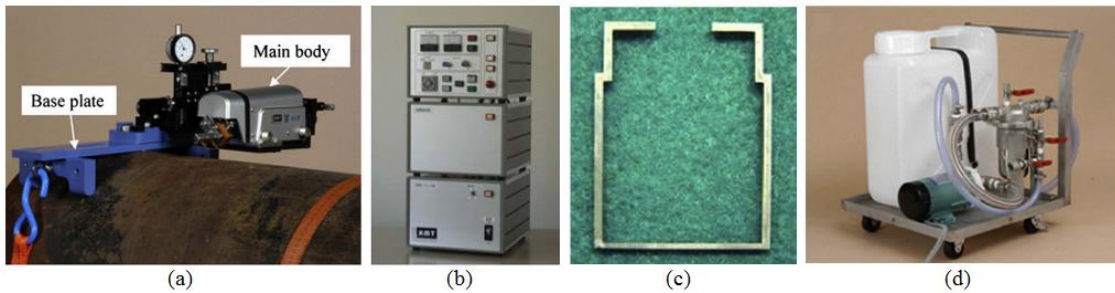


Figura 2. 52 - Equipamento de recolha de amostras por descarga elétrica. (a) Placa de base e corpo principal. (b) Painel de controlo. (c) Eléctrodo. (d) Máquina de líquido. [38].

O equipamento é dividido em quatro partes, a placa de base que é responsável pela fixação do corpo principal que conduz o eléctrodo ao componente Figura 2. 52 (a), um painel de controlo que controla a condição da descarga eléctrica Figura 2. 52 (b), um eléctrodo Figura 2. 52 (c) e um reservatório com líquido refrigerante Figura 2. 52 (d).

Na Figura 2. 53, está representada uma amostra de material típica de uma extração efetuada por um equipamento de descarga eléctrica [38].

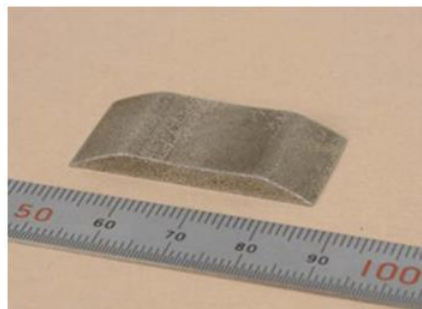


Figura 2. 53 - Amostra típica [38].

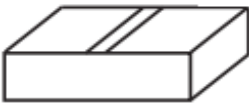



Alguns dos benefícios desta técnica são [38]:

- Remoção mais simples e rápida da amostra em comparação com as alternativas tradicionais. Uma amostra de material com dimensões 40x23x2.3mm, pode ser removida em 3-4 horas, dependendo do tipo de aço.
- Permite recolha localizada.
- Poucas alterações no componente de extração.
- O efeito térmico causado pela descarga eléctrica é muito pequena, podendo ser desprezado.

2.3 Comparação entre os ensaios apresentados

Na Tabela 2. 2, estão apresentados os principais aspetos de cada um dos ensaios miniatura retratados anteriormente a fim de se poder fazer uma comparação global.

Tabela 2. 2 - Principais aspetos de cada um dos ensaios miniatura.

Tipo de ensaio	Principais aspetos
 <p data-bbox="405 801 440 831">IC</p>	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Apenas determina propriedades de fluência. ✓ Provete de fácil obtenção [3]. ✓ Volume de material necessário para o provete ($10 \times 10 \times 2 = 200 \text{ mm}^3$) [9]. ✓ Sensibilidade de medição da deformação para os provetes recomendados $EGL = 2$ [3]. ✓ A conversão dos dados IC é feita a partir de uma base mecânica, pelo método da tensão de referência inversa [3].
 <p data-bbox="405 1249 440 1283">SR</p>	<ul style="list-style-type: none"> ✓ O ESR uma técnica que permite obter diversas propriedades mecânicas [4]. ✓ Provete de fácil obtenção [3]. ✓ Volume de material necessário para o provete ($\pi \times 7^2 \times 2 \approx 265.46 \text{ mm}^3$) [4]. ✓ Sensibilidade de medição da deformação para os provetes recomendados $EGL = 25$ [3]. ✓ A conversão dos dados SR é feita a partir de uma base mecânica, pelo método da tensão de referência inversa [3].
 <p data-bbox="384 1547 461 1574">CSSU</p>	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Permite obter diversas propriedades mecânicas [3], [15]. ✓ Provete de difícil obtenção [3]. ✓ Volume de material necessário para o provete aproximadamente ($\pi \times 1.5^2 \times 25 \approx 176.7 \text{ mm}^3$) [3]. ✓ Sensibilidade de medição da deformação para os provetes recomendados $EGL = 10$ [3]. ✓ Permite obter diversas propriedades mecânicas [3], [27]. ✓ Provete de fácil obtenção [3].
 <p data-bbox="395 1883 443 1910">SPT</p>	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Volume de material necessário para o provete ($\pi \times 0.5^2 \times 25 \approx 19.6 \text{ mm}^3$) [18]. ✓ Sensibilidade de medição da deformação para os provetes recomendados $EGL = 6$ [3]. ✓ Conversão dos dados SPT para as propriedades reais é feita por correlações empíricas, envolvendo soluções analíticas aproximadas e análises em elementos finitos [3].

Comparando os aspectos apresentados na Tabela 2. 2, verifica-se que o método de ESP é o método mais complexo para determinar as propriedades mecânicas dos materiais, dado que este depende de relações empíricas. No entanto, quando se trata de avaliar o estado de degradação dos equipamentos em serviço, este torna-se mais vantajoso relativamente aos restantes. A razão para tal, advém de necessitar de menor volume de material no ensaio, permitindo obter vários provetes apenas numa amostra de material do tipo concha. Assim, é possível determinar diferentes propriedades a partir de uma única extração de material.

3 Projeto do dispositivo para os ESP e definição dos respectivos provetes

Para se proceder à realização dos ESP foi necessário projetar e conceber o dispositivo de ensaio, bem como definir os provetes (tipo de entalhe e respectivas dimensões) a utilizar. Quanto ao dispositivo, este foi projetado de forma a possibilitar a realização de ensaios a baixa temperatura, a alta temperatura e à temperatura ambiente. A definição dos provetes teve essencialmente em consideração as conclusões e sugestões dos trabalhos anteriores, onde se procurou otimizar a localização do entalhe circular no provete.

3.1 Dispositivo para os ESP

Com base na informação da pesquisa efetuada foi projetado um dispositivo para a realização dos ESP, que teve como base as recomendações do código de boas práticas [18].

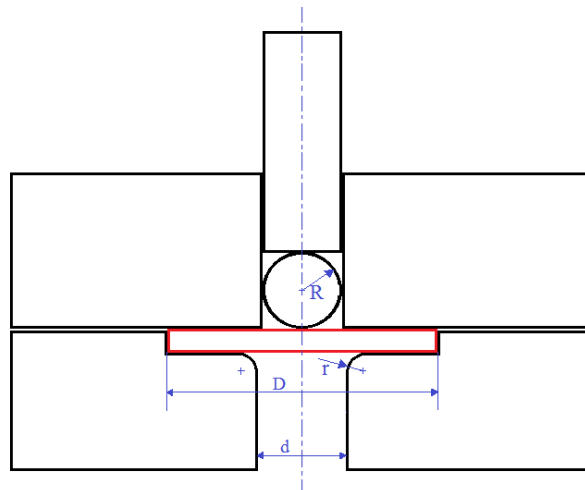


Figura 3. 1 - Dimensões principais do dispositivo de ESP.

A Figura 3. 1, mostra esquematicamente uma vista em corte transversal das matrizes de aperto do provete, com um punção de ponta esférica. As dimensões apresentadas na Figura 3. 1, estão recomendadas no código de boas práticas [18], onde para um provete com diâmetro de 8mm (D) o raio da ponta do punção (R) deve ser de 1.25mm e o diâmetro do orifício de recepção (d) 4mm. A aresta do orifício de recepção no código de boas práticas

está como um chanfro de 0.2 mm a 45°, contudo a maioria das publicações mais recentes referidas no capítulo 2 utiliza um raio de concordância de 0,5 mm.

Quanto ao material do dispositivo, o código de boas práticas [18] recomenda que as matrizes de aperto do provete e o punção tenham uma dureza de pelo menos 55 HRC (ou 555 HB – tabela de conversão **Anexo 1**), para permitir ensaiar a maior parte dos aços sem sofrer qualquer tipo de deformação que possa influenciar os resultados. O material utilizado no dispositivo do presente trabalho foi o AISI 316 que tem uma dureza de 95 HRB (ou 207 HB - tabela de conversão **Anexo 1**). Optou-se por este material pelas seguintes razões:

- É um material austenítico o que faz com que não fragilize a baixas temperaturas (Figura 3. 2 (a)), e ao mesmo tempo tem uma boa resistência a altas temperaturas (Figura 3. 2 (b)), logo permitirá realizar ensaios numa gama de temperaturas considerável.

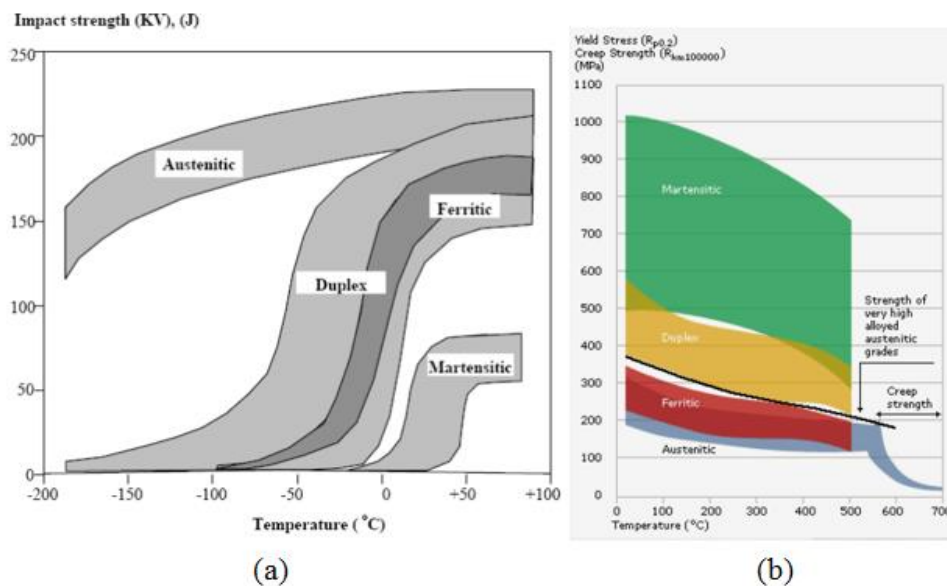


Figura 3. 2 - (a) Tenacidade de diferentes grupos de materiais. (b) Resistência de diferentes grupos de materiais a diferentes temperaturas. Adaptado de [39].

- Além de ter uma dureza inferior à recomendada tem uma dureza razoavelmente superior à do material de ensaio (aço A 335 P11) que tem uma dureza de 163 HB [40].

- É um material razoavelmente fácil de maquinar quando comparado com as ligas de alta resistência.

Na Figura 3. 3, está representada a modelação 3D do dispositivo que foi construído para a realização dos ESP. A modelação foi efetuada com o auxílio do *software Solidworks*, onde também foram elaborados os desenhos técnicos de todas as peças do dispositivo (**Apêndice I**).

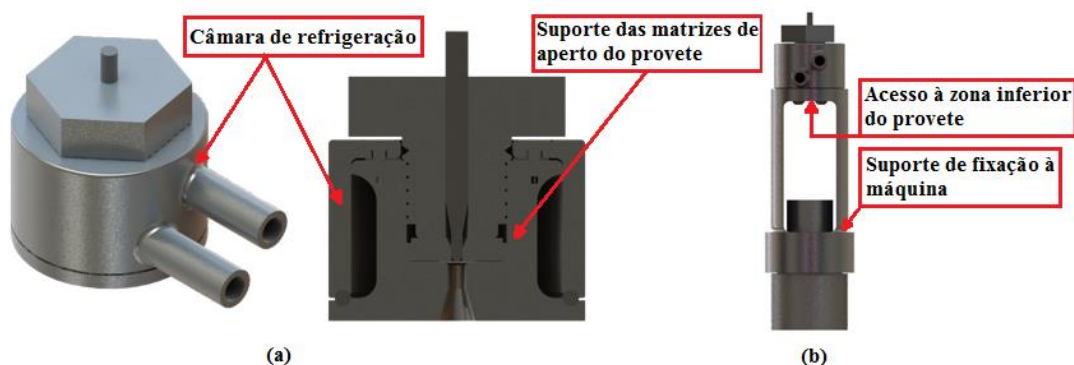


Figura 3. 3 - (a) - Modelação 3D do dispositivo de ESP. (b) - Modelação 3D do Sistema de fixação do dispositivo à máquina.

Este dispositivo foi projetado de forma a permitir efetuar ensaios a altas e baixas temperaturas. Para baixas temperaturas o dispositivo está equipado com uma câmara de refrigeração (Figura 3. 3 (a)) onde poderá circular azoto líquido, e para altas temperaturas a câmara de refrigeração é extraída ficando somente o suporte das matrizes de aperto do provete, que será rodeado por um forno onde irão decorrer os ensaios. Este dispositivo foi projetado para ser utilizado numa máquina de ensaios *Instron 6562*. O suporte de fixação representado na Figura 3. 3 (b) foi projetado de forma a possibilitar o acesso à zona inferior do provete, o que permitirá obter um maior controlo durante o ensaio. Esse controlo pode passar por colocar um endoscópio para monitorizar a deformação do provete, colocar um termopar em contacto com o provete para determinar a temperatura de ensaio, ou ainda colocar um transdutor diferencial variável linear (LVDT) para medir a deflexão do provete.

3.2 Provetes para os ESP

A seleção dos provetes e entalhes para a fase experimental teve como base três itens:

- As conclusões e sugestões referidas nos diversos trabalhos apresentados no capítulo 2;
- Aplicações da técnica de ESP na caracterização de componentes;
- As recomendações do código de boas práticas;

Segundo *K. Turba^a et al*, o entalhe circular destacou-se de forma positiva em relação aos outros, pelo facto de ter apresentado uma simetria radial na distribuição de tensões, que fez com que se aproximasse das condições de deformação plana. Partiu-se da sugestão do autor, no que diz respeito a evitar o modo de carregamento misto, isto é, estudou-se o entalhe por forma a obter uma relação entre as suas dimensões que o façam deformar em modo I e assim obter a tenacidade à fratura em deformação plana. Foram efetuadas algumas simulações numéricas utilizando o método de elementos finitos (MEF) a fim de obter informação sobre o entalhe a otimização da posição do entalhe.

Para se proceder às simulações numéricas foi necessário efetuar um ensaio de tração (ver capítulo 5) ao material retirado do reator a fim de se obter a tensão de cedência, tensão de rotura, módulo de elasticidade e a curva de deformação plástica para definir o material no *software*.

Para a realização das simulações em elementos finitos recorreu-se ao *software Ansys* pelos motivos apresentados no capítulo 4. Começou-se por realizar algumas análises estáticas utilizando o modelo “**Linear Elastic Isotropic Elasticity**” (LEIE), a fim de analisar a distribuição de tensões no provete SP convencional². A malha utilizada foi a “**Hex Dominant**” composta por elementos sólidos (**SOLID 186 – capítulo 4**).

Uma vez que existe contacto entre os vários componentes em estudo, o coeficiente de atrito utilizado entre o provete, punção e matrizes de aperto foi de 0.57, valor

² Um provete SP convencional é um provete com 8 mm de diâmetro e 0.5 mm de espessura como aconselhado no código de boas práticas [18].

mencionado em várias fontes como sendo o coeficiente de atrito do par cinemático aço-aço sem lubrificação [41], [42].

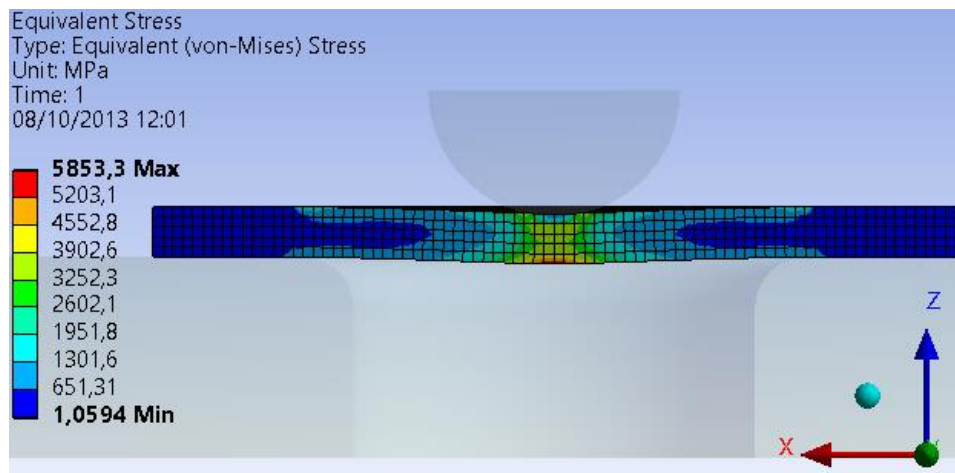


Figura 3. 4 -Distribuição das tensões equivalentes de um provete SP convencional.

A Figura 3. 4, mostra a distribuição das tensões equivalentes de *von-Mises* de um provete SP convencional. Como se pode verificar as maiores tensões aparecem no centro do provete na face inferior, direcionando-se para os pontos de contacto com o punção. À medida que o punção avança a zona de contacto vai-se alterando. Assim para se obter a distribuição de tensões consoante o avanço do punção (ou deformação do provete), partiu-se para uma análise estática mas utilizando um modelo plástico “*Bilinear Isotropic Hardening*” (BLIH), uma vez que dispúnhamos da informação da curva de deformação plástica do material e pelo facto de ser aconselhado para grandes deformações e cargas não-cíclicas, que é o caso [43].

Na Figura 3. 5 encontra-se representada a distribuição das tensões equivalentes de *von-Mises* correspondentes às varias fases de deformação do provete SP. Analisando a figura, verifica-se que a zona de contacto entre o punção e o provete vai-se alterando à medida que o provete se deforma e as tensões máximas tendem a acompanhar a zona do contacto. Deste modo optou-se por colocar o entalhe na zona onde se verificam as tensões máximas quando o provete está sujeito a uma carga de 75% da sua carga máxima. Este valor de carga foi escolhido pelo facto de ser referido noutros trabalhos [24] como sendo aproximadamente a carga correspondente à iniciação da propagação da fenda.

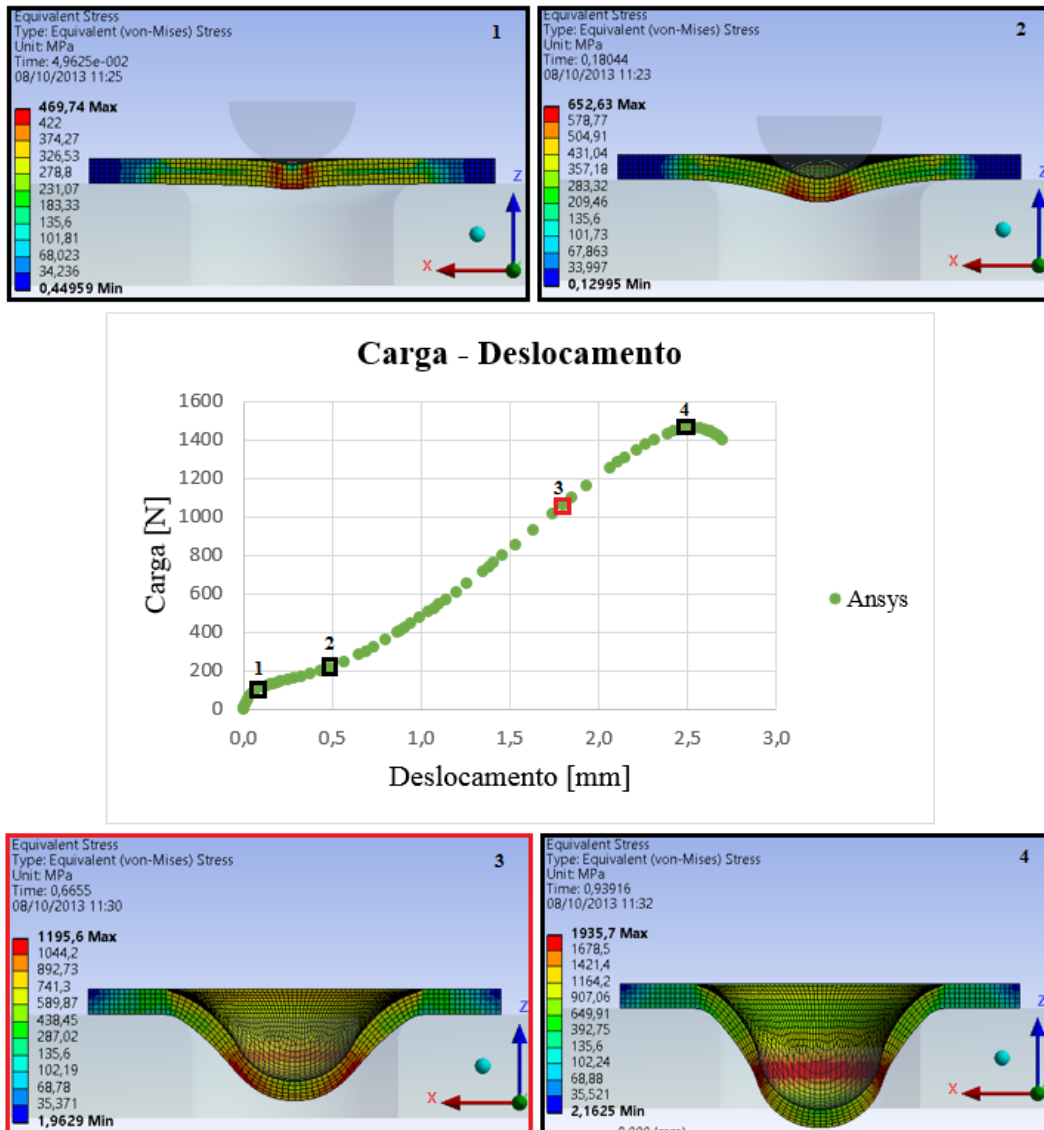


Figura 3.5 - Deformação do provete em diferentes zonas da curva carga-deslocamento.

Assim o diâmetro do entalhe a escolhido é de ≈ 1.6 mm, por forma a localizá-lo na zona das maiores tensões no instante 3 da curva acima. Contudo, verificou-se se o entalhe escolhido (diâmetro 1.6 mm, profundidade 0.175 mm e 60° de abertura) se deformava em modo I ou em modo misto (Modo I + Modo II). Para isso efetuou-se novamente uma análise estática utilizando um modelo BLIH, onde se comparou a deformação do entalhe escolhido acima com o entalhe estudado por *K. Turba^a et al*, que é de 2.5 mm de diâmetro (Figura 3.6).

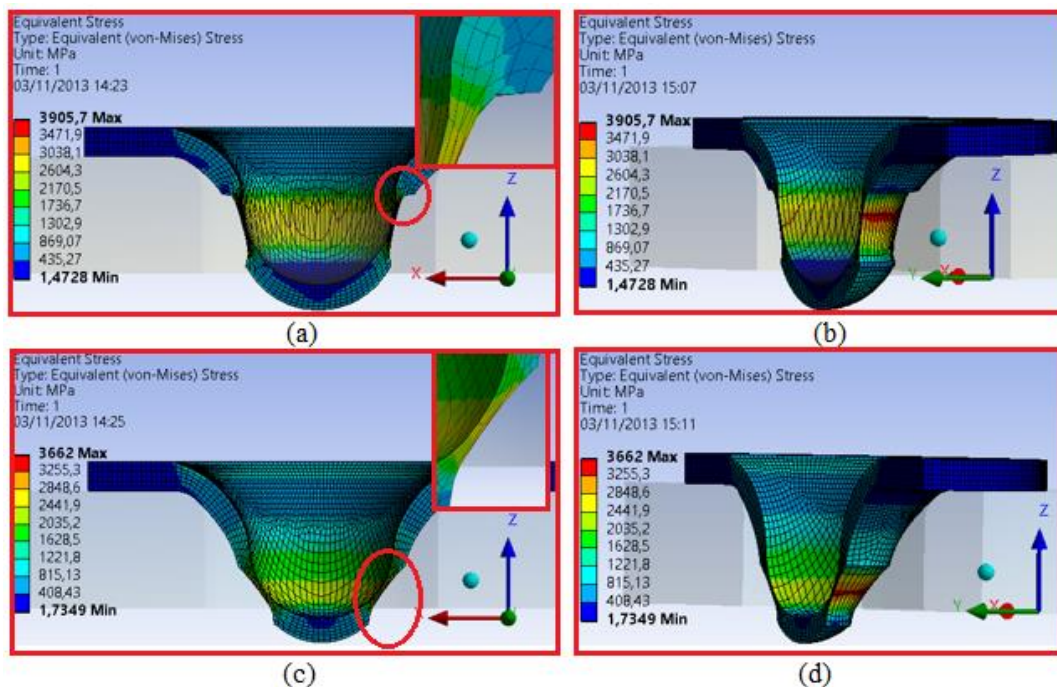


Figura 3. 6 - Deformação plástica dos provetes entalhados. (a) Diâmetro de entalhe D=2.5 mm. (b) Diâmetro de entalhe D=2.5 mm. (c) Diâmetro de entalhe D=1.6 mm. (d) Diâmetro de entalhe D=1.6 mm.

Analisando a Figura 3. 6, podemos concluir que o entalhe obtido tem um comportamento diferente ao do entalhe utilizado em trabalhos anteriores. Como se pode verificar na Figura 3. 6 (a) o provete com o entalhe de 2.5 mm de diâmetro deformou-se em modo misto, isto é, o entalhe começa por se deformar em modo I e depois passa para modo II onde existe corte junto à transição do entalhe com o restante provete Figura 3. 6 (b) (zona onde surgem as tensões máximas). Com isto, demonstrou-se o que *K. Turba^a et al* já tinha concluído anteriormente. Na Figura 3. 6 (c), o provete com entalhe de 1.6 mm de diâmetro deformou-se em apenas modo I e as tensões máximas aparecem no centro do entalhe como mostra a Figura 3. 6 (d).

Selecionou-se também o entalhe linear da Figura 3. 7 (b) não só pelos bons resultados demonstrados anteriormente, mas também pelo facto de ser vantajoso na avaliação das zonas termicamente afetadas pelos cordões de soldadura (ZTA), isto pelo facto de ser possível posicionar o entalhe paralelamente aos cordões de soldadura e assim obter a informação da ZTA.

Por fim, como no código de boas práticas apenas é referido o provete convencional para a estimativa da tensão de cedência, tensão de rotura e tenacidade à fratura, optou-se também por o utilizar.

Os provetes e respetivas dimensões para a fase experimental estão apresentados na Figura 3. 7 e na Tabela 3. 1 respetivamente:

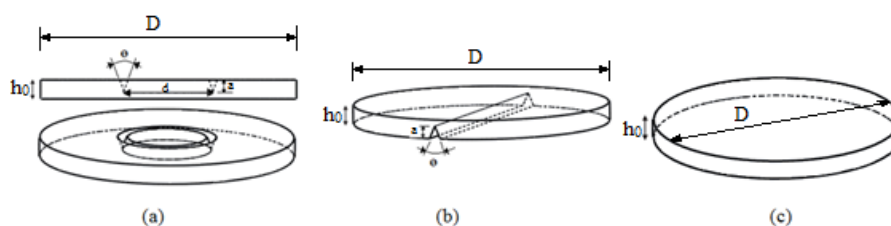


Figura 3. 7 - (a) - Provete com entalhe circular. (b) - Provete com entalhe linear (c) – Provete SP convencional.

Tabela 3. 1 - Dimensões dos provetes e respetivos entalhes.

Dimensões [mm]	Entalhe Circular	Entalhe Linear	Provete SP convencional
h_0	0.5	0.5	0.5
d	1.6	---	---
a	0.175	0.175	---
θ	60°	60°	---
D	8	8	8

As dimensões dos provetes e respetivos entalhes, excepto o diâmetro do entalhe circular, foram adotadas da bibliografia utilizada no presente trabalho. Quanto ao diâmetro do entalhe circular, conseguiu-se uma melhoria face à bibliografia, uma vez que se passou de um modo de carregamento misto (modo II) para modo I, facilitando a determinação da tenacidade à fratura.

4 Simulações Numéricas

Neste capítulo estudou-se o comportamento dos provetes SP quando solicitados. Para isso recorreu-se ao método dos elementos finitos utilizando modelos de comportamento plástico a fim de se obter as respectivas curvas carga-deslocamento, e para melhor compreensão da distribuição de tensões no provete ao longo do ensaio. Também foram efetuadas simulações de Integral J para comparar os valores de energia absorvida por unidade de área na ponta do entalhe, entre os dois tipos de entalhe utilizados.

Para a realização das simulações em elementos finitos recorreu-se ao *software Ansys*, uma vez que dispõe de uma grande variedade de análises e modelos de comportamento dos materiais: isotrópico, ortotrópico, modelos de comportamento plástico com encruamento isotrópico, cinemático etc (Figura 4. 1).

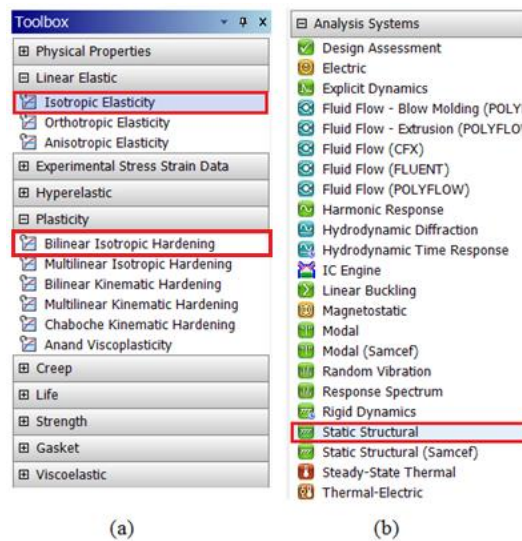


Figura 4. 1 - (a) – Modelos disponíveis no Ansys. (b) – Análises disponíveis no Ansys. [43].

O tipo de malha utilizada nas várias análises foi a “*Hex Dominant*” composta por elementos sólidos (*SOLID 186* - Figura 4. 2) constituídos por 20 nós cada e três graus de liberdade por nó (x, y e z) [43].

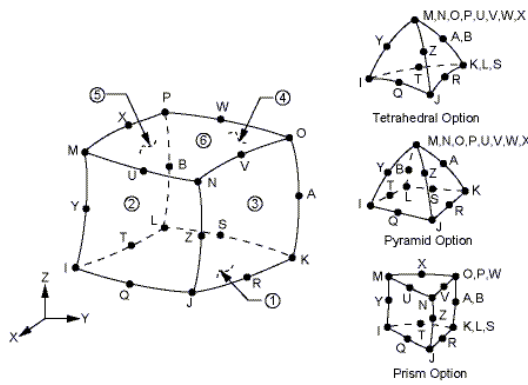


Figura 4. 2 - Elemento SOLID 186 [43].

Foi escolhido este tipo de elemento pelo facto de ter grande capacidade de deformação e ser indicado para análises de plasticidade, hiperelasticidade e grandes deflexões [43].

Efetuuou-se também uma análise de convergência da malha, a fim de determinar o tamanho do elemento que proporcione o menor erro na aproximação numérica. Os gráficos da Figura 4. 3, apresentam os resultados obtidos nos diferentes tamanhos de elemento, para uma análise elásto-plástica

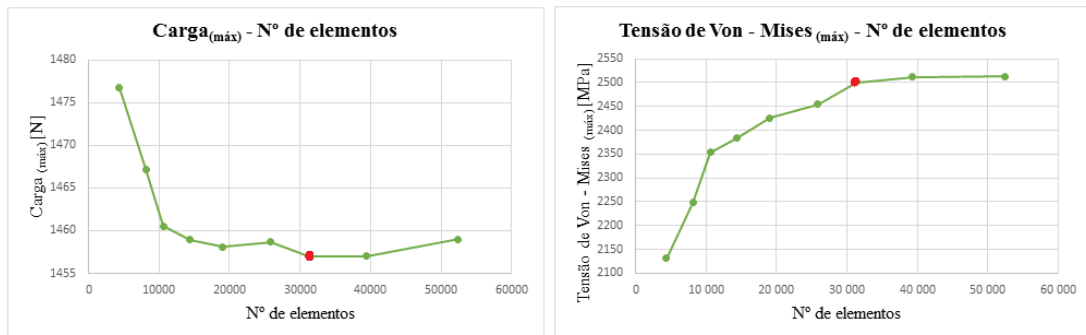


Figura 4. 3 - Curvas de convergência da malha.

Como se pode verificar nos gráficos acima, a partir dos 30000 elementos a tensão de *von-Mises* máxima e a carga máxima do ensaio tendem a ficar constantes. Assim sendo, optou-se por utilizar um elemento com $\approx 0,083$ mm de comprimento (ponto assinalado a vermelho) uma vez que o seu refinamento já não reduziria significativamente o erro numérico. Como já se trata de um elemento muito pequeno a utilização de um elemento ainda menor iria necessitar de uma maior capacidade computacional, o que não se justifica.

No **Apêndice II** encontram-se os dados referentes à análise de convergência da malha.

4.1 Curvas carga-deslocamento dos provetes SP

Para se obter as curvas carga-deslocamento, efetuaram-se análises estáticas dado que a velocidade do ESP é muito reduzida (0.2mm/min). O modelo utilizado foi o BLIH, uma vez que o que se pretende é obter a informação da deformação plástica do provete. Na Figura 4. 4 encontra-se a comparação das curvas obtidas no *Ansys* para os vários provetes com 0.5 mm de espessura.

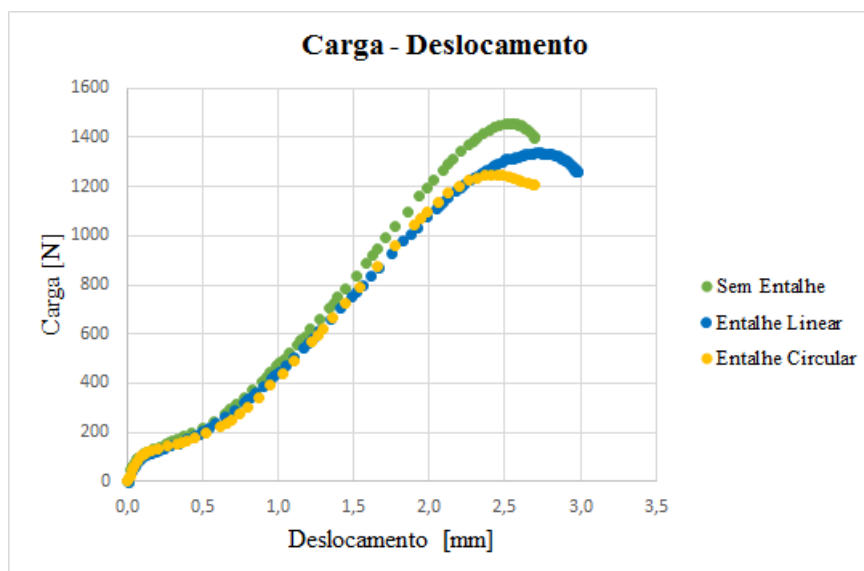


Figura 4. 4 - Curvas carga-deslocamento de ambos entalhes.

Analisando as curvas do gráfico acima, verifica-se que ao introduzir os entalhes nos provetes, estes não sofreram uma redução considerável na sua resistência, o que pode estar associado a dois fatores: o material pode ter um comportamento bastante dúctil, o que faz com que não haja propagação da fenda e o provete rompe apenas por colapso plástico da secção resistente; ou então, os entalhes utilizados não desenvolvem um elevado estado de tensão na sua extremidade, logo, não têm grande influência na resistência do provete dado que o fator de intensidade de tensões é muito baixo.

Apesar do efeito dos entalhes não ser significativo na resistência dos provetes, estes tiveram comportamentos diferentes. Sendo as dimensões de ambos os entalhes exatamente iguais diferindo apenas a sua geometria, o facto do provete com entalhe

circular resistir menos do que o provete com entalhe linear, está relacionado com a geometria do entalhe. Olhando para a distribuição das tensões equivalentes de *von-Mises* do provete sem entalhe (Figura 4. 5 (a)), verifica-se que as tensões máximas aparecem em forma de coroa circular (radialmente simétricas) posicionadas na zona onde o contacto com o punção é maior. Ao utilizar o entalhe circular, este permite posicionar-se de forma a abranger toda essa zona, o que irá intensificar ainda mais essas tensões (Figura 4. 5 (b)) e assim facilitar a propagação das fendas. Quanto ao entalhe linear, a sua geometria não permite posioná-lo de forma a abranger toda a zona crítica do provete sem entalhe, acabando por não ter um efeito tão grande.

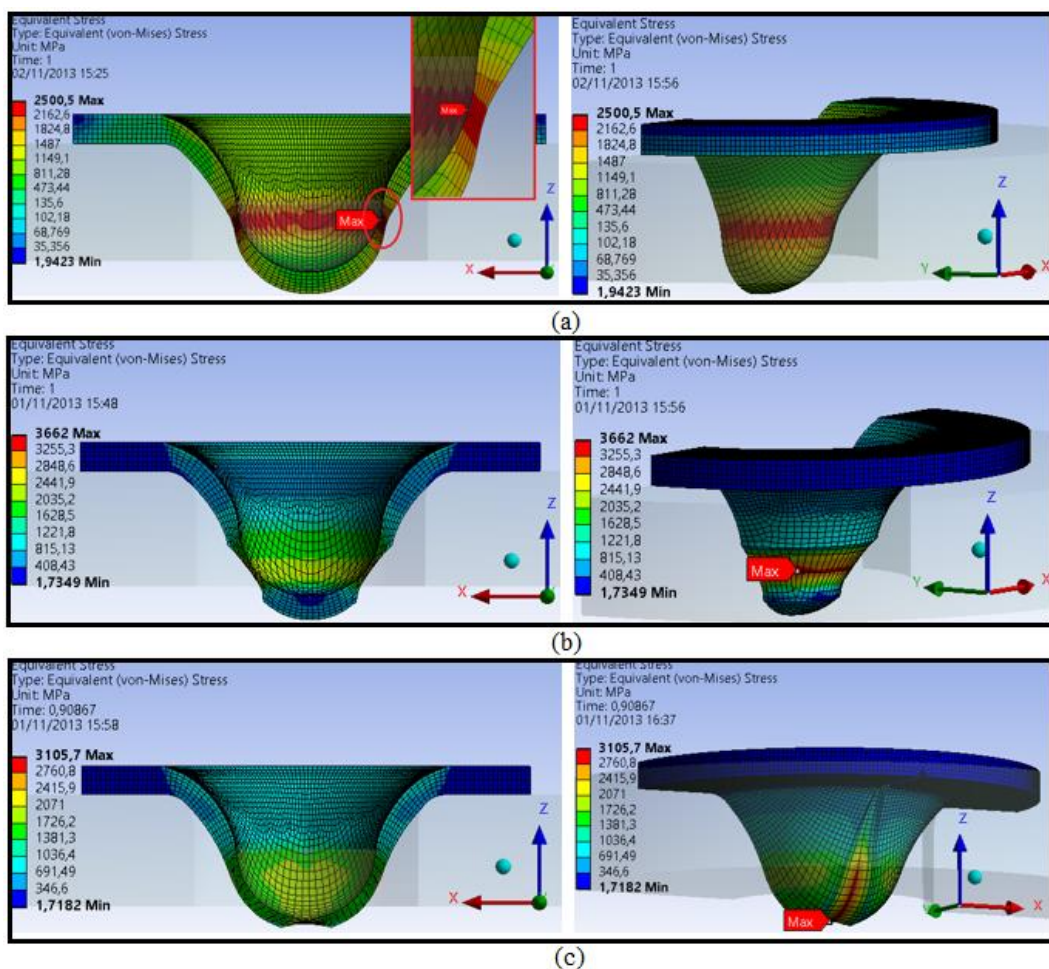


Figura 4. 5 – (a) Distribuição das tensões equivalentes de von-Mises num provete sem entalhe. (b) Distribuição das tensões equivalentes de von-Mises num provete com entalhe circular. (c) Distribuição das tensões equivalentes de von-Mises num provete com entalhe linear.

Comprando ainda a distribuição das tensões nos entalhes, verifica-se que no entalhe circular as tensões máximas aparecem uniformemente em toda a sua extremidade (Figura 4. 5 (b)), já no entalhe linear estas surgem na extremidade do entalhe localizada no centro

provete e tendem a perder intensidade à medida que se afastam do centro do provete (Figura 4. 5 (c)), o que leva a uma maior resistência à propagação de fendas.

4.2 Determinação do integral J

Para se proceder ao cálculo do Integral J a partir do MEF, recorreu-se mais uma vez às potencialidades do *software Ansys* uma vez que já tem implementado o conceito do integral J. A base do cálculo do *Ansys* para determinar este parâmetro, consiste em determinar os deslocamentos nodais em torno da ponta da fenda como demonstra a Figura 4. 6 (a). Existe a possibilidade de efetuar dois tipos de análises: uma bidimensional (2-D) onde a integração é feita apenas numa área delimitada pelo contorno Γ da Figura 4. 6 (b); e uma análise tridimensional (3-D) onde a integração é feita num volume de material delimitado pelo contorno Γ , e pelo comprimento da frente da fenda.

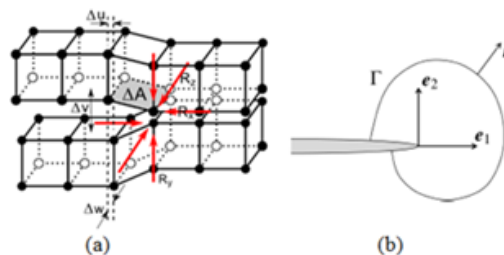


Figura 4. 6 - (a) Esquema da geometria da fenda 3-D. (b) Zona de avaliação dos deslocamentos na ponta da fenda [43].

Neste caso efetuaram-se análises estáticas 3-D utilizando o modelo LEIE, a fim de se obter a energia desenvolvida em toda a frente da fenda. Para isso utilizou-se mais uma vez a malha “*Hex Dominant*” composta pelos elementos sólidos da Figura 4. 2 já que era uma das malhas aconselhadas para o cálculo do integral J [43].

Também se realizou uma análise de convergência da malha a fim de determinar o tamanho do elemento que caracteriza devidamente o campo das tensões elásticas na ponta do entalhe, de modo a obter um valor de integral J com o menor erro possível (no **Apêndice II** encontra-se toda a informação).

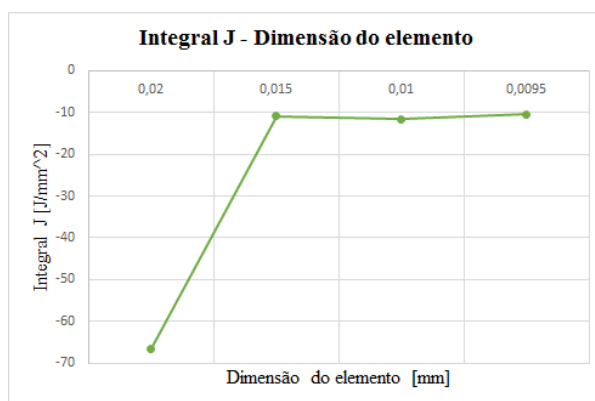


Figura 4. 7 - Análise de convergência da malha.

Como demonstra o gráfico da análise de convergência da malha (Figura 4. 7) a partir do elemento com 15 μ m de comprimento, a energia (integral J) praticamente não varia. Assim sendo, foi este o tamanho do elemento escolhido para determinar o Integral J.

O cálculo do integral J foi efetuado com base num artigo técnico da *Engineering Simulation and Scientific Software* [44] para 75% da carga máxima obtida no gráfico da Figura 4. 4, uma vez que é o valor referido em trabalhos anteriores [24] como sendo aproximadamente a carga correspondente à iniciação da propagação da fenda.

4.2.1 Provete com entalhe linear

No gráfico da Figura 4. 8, está representada a distribuição da energia absorvida pela deformação do material na frente da fenda em J/mm². Dada a simetria do provete a análise foi efetuada em apenas metade do mesmo.

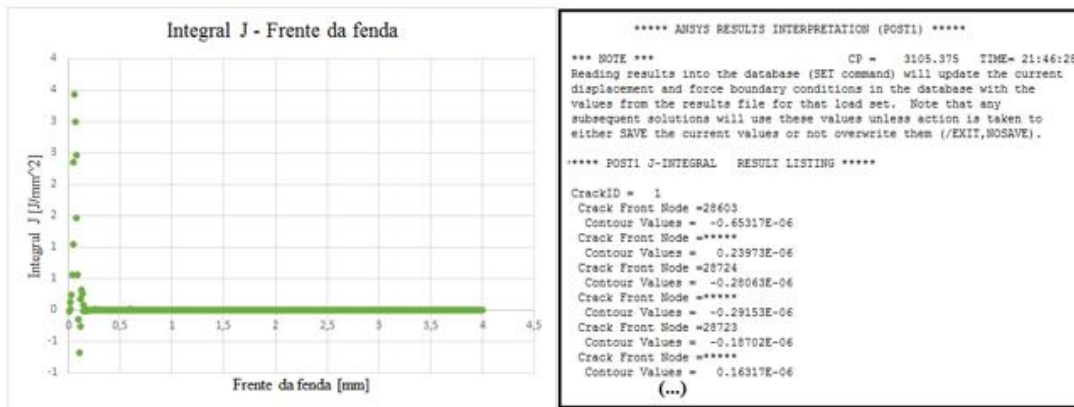


Figura 4. 8 - Integral J na frente da fenda [43].

Como se pode ver no gráfico acima, a energia tende para zero à medida que se afasta do centro do provete. Este decréscimo deve-se ao facto do provete não se deformar uniformemente em todo o seu comprimento como se pode ver na Figura 4. 5 (c). Os valores negativos estão associados aos deslocamentos nodais que surgem em sentido contrario à direção do respetivo referencial do elemento. Na Figura 4. 8, encontra-se representado o gradiente das tensões máximas principais (σ_1) da zona plástica junto à ponta do entalhe.

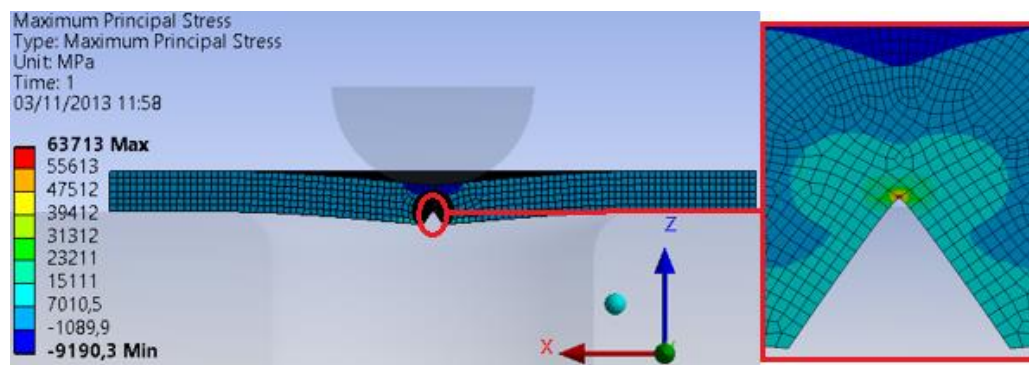


Figura 4. 9 - Gradiente das tensões máximas principais (σ_1).

Analisando a zona plástica da Figura 4. 9 verifica-se que a deformação do provete ocorre em condições de tensão plana, o que se deve, neste caso, à espessura do provete ser muito pequena e daí não ser suficiente para provocar resistência à propagação da fenda.

4.2.2 Provete com entalhe circular

No gráfico da Figura 4. 10, está representada a distribuição da energia absorvida pela deformação do material na frente da fenda em J/mm^2 . Dada a simetria do provete a análise foi efetuada em apenas 1/4 do mesmo.

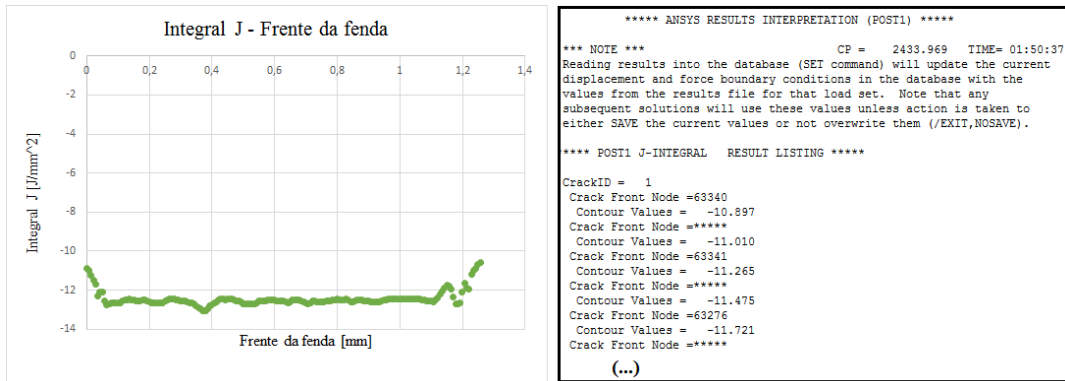


Figura 4. 10 - Integral J na frente da fenda[43].

Mais uma vez se verifica que o entalhe circular tem um comportamento uniforme ao longo do seu comprimento.

Na Figura 4. 11 está representado o gradiente das tensões máximas principais (σ_1) da zona plástica junto à ponta do entalhe.

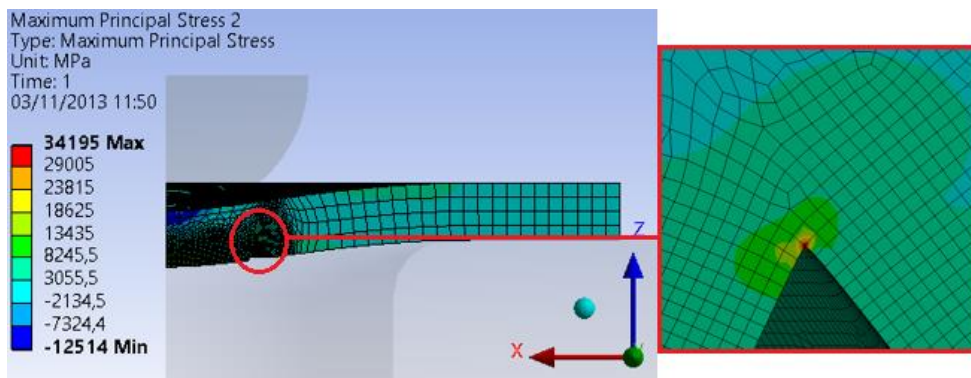


Figura 4. 11 - Gradiente das tensões máximas principais (σ_1).

Olhando para a zona plástica do provete com entalhe circular (Figura 4. 11), verifica-se que este entalhe também se deforma em condições de tensão plana, o que difere do referido por *K. Turba^a et al* (“o entalhe circular deforma-se próximo das condições de deformação plana”).

Do presente capítulo retém-se que o modelo de comportamento plástico utilizado permitiu conhecer a distribuição de tensões ao longo do ensaio, bem como obter as respectivas curvas de carga-deslocamento. Relativamente às simulações de integral J, conseguiu-se identificar o entalhe que possui maior absorção de energia por unidade de área sendo que será necessário mais trabalho a fim de melhorar o modelo utilizado.

5 Fase experimental

Os provetes utilizados no presente trabalho foram retirados de uma tira de material dum reator de uma unidade de *Platforming* de uma refinaria (Figura 5. 1 (a)).

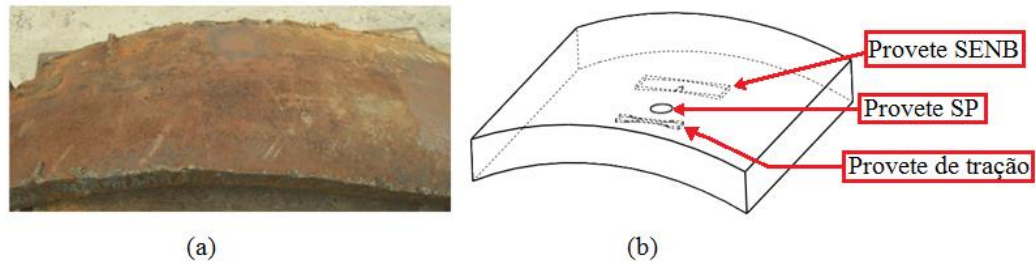


Figura 5. 1 - (a) Material do reator. (b) Esquema da zona e direção da extração dos provetes.

Como se pode verificar na Figura 5. 1 (b) os provetes foram retirados junto à face interior do reator e na direção circunferencial, dado que é a zona mais afetada e a direção mais solicitada.

5.1 Ensaio convencional de tração

Os ensaios de tração (Figura 5. 2) forma realizados segundo a norma ISO 6892-1:2009 (E) [45].

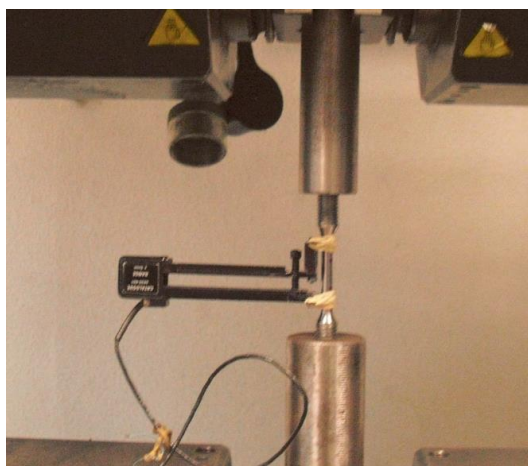


Figura 5. 2 - Ensaio de tração.

Na Tabela 5. 1, encontram-se os resultados obtidos no ensaio de tração. No **Anexo 2** encontra-se a curva de deformação plástica obtida no ensaio.

Tabela 5. 1 - Propriedades do material retirado do reator.

Ensaio	Tensão de Ruptura (MPa)	Tensão de Cedência 0,2% (MPa)	Módulo de Elasticidade (MPa)
Tração	525.6	310.5	200052

5.2 Ensaio convencional de flexão a três pontos

Como referido anteriormente foram efetuados ensaios de flexão a três pontos utilizando um provete *Single Edge Notched Bend* (SENB) (Figura 5. 3 (a)) a fim de determinar a tenacidade à fratura do aço A 335 P11. O parâmetro escolhido para a caracterizar foi o integral J, não só pelo facto de se tratar de um material dúctil, mas também para poder ser comparável com os resultados dos ESP.

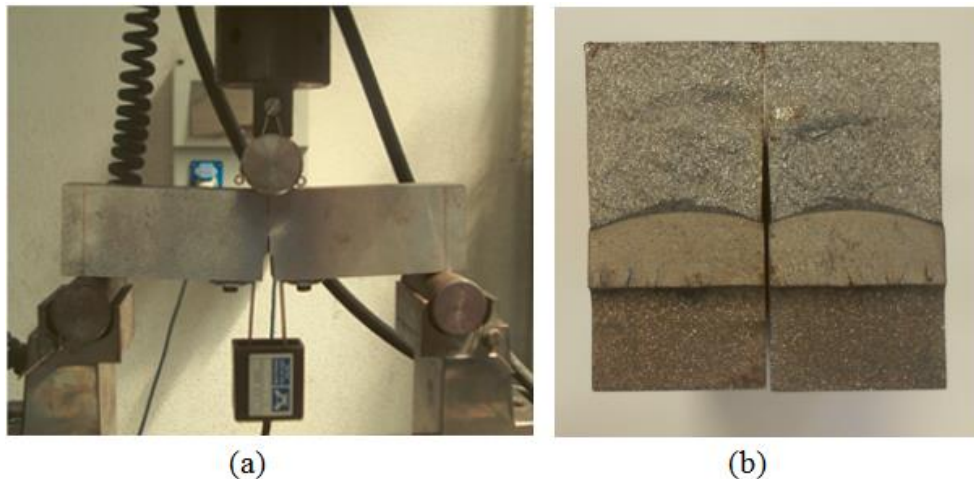


Figura 5. 3 - (a) Ensaio de flexão a três pontos (SENB). (b) Superfície de fratura.

Os ensaios realizaram-se com base na norma BS 7448: Part 1:1991 [46].

Nos ensaios foram obtidos os seguintes resultados:

Ensaio (22 °C)	Integral J [J/mm ²]
Ensaio 1	0.369
Ensaio 2	0.255

5.3 Ensaio convencional de impacto Charpy V

Foram também efetuados ensaios de impacto Charpy V à temperatura ambiente e a baixas temperaturas a fim de obter o comportamento do material. Os ensaios foram realizados com base na norma ISO 148-1:2009 (E) [47].

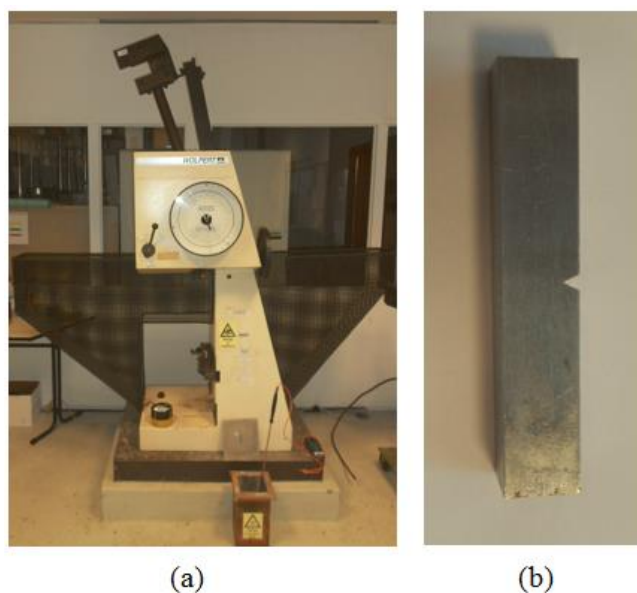


Figura 5. 4 - (a) Máquina de ensaio de impacto Charpy V. Provete do ensaio de impacto Charpy V.

Os resultados obtidos nos ensaios encontram-se na Tabela 5. 3, onde se pode constatar que o aço A335 P11 fragiliza a baixa temperatura.

Ensaio	Energia de impacto (J) a	
	-30°C	22°C
Ensaio 1	3	39
Ensaio 2	10	48
Ensaio 3	7	39

5.4 Ensaio *Small Punch*

5.4.1 Preparação dos provetes SP

Os provetes da Figura 5. 5, foram maquinados a partir de processos de corte por arranque de aparas e os entalhes obtidos por eletroerosão.

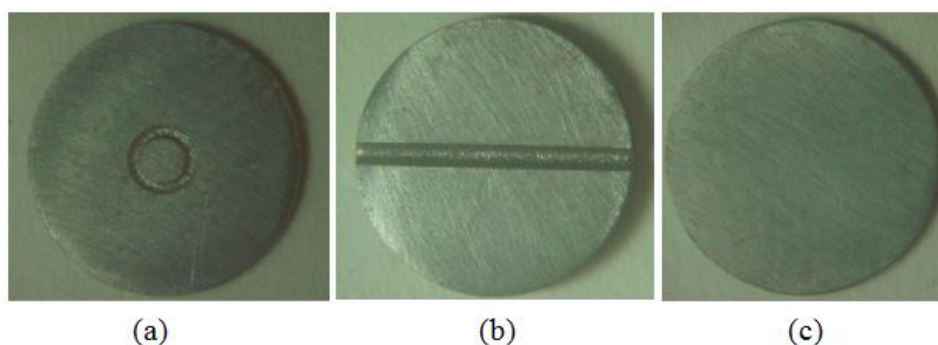


Figura 5. 5 - Provetes utilizados na fase experimental. (a) Provette com entalhe circular. (b) Provete com entalhe linear. (c) Provete SP convencional.

A fim de minimizar as tensões nas faces do provete provocadas pela maquinagem, estes foram obtidos com uma espessura superior à espessura final (cerca de 1.1 da espessura final). Posteriormente foram polidos (Figura 5. 6 (a)) com lixas de grão P 500 e P 1200, a fim de acertar a espessura com uma tolerância de $\pm 1\%$ da sua espessura final (Figura 5. 6 (b)), como recomendado no código de boas práticas [18].



Figura 5. 6 - (a) Máquina de polir. (b) Micrómetro utilizado para o controlo dimensional da espessura.

Nota: Todos os dados referentes ao controlo dimensional dos provetes utilizados encontram-se no Apêndice III.

5.4.2 Equipamento utilizado nos ESP

A instrumentação dos ESP foi efetuada de acordo com as recomendações do código de boas práticas [18], as quais se resumem seguidamente:

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

Começando pelo controlo da carga, a máquina utilizada nos ensaios (*Instron 6562*) encontrava-se equipada com uma célula de 100 kN, que é uma carga muito elevada quando comparada com as cargas necessárias para os ESP ($\approx 3\text{kN}$). Ao utilizar-se esta célula de carga nos ensaios SP, iríamos estar a introduzir um erro considerável na medição da carga, uma vez que a gama de forças obtidas nos ESP são bastante inferiores à gama de medição da célula de carga da máquina. Assim foi necessário adaptar na máquina uma célula carga com uma gama de medição menor. Uma vez que no laboratório não existia nenhuma célula de carga com a gama de medição próxima da necessária para os ESP, foi construído o anel dinamométrico da Figura 5. 7 a fim de se obter uma maior precisão na medição da carga (gama de medição do anel de 0 a 3kN).



Figura 5. 7 - Equipamento para o ESP.

No **Apêndice IV** seguem os principais procedimentos da construção do anel dinamométrico bem como os dados da sua verificação.

Ao utilizar o anel dinamométrico, o controlo do deslocamento do punção não pôde ser feito através da máquina, uma vez que iria contabilizar a deformação do anel dinamométrico. Com isto foi necessário adaptar um extensómetro dinâmico ao dispositivo, como se pode ver na Figura 5. 7. Este extensómetro funciona à compressão e tem uma precisão de ± 0.0007 mm (a amplitude máxima do erro é indicada no **Anexo 3** página 4 medição no sentido ascendente). Uma vez que os dados do extensómetro foram adquiridos a partir de uma placa de aquisição de dados para o Lab-View, foi necessário efetuar a verificação do extensómetro a fim de se obter a equação para transformar os volts adquiridos pelo Lab-View para milímetros (**Anexo 4**).

Para a medição da temperatura utilizou-se um termopar do tipo T (Figura 5. 8) uma vez que a sua gama de medição vai de -180 °C a 370 °C (**Anexo 5**).



Figura 5. 8 - Termopar do tipo T.

Como se pode ver na Figura 5. 8, o termopar foi colocado em contacto com a face inferior do provete (secção de ensaio) como recomendado no código de boas práticas [18]. A aquisição dos dados da temperatura também foi efetuada a partir de uma placa de aquisição de dados para o Lab-View, mas neste caso a placa já se encontrava preparada para adquirir temperaturas, não necessitando de conversão.

Para a execução dos ensaios a baixas temperaturas, utilizou-se azoto líquido a passar no interior da câmara de refrigeração. Para insuflar o azoto na câmara utilizou-se um

soprador (Figura 5. 9) que permitiu controlar a temperatura de ensaio consoante o caudal de azoto insuflado.











Figura 5. 9 - Soprador de Azoto.

5.4.3 Plano experimental dos ESP

Na Tabela 5. 4, encontra-se a descrição dos ESP realizados na fase experimental do presente trabalho.

Tabela 5. 4 – ESP realizados.

Tipo de provete	Espessura	Temperatura de ensaio	Tipo de ensaio	Nº de Ensaios
	0.5 mm	22°C	Contínuo	3
	0.5 mm	22°C	Contínuo	2
	0.5 mm	22°C	Contínuo	2
	0.5 mm	22°C	Interrompido	2
	0.5 mm	22°C	Interrompido	2
	0.5 mm	-130°C	Contínuo	2

	0.5 mm	-130°C	Contínuo	2
	0.5 mm	-130°C	Contínuo	2

Nota: Por uma questão de organização os provetes foram numerados um a um consoante as suas características e condições de ensaio (**Apêndice III**).

Todos os ensaios foram realizados em controlo de posição com uma velocidade de 0.2 mm/min como recomendado no código de boas práticas [18].

5.4.4 Resultados e cálculo das propriedades

- ❖ Ensaio dos provetes sem entalhe com 0.5 mm de espessura à temperatura ambiente (Figura 5. 10).

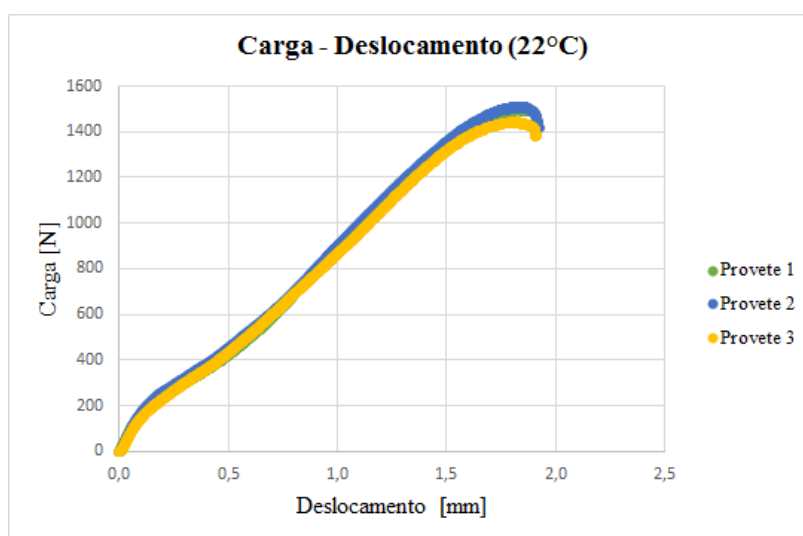


Figura 5. 10 - Curvas carga-deslocamento dos provetes sem entalhe e 0.5 mm de espessura.

Como se pode verificar na Figura 5. 10, as curvas obtidas nos provetes sem entalhe demonstram uma boa repetibilidade e sensibilidade à deformação, uma vez que estão bem explicitas as fases de deformação do provete demonstradas por *BaiK et al.*

Devido à repetibilidade dos ensaios, apenas serão calculadas as propriedades mecânicas para a curva referente ao provete 3, pelo facto de ter sido o provete que rompeu com menor carga.

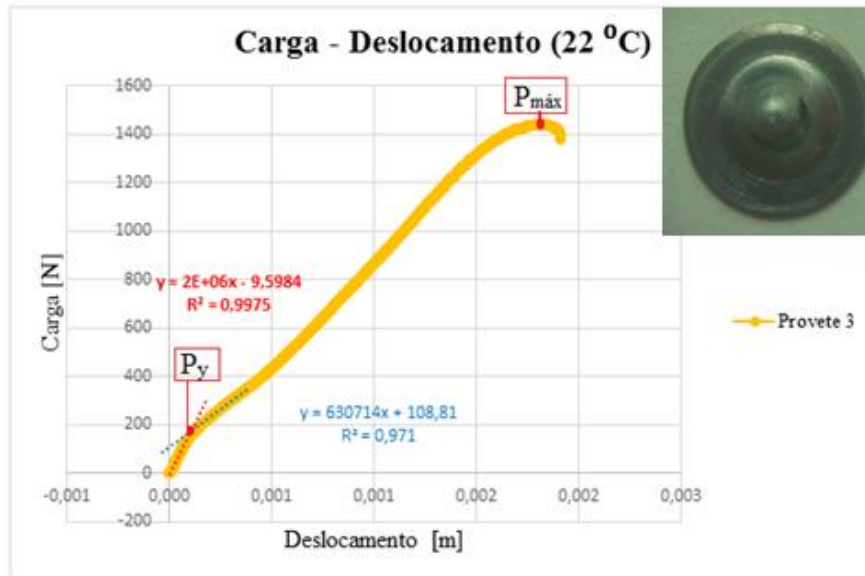


Figura 5. 11 - Curva carga deslocamento do provete 3.

Aplicando as formulas desenvolvidas por *Mao et al*, determinou-se a tensão de rotura (Eq. 17), tensão de cedência (Eq. 16) e tenacidade à fratura (Eq. 20):

➤ Tensão de rotura:

Sendo $P_{m\acute{a}x} = 1443.157 \text{ N} = 1.4443157 \text{ kN}$

$$\sigma_{uts} = 130 \left(\frac{P_{max}}{t_0^2} \right) - 320 = 130 \left(\frac{1.4443157}{0.496^2} \right) - 320 = 442.59 \text{ MPa}$$

➤ Tensão de cedência:

Sendo $P_y = 163.35 \text{ N} = 0.16335 \text{ kN}$

$$\sigma_y = 360 \left(\frac{P_y}{t_0^2} \right) = 360 \left(\frac{0.16335}{0.496^2} \right) = 239.03 \text{ MPa}$$

➤ Tenacidade à fratura (Integral J):

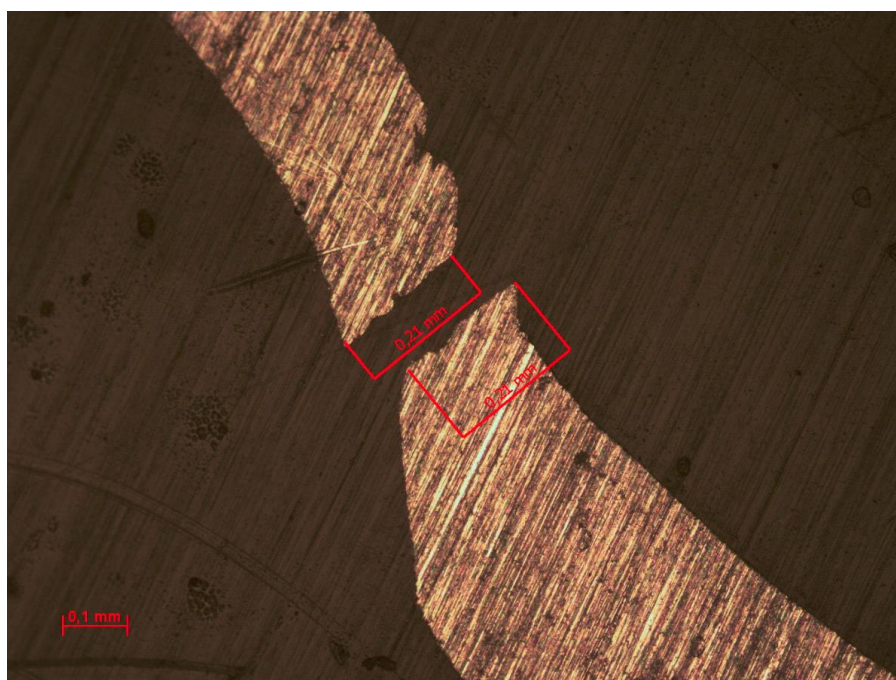


Figura 5. 12 - Vista em corte da secção transversal do provete 3.

Sendo que $t_0 = 0.496$ mm (Apêndice III) e $t = 0.21$ mm (Figura 5. 12) então:

$$\varepsilon_{qf} = \ln \frac{t_0}{t}$$

$$J_{IC} = 345 \times \varepsilon_{qf} - 113 = 345 \ln \left(\frac{0.496}{0.21} \right) - 113 = 183.52 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^2} = 0.184 \frac{\text{J}}{\text{mm}^2}$$

Na Tabela 5. 5, está a comparação entre os resultados obtidos por métodos convencionais e por ensaios miniatura SP.

Tabela 5. 5 - Comparação dos resultados obtidos pelos métodos convencionais e pelos ESP.

Método de ensaio	Tensão de Ruptura [MPa]	Tensão de Cedência 0,2% [MPa]	Tenacidade à fratura Integral J [J/mm ²]
Convencional	525.6	310.5	0.255 e 0.369
SP-Provete 3	442.59	239.03	0.184

A diferença de resultados pode dever-se ao facto das constantes usadas nos cálculos não serem indicadas para o aço A335 P11, uma vez que este tem 1% de Crómio e 0.5% de Molibdénio e as constantes usadas foram determinadas para aços com maiores percentagens de Crómio e de Molibdénio.

- ❖ Ensaio dos provetes sem entalhe com 0.5 mm de espessura a baixa temperatura (Figura 5. 13).

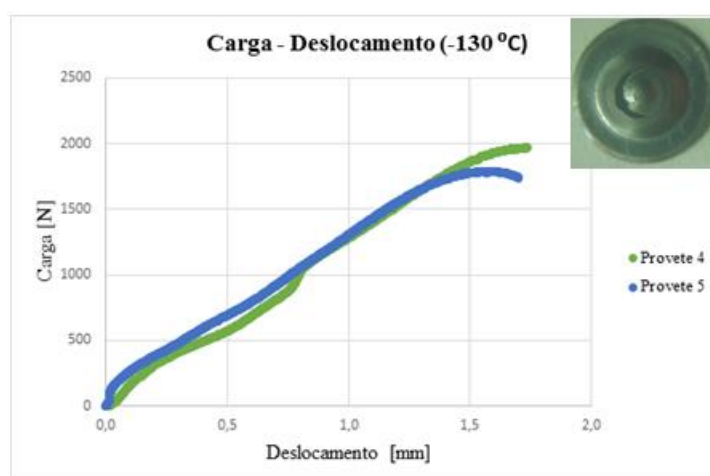


Figura 5. 13 - Curvas carga-deslocamento dos provetes sem entalhe e 0.5 mm de espessura.

Comparando as curvas da Figura 5. 13 com as curvas da Figura 5. 10, verifica-se que as cargas máximas aumentaram significativamente e o deslocamento correspondente à carga máxima diminuiu. Verificou-se também que o provete não rompeu de forma frágil, o que diverge da constatação feita no ensaio de impacto Charpy V, em que o material a -30°C já tinha um comportamento bastante frágil. Isto pode ser explicado pelo facto dos ESP a baixa temperatura não terem sido efetuados nas condições ideais, isto porque quando se iniciou o processo de arrefecimento, e devido à diferença de temperatura entre o meio ambiente e o dispositivo de ensaio, formou-se gelo em torno dos componentes, nomeadamente em torno do punção de carregamento como mostra a Figura 5. 14. Assim houve um aumento considerável do atrito entre o punção e o orifício do parafuso de aperto.

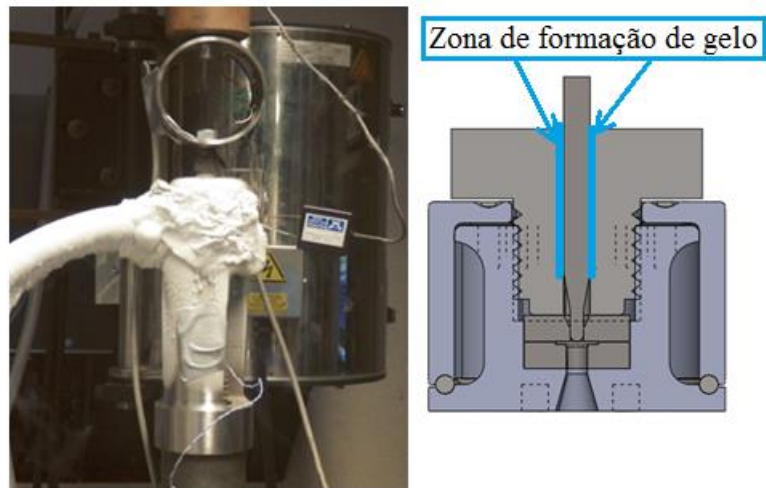


Figura 5. 14 - ESP a baixa temperatura.

Sendo assim os resultados obtidos a baixa temperatura não servem para caracterizar o material.

- ❖ Ensaio dos provetes com entalhe circular e 0.5 mm de espessura à temperatura ambiente (Figura 5. 15).

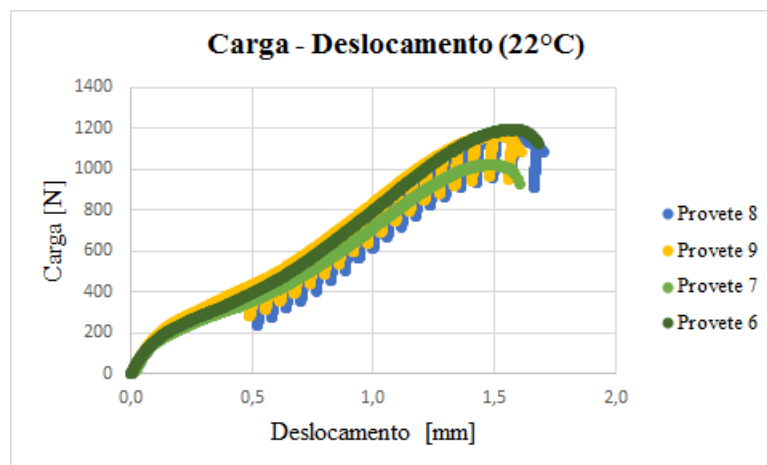


Figura 5. 15 - Curvas carga-deslocamento dos provetes com entalhe circular e 0.5 mm de espessura.

Na Figura 5. 15, encontram-se as curvas obtidas nos dois métodos de ensaio utilizados. Os provetes 8 e 9 foram ensaiados utilizando o método das cargas e descargas utilizado por *I.I. Cuesta et al*, a fim de determinar o ponto correspondente à iniciação da fenda. Já os provetes 6 e 7 foram ensaiados com o procedimento normal, isto é, sem descargas. O objetivo de efetuar ensaios com os dois métodos diferentes foi apenas para comparar os resultados de ambos e assim verificar se ao introduzir as descargas a curva

se iria alterar. Com isto pode-se concluir que não existe alteração das curvas obtidas pelo método das cargas e descargas.

Mais uma vez não existe dispersão significativa entre os resultados dos provetes com entalhe circular, assim sendo, será apenas calculada a tenacidade à fratura para o provete 8.

Para o cálculo da tenacidade à fratura, utilizou-se a equação proposta por C. Rodríguez *et al* (Eq. 46), a qual contabiliza a energia absorvida até ao ponto de iniciação da fenda por unidade de área. Esta energia (W_{ini}) vem em joules e é determinada a partir da área sob a curva carga-deslocamento até ao ponto correspondente à iniciação da fenda (P_{ini} ; d_{ini}).

Analisando os declives das retas resultantes das descargas (Figura 5. 16) determina-se o ponto de iniciação da fenda. Este ponto corresponde à zona onde a mudança do declive é mais acentuada, uma vez que estes declives correspondem à flexibilidade do provete, assim, quando a fenda se inicia o provete perde flexibilidade e imediatamente o declive altera-se.

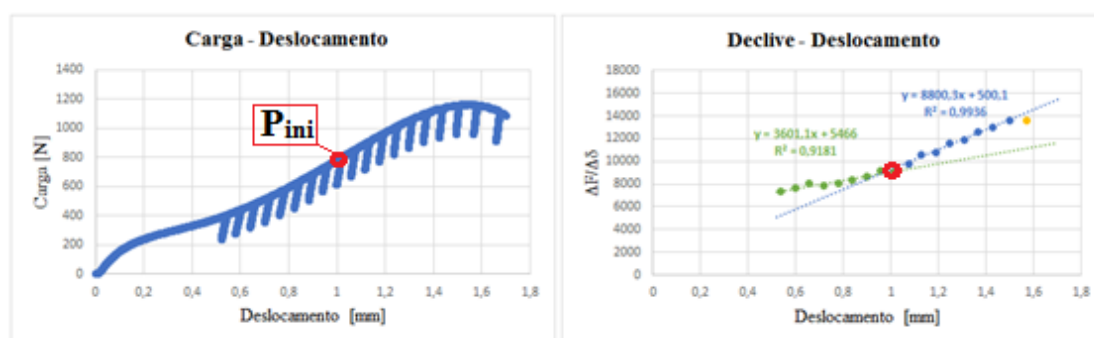


Figura 5. 16 - Ponto de iniciação da fenda do provete 8.

Como se pode verificar na Figura 5. 16, existe claramente um ponto de mudança de declive. Este ponto corresponde à carga $P_{ini} = 795.28$ N e deslocamento $d_{ini} 1.02$ mm.

Sendo assim a energia absorvida até ao ponto de iniciação da fenda do provete 8 é dada pela área representada na Figura 5. 17.

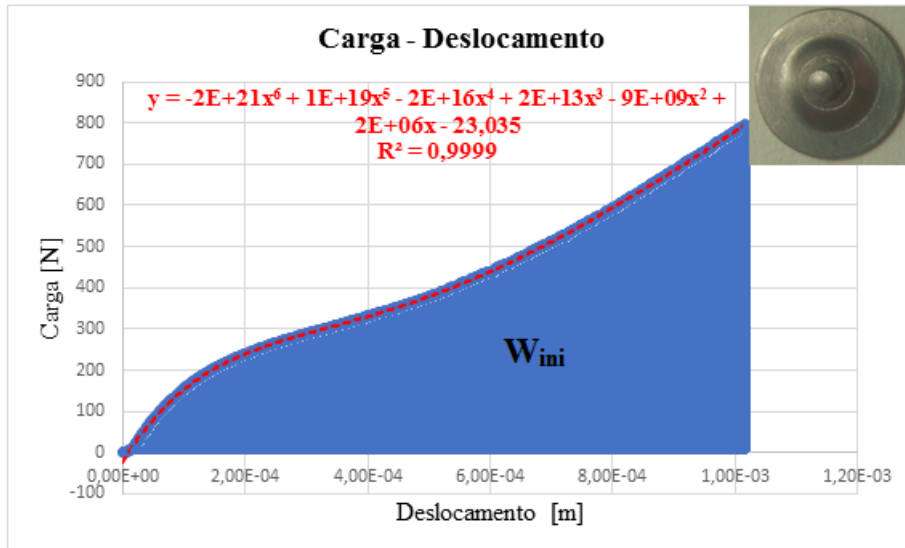


Figura 5. 17 - Energia absorvida até ao ponto de iniciação da fenda do provete 8.

➤ Cálculo da tenacidade à fratura Integral J:

Então a energia W_{ini} é dada pela seguinte equação:

$$W_{ini} = \int_0^{0.00102} -2E^{21}x^2 + 1E^{19}x^5 - 2E^{16}x^4 + 2E^{13}x^3 - 9E^9x^2 + 2E^6x - 23.035 \, dx = 0.373 \, \text{J}$$

Utilizando a constante K_{SP} determinada por *C. Rodríguez et al*, a tenacidade à fratura é:

$$J_{ini} = K_{SP} \left[\frac{W_{ini}}{(t-a)^2} \right] = 0.0485 \left[\frac{0.373}{(0.501 - 0.175)^2} \right] = 0.17 \, \frac{\text{J}}{\text{mm}^2}$$

Comparando a tenacidade à fratura obtida a partir do provete 8 com os resultados convencionais (Tabela 5. 6), verifica-se uma diferença significativa. Esta diferença pode dever-se ao facto de se ter utilizado a constante K_{SP} determinada por *C. Rodríguez et al*, uma vez que esta foi determinada para caracterizar um entalhe linear.

Tabela 5. 6 - Comparação dos resultados convencionais com os SP.

Ensaio	Integral J [J/mm ²]
Convencional	0.369 e 0.255
SP-Provete 8	0.17

- ❖ Ensaio dos provetes com entalhe circular e 0.5 mm de espessura a baixa temperatura (Figura 5. 18).

Nestes ensaios foi aplicado um pouco de lubrificante WD-40 na zona entre o punção e o orifício do parafuso de aperto. O atrito verificado anteriormente diminuiu significativamente, mas mesmo assim, o lubrificante à medida que a temperatura diminuía tornava-se mais denso ficando em forma de pasta.

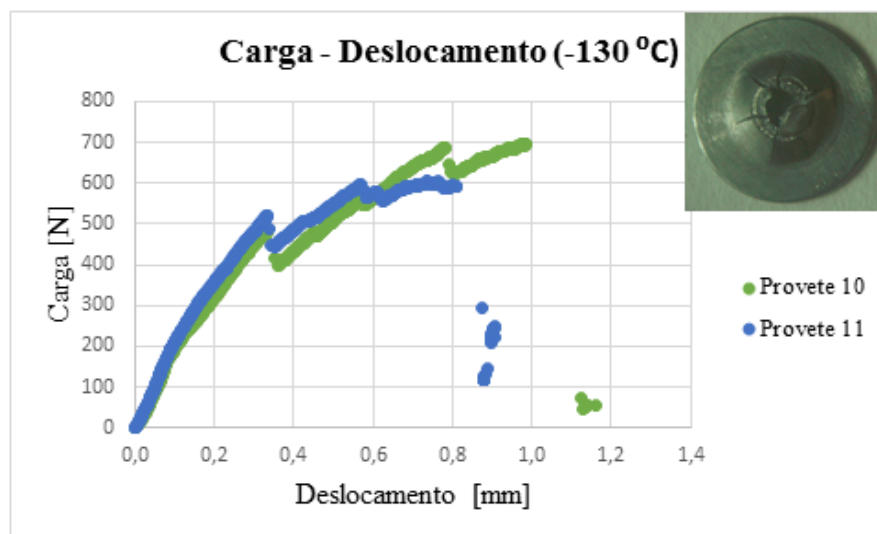


Figura 5. 18 - Curvas carga-deslocamento dos provetes com entalhe circular e 0.5 mm espessura.

Como se pode verifica na Figura 5. 18, o provete com entalhe circular rompeu fragilmente, o que vai ao encontro daquilo que se verificou no ensaio de impacto Charpy V, em que o aço A335 P11 a baixas temperaturas comporta-se de forma frágil.

As curvas obtidas (Figura 5. 18) têm uma configuração típica de um comportamento frágil, onde se verificam os **“Pop-ins”** referidos na norma BS: 7448: Part: 1991, que surgem das propagações instantâneas das fendas.

- ❖ Ensaio dos provetes com entalhe linear e 0.5 mm de espessura à temperatura ambiente (Figura 5. 19).

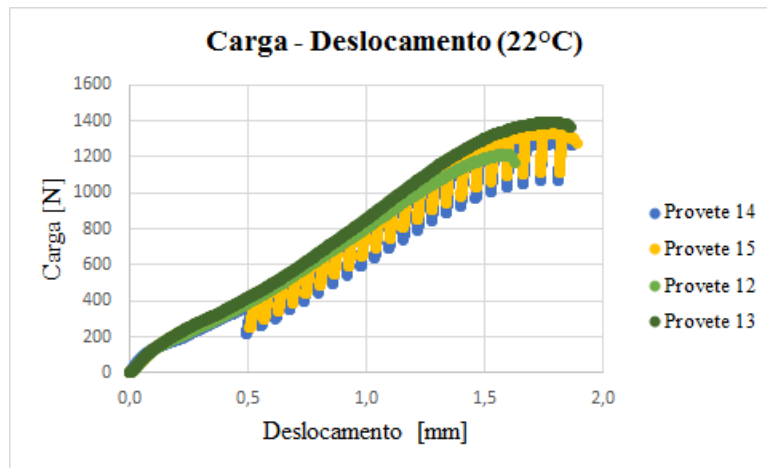


Figura 5. 19 -Curvas carga-deslocamento dos provetes com entalhe linear e 0.5 mm de espessura.

Como se pode verificar mais uma vez, as curvas obtidas nos provetes com entalhe linear (Figura 5. 19) foram bastante coerentes, assim sendo a tenacidade à fratura será somente calculada para o provete 14.

Utilizando o procedimento de ensaio do provete 8 acima mencionado, determinou-se a tenacidade à fratura para o provete 14.

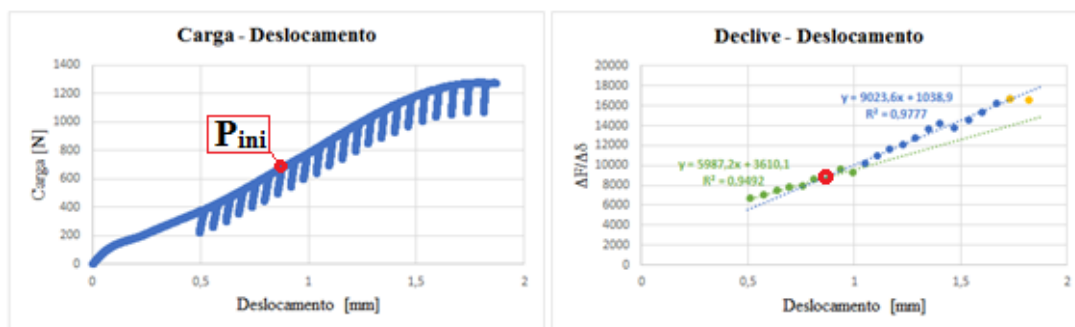


Figura 5. 20 - Ponto de iniciação da fenda do provete 14.

Como se pode verificar na Figura 5. 20 existe claramente um ponto de mudança de declive que corresponde à carga $P_{ini} = 651,88$ N e deslocamento $d_{ini} = 0,8468$ mm.

Sendo assim a energia absorvida até ao ponto de iniciação da fenda do provete 14 é dada pela área representada na Figura 5. 21.

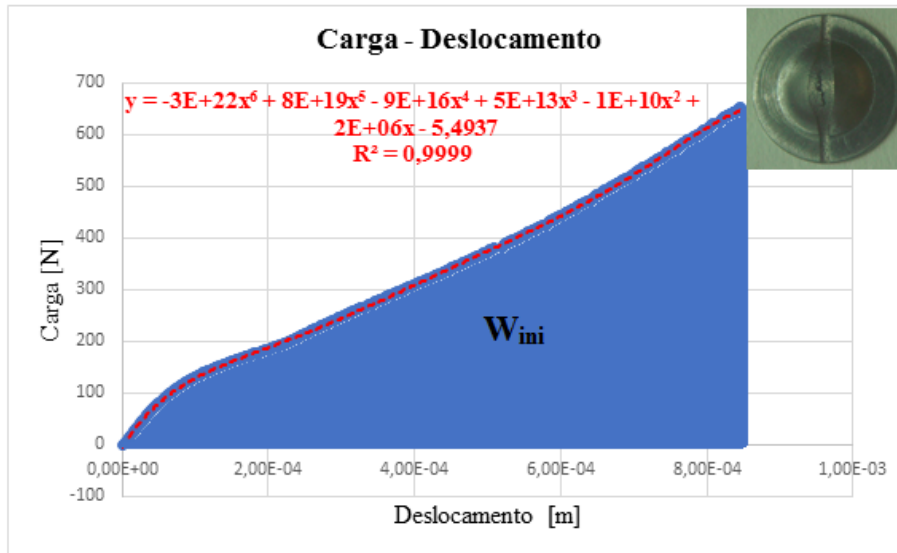


Figura 5. 21 - Energia absorvida até ao ponto de iniciação da fenda do provete 14.

➤ Cálculo da tenacidade à fratura Integral J:

Então a energia W_{ini} é dada pela seguinte equação:

$$W_{ini} = \int_0^{0.0008468} (-3E^{22}x^6 + 8E^{19}x^5 - 9E^{16}x^4 + 5E^{13}x^3 - 1E^{10}x^2 + 2E^6x - 5.4937) dx = 0.856 \text{ J}$$

Utilizando a constante K_{SP} determinada por *C. Rodríguez et al*, a tenacidade à fratura é:

$$J_{ini} = K_{SP} \left[\frac{W_{ini}}{(t-a)^2} \right] = 0.0485 \left[\frac{0.856}{(0.502 - 0.175)^2} \right] = 0.388 \frac{\text{J}}{\text{mm}^2}$$

Comparando a tenacidade à fratura obtida a partir do provete SP 14 com os resultados convencionais (Tabela 5. 7), verifica-se que estão muito próximos. Isto pode dever-se ao facto da constante de proporcionalidade das características geométricas do provete (K_{SP}) determinada por *C. Rodríguez et al*, caracterizar devidamente o entalhe utilizado no presente trabalho, uma vez que ele utilizou um entalhe semelhante.

Tabela 5. 7 - Comparação dos resultados convencionais com os SP.

Ensaio	Integral J [J/mm^2]
Convencional	0.369 e 0.255
SP-Provete 14	0.388

- ❖ Ensaio dos provetes com entalhe linear e 0.5 mm de espessura a baixa temperatura (Figura 5. 22).

Utilizando o mesmo procedimento de ensaio acima referido (nos provetes com entalhe circular a baixa temperatura), obteve-se as curvas da Figura 5. 22.

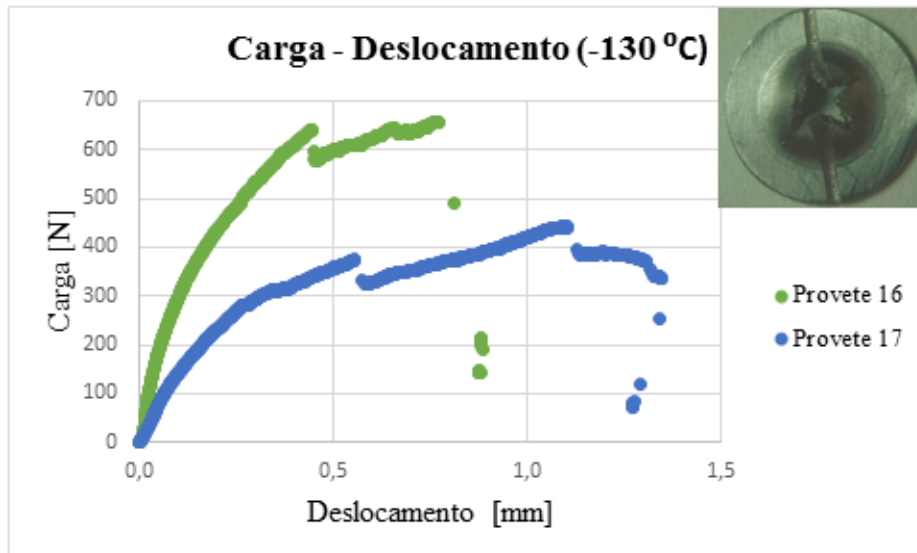


Figura 5. 22 - Curvas carga-deslocamento dos provetes com entalhe linear e 0.5 mm de espessura

Mais uma vez verificou-se um comportamento frágil, contudo existe alguma dispersão entre as curvas. Esta dispersão pode dever-se ao aumento do atrito, ou então, às irregularidades presentes no entalhe mecânico como se pode ver na Figura 5. 23.

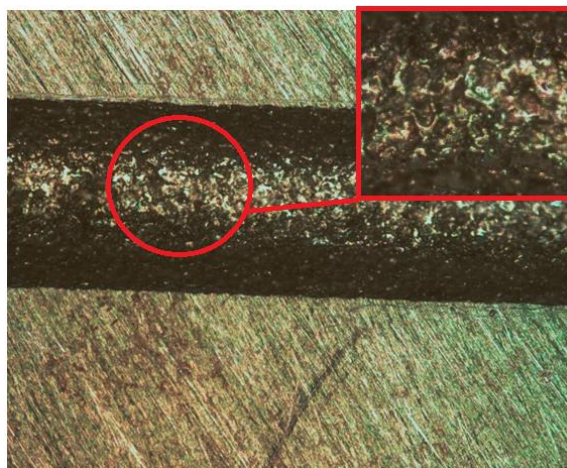


Figura 5. 23 - Entalhe mecânico.

5.4.5 Comparação entre os resultados experimentais e os numéricos

A Figura 5. 24, apresenta a comparação entre o modelo de elementos finitos obtido a partir do *software Ansys* e os provetes ensaiados experimentalmente. A Figura 5. 24 (a) é referente ao provete sem entalhe, a Figura 5. 24 (b) ao provete com entalhe circular e a Figura 5. 24 (c) ao provete com entalhe linear.

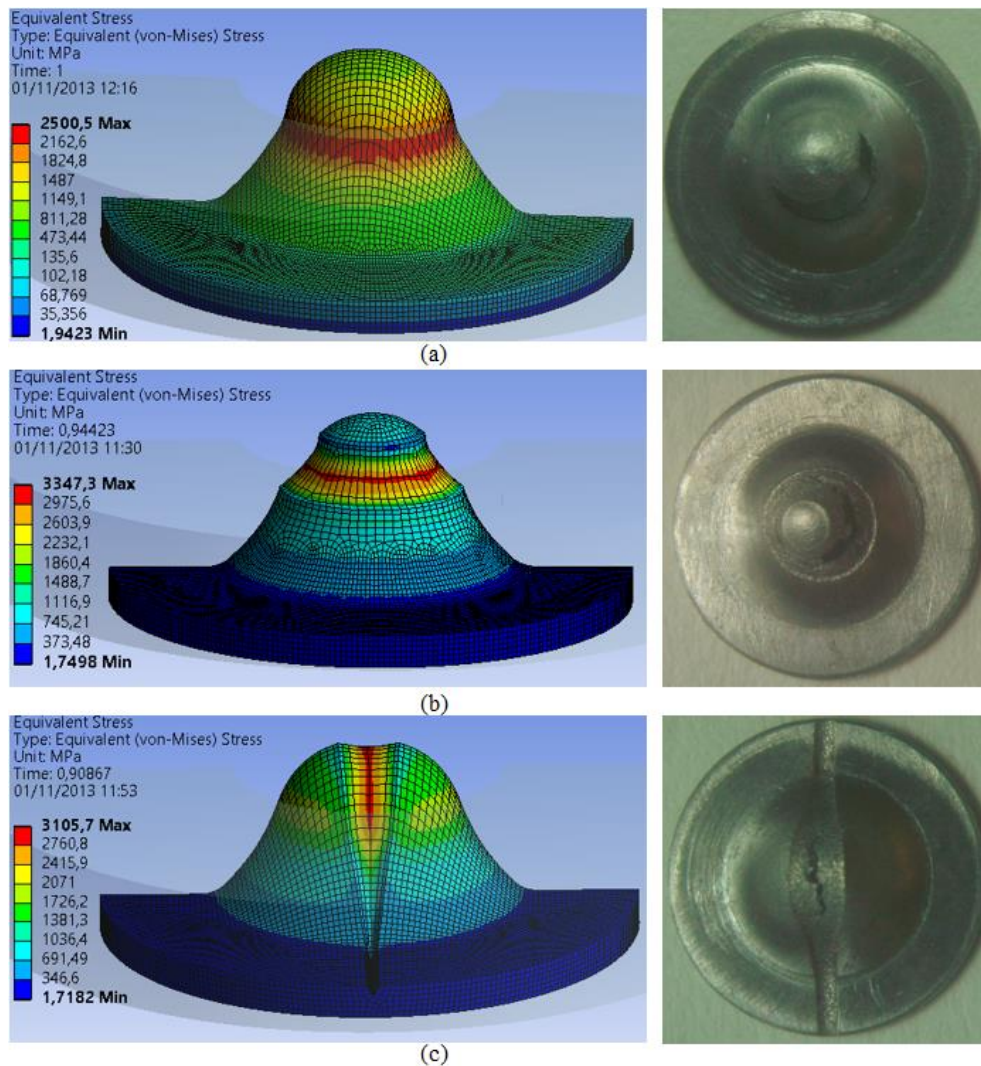


Figura 5. 24 – (a) - Provetes sem entalhe. (b) – Provette com entalhe circular. (c) – Provette com entalhe linear.

Analisando as imagens acima apresentadas, e comparando a zona de fratura dos provetes ensaiados experimentalmente com a distribuição das tensões equivalentes de *von-Mises*, verifica-se que o modelo numérico está coerente com os resultados experimentais, isto é, as tensões máximas surgem exatamente na zona onde ocorre o

colapso do provete. As curvas carga-deslocamento respectivas (Figura 5. 25) revelam um comportamento ligeiramente diferente, onde os resultados numéricos demonstram um comportamento ligeiramente mais dúctil que os experimentais.

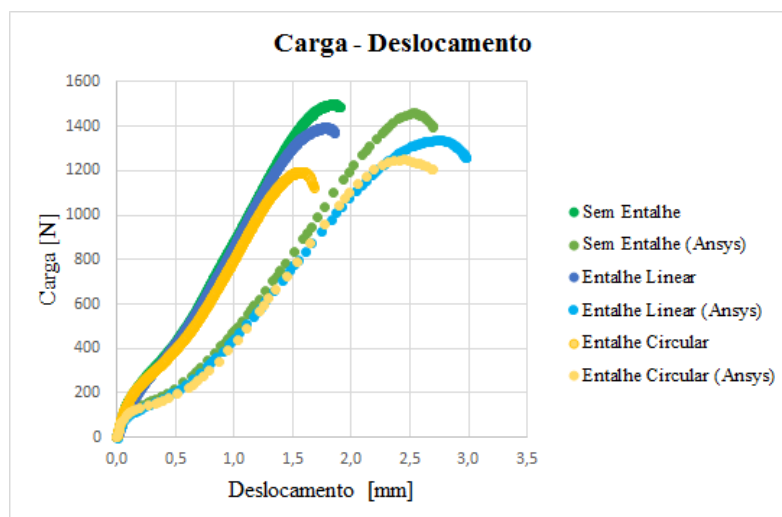


Figura 5. 25 - Curvas carga-deslocamento dos provetes com entalhe linear.

O desfasamento entre as curvas pode estar associado a vários fatores: o tipo de elemento utilizado não ser o mais indicado para análise em questão, apesar de ainda ser aconselhado para análises de grandes deformações; o coeficiente de atrito considerado para análise não estar correto; o coeficiente de encruamento do material utilizado pelo Ansys não ser o representativo do material.

Apesar do desfasamento evidente entre as curvas, verifica-se que ambas apresentam as várias fases de deformação do provete, inumeradas em trabalhos anteriores por *BaiK et al.*

Em relação aos resultados do integral J obtidos experimentalmente e numericamente, estes diferem bastante, o que se deve ao facto dos valores experimentais serem determinados a partir de equações vocacionadas para extrapolar os resultados dos ESP para a respetiva tenacidade à fratura do material, isto, a partir de constantes relacionadas com a geometria do entalhe e o tipo de material. Já no caso dos resultados numéricos estes foram obtidos com base na mecânica da fratura, sob um estado de tensão plana, o que não corresponde à tenacidade à fratura do material.

6 Conclusão

O desafio de realizar ensaios *Small Punch* para determinar a tensão de cedência, tensão de rotura e tenacidade à fratura do aço A335 P11, tornou-se numa tarefa complicada. Trata-se de uma tecnologia recente que ainda se encontra em desenvolvimento, tornando difícil formar uma opinião sobre 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 conseguinte, 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.

❖ Conclusões do Trabalho

Tendo em conta o objetivo inicialmente proposto para o presente trabalho, que passava pela realização de ensaios *Small Punch* para determinar a tensão de cedência, tensão de rotura e tenacidade à fratura do aço A 335 P11, conclui-se o sucesso do mesmo.

Para se realizar os ensaios *Small Punch*, foi necessário projetar e conceber o dispositivo para os ensaios, selecionar e adaptar todo o sistema de instrumentação, definir os provetes a utilizar (tipo de entalhe e respetivas dimensões) e definir um procedimento de ensaio que permitisse obter a informação necessária para a determinação das propriedades mecânicas.

Quanto ao dispositivo de ensaio, foi projetado e concebido um dispositivo que permite realizar ensaios a baixa temperatura, a alta temperatura e à temperatura ambiente.

A instrumentação dos ensaios teve em consideração as recomendações do código de boas práticas, onde se encontram algumas diretrizes relacionadas com a precisão da medição da carga, temperatura e deslocamento. Para respeitar a precisão necessária na medição da carga, foi construído um anel dinamométrico, uma vez que a célula de carga da máquina utilizada nos ensaios era de 100 kN e as cargas máximas nos ensaios *Small Punch* atingem no máximo 3 kN.

A seleção dos provetes e entalhes a utilizar no presente trabalho teve em consideração as conclusões e sugestões dos trabalhos anteriores. Contudo, nos resultados dos trabalhos mencionados, o posicionamento do entalhe circular proporcionou um modo de carregamento misto, sendo uma limitação na determinação da tenacidade à fratura. Para ultrapassar essa questão, recorreu-se às simulações numéricas para otimizar o posicionamento do entalhe, tendo-se obtido sucesso ao alterar o diâmetro de entalhe de 2,5 para 1,6mm.

O procedimento de ensaio utilizado teve como objetivo a determinação da informação necessária para determinar as propriedades acima mencionadas, tendo sido divididos em:

- ✓ No caso das propriedades de resistência mecânica, realizaram-se ensaios em controlo de posição e a velocidade constante a fim de se obter as respetivas curvas carga-deslocamento.
- ✓ No caso da tenacidade à fratura, foi necessário efetuar ensaios interrompidos (com sucessivas cargas e descargas até à rotura do provete) a fim de se determinar o ponto de iniciação da fenda.

❖ **Trabalhos Futuros**

Existem alguns pontos de interesse que poderão ser objeto de estudo no futuro, de forma a dar seguimento ao trabalho já iniciado, nomeadamente:

- ✓ Alterar o dispositivo de ensaio, de modo a tornar possível a realização dos ensaios a baixas temperaturas sem qualquer influência do gelo.
- ✓ Estudar a propagação da fratura, isto é, certificar se existe efetivamente propagação da fenda a partir da ponta do entalhe mecânico, ou se o provete apenas rompe pela sua menor secção.
- ✓ Validar o método utilizado para determinar o ponto correspondente à iniciação da fenda, efetuando ensaios interrompidos a diferentes percentagens de carga máxima e, posteriormente, analisar os provetes no microscópio.
- ✓ Alterar a relação entre o diâmetro do punção e o diâmetro do orifício da matriz de receção para os provetes de 1mm de espessura, a fim de ser possível

efetuar ensaios em modo I de carregamento. Com isso, poder estudar a influência da espessura do provete.

- ✓ Investigar outros processos para obter um entalhe mais agudo para que este possa simular melhor um intensificador de tensões.
- ✓ Melhorar o cálculo do integral J, usando refinamento de malhas e validação mediante artigos e cálculos.

Referências Bibliográficas

- [1] R. Hurst, “Small Punch Testing for Creep: Progress in Europe,” 2007.
- [2] R. Hurst, “Determination of Mechanical Properties of Materials by Small Punch and Other Miniature Testing Techniques,” 2010, vol. cl.
- [3] T. H. Hyde, C. J. Hyde, and W. Sun, “Theoretical basis and practical aspects of small specimen creep testing,” *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, vol. 48, no. 2, pp. 112–125, Oct. 2012.
- [4] W. Hyde, Thomas H. Sun, “Specimen creep test and methods of using such tests,” 20110277553A12011.
- [5] S. N. G. Chu and J. C. M. Li, “Impression creep; a new creep test,” *Journal of Materials Science*, vol. 12, pp. 2200–2208, 1977.
- [6] T. H. Hyde, W. Sun, and A. A. Becker, “Analysis of the impression creep test method using a rectangular indenter for determining the creep properties in welds,” *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 38, no. 10, pp. 1089–1102, 1996.
- [7] T. H. Hyde, W. Sun, and S. J. Brett, “Application of Impression Creep Test Data for the Assessment of Service Exposed Power Plant Components,” in *Determination of Mechanical Properties of Materials by Small Punch and Other Miniature Testing Techniques*, 2010.
- [8] T. H. Hyde and W. Sun, “Multi-step Load Impression Creep Tests for a,” *Strain - An International Journal for Experimental Mechanics*, vol. 37, no. 3, pp. 2–6, 2001.
- [9] T. H. Hyde and W. Sun, “Evaluation of conversion relationships for impression creep test at elevated temperatures,” *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, vol. 86, no. 11, pp. 757–763, Nov. 2009.
- [10] T. H. Hyde and W. Sun, “Some considerations on specimen types for small sample creep tests,” *Materials at High Temperatures*, vol. 27, no. 3, pp. 157–165, Sep. 2010.
- [11] W. Sun and T. H. Hyde, “Determination of Secondary Creep Properties Using a Small Ring Creep Test Technique,” in *Determination of Mechanical Properties of Materials by Small Punch and Other Miniature Testing Techniques*, 2010.
- [12] “ASTM E8/E8M-09, 2008, Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2009, DOI: 10.1520/E0008_E0008M-09, www.astm.org,” no. C.

- [13] “ASTM A370-03A, 2003, Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2003, www.astm.org.”
- [14] Tinius Olsen, “School of Testing.” [Online]. Available: <http://www.schooloftesting.com/resourcearea/94-miniature-specimen-techniques>. [Accessed: 18-Jan-2013].
- [15] B. A. C. N. F. Panayotou, S. D. Artkin, R. J. Puigh, “Design and Use of Nonstandard Tensile Specimens for Irradiated Materials Testing,” *ASTM STP 888*. W.R. Corwin y G. E. Lucas, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, pp. 201–219, 1986.
- [16] O. K. Manahan, M. P., Argon, A. S. and Harling, “The development of a miniaturized disk bend test for the determination of postirradiation mechanical properties,” *Journal of Nuclear Materials*, vol. 104, pp. 1545–1550, 1981.
- [17] M. P. Manahan et al., “Determining mechanical behavior of solid materials using miniature specimens,” 1986.
- [18] CEN (Comité Européen de Normalisation), “Workshop Agreement Small Punch Test Method for Metallic Materials,” *Small Punch Test Method for Metallic Materials*. pp. 1–38 Part A and 1–32 Part B, 2006.
- [19] J. P. J. Hulka, P. Kubík, “Sensitivity Analysis Of Small Punch Test,” in *18^a International Conference Engineering Mechanics*, 2012, pp. 461–468.
- [20] H. T. X. MAO, “Development of a Further-Miniaturized Specimen of 3mm Diameter for TEM Disk (D 3 mm) Small Punch Tests,” *Journal of Nuclear Materials 150*, vol. 150, pp. 42–52, 1987.
- [21] F. J. C. RODRÍGUEZ, Belzunce, “Mechanical Properties Characterization of Heat-Affected Zone Using the Small Punch Test,” vol. 88, no. September, pp. 188–192, 2009.
- [22] T. H. Hyde and W. Sun, “A novel, high-sensitivity, small specimen creep test,” *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, vol. 44, no. 3, pp. 171–185, Mar. 2009.
- [23] J. H. Bulloch, “Toughness losses in low alloy steels at high temperatures: an appraisal of certain factors concerning the small punch test,” *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, vol. 75, no. 11, pp. 791–804, Sep. 1998.
- [24] C. Rodríguez, E. Cárdenas, F. J. Belzunce, and C. Betegón, “Fracture Characterization of Steels by Means of the Small Punch Test,” *Experimental Mechanics*, vol. 53, no. 3, pp. 385–392, Jul. 2012.
- [25] K. Turba, B. Gülçimen, Y. Z. Li, D. Blagoeva, P. Hähner, and R. C. Hurst, “Introduction of a new notched specimen geometry to determine fracture

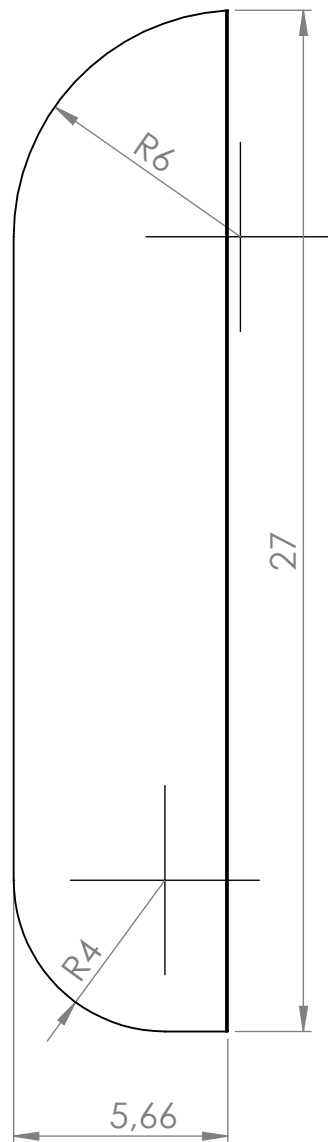
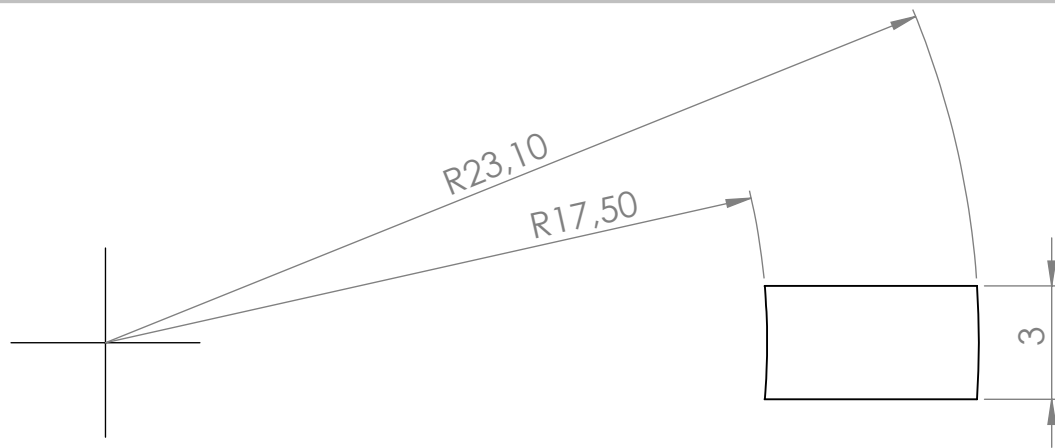
- properties by small punch testing,” *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 78, no. 16, pp. 2826–2833, Nov. 2011.
- [26] J.-B. Ju, J. Jang, and D. Kwon, “Evaluation of fracture toughness by small-punch testing techniques using sharp notched specimens,” *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, vol. 80, no. 4, pp. 221–228, Apr. 2003.
- [27] Z.-X. Wang, H.-J. Shi, J. Lu, P. Shi, and X.-F. Ma, “Small punch testing for assessing the fracture properties of the reactor vessel steel with different thicknesses,” *Nuclear Engineering and Design*, vol. 238, no. 12, pp. 3186–3193, Dec. 2008.
- [28] R. Hu and X. Ling, “Three-dimensional numerical simulation on plastic damage in small punch specimen of Zirconium,” *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, vol. 86, no. 12, pp. 813–817, Dec. 2009.
- [29] T. Ishii, M. Ohmi, J. Saito, T. Hoshiya, N. Ooka, S. Jitsukawa, and M. Eto, “Development of a small specimen test machine to evaluate irradiation embrittlement of fusion reactor materials,” *Journal of Nuclear Materials*, vol. 283–287, pp. 1023–1027, Dec. 2000.
- [30] J. M. Baik, J. Kameda, and O. Buck, “Development of small punch test for ductilebrittle transition temperature measurement of temper embrittled Ni–Cr steel,” vol. In: Corwin, no. ASTM STP 888. PA:ASTM, Philadelphia, pp. 92–111, 1986.
- [31] Y. W. Ma and K. B. Yoon, “Assessment of tensile strength using small punch test for transversely isotropic aluminum 2024 alloy produced by equal channel angular pressing,” *Materials Science and Engineering: A*, vol. 527, no. 16–17, pp. 3630–3638, Jun. 2010.
- [32] X. Mao, “Supersmall punch test to estimate fracture toughness J_{IC} and its application to radiation embrittlement of 2 . 25Cr-1Mo steel,” vol. 50, pp. 231–236, 1992.
- [33] I. I. Cuesta and J. M. Alegre, “Determination of the fracture toughness by applying a structural integrity approach to pre-cracked Small Punch Test specimens,” *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 78, no. 2, pp. 289–300, Jan. 2011.
- [34] S. K. Kudari and C. M. Sharanaprabhu, “On the relationship between stress intensity factor (K) and minimum plastic zone radius (MPZR) for four point bend specimen under mixed mode loading,” *International Journal of Engineering, Science and Technology*, vol. 2, no. 5, pp. 13–22, 2010.
- [35] T. H. Hyde and W. Sun, “Interpretation of Small Punch Creep Tests Data for Ductile Materials,” in *1st Int. Conf. on Determination of Mechanical Properties of Materials by Small Punch and Other Miniature Testing Techniques*, 2010.

- [36] K. Matocha, P. Čížek, and K. Ladislav, “The evaluation of actual mechanical properties of materials by Small Punch Tests,” Ostrava, Czech Rep.
- [37] M. J. Vol, “Testing of Small Local Zones by means of Small Punch Test at Room and Creep Temperatures.”
- [38] K. Okamoto, H. Kitagawa, J. Kusumoto, A. Kanaya, and T. Kobayashi, “Development of electric discharge equipment for small specimen sampling,” *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, vol. 86, no. 9, pp. 633–636, Sep. 2009.
- [39] A. S. D. Oliveira, “Aços Inoxidáveis.” [Online]. Available: [http://demec.ufpr.br/pesquisas/superficie/material didatico/Acos oxidaveis.pdf](http://demec.ufpr.br/pesquisas/superficie/material%20didatico/Acos%20inoxidaveis.pdf). [Accessed: 08-Mar-2013].
- [40] G. A. do Arco-Íris, “Aço A335 P11.” [Online]. Available: http://portuguese.seamlessweldedpipe.com/china-alloy_steel_seamless_tubes_asme_sa213_t1_t11_t12_t2_t22_t23_t5_t9_t91_t92-703858.html. [Accessed: 08-Mar-2013].
- [41] Sulcromo - Revestimentos Industriais, “Coeficiente de atrito.” [Online]. Available: https://www.google.pt/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=4&cad=rja&ved=0CD4QFjAD&url=http%3A%2F%2Fwww.sulcromo.com.br%2Fsistemas%2Fdownloads%2Fdownload.asp%3Farquivo%3DTabela%2520de%2520Comp%20ara%25E7%25E3o%2520-%2520Coeficiente%2520de%2520Atrito.pdf&ei=xfodUvD7BuKr7AblzIDABQ&usg=AFQjCNG3-Knv1cpDoXZH4Y3TMEfQGb_BhA&bvm=bv.51156542,d.d2k. [Accessed: 27-Mar-2013].
- [42] E. G. de Santana, “Coeficiente de atrito.” [Online]. Available: <http://200.17.141.35/egsantana/dinamica/rozamiento/general/rozamiento.htm>. [Accessed: 27-Mar-2013].
- [43] “Software ANSYS-Help.”
- [44] E. Giovanni Moraes Teixeira, Antônio Carlo Guimarães, Ivan Thesi Ragusoff, Fernando Amaral Polastro, “A mecânica da fratura como base do projeto tolerante ao dano,” *Engineering Simulation and Scientific Software*, 2008. [Online]. Available: <http://www.esss.com.br/blog/pt/2008/11/a-mecanica-da-fratura-como-base-projeto-tolerante-ao-dano/>. [Accessed: 22-Feb-2013].
- [45] “ISO 6892-1:2009(E), Metallic materials — Tensile testing, Part 1: Method of test at room temperature, E-mail copyright@iso.org, Web www.iso.org,” vol. 2009.
- [46] “BS 7448:Part 1: 1991, British Standard, Fracture mechanics toughness tests.”

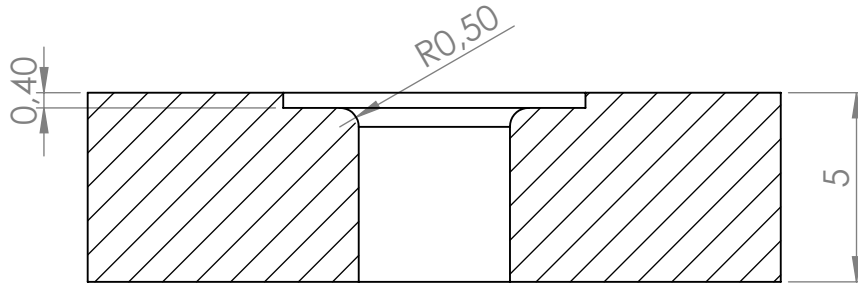
- [47] “ISO 148-1:2009 (E), Metallic materials — Charpy pendulum impact test, Part 1: Test method, E-mail copyright@iso.org, Web www.iso.org,” vol. 2009.

APÊNDICES

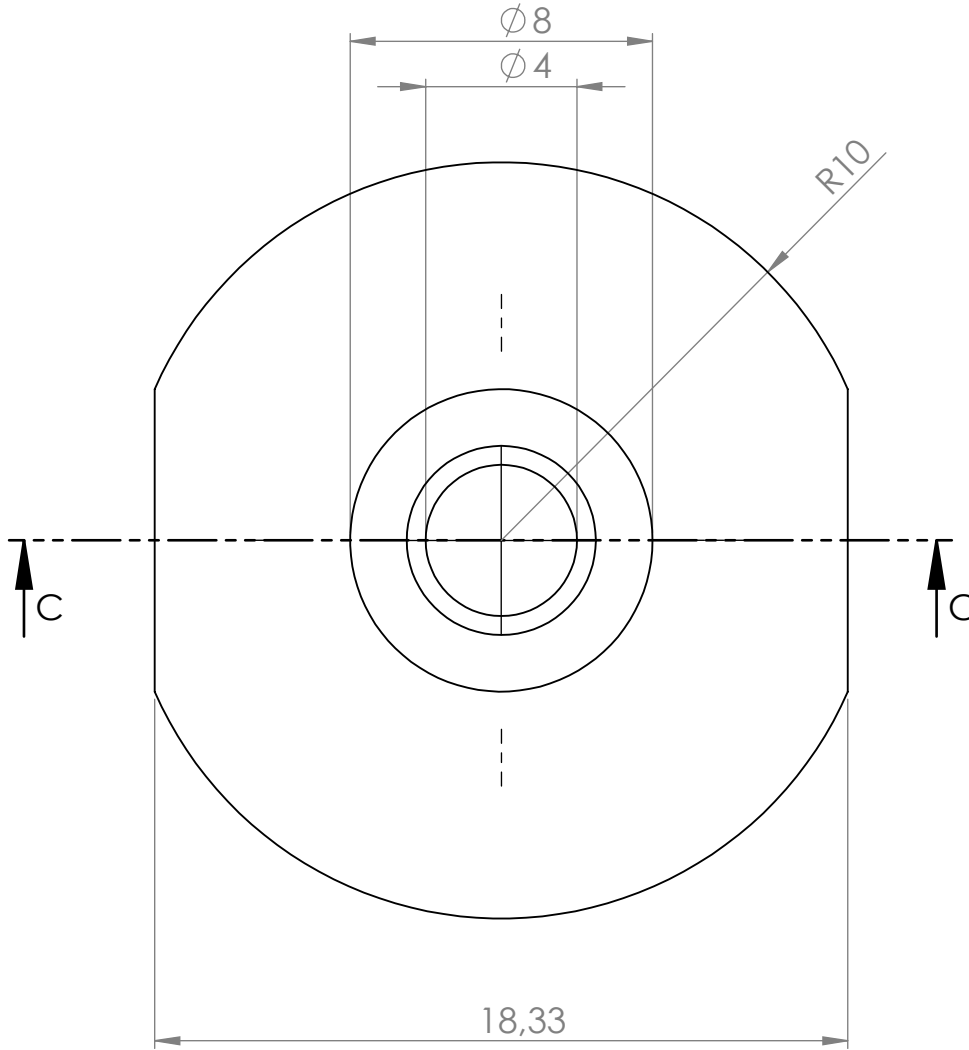
Apêndice I – Desenhos técnicos 2D do dispositivo de ensaio



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:		FINISH:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
DRAWN		SIGNATURE		DATE		TITLE:			
CHK'D									
APPV'D									
MFG									
Q.A						DWG NO.		Divisão_Azoto	
						SCALE:5:1		SHEET 1 OF 1	
				WEIGHT:				A4	



SECTION C-C
SCALE 5 : 1



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:
DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
SURFACE FINISH:
TOLERANCES:
LINEAR:
ANGULAR:

FINISH:

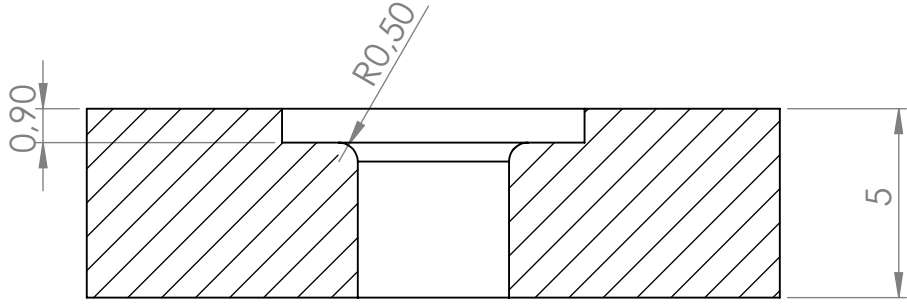
DEBUR AND
BREAK SHARP
EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

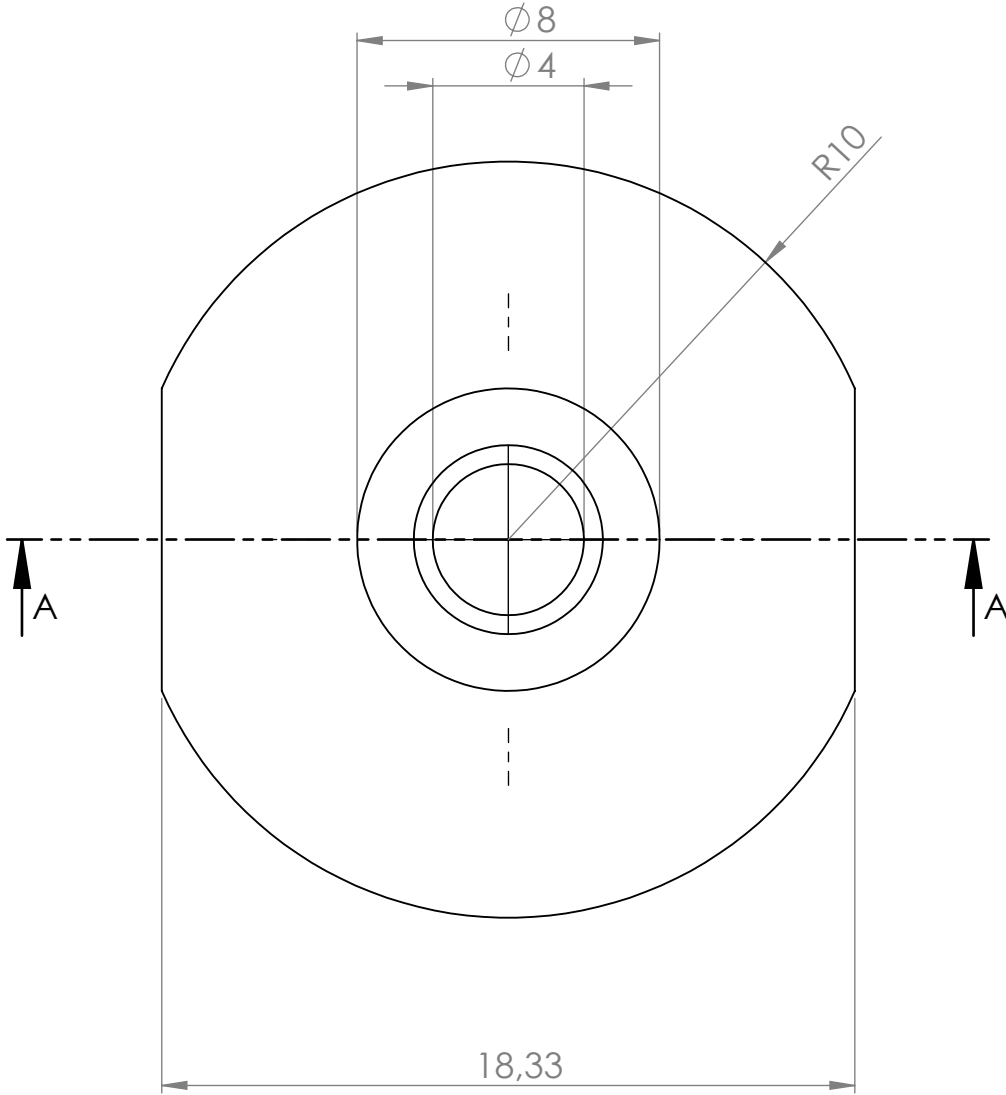
REVISION

	NAME	SIGNATURE	DATE		
DRAWN					
CHK'D					
APPV'D					
MFG					
Q.A					

TITLE:		
DWG NO.	matriz_inf	A4
WEIGHT:	SCALE:2:1	SHEET 1 OF 1



SECTION A-A
SCALE 5:1



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:
DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
SURFACE FINISH:
TOLERANCES:
LINEAR:
ANGULAR:

FINISH:

DEBUR AND
BREAK SHARP
EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

	NAME	SIGNATURE	DATE		
DRAWN					
CHK'D					
APPV'D					
MFG					
Q.A					

TITLE:

DWG NO.

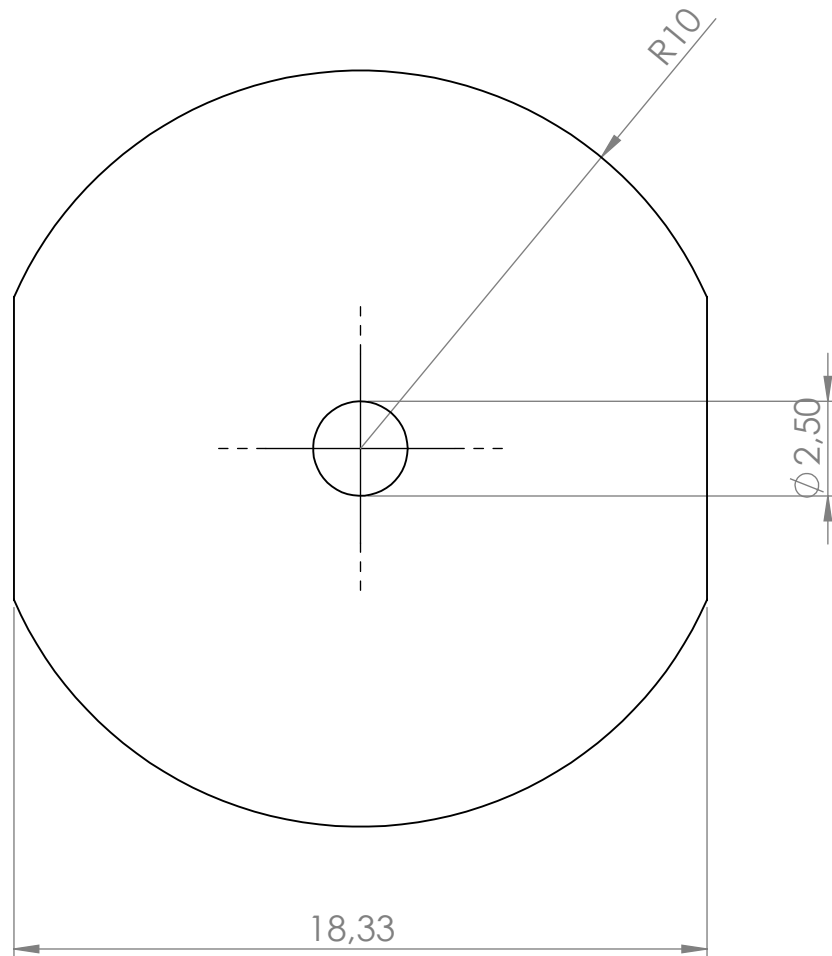
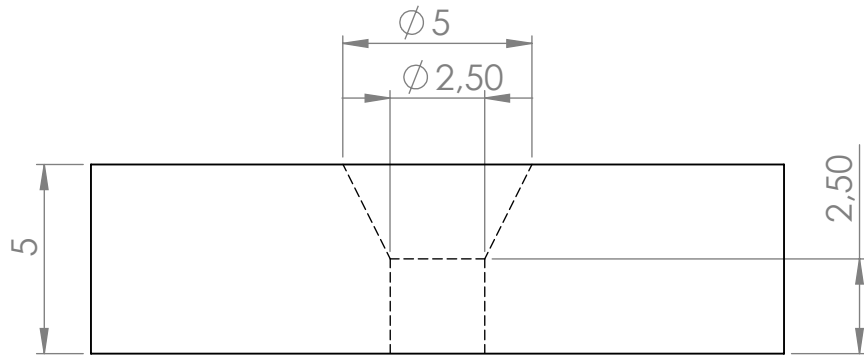
matriz_inf_prov_1

A4

WEIGHT:

SCALE:1:1

SHEET 1 OF 1



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:
DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
SURFACE FINISH:
TOLERANCES:
LINEAR:
ANGULAR:

FINISH:

DEBUR AND
BREAK SHARP
EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

	NAME	SIGNATURE	DATE		
DRAWN					
CHK'D					
APPV'D					
MFG					
Q.A					
				WEIGHT:	

TITLE:

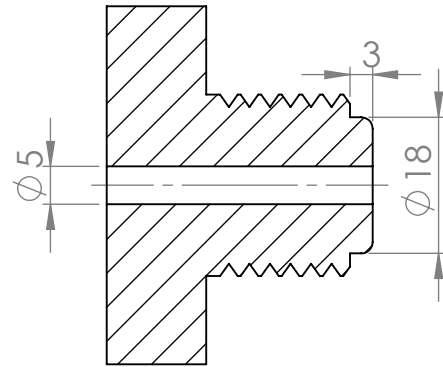
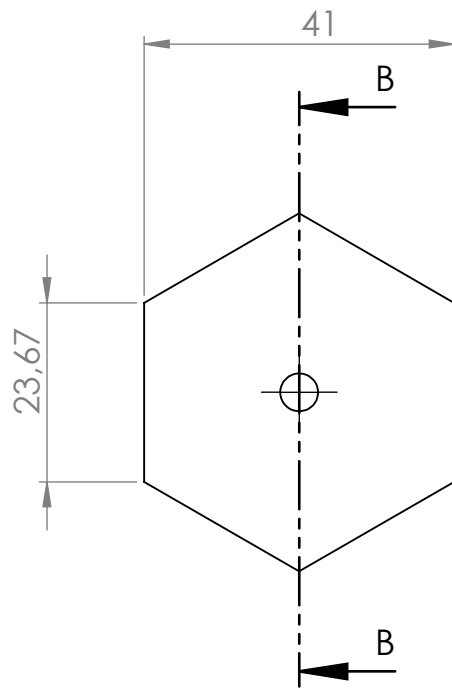
DWG NO.

matriz_sup

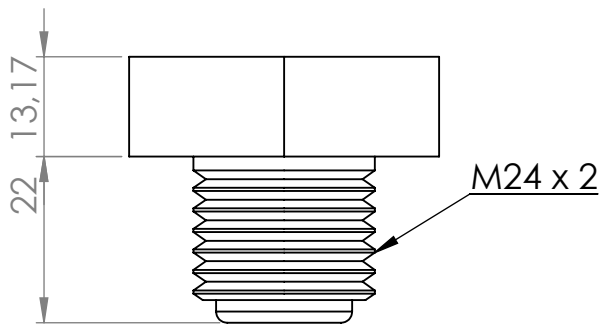
A4

SCALE:1:1

SHEET 1 OF 1



SECTION B-B



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:
DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
SURFACE FINISH:
TOLERANCES:
LINEAR:
ANGULAR:

FINISH:

DEBUR AND
BREAK SHARP
EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

	NAME	SIGNATURE	DATE
DRAWN			
CHK'D			
APPV'D			
MFG			
Q.A			
			WEIGHT:

TITLE:

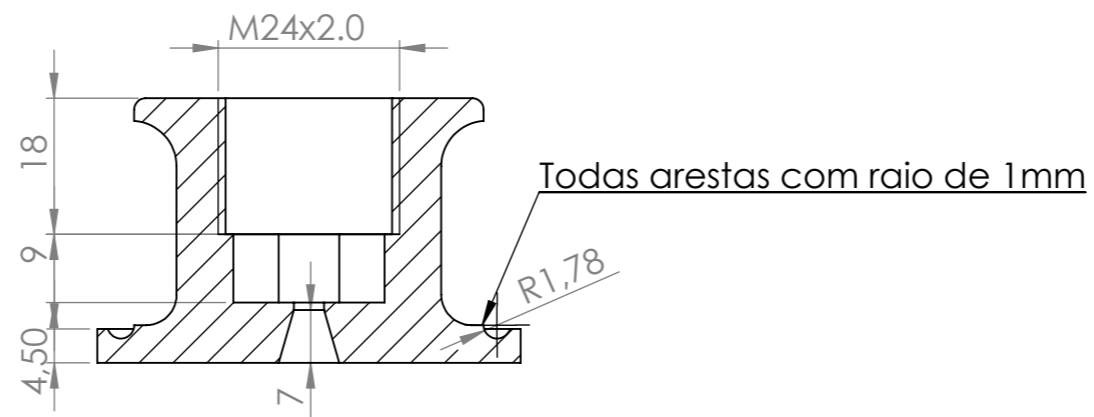
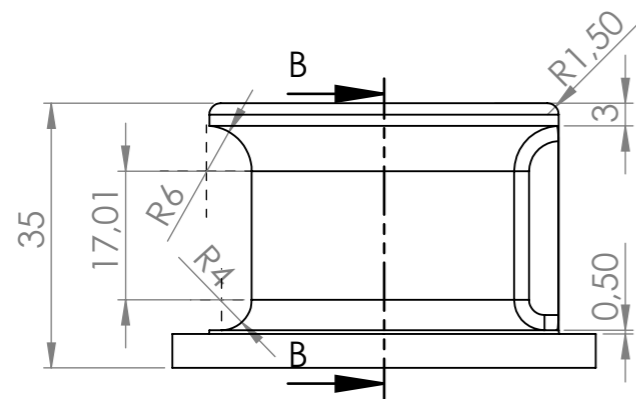
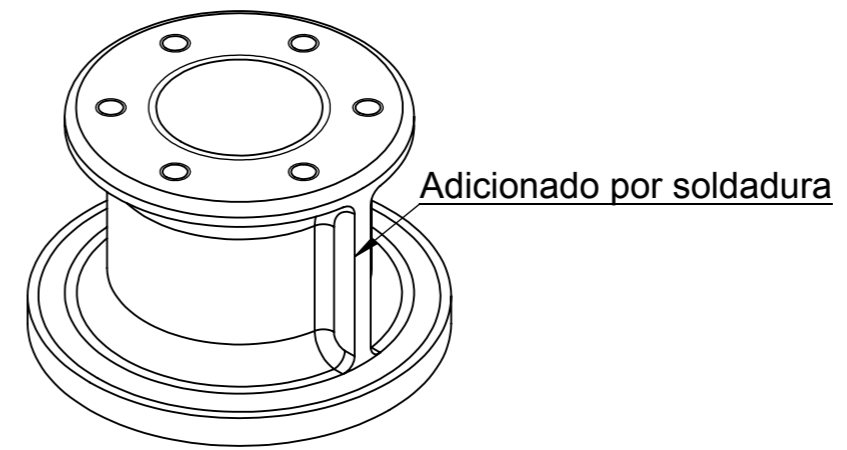
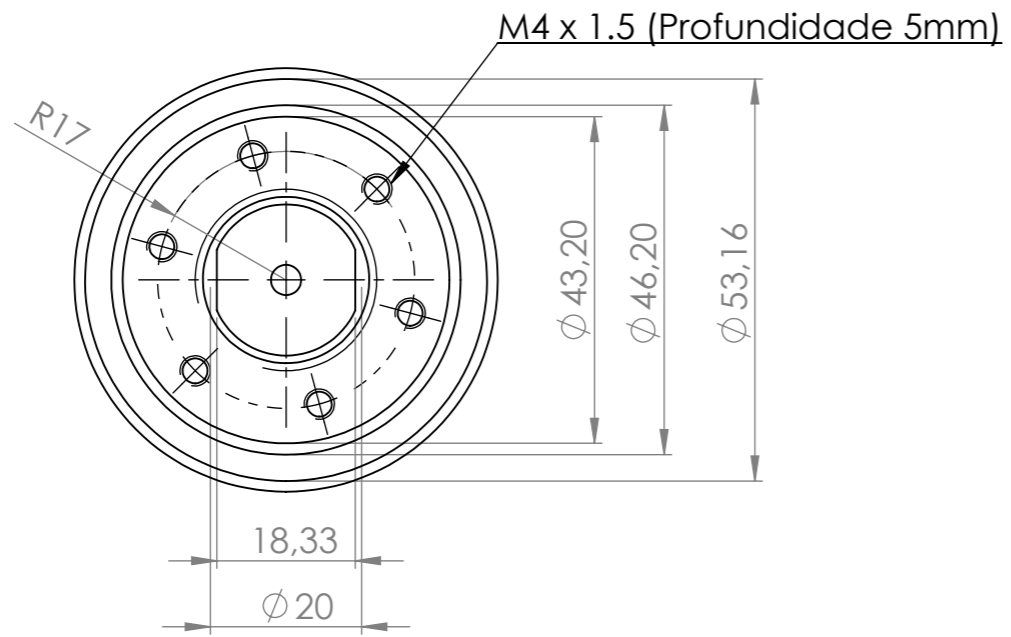
DWG NO.

Parafuso_M24 x 2

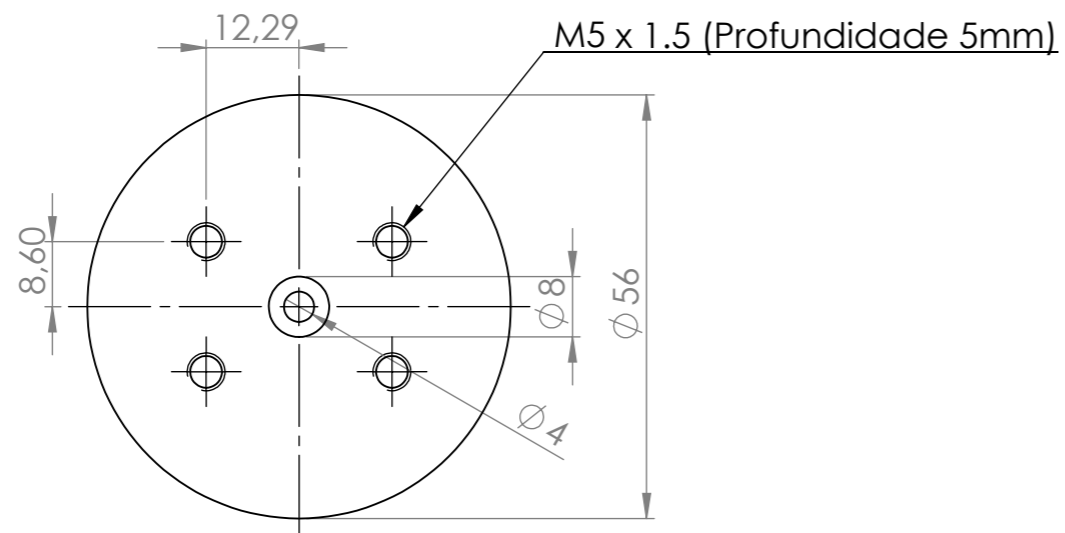
A4

SCALE:1:1

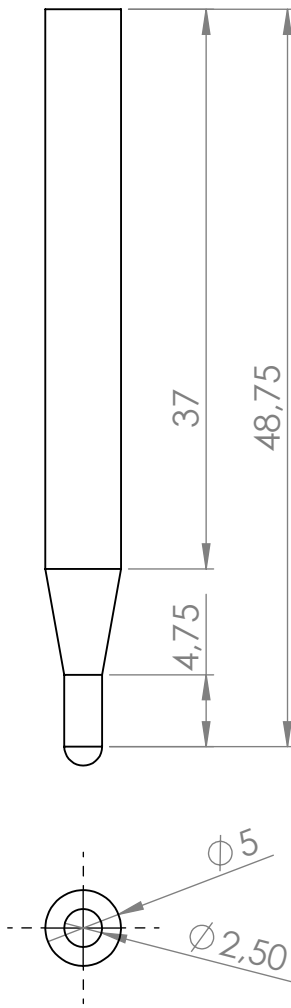
SHEET 1 OF 1



SECTION B-B



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:	FINISH:			DEBUR AND BREAK SHARP EDGES	DO NOT SCALE DRAWING	REVISION
	DRAWN				TITLE:	
CH'K'D	NAME	SIGNATURE	DATE	DWG. NO.		
APPV'D				Porta_ferramente A3		
MFG				SCALE:1:1		
Q.A				SHEET 1 OF 1		
				WEIGHT:		



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:
 DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
 SURFACE FINISH:
 TOLERANCES:
 LINEAR:
 ANGULAR:

FINISH:

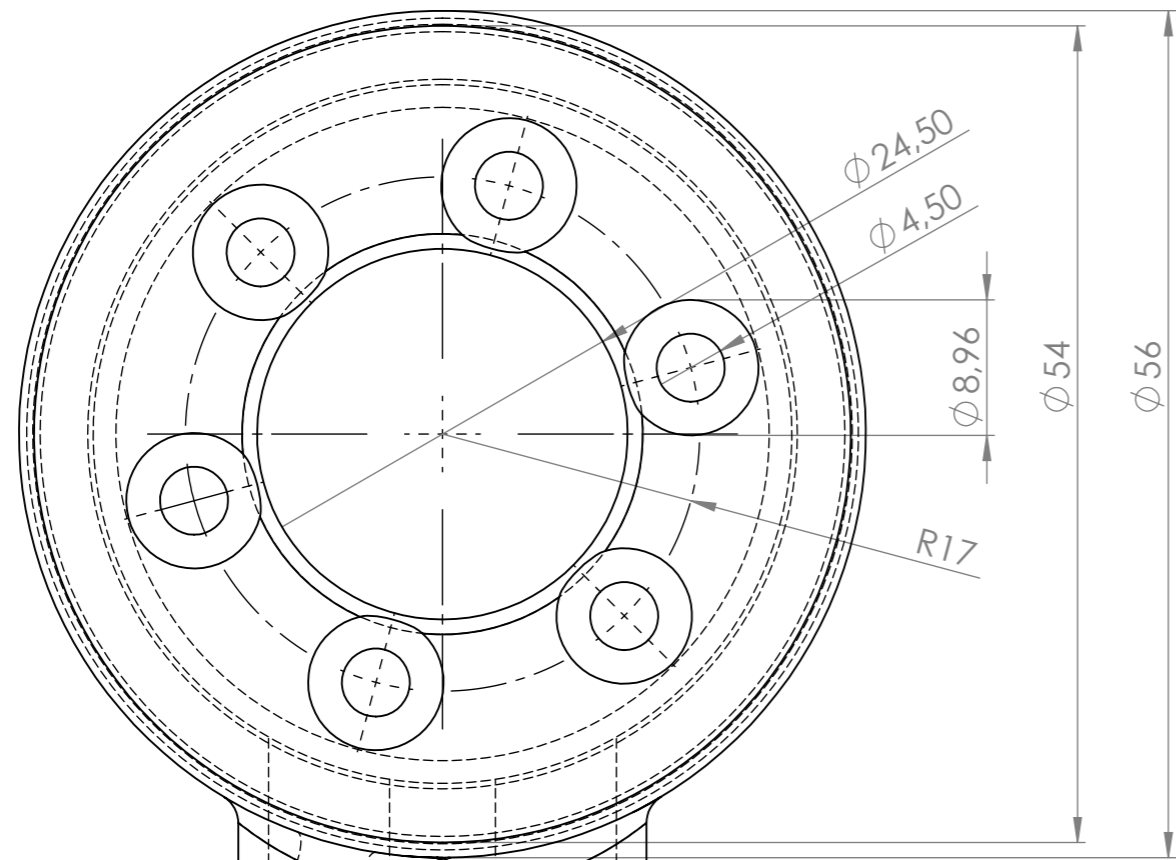
DEBUR AND
 BREAK SHARP
 EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

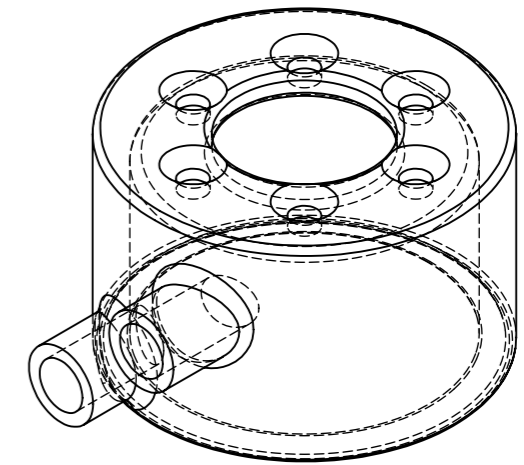
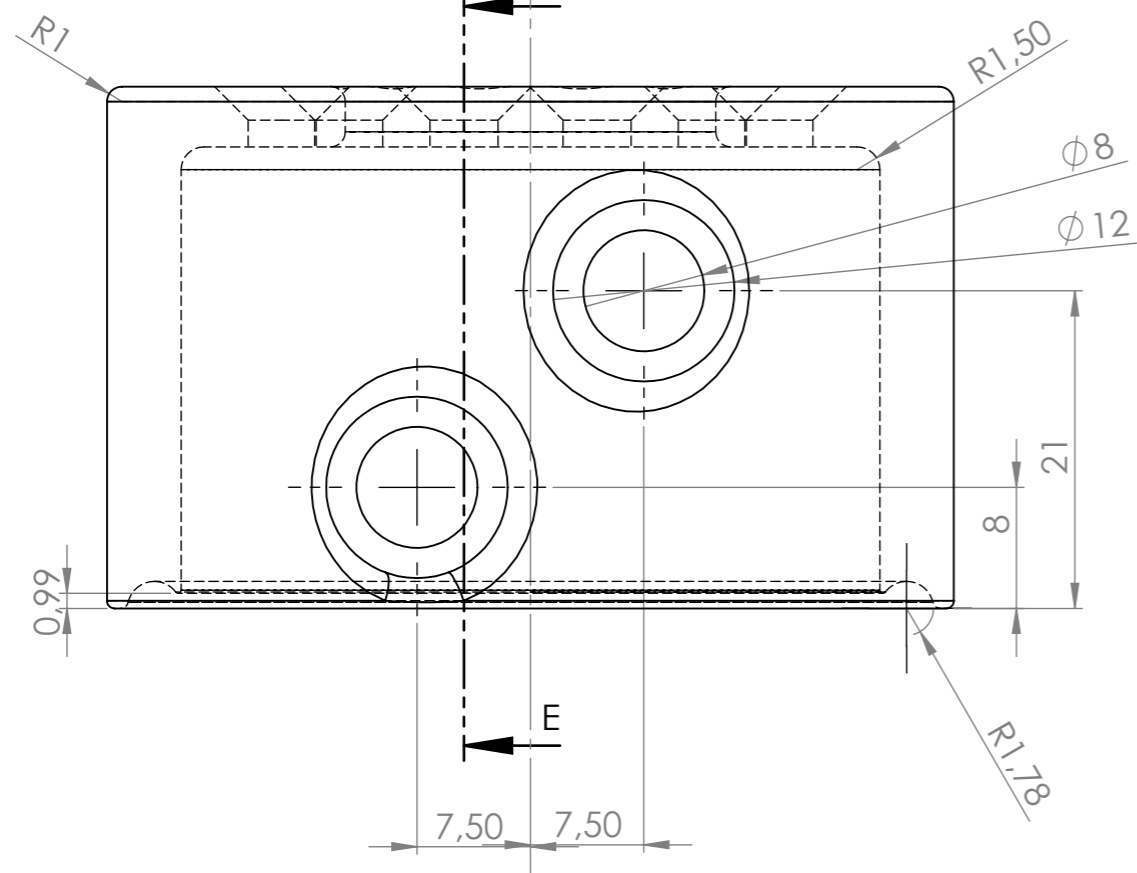
REVISION

NAME		SIGNATURE		DATE	
DRAWN					
CHK'D					
APPV'D					
MFG					
Q.A					
WEIGHT:					

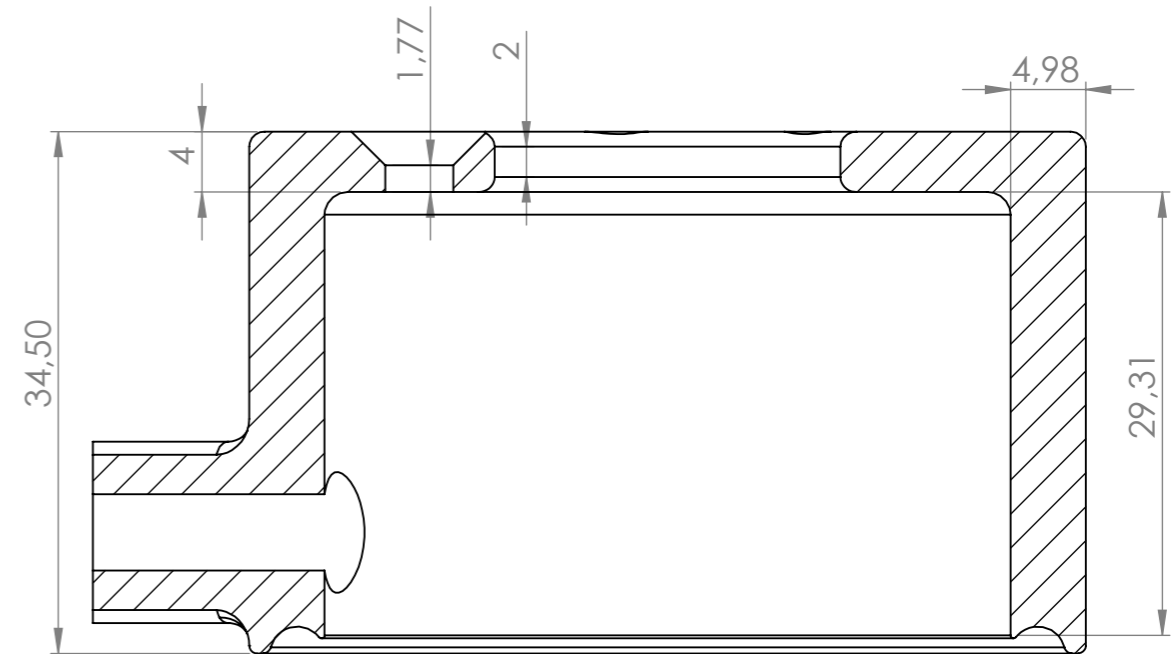
TITLE:	
DWG NO.	Punção
SCALE:2:1	A4
SHEET 1 OF 1	



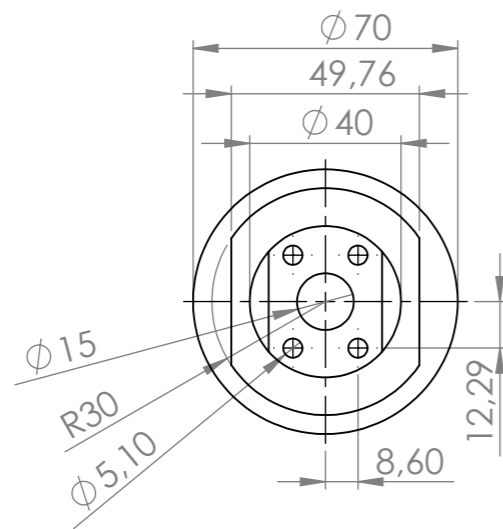
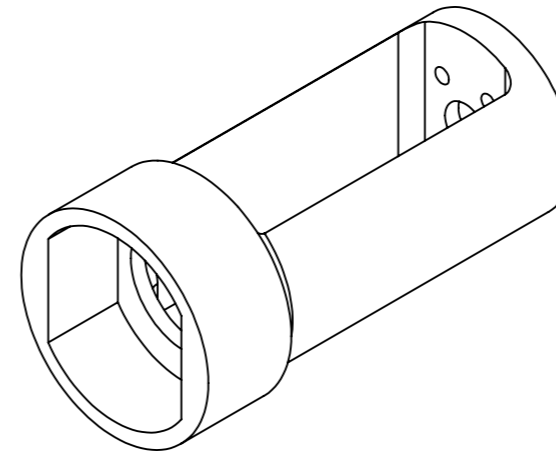
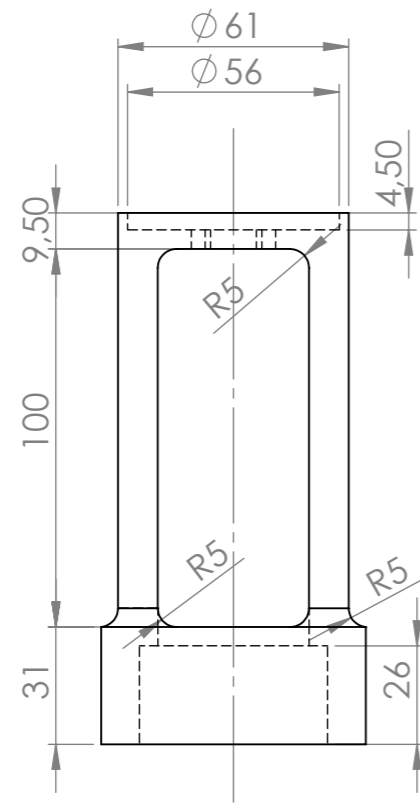
Adicionado por soldadura



SECTION E-E
SCALE 2:1



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:				FINISH:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
DRAWN				NAME		SIGNATURE		DATE		TITLE:	
CHK'D											
APPV'D											
MFG											
Q.A								MATERIAL:		DWG NO:	
										Reservatório de azoto	
								WEIGHT:		SCALE:1:1	
										SHEET 1 OF 1	



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:				FINISH:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
DRAWN				NAME		SIGNATURE		DATE		TITLE:	
CHK'D											
APPV'D											
MFG											
Q.A								MATERIAL:		DWG NO.	
										Suporte_dispositivo A3	
								WEIGHT:		SCALE:1:2	
										SHEET 1 OF 1	

Apêndice II – Análise de convergência da malha

Apêndice II

- ❖ Análise de convergência da malha para o modelo elásto- plástico.

Tabela 1 - Dados da análise de convergência.

Tamanho do elemento [mm]	Nº de Elementos	Tensão de Von-Mises (máxima) [MPa]	$F_{(máx)}$ [N]
0,166666667	4399	2130,9	1476,7
0,142857143	8153	2248,3	1467,2
0,125	10597	2353,1	1460,5
0,111111111	14375	2383,7	1458,9
0,1	19072	2426,3	1458,1
0,090909091	25862	2454,9	1458,7
0,083333333	31264	2500,5	1457
0,076923077	39340	2511,5	1457
0,071428571	52440	2512,6	1463

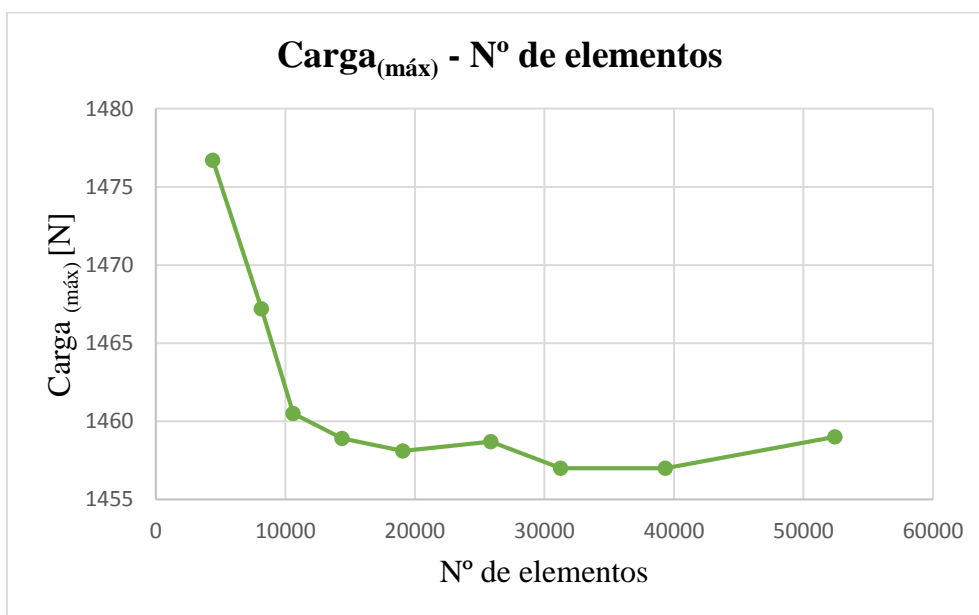


Figura 1 - Curva de convergência da malha.

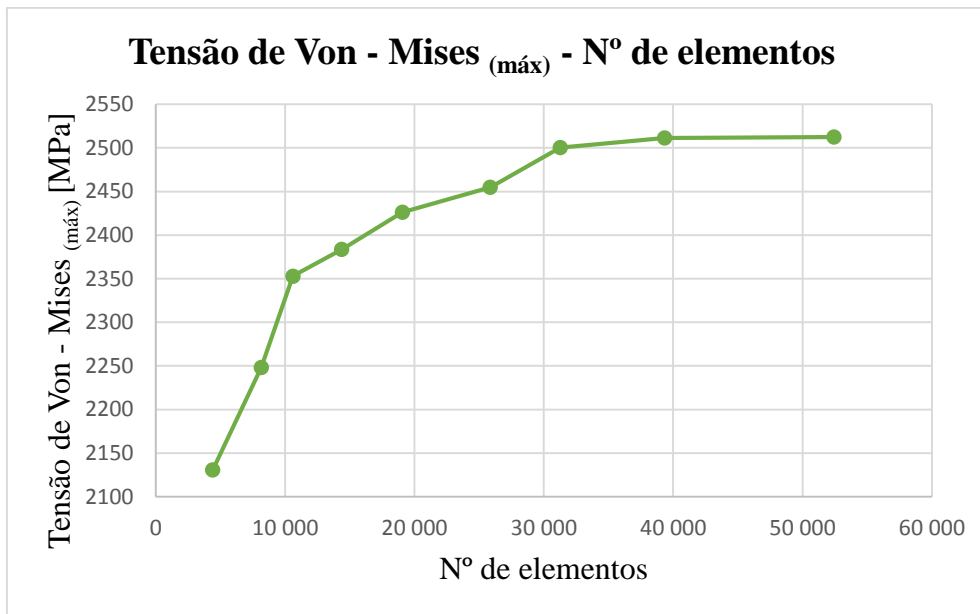


Figura 2 - Curva de convergência da malha.

❖ Análise de convergência da malha para o modelo linear elástico.

Tabela 2 - Dados da análise de convergência.

Tamanho do elemento [mm]	Integral J [J/mm ²]
0,02	-66,432
0,015	-10,897
0,01	-11,655
0,0095	-10,488

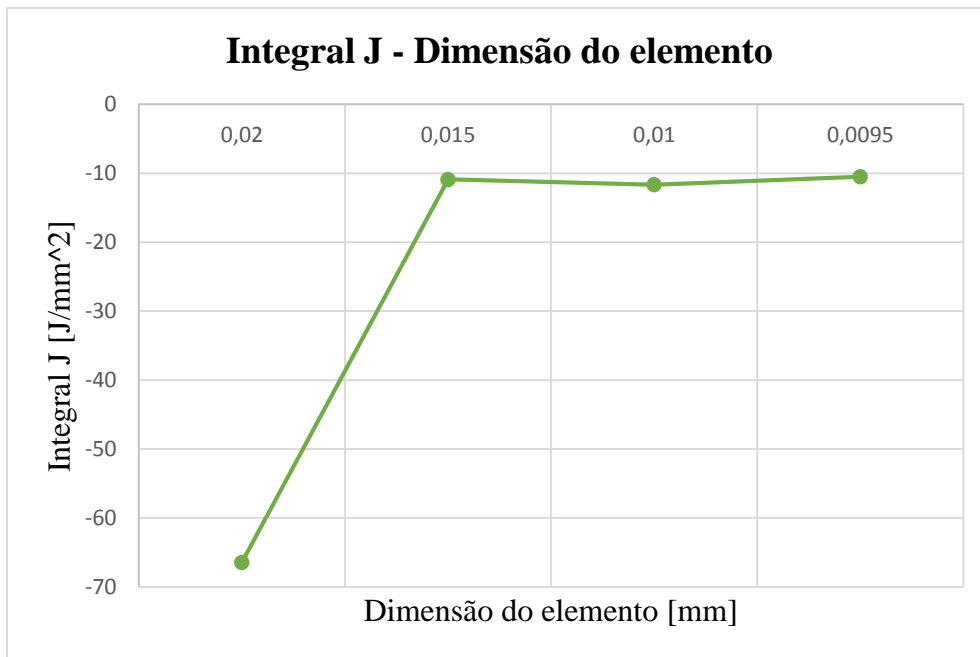


Figura 3 - Curva de convergência da malha.

Apêndice III – Características dos provetes SP e ensaios efetuados

Apêndice III

Nº Provete	Não Entalhado	Entalhe Circular	Entalhe Linear	Temp. 22°C	Temp. -130°C	Ensaio Contínuo	Ensaio Interrompido	Controlo dimensional da espessura [mm]			
								Med. 1	Med. 2	Med. 3	Espessura
1	X			X		X		0,495	0,496	0,494	0,495
2	X			X		X		0,495	0,494	0,496	0,495
3	X			X		X		0,496	0,495	0,497	0,496
4	X				X	X		0,495	0,496	0,496	0,496
5	X				X	X		0,494	0,495	0,495	0,495
6		X		X		X		0,495	0,495	0,495	0,495
7		X		X		X		0,499	0,5	0,5	0,500
8		X		X			X	0,499	0,5	0,503	0,501
9		X		X			X	0,5	0,502	0,5	0,501
10		X			X	X		0,495	0,496	0,495	0,495
11		X			X	X		0,495	0,494	0,495	0,495
12			X	X		X		0,502	0,502	0,504	0,503
13			X	X		X		0,497	0,497	0,499	0,498
14			X	X			X	0,501	0,501	0,503	0,502
15			X	X			X	0,5	0,5	0,499	0,500
16			X		X	X		0,497	0,496	0,498	0,497
17			X		X	X		0,499	0,496	0,498	0,498

Apêndice IV – Procedimento utilizado para a construção do anel dinamométrico

Apêndice IV

- ❖ Procedimentos da construção do anel dinamométrico de 3kN.

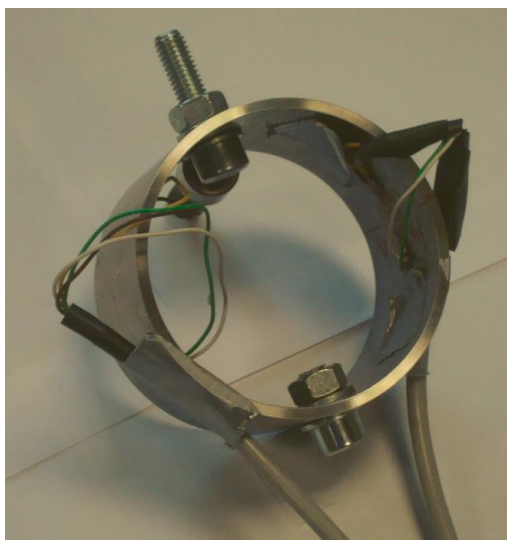


Figura 1 - Anel dinamométrico.

O princípio de funcionamento do anel dinamométrico da Figura 1 consiste em medir as micro-deformações em duas direções e em dois pontos simetricamente opostos. As micro-deformações são medidas a partir de extensômetros posicionados a 0° e 90° como indica a Figura 2.

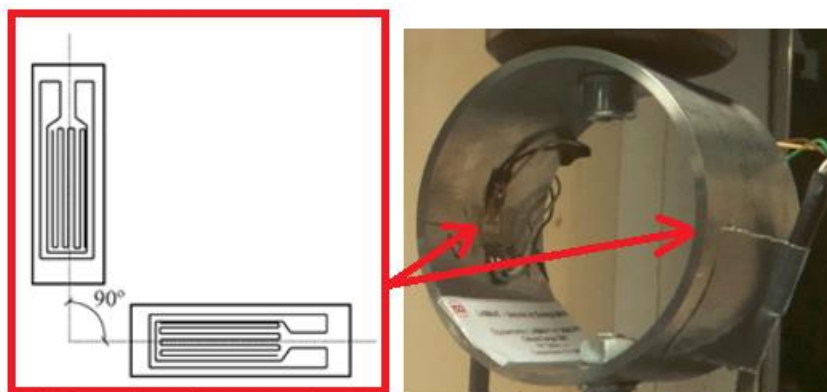


Figura 2 - Posicionamento dos extensômetros. Fonte: consultado a 12-08-2013 (http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1413-70542008000400033)

O anel dinamométrico foi instrumentado utilizando a ponte de wheatstone incorporada no aparelho portátil P – 3500 da Figura 3 (a).



(a)



(b)

Figura 3 - (a) Ponte de Wheatstone. (b) Placa de aquisição de dados.

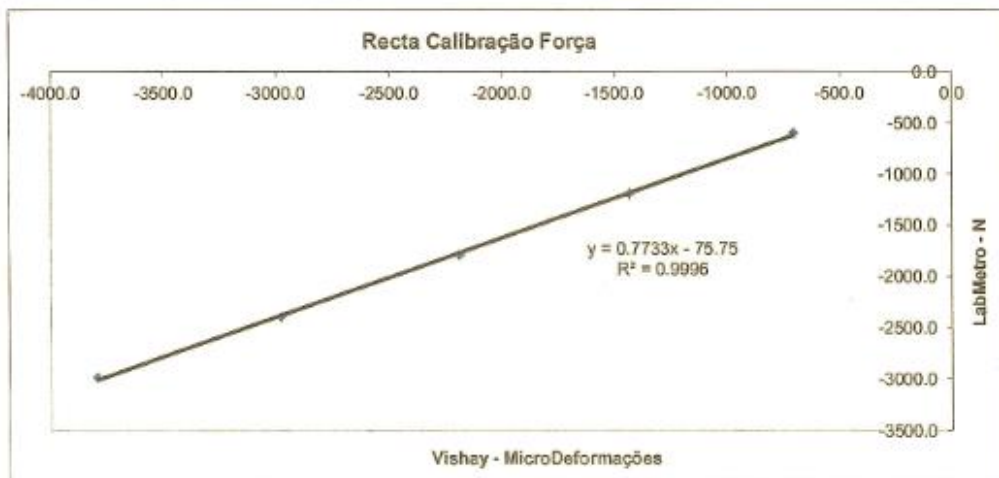
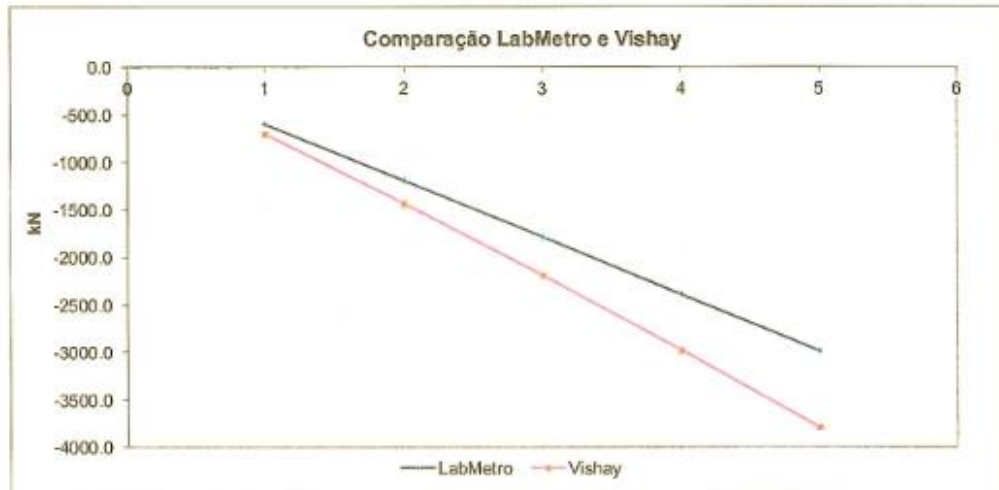
Os dados das micro-deformações medidos a partir da ponte de Wheatstone foram adquiridos pelo Lab-View a partir da placa de aquisição de dados da Figura 3 (b).

Após a sua construção foi efetuada a verificação da sua linearidade e assim obter a equação correspondente à transformação de micro-deformações para Newtons Figura 4.

003 CDC - Verificação Força

Sentido: Compressão
Padrão: Célula Carga LABMETRO

1ª Leitura		2ª Leitura		3ª Leitura		Média		Erro Absoluto	Erro Relativo
LabMetro	Vishay	LabMetro	Vishay	LabMetro	Vishay	LabMetro	Vishay		
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-598.9	-705.0	-106.1000	17.71581
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-1196.1	-1435.0	-238.9000	19.97325
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-1791.1	-2191.0	-399.9000	22.32706
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-2391.1	-2980.0	-588.9000	24.62883
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-2988.8	-3794.0	-805.2000	26.94058



MF
2013/08/20

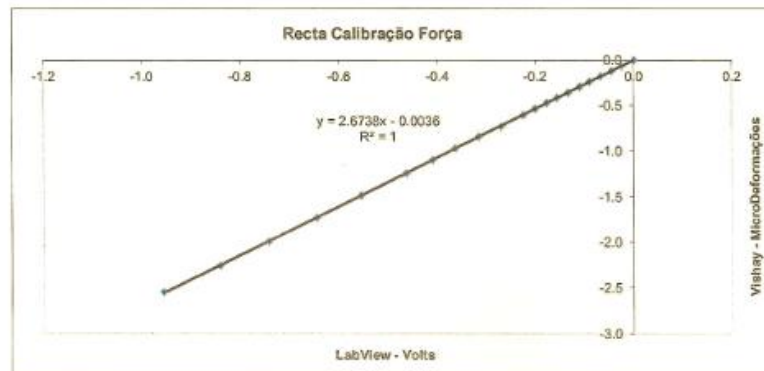
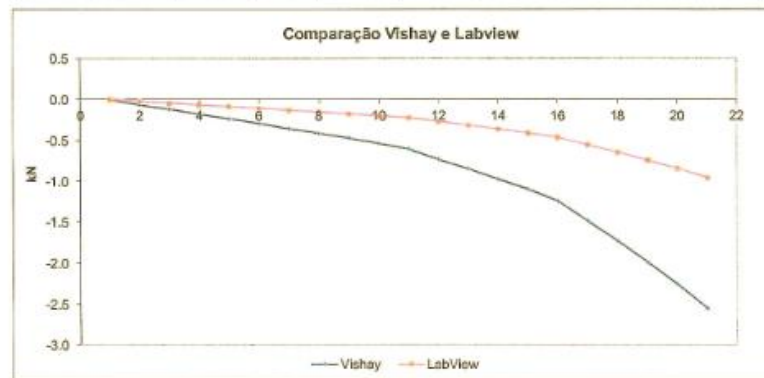
Figura 4 - Equação de transformação de micro-deformações para Newtons.

Uma vez que as micro-deformações foram adquiridas para o Lab-View, foi necessário fazer a verificação de modo a obter a equação para transformar os voltes adquiridos pelo Lab-View para micro-deformações.

003 CDC - Verificação Força

Sentido: Compressão
Padrão: Ponte Vishay 001PV

	1ª Leitura		2ª Leitura		3ª Leitura		Média		Erro Absoluto	Erro Relativo
	Vishay	LabView	Vishay	LabView	Vishay	LabView	Vishay	LabView		
0	-0.003	0.0000	0	0.0008	-0.001	0.0007	-0.0013	0.0005	0.0018	-135.868
50	-0.072	-0.0262	-0.067	-0.0242	-0.061	-0.0222	-0.0667	-0.0242	0.0425	-63.6923
100	-0.126	-0.0463	-0.115	-0.0427	-0.125	-0.0459	-0.1220	-0.0450	0.0770	-63.137
150	-0.164	-0.0689	-0.173	-0.0637	-0.162	-0.0672	-0.1797	-0.0666	0.1131	-62.9463
200	-0.243	-0.0901	-0.24	-0.0887	-0.238	-0.0877	-0.2403	-0.0888	0.1515	-63.0411
250	-0.301	-0.1112	-0.299	-0.1110	-0.288	-0.1077	-0.2960	-0.1099	0.1861	-62.8569
300	-0.364	-0.1353	-0.357	-0.1324	-0.356	-0.1321	-0.3590	-0.1333	0.2257	-62.8717
350	-0.426	-0.1579	-0.411	-0.1526	-0.417	-0.1549	-0.4180	-0.1551	0.2629	-62.8891
400	-0.467	-0.1742	-0.476	-0.1770	-0.48	-0.1785	-0.4743	-0.1766	0.2978	-62.7764
450	-0.543	-0.2020	-0.532	-0.1982	-0.54	-0.2008	-0.5383	-0.2003	0.3360	-62.7928
500	-0.596	-0.2211	-0.61	-0.2269	-0.606	-0.2253	-0.6040	-0.2244	0.3796	-62.8427
600	-0.73	-0.2718	-0.754	-0.2894	-0.72	-0.2877	-0.7347	-0.2896	0.4651	-63.3009
700	-0.853	-0.3174	-0.84	-0.3127	-0.844	-0.3144	-0.8457	-0.3148	0.5308	-62.7702
800	-0.983	-0.3658	-0.967	-0.3805	-0.972	-0.3826	-0.9740	-0.3830	0.6111	-62.7361
900	-1.1	-0.4092	-1.103	-0.4110	-1.095	-0.4077	-1.0993	-0.4093	0.6901	-62.77
1000	-1.233	-0.4600	-1.237	-0.4609	-1.254	-0.4673	-1.2413	-0.4627	0.7786	-62.7225
1200	-1.489	-0.5559	-1.477	-0.5509	-1.491	-0.5555	-1.4857	-0.5541	0.9316	-62.7028
1400	-1.735	-0.64694	-1.727	-0.6435	-1.725	-0.6427	-1.7290	-0.6444	1.0846	-62.7316
1600	-2.003	-0.747213	-1.98	-0.7381	-1.989	-0.7413	-1.9907	-0.7422	1.2485	-62.7161
1800	-2.276	-0.849	-2.248	-0.8378	-2.237	-0.8335	-2.2537	-0.8401	1.4136	-62.7236
2000	-2.515	-0.936179	-2.558	-0.9543	-2.57	-0.9735	-2.5477	-0.9553	1.5923	-62.5021



M
26/08/2013

Figura 5 - Equação de transformação de volts para micro-deformações.

Como se verifica o anel tem um comportamento bastante linear.

ANEXOS

Anexo 1 - Tabela de conversão de dureza

TABELAS AUXILIARES

FATORES DE CONVERSÃO PARA MEDIDAS

E PESOS DIVERSOS.

Para transformar as unidades listadas em A para B, multiplique pelo fator indicado na coluna A B; para transformar as unidades listadas em B para A multiplique pelo fator da coluna B A.

A	B	A B	B A
Polegada	cm	2,5400	0,3937
Pé	m	0,3048	3,2809
Jarda	m	0,9144	1,0936
Milha	km	1,6093	0,5214
Polegada ²	cm ²	6,4520	0,1550
Pé ²	m ²	0,0929	10,7640
Milha ²	km ²	2,5900	0,3861
Polegada ³	cm ³	16,3870	0,0610
Pé ³	m ³	0,0283	35,3147
Galão (E.U.A.)	Litro	3,7854	0,2642
Galão Imperial	Litro	4,5460	0,2200
Barril	m ³	0,1590	6,2893
Libra	kg	0,4536	2,2045
Ton. curta (2.000 lb)	tonelada	0,9072	1,1023
Ton. longa (2.240 lb)	tonelada	1,0160	0,9843
Onça (avoirdupois)	g	28,3495	0,0353
Onça (troy)	g	31,1042	0,0321
Libra / pol.	g / cm	27,6799	0,0361
Libra / pé	g / cm	0,0160	62,5000
Pé / minuto	m / s	0,0051	196,8504
Pé / segundo	km / h	1,0973	0,9113
Pé / minuto (CFM)	l / s	0,4717	2,1200
Galão / minuto	l / s	0,0631	15,8479
Libra / pol.	kg / cm	0,0703	14,2233
Libra / pé	kg / cm	4,8824	0,2048
Libra / pé	quilogrametro	0,1382	7,2330
Horse Power	quilowatt	0,7457	1,3410
Cavalo Vapor	quilowatt	0,7355	1,3596
BTU / min	quilowatt	0,0176	56,92
BTU	kcal	0,2520	3,9683
BTU	quilowatt	0,0003	3,413,0
BTU / h pé ² ° F / pol.	kcal / hm C/m	0,124	8,05
BTU / h pé ² ° F	kcal / hm C	4,88	0,205
BTU / h pé ²	kcal / m	8,900	0,1123
BTu / lb	kcal / kg	0,556	1,800
Quilocaloria	quilowatt / h	0,0012	860,0
Atmosfera	kg / cm	1,033	0,9678
Baria	atmosfera	0,9869	1,0133
Metro / minuto	cm / s	1,667	0,5999
Dia	min.	1,440	6,9444x10
Ano (365 dias)	h	8,760	1,1415x10

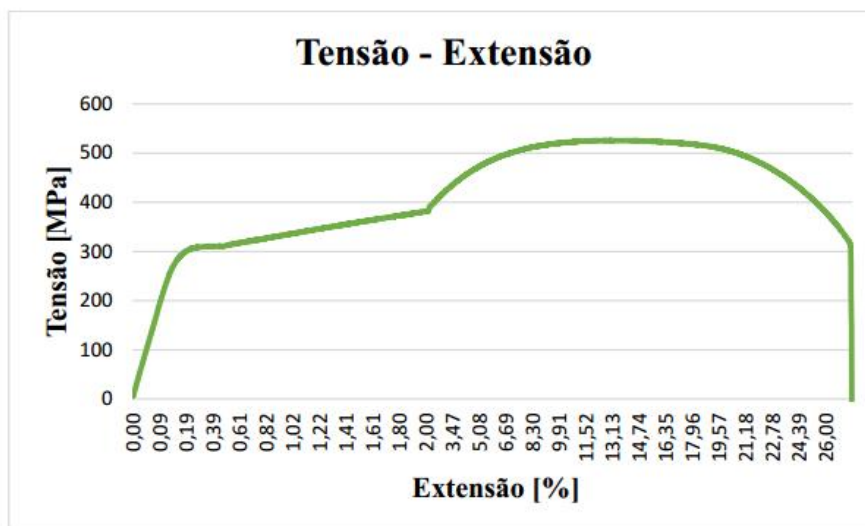
TABELA DE CONVERSÃO DE DUREZAS E RESISTÊNCIAS

Impres mm Carga 3.000 kgf Esfera 10mm	Dureza Brinel (HB)	Resistências (kgf/mm ²)			Dureza Rockwell		Dureza Vickers	Dureza Shore
		Aço Carbono HB x 0,36	Aço Cr Aço Mn Aço CrMn HB x 0,35	Aço Ni Aço CrNi Aço CrMo HB x 0,34	Esc. C (HRc)	Esc. B (HRb)	Pirâmide Diamante (HV)	
-	-	-	-	-	68,0	-	940	97
-	-	-	-	-	67,5	-	920	96
-	-	-	-	-	67,0	-	900	95
-	-767	276,1	268,4	260,7	66,4	-	880	93
-	-757	272,4	264,9	257,3	65,9	-	860	92
2,25	-745	268,2	260,8	253,3	65,3	-	840	91
2,30	-710	255,6	248,5	241,4	63,3	-	780	87
2,35	-682	245,5	238,7	231,9	61,7	-	737	84
2,40	-683	235,1	228,6	222,0	60,0	-	697	81
2,45	627*	225,7	219,5	213,2	58,7	-	667	79
2,50	601*	216,4	210,4	204,3	57,3	-	640	77
2,55	578*	208,1	202,3	196,5	56,0	-	615	75
2,60	555*	199,8	194,8	188,7	54,7	-	591	73
2,65	534*	192,2	186,9	181,6	53,5	-	569	71
2,70	514*	185	179,9	174,8	52,1	-	547	70
2,75	495*	178,2	173,3	168,3	51,0	-	528	68
2,80	477*	171,7	167	162,2	49,6	-	508	66
2,85	461*	166	161,4	156,7	48,5	-	491	65
2,90	444*	159,8	155,4	151,0	47,1	-	472	63
2,95	429*	154,4	150,2	145,9	45,7	-	455	61
3,00	415	149,4	145,3	141,1	44,5	-	440	59
3,02	401	144,4	140,4	136,3	43,1	-	425	58
3,10	388	139,7	135,8	131,9	41,8	-	410	56
3,15	375	135	131,3	127,5	40,4	-	396	54
3,20	363	130,7	127,1	123,4	39,1	-	383	52
3,25	352	126,7	123,2	119,7	37,9	-110,0	372	51
3,30	341	122,8	119,4	115,9	36,6	-109,0	360	50
3,35	331	119,2	115,9	112,5	35,5	-108,5	350	48
3,40	321	115,6	112,4	109,1	34,3	-108,0	339	47
3,45	311	112	108,9	105,7	33,1	-107,5	328	46
3,50	302	108,7	105,7	102,7	32,1	-107,0	319	45
3,55	293	105,5	102,6	99,6	30,9	-106,0	309	43
3,60	285	102,6	99,8	96,9	29,9	-105,5	301	-
3,65	277	99,7	97,0	94,2	28,8	-104,5	292	41
3,70	269	96,9	94,2	91,5	27,6	-104,0	284	40
3,75	262	94,3	91,7	89,1	26,6	-103,0	276	39
3,80	255	91,8	89,3	86,7	25,4	-102,0	269	38
3,85	248	89,3	86,8	84,3	24,2	-101,0	261	37
3,90	241	86,8	84,4	81,9	22,8	100,0	253	36
3,95	235	84,6	82,3	79,9	21,7	99,0	247	35
4,00	229	82,4	80,2	77,9	20,5	98,2	241	34
4,05	223	80,3	78,0	75,8	-18,8	97,3	234	-
4,10	217	78,1	76,0	73,8	-17,5	96,4	228	33
4,15	212	76,3	74,2	72,1	-	95,5	-	-
4,20	207	74,5	72,5	70,4	-	94,6	218	32
4,25	201	72,4	70,4	68,3	-	93,8	-	-
4,30	197	70,9	69,0	67,0	-	92,8	207	30
4,35	192	69,1	67,2	65,3	-	91,9	-	-
4,40	187	67,3	65,5	63,6	-	90,7	196	-
4,45	183	65,9	64,1	62,2	-	90,0	-	-
4,50	179	64,4	62,6	60,9	-	89,0	188	27
4,55	174	62,6	60,9	59,2	-	87,8	-	-
4,60	170	61,2	59,5	57,8	-	86,8	178	26
4,65	167	59,8	58,4	56,8	-	86,0	-	-
4,70	163	58,7	57,1	55,4	-	85,0	171	25
4,80	156	56,2	54,6	53,0	-	82,9	163	-
4,90	149	53,6	52,2	50,7	-	80,8	156	23
5,00	143	51,5	50,1	48,6	-	78,7	150	22
5,10	137	49,3	48,0	46,6	-	76,4	143	21
5,20	131	47,2	45,9	44,5	-	74,0	137	-
5,30	126	45,4	44,1	42,8	-	72,0	132	20
5,40	121	43,6	42,4	41,1	-	69,8	127	19
5,50	116	41,8	40,6	39,4	-	67,6	122	18
5,60	111	40,0	38,9	37,7	-	65,7	117	15

Anexo 2 – Curva de deformação plástica do aço A 335 P11

Anexo 2

❖ Resultado obtido no ensaio de tração [ISO 6892-1:2009 (E)].



Ensaio	Tensão de Rotura (MPa)	Tensão de Cedência 0,2% (MPa)	Módulo de Elasticidade (MPa)
Tração	525,6	310,5	200052

Anexo 3 – Certificado de calibração do calibrador dos extensómetros dinâmicos

Anexo 3



Instalações de
Oeiras

Validity unknown

Digitally signed by
LabMetro Online
Date: 2012.11.08
09:12:03+00:00
Reason: Documento
aprovado
electronicamente

Certificado de calibração

Data de emissão 2012-11-06

Certificado n.º CDIM6563/12

Página 1 de 5

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

Marca:	Instron	Indicação:	Analógica
Modelo:	---	Intervalo de Indicação:	0 a 25 mm
Nº Ident.:	01CEAX	Resolução:	0,0005 mm
Nº Série:	---		(do dispositivo afixador)

Cliente **ISQ - LABORATÓRIO DE MATERIAIS**

AV. PROF. DR. CAVACO SILVA, 33 - APARTADO 119
2781-951 TAGUS PARK

Data de Calibração **2012-11-06**

Condições Ambientais Temperatura: 19,7 °C Humidade relativa: 55,0 %hr

Procedimento PO.M-DM/DIM 036 Ed. C (tem por base a norma DIN 863 parte II)

Rastreabilidade Comparador electrónico, com o nº ident. LD046, rastreado ao IPQ (Portugal), à Mahr e PTB (Alemanha)

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

Resultados Encontram-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.Z/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

http://metrologia.isq.pt

Porto: Rua do Mirante, 259 • 4415-491 Orlim • Portugal
Tels.: +351 22 747 19 10 / 50 • Fax: +351 22 747 19 19 / 745 57 76

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

Anexo 3



Certificado de calibração

Certificado nº. CDIM6563/12

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	0,0998 mm	0,0001 mm	0,10 %	± 0,0013 mm
0,2 mm	0,1999 mm	0,0000 mm	0,00 %	± 0,0013 mm
0,3 mm	0,2999 mm	0,0000 mm	0,00 %	± 0,0013 mm
0,4 mm	0,3998 mm	0,0000 mm	0,00 %	± 0,0013 mm
0,5 mm	0,4996 mm	0,0004 mm	0,08 %	± 0,0013 mm
0,6 mm	0,5995 mm	0,0003 mm	0,05 %	± 0,0013 mm
0,7 mm	0,6997 mm	0,0001 mm	0,01 %	± 0,0013 mm
0,8 mm	0,7997 mm	0,0002 mm	0,03 %	± 0,0013 mm
0,9 mm	0,8998 mm	0,0001 mm	0,01 %	± 0,0013 mm
1,0 mm	0,9995 mm	0,0004 mm	0,04 %	± 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	0,0998 mm	0,0002 mm	0,20 %	± 0,0013 mm
0,2 mm	0,2000 mm	0,0000 mm	0,00 %	± 0,0013 mm
0,3 mm	0,3000 mm	0,0000 mm	0,00 %	± 0,0013 mm
0,4 mm	0,4001 mm	-0,0001 mm	-0,02 %	± 0,0013 mm
0,5 mm	0,4997 mm	0,0003 mm	0,06 %	± 0,0013 mm
0,6 mm	0,5999 mm	0,0001 mm	0,02 %	± 0,0013 mm
0,7 mm	0,7001 mm	-0,0001 mm	-0,01 %	± 0,0013 mm
0,8 mm	0,8001 mm	-0,0001 mm	-0,01 %	± 0,0013 mm
0,9 mm	0,9002 mm	-0,0002 mm	-0,02 %	± 0,0013 mm
1,0 mm	0,9998 mm	0,0002 mm	0,02 %	± 0,0013 mm

Este documento não pode ser reproduzido, exceto 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 / 61 86 / 90 20 • Fax: +351 21 422 81 02

labmetro@isq.pt

<http://metrologia.isq.pt>

Ponte: Rua do Mirante, 258 • 4415-491 Grijó • Portugal
Tels.: +351 22 747 19 10 / 50 • Fax: +351 22 747 19 19 / 745 57 78

Anexo 3

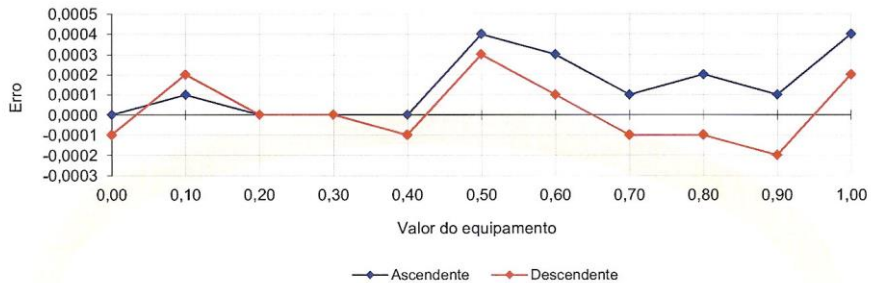


Certificado de calibração

Certificado nº. CDIM6563/12

Página 3 de 5

Representação gráfica da medição dos erros (valores em mm)



Determinação dos erros

	Valor de referência
Sentido ascendente:	
- Erro máximo (G)	0,0004 mm
- Amplitude máxima do Erro	0,0004 mm
- Repetibilidade	0,0003 mm
Sentido descendente:	
- Erro máximo (G)	0,0003 mm
- Amplitude máxima do Erro	0,0005 mm
- Repetibilidade	0,0005 mm
Histerese	0,0003 mm

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

DM/065.2/07

Calibrado por

José Godinho

Responsável pela Validação

Sara Leonardo (Responsável Técnico)

Instituto de Soldadura e Qualidade

Lisboa: Av. Prof. Cavaco Silva, 33 • Teguspark • 2740-120 Oeiras • Portugal
Tels: +351 21 422 90 34/61 68/90 20 • Fax: +351 21 422 81 02

labmetro@isq.pt

<http://metrologia.isq.pt>

Porto: Rua do Mirante, 256 • 4415-491 Grijó • Portugal
Tels: +351 22 747 19 10/50 • Fax: +351 22 747 19 19/745 67 78

Anexo 3



Certificado de calibração

Certificado n.º. CDIM6563/12

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	0,5001 mm	-0,0001 mm	-0,02 %	± 0,0013 mm
1,0 mm	1,0000 mm	0,0000 mm	0,00 %	± 0,0013 mm
1,5 mm	1,4999 mm	0,0001 mm	0,01 %	± 0,0013 mm
2,0 mm	1,9998 mm	0,0002 mm	0,01 %	± 0,0013 mm
2,5 mm	2,4998 mm	0,0002 mm	0,01 %	± 0,0013 mm
3,0 mm	2,9997 mm	0,0003 mm	0,01 %	± 0,0013 mm
3,5 mm	3,4997 mm	0,0003 mm	0,01 %	± 0,0013 mm
4,0 mm	3,9996 mm	0,0004 mm	0,01 %	± 0,0013 mm
4,5 mm	4,4994 mm	0,0006 mm	0,01 %	± 0,0013 mm
5,0 mm	4,9995 mm	0,0005 mm	0,01 %	± 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	0,5003 mm	-0,0003 mm	-0,06 %	± 0,0013 mm
1,0 mm	1,0005 mm	-0,0005 mm	-0,05 %	± 0,0013 mm
1,5 mm	1,5005 mm	-0,0005 mm	-0,03 %	± 0,0013 mm
2,0 mm	2,0003 mm	-0,0003 mm	-0,02 %	± 0,0013 mm
2,5 mm	2,5005 mm	-0,0005 mm	-0,02 %	± 0,0013 mm
3,0 mm	3,0004 mm	-0,0004 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	4,5000 mm	0,0000 mm	0,00 %	± 0,0013 mm
5,0 mm	4,9996 mm	0,0004 mm	0,01 %	± 0,0013 mm

Este documento não pode ser reproduzido, exceto 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 / 91 66 / 90 20 • Fax: +351 21 422 81 02

labmetro@isq.pt

<http://metrologia.isq.pt>

Porto: Rua do Mirante, 256 • 4415-491 Oporto • Portugal
Tels.: +351 22 747 19 10 / 50 • Fax: +351 22 747 19 19 / 745 57 76

Anexo 4 – Curva de transformação de volts para milímetros

Anexo 4

Na Figura 1 encontra-se a equação de transformação de volts para milímetros.

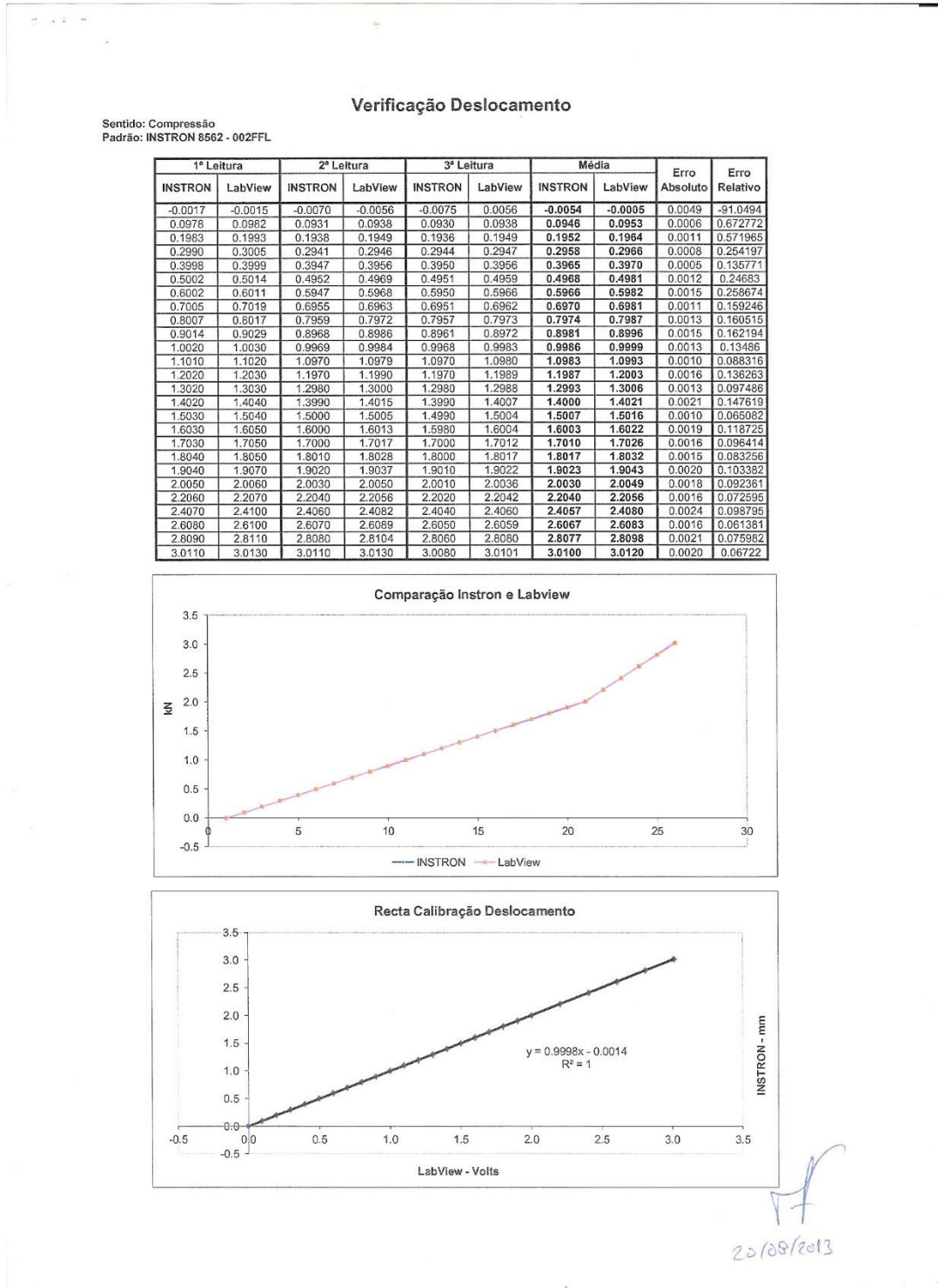
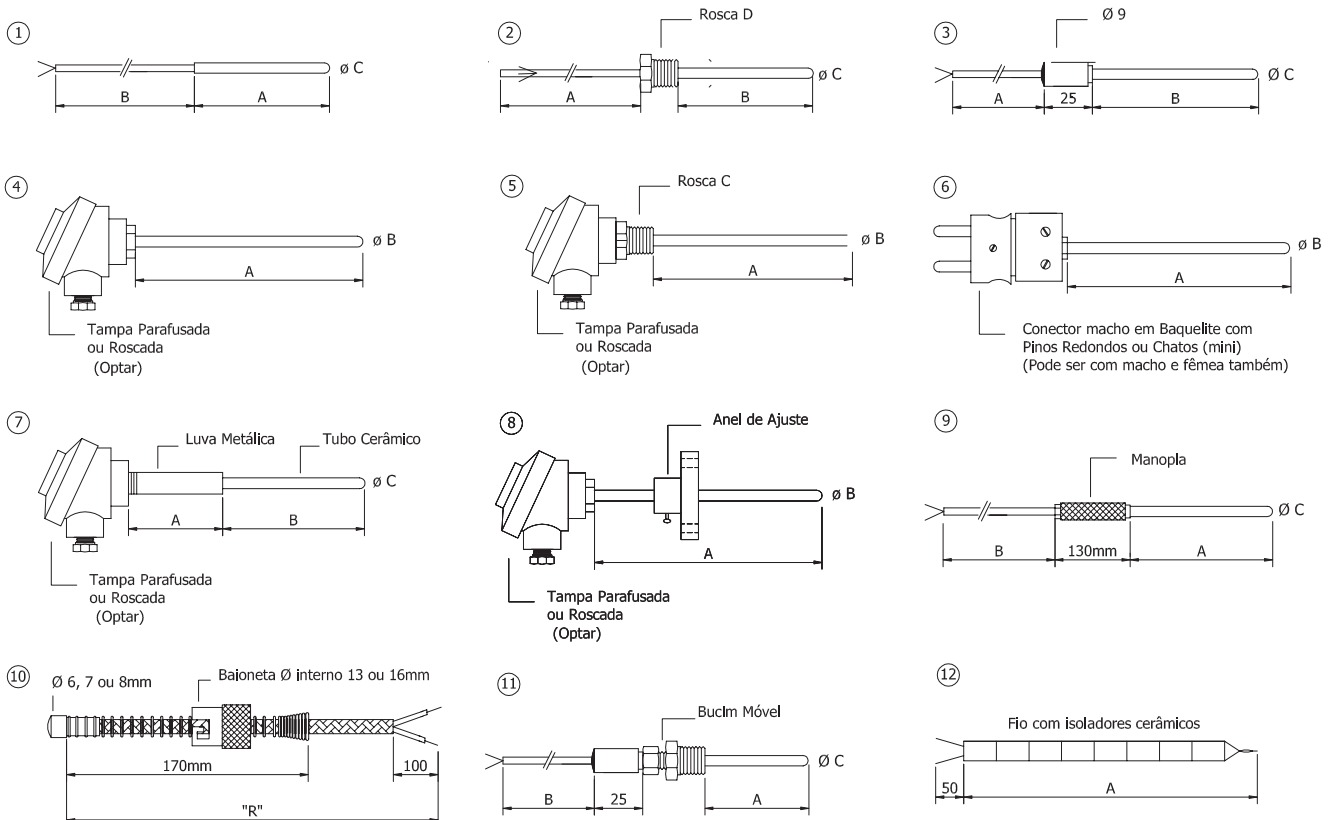


Figura 1 - Equação de transformação de volts para milímetros.

Anexo 5 – Catálogo das características dos termopares

Tipo	Elemento Positivo	Elemento Negativo	Faixa de temperatura usual	Características	Restrições
T	Cobre (+)	Constantan (-)	-180 a 370°	Podem ser usados em atmosferas oxidantes, redutoras, inertes e no vácuo. Adequado para medições abaixo de zero graus. Apresenta boa precisão na sua faixa de utilização.	- oxidação do cobre acima de 310°C.
J	Ferro (+)	Constantan (-)	0 a 760°C	Podem ser usados em atmosferas oxidantes, redutoras, inertes e no vácuo. Não devem ser usados em atmosfera sulfurosa e não se recomenda o uso em temperaturas abaixo de zero graus. Apresenta baixo custo.	- limite máximo de utilização em atmosfera oxidante de 760°C devido à rápida oxidação do ferro. - utilizar tubo de proteção acima de 480°C.
E	Níquel Cromo (+)	Cobre Níquel (-)	0 a 870°C	Podem ser usados em atmosferas oxidantes e inertes. Em ambientes redutores ou vácuo perdem suas características termoeletricas. Adequado para uso em temperaturas abaixo de zero graus.	- baixa estabilidade em atmosfera redutora.
K	Chromel (+)	Alumel (-)	0 a 1200°C	Recomendável em atmosferas oxidantes ou inertes. Ocasionalmente, podem ser usados abaixo de zero graus. Não devem ser utilizados em atmosferas sulfurosas. Seu uso no vácuo é por curto período de tempo.	- vulnerável em atmosfera sulfurosa e gases como SO ₂ e H ₂ S, requerendo substancial proteção quando utilizado nessas condições.
S	Platina 90% Rhódio 10% (+)	Platina 100% (-)	0 a 1600°C	Recomendável em atmosferas oxidantes ou inertes. Não devem ser usados abaixo de zero graus no vácuo, em atmosferas redutoras ou atmosferas com vapores metálicos. Apresenta boa precisão em temperaturas elevadas.	- vulnerável a contaminação em atmosferas que não sejam oxidantes. - para altas temperaturas, utilizar isoladores e tubos de proteção de alta alumina.
R	Platina 87% Rhódio 13% (+)	Platina 100% (-)	0 a 1600°C		
B	Platina 70% Rhódio 30% (+)	Platina 94% Rhódio 6% (-)	870 a 1795°C	Recomendável em atmosferas oxidantes ou inertes. Não devem ser usados no vácuo, em atmosferas com vapores metálicos. Mais adequados para altas temperaturas que os tipos S/R.	- vulnerável a contaminação em atmosferas que não sejam oxidantes. - utilizar isoladores e tubos de proteção de alta alumina.
N	Nicrosil (+)	Nisil (-)	0 a 1260°C	Excelente resistência a oxidação até 1200°C. Curva FEM x temp. similar ao tipo K, porém possui menor potência termoeletrica. Apresenta maior estabilidade e menor drift x tempo.	- melhor desempenho na forma de termopar de isolamento mineral.

Exemplos de construções usuais



TABELA

Cores de Cabos de Compensação e Extensão

Contemp Ind. Com. Serv. Ltda

(11) 4223-5100 | vendas@contemp.com.br | www.contemp.com.br



Ligas	+ FIO	- FIO	Código de cores ANSI MC-96.1	Internacional IEC 584-3	BS 1843	DIN 43710	JIS C1610-1981	Padrão	Especial
J	Fe (magnético)	Constantan Cu-Ni						2.2°C ou 0.75%	1.1°C ou 0.4%
K	Níquel-Cromo Ni-Cr	Níquel-Alum Ni-Al (magnético)						2.2°C ou 0.75%	1.1°C ou 0.4%
W*X	Cobre Cu	Cu-Ni							
T	Cobre Cu	Constantan Cobre-Níquel Cu-ni						1.0°C ou 0.75%	0.5°C ou 0.4%
E	Níquel-Cromo Ni-Cr	Constantan Cobre-Níquel Cu-ni						1.7°C ou 0.5%	1.0°C ou 0.4%
N	Nicrosil Ni-Cr-Si	Nisil Ni-Si-Mg						2.2°C ou 0.75%	1.1°C ou 0.4%
R	Platina 13% Rhadio Pt-10%Rh	Platina Pt						1.5°C ou 0.25%	0.6°C ou 0.1%
S	Platina 10% Rhadio Pt-10%Rh	Platina Pt						1.5°C ou 0.25%	0.6°C ou 0.1%
B	Platina 30% Rhadio Pt-30%Rh	Platina 6% Rhadio Pt-6%Rh			use fio de cobre			0.5% ou 500°C	não estabilizado

Cabos de compensação, extensão, conectores compensados etc.

