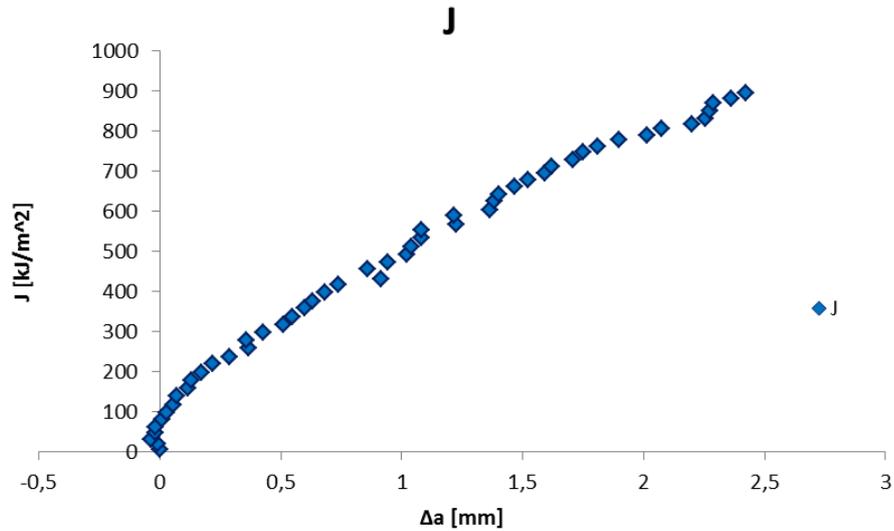




INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA

Área Departamental de Engenharia Mecânica

ISEL



Determinação da curva de Resistência à fractura em materiais metálicos “Curva R”

Adriano Jorge Santos Balhana
(Licenciado em Engenharia Mecânica)

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

Orientadores:

António Correia da Cruz

Afonso Leite

Manuel Gomes

Júri:

Presidente: Doutor João Manuel Ferreira Calado

Vogais: Doutor Luís Felipe Galvão Reis

Doutor Manuel Gomes

Fevereiro de 2017



ISEL

INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA

Área Departamental de Engenharia Mecânica

Determinação da curva de Resistência à fractura em materiais metálicos “Curva R”

Adriano Jorge Santos Balhana
(Licenciado em Engenharia Mecânica)

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

Orientadores:

António Correia da Cruz

Afonso Leite

Manuel Gomes

Júri:

Presidente: Doutor Manuel Ferreira Calado

Vogais: Doutor Luís Felipe Galvão Reis

Doutor Manuel Gomes

Fevereiro de 2017

*“O sucesso não é definitivo, o fracasso
não é fatal: É a coragem de continuar que
conta”*

Winston Churchill

Agradecimentos

Em primeiro lugar quero agradecer à minha família. Aos meus pais Fernanda Balhana e Carlos Balhana pelo seu apoio, que permitiu que eu realizasse a licenciatura e o Mestrado em engenharia Mecânica. Quero também agradecer aos meus avós, Vasco Santos, Ana Santos, Zulmira Balhana e Manuel Balhana pelo apoio moral que sempre me prestaram desde o início do meu percurso académico. Em último, mas não menos importante, à minha irmã Sara Balhana e ao seus dois filhos, Jorge e Ricardo pelo apoio e paciência disponibilizaram.

Agradeço aos meus Orientadores, António Correia da Cruz, Manuel Gomes e Afonso Leite, que em primeiro lugar disponibilizaram o tema do trabalho aqui apresentado e pelo apoio e orientação prestada ao longo da realização do mesmo.

Agradeço ao ISQ, em particular ao LabMat, pela disponibilidade dos seus meios materiais e técnicos que permitiram a realização deste trabalho. Quero agradecer em particular aos seguintes membros do Labmat pelo apoio moral e técnico que me dispensaram e também pelos momentos de boa disposição. Por ordem alfabética: Adilson Andrade, Ana Catarina Duarte, Bruno Silva, Elisabete Vaz, Felipe Nascimento, Inês Barroso, Joana Gonçalves, João Nabais, José Nunes, Luis Nunes, Sérgio Reis e Sónia Augusto.

Finalmente quero agradecer a todos os meus amigos que me ajudaram de modo directo ou indirecto na realização do presente trabalho, pois fizeram parte de um dos momentos mais importantes da minha vida e por isso nunca devem ser esquecidos. Em particular e por ordem alfabética: André Curado, André Oliveira, Bárbara Brito, Emanuel Delgado, Filipa Tancredo, Gilberto Neto, Inês Soares, João Diniz, João Reis, João Soares, João Tiago, João Vicente, Mafalda Viegas, Mário Martina, Nuno Guerreiro, Pedro Gaspar, Rita Sanches, Rita Soares, Sara Fernandez, Sara Tomar e Tiago Almeida

A todos, Muito Obrigado

Glossário

a – Tamanho de fenda

a_0 – Tamanho de fenda inicial

a_b – Tamanho de fenda corrigido com o arrombamento

a_{eff} – Tamanho de fenda efectivo

A_{pl} – Área plástica no diagrama de força deslocamento

b – Ligamento não fendido

B – Espessura do provete

C – *Compliance* ou complacência elástica

E – Módulo de *Young* (ou elasticidade)

F – Força aplicada

$f\left(\frac{a}{W}\right)$ – Factor de forma

J – Integral J

J_{IC} – Valor do integral J (independente do tamanho) correspondente a iniciação da propagação estável de fenda para o modo I de propagação de fenda.

J_Q – Valor do integral J correspondente a iniciação da propagação estável de fenda para o modo I de propagação de fenda.

J_{el} – Componente elástica do Integral J

J_{pl} – Componente plástica do Integral J

K – Factor de intensidade de tensões elásticas

K_{eff} – Factor de intensidade de tensões efectivo

K_{IC} – Valor do factor de intensidade (independente das dimensões) de tensões correspondente à propagação instável de fenda para o modo I de propagação de fenda.

K_Q - Valor do factor de intensidade de tensões correspondente à propagação instável de fenda para o modo I de propagação de fenda.

L – Comprimento do provete

P_n – Força Normalizada

R – Resistência à fractura de um material metálico

S – Distância entre apoios no dispositivo de flexão (Vão)

U_γ – Energia de superfície

$U_{\gamma P}$ – Trabalho de deformação plástica

V – Deslocamento

V_{pl} – Componente plástica do deslocamento

v_{pl}' – Componente plástica do deslocamento normalizado

W – Altura do provete

W_d – Densidade de energia de deformação

ν – Coeficiente de *Poisson*

Δa – Variação do comprimento de fenda

η_{pl} – Factor eta plástico

γ_{pl} – Factor gamma plástico

σ_{YS} – Tensão de cedência

σ_{uts} – Tensão de rotura

σ_Y – Tensão de escorregamento (*flow stress*)

Acrónimos

ASTM – American Society of Testing Materials

BSi – British Standards institute

BOAC - British Overseas Airways Company

C(T) – Compact Tension

CCT – Center Cracked Tensile Panels

CMOD – Crack Mouth Opening Displacement (Deslocamento da abertura da boca da fenda)

COD – Crack Opening Displacement (deslocamento da abertura da fenda)

CTOA – Crack Tipopening Angle (Angulo de abertura da ponta da fenda)

CTOD – Crack Tipopening Displacement (Deslocamento da abertura da ponta da fenda)

DENT – Double Edge Notch Tension

DC(T) – Disk Shaped Compact Tension Specimen (

ESIS – European Structural Integrity Society

FPZ – Fracture Process Zone (Zona do processo de fractura)

ISO – International Standardization Organization

LLD – LoadLineDisplacement (deslocamento ao longo da linha de carga)

M(T) – Middle Crack Tension Panel

MFLE – Mecânica da Fractura Linear Elástica

MFEP – Mecânica da Fractura Elasto Plástica

SENB – Single Edge Notch Bending

SENT – Single Edge Notch Tension

Resumo

No presente trabalho foi abordado a determinação da curva de resistência à fractura (“Curva R”), em materiais metálicos, através dos métodos de curva de resistência e de normalização descritos na ASTM E 1820.

O método de curva de resistência consiste na obtenção da curva de resistência à fractura (expressa em integral J ou CTOD), através de uma única amostra de material, recorrendo à técnica de *elastic compliance*.

O método normalização consiste na obtenção da curva de resistência (expressa em integral J) directamente do diagrama de força deslocamento, e da medição do comprimento inicial e final da fenda na superfície de fractura.

Foram ensaiados dois conjuntos de provetes (6+8) de dois materiais metálicos distintos. Dois provetes de cada conjunto foram ensaiados através do método de normalização. Os restantes foram submetidos ao método de curva de resistência, através do ensaio desenvolvido no software Wavematrix baseado no procedimento da ASTM E 1820. Foram confrontados os resultados entre cada um dos métodos dentro de cada material e ainda foram comparadas as curvas de resistência entre os dois materiais metálicos. Com as curvas de resistência obtidas foram ainda aplicados os procedimentos do anexo A9 da ASTM E 1820 para se obterem os valores de iniciação à fractura J_{IC} .

Palavras chave: Resistência à fractura, Ensaio de Fractura, Materiais Metálicos, ASTM E 1820, Curva de Resistência, Integral J, J_{IC}

Abstract

In the present work, a study is made about the experimental determination of the fracture resistance curve (R curve) of metallic materials, through the methods: resistance curve and normalization, present on ASTM E 1820.

The resistance curve method consists in obtaining the “R curve” (Expressed in integral J or CTOD) through a single specimen. Within this method, the elastic compliance technique was used to obtain crack extension values.

The normalization method consists in obtaining the resistance curve (expressed in integral J) directly from the force vs displacement diagram and the initial and final crack lengths, measured at the fracture surface.

Two sets of specimens (6+8) of two metallic materials were tested. Two specimens from each set were submitted to the normalization method, while the remaining were studied with the resistance curve method, developed in the Instron Wavematrix software based on the procedure of ASTM E 1820. Within each material, the respective resistance curves were compared using both methods. The procedures of Annex A9 of ASTM E 1820 were also applied to obtain the fracture initiation values, J_{IC} .

Keywords: Fracture Toughness, Fracture Testing, ASTM E 1820, Resistance Curve, Metallic Materials, J Integral, J_{IC}

Índice

1	Introdução.....	1
1.1	Motivações/Enquadramento	1
1.2	Objectivos	3
1.3	Metodologia	4
2	Introdução Teórica	5
2.1	Estado da arte.....	5
2.1.2	Primórdios da Mecânica da fractura.....	8
2.1.3	O desenvolvimento da mecânica da fractura linear elástica.....	10
2.1.4	O desenvolvimento da mecânica da fractura elásto-plástica.....	10
2.1.5	As tendências da mecânica da fractura e as suas outras abordagens.....	12
2.2	Conceitos da Mecânica da fractura	14
2.2.1	Mecânica da fractura linear elástica (MFLE).....	14
2.2.2	Factor de intensidade de tensões elásticas-“K”	17
2.2.3	Plasticidade da ponta da fenda e o significado da tensão plana ou extensão plana na mecânica da fractura.	20
2.2.4	Os valores críticos de “K” e “G”	24
2.2.5	A determinação experimental dos valores críticos para o estado de deformação plana K_{Ic}	28
2.2.6	Limitações da MFLE	31
2.2.7	Mecânica da fractura elasto-plástica.....	32
2.2.8	Crack Tip Opening Displacement (CTOD).....	32
2.2.9	Integral J	33
2.2.10	Determinação experimental dos δC e JIC	36
3	Curva de Resistência	39
3.1	O conceito	39
3.2	Normalização e o problema da transferibilidade	45
3.3	Curva “ K_r ”	49

3.3.1	Factores que influenciam a curva de resistência nas condições de tensão plana	54
3.4	Curva "JR"	57
3.4.1	Factores que influenciam a curva de resistência em condições elasto-plásticas	59
4	Obtenção da curva de resistência à fractura – Caso estudo	61
4.1	Verificação e selecção do material de ensaio	61
4.2	Obtenção das propriedades mecânicas do material	65
4.2.1	Ensaio de impacto (EN ISO 148)	65
4.2.2	Composição química, Dureza e microestrutura	69
4.2.3	Ensaio de tracção (EN ISO 6892)	71
4.3	Seleção da curva "R"	72
4.4	Equipamentos de ensaio	74
4.4.1	Máquinas de ensaio e fadiga	74
4.4.2	Dispositivos	75
4.4.3	Extensómetro	77
4.5	Verificação dimensional dos provetes	78
4.5.1	Requisitos dimensionais do provete e entalhe da ASTM E1820	78
4.5.2	Verificação dos requisitos dimensionais	80
4.6	Pré-fissuração dos provetes	84
4.6.1	Requisitos da ASTM E 1820	84
4.6.2	Controlo do processo de pré fissuração	94
4.7	Ensaio – Procedimento da curva de resistência	95
4.8	Método desenvolvido	96
4.9	Processamento de dados e obtenção da curva de resistência	100
4.9.1	Cálculo do comprimento de fenda	101
4.9.2	Cálculo do Integral J	102
4.9.3	Condições iniciais do cálculo	104

4.10	Medição óptica do tamanho de fenda na superfície de fractura.....	106
4.11	Método de normalização.....	109
4.12	Obtenção do <i>JIC</i>	112
5	Resultados - Tratamento, verificação e interpretação	117
5.1	Verificação dos ensaios referentes ao método de curva de resistência.....	119
5.2	Curvas de Resistência	121
5.3	Medição óptica e previsão do tamanho de fenda	124
5.4	<i>JQ</i> - Valor de iniciação à fractura.	129
6	Conclusões	133
6.1	Sugestões para estudos posteriores	135
7	Bibliografia.....	136
8	Anexos.....	141
8.1	Anexo A – Lista de provetes originais.....	142
8.2	Anexo B – Verificação do extensómetro	145
8.3	Anexo C – Registo da pré-fissuração	147
8.4	Anexo D – Exemplo do calculo da curva de resistência.....	164
8.5	Anexo E – Registo da medição do comprimento de fenda na superfície de fractura.	171
8.6	Anexo F – Método de normalização	186
8.7	Anexo G – Obtenção do J_{IC}	198

Índice de Figuras

Figura 1-Fractura Frágil do casco de um dos navios Liberty [4]	6
Figura 2 - Modos de propagação de fenda [14].....	14
Figura 3 - Referencial utilizado por Irwin para o desenvolvimento da equação que representa as tensões na proximidade da fenda [12]	17
Figura 4 - Princípio da sobreposição [9]	19
Figura 5 - Zona plástica da fenda segundo o modelo de Irwin [9].....	20
Figura 6 - Zona plástica da fenda segundo os critério de Von Mises para o modo I (a), II (b) e III (c) [12].....	21
Figura 7 - Representação tridimensional da zona plástica na ponta da fenda [9]	22
Figura 8 - Influência da espessura no tamanho da zona plástica [9].....	22
Figura 9 - Critério energético para o estado de deformação plana [9]	25
Figura 10 - Critério energético para o estado de tensão plana [9].....	26
Figura 11 - Variação dos valores de "K" crítico com a variação da espessura. [12].....	27
Figura 12- Requisitos dimensionais para o provete Senb segundo ASTM E399 [12].....	28
Figura 13 - Requisitos dimensionais para o provete compacttension segundo ASTM E 399 [12]	29
Figura 14 - Requisitos dos entalhes para a determinação do K_{IC} segundo ASTM E399 [18]	29
Figura 15- Zona plástica e as dimensões do provete [19]	31
Figura 16 - Conceito do CTOD [20]	32
Figura 17 - Material elástico não linear vs Material elasto-plastico [4].....	34
Figura 18 - Integral de contorno à volta da ponta da fenda [13]	34
Figura 19 - Modelo de articulação plástica e diagrama de F vs CMOD [9].....	37
Figura 20 - Obtenção do J_{IC} [25]	38
Figura 21 – Sobreposições de curvas de carga com a curva de resistência do material (a) Diagrama de força deslocamento que gera a curva de resistência com o ponto de carga máxima referenciado.(b) [28].....	40

Figura 22 - Previsão do comportamento à fractura através da curva de resistência [9]	41
Figura 23 - Influência do constrangimento da zona plástica na ponta da fenda na curva “R” [30]	43
Figura 24 - Influência do parâmetro slenderness e do expoente de endurecimento [31]	44
Figura 25 - Influência das cargas biaxiais e das cargas de flexão [31]	44
Figura 26 - Influência da posição angular na frente de fenda e do rácio entre carga aplicada e carga de cedência [31]	44
Figura 27 - Curvas de resistência à fractura para diferentes relações de a/w [33]	46
Figura 28 - Método desenvolvido por Zhu e Chao.....	48
Figura 29 - Provetes utilizados para a determinação da curva “Kr” [36].....	50
Figura 30 – a) Representação esquemática da zona onde ocorre encurvadura [9] - b)Dispositivo anti encurvadura para uma placa com fenda central [9] - c)Dispositivo anti- encurvadura do provete C(T) [31]	52
Figura 31 - Efeito da encurvadura e fricção no diagrama F-Deslocamento [36]	53
Figura 32 – Estudos efectuados em placas finas onde identificou a influência, na resistência à fractura, do tipo de carregamento em materiais diferentes [28].	54
Figura 33 - Efeito do ligamento combinado [28] com esforços de tração a) e flexão b) ...	55
Figura 34 - Curvas de resistência de diversos materiais metálicos [28].....	60
Figura 35 - Material disponível para ensaio	61
Figura 36 - Provette de material base	62
Figura 37- Provette proveniente de chapa soldada	62
Figura 38 - Dimensões de referência do provete de flexão em três pontos.....	62
Figura 39 - Provetes de tração e de Impacto de Charpy	65
Figura 40 - Provette de Impacto de Charpy Tipo A	65
Figura 41- Resultados do ensaio de Impacto.....	66
Figura 42 - Ductilidade do material em função da variação de temperatura.....	67
Figura 43 - Expansão lateral.....	68
Figura 44 - Compilação dos ensaios de impacto	68

Figura 45 - Micrografias obtidas através de microscópio óptico (500 X).....	70
Figura 46 - Instron 8502 e respectiva consola.....	74
Figura 47 - Instron 8204 com o comando e computador de controlo.....	74
Figura 48 – a)- Dispositivo de flexão b)- Requisitos dimensionais do dispositivo	75
Figura 49 - Extensómetro de palhetas Instron 10/4.....	77
Figura 50 - Requisitos dimensionais do provete SENB [40]	78
Figura 51 - Tipos de entalhe [40]	79
Figura 52 - Requisitos dimensionais dos entalhes em “V” e estreito [40]	79
Figura 53 - Entalhe em V	82
Figura 54 - Entalhe em escada.....	82
Figura 55- Forças no ciclo de fadiga	91
Figura 56 - Método desenvolvido no WaveMatrix	96
Figura 57- Relação entre o deslocamento vertical e a abertura da boca da fenda (B=1,5mm)	99
Figura 58 - Diagrama força vs deslocamento do ensaio de um provete SENB utilizando o método de curva de resistência.....	100
Figura 59 - Exemplo de uma Curva de Resistência.....	105
Figura 60 - Superfície de Fractura de um provete ensaiado: a)-Entalhe, b)-Pré-fenda de fadiga c)- Fenda dúctil d)-Fenda de fadiga posterior ao ensaio e)- Fractura frágil provocada a baixa temperatura.....	106
Figura 61 - Representação da medição óptica dos comprimentos de fenda inicial e final	107
Figura 62 - Diagrama Força vs deslocamento Normalizado	110
Figura 63 - Obtenção do a_0q	112
Figura 64 - Curva de resistência restringida para obtenção do J_{Ic}	113
Figura 65 - Delimitação da região de dados válidos	114
Figura 66 - Diagrama reduzido F vs V amostra - 217	117
Figura 67 - Diagrama de F vs deslocamento reduzido amostra - 213	118
Figura 68 - Curvas de resistência: Amostra 217	121

Figura 69 - Curvas de resistência: Amostra 213	122
Figura 70 - Comparação entre as amostras 213 e 217.....	123
Figura 71 - Erro da previsão - Amostra 217.....	125
Figura 72 - Frente de fenda sujeita a “Tunelling effect” (a) e b) medição dos pontos de contorno das respectivas frentes de fenda.	125
Figura 73 - Erro da previsão - amostra 213	127
Figura 74 - JQ M. Curva de Resistência vs M normalização - Amostra 217.....	129
Figura 75 - JQ Influência do comprimento de fenda relativo - Amostra 217	130
Figura 76 - JQ M. Curva de Resistência vs M. Normalização - Amostra 213	131
Figura 77 - JQ: Influência do comprimento de fenda relativo - Amostra 213	131

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Ligamento mínimo para a determinação do KIC	30
Tabela 2 - Dimensões dos provetes selecionados.....	62
Tabela 3 - Composição Química dos materiais metálicos.....	69
Tabela 4 - Dureza Vickers	69
Tabela 5 - Resultados dos ensaios de tracção.....	71
Tabela 6 - Dimensões dos rolos do dispositivo de flexão	76
Tabela 7 - Características do Extensómetro	77
Tabela 8 - Verificação dimensional dos provetes – amostra 213	80
Tabela 9 - Verificação dimensional dos provetes - Amostra 217.....	81
Tabela 10 - Verificação dos entalhes em escada - Amostra 213.....	83
Tabela 11 - Verificação dos entalhes estreitos - Amostra 217	83
Tabela 12 - Planeamento da amostra 213	88
Tabela 13 - Planeamento da amostra 217	89
Tabela 14 - Parâmetros de ensaio para as séries 213 e217.....	98
Tabela 15 - Expressões de cálculo do deslocamento no passo 5.....	99
Tabela 16 - Verificação dos ensaios efectuados através do método de curva de resistência, amostra 217	119
Tabela 17 - Verificação dos ensaios efectuados através do método de curva de resistência, amostra 213	120
Tabela 18 - Verificação da medição directa e indirecta do comprimento de fenda - Amostra 217	124
Tabela 19 - Verificação da medição directa e indirecta do comprimento de fenda - Amostra 213	126
Tabela 20 - Verificação da aplicabilidade do método de normalização - Amostras 217 e213	127

1 Introdução

1.1 Motivações/Enquadramento

A revolução industrial marca o início da disseminação da utilização maciça dos materiais metálicos no desenvolvimento da sociedade humana. A partir desse momento os materiais metálicos passaram a ser o material de eleição para todo o tipo de aplicações de engenharia.

O sucesso dos metais, em utilizações de engenharia, deve-se a sua capacidade de cumprir os requisitos de projecto, serviço e ainda de ser produzido de acordo com as dimensões e geometrias pretendidas. A capacidade dos materiais metálicos cumprir os requisitos pretendidos é determinada pelas suas propriedades físicas e mecânicas. Entende-se por propriedades físicas todas aquelas que possam ser obtidas por métodos que não dependem da aplicação de força, como por exemplo, massa volúmica, as propriedades magnéticas, eléctricas e térmica. As propriedades mecânicas estabelecem a relação entre as forças ou tensões que actuam no material e a resistência do mesmo à deformação e ruptura. Ao longo dos anos foram desenvolvidos testes que usam a aplicação de força para medir propriedades mecânicas dos materiais, como por exemplo, o módulo de elasticidade (Young), tensão de cedência e rotura, deformação elástica e plástica, dureza, resistência à fadiga e fractura. As propriedades mecânicas são dependentes da microestrutura (tamanho de grão, distribuição de fase, etc.), tipo de estrutura cristalina e da sua composição química [1].

Com a crescente utilização de componentes metálicos, os problemas associados a falha dos mesmos tomaram cada vez mais importância, devido também a perdas humanas associadas. A maioria das falhas estruturais está associada a algum tipo de defeito do material ou de *design* do componente. Estes são agravado por um dos diversos processos de crescimento de fenda (fadiga, fluência, corrosão sob tensão, fissuração a frio, no caso de soldaduras) e que quando atinge o tamanho crítico dá se a falha através da fractura do material. A fractura é essencialmente de dois tipos, frágil e dúctil. A fractura frágil é caracterizada por ser abrupta e ocorrer por clivagem. Este tipo de fractura está associado a materiais metálicos de alta resistência, sujeitos a fendas provenientes de processos de maquinagem, tratamentos térmicos, soldadura e fenómenos de fadiga. Em contraste, a fractura dúctil, apresenta evidentes sinais de deformação plástica, e está associada a

sobrecargas, provocadas devido a projecto deficiente ou por aplicação de cargas que excedem aquelas para o qual o componente foi concebido [2].

A mecânica da fractura é uma ferramenta que pode ser utilizada na análise “*postmortem*”, dos componentes falhados, com o objectivo de encontrar as razões que contribuíram para a falha. Esta também pode ser utilizada no exame de componentes e estruturas em serviço, para averiguar a sua operacionalidade, e ainda no projecto segundo uma filosofia de “*fail safe design*”. Os parâmetros que é possível quantificarem através da mecânica da fractura são a carga crítica do componente, o tamanho do defeito e a resistência do material à fractura, estes formam aquilo que se designa o triângulo da mecânica da fractura. O sucesso e a utilidade da aplicação da mecânica da fractura está fortemente dependente da forma com é aplicada e da precisão dos dados que são utilizados. O melhor exemplo disso é as propriedades à fractura dos materiais metálicos, estas são dependentes da geometria e do tamanho da amostra ensaiada. Este facto levou as agências de normalização a desenvolverem testes com requisitos dimensionais que resultam em propriedades à fractura representativas de um estado triaxial de tensões na ponta da fenda (que representa a situação mais desfavorável que é possível encontrar), podendo ser considerado conservadoras quando comparadas com a realidade existente no componente ou estrutura. A utilização das propriedades obtidas através de testes normalizados, em alguns casos, está associada a algum nível de imprecisão (dispersão). Devido a esta dispersão associada aos valores de resistência à fractura, em determinadas situações, e também o facto de estar aliada a conceitos e ensaios mais complexos, estas propriedades são relegadas para segundo plano e substituídas por exemplo por análise dados de energia obtidos através de ensaios de Charpy [3].

O presente trabalho recai sobre a determinação da curva de resistência à fractura dos materiais metálicos, também denominada de curva “R”. Esta curva caracteriza a resistência do material metálico, no processo de fractura, com a propagação da fenda, e é considerada como sendo uma propriedade do material. A curva pode ser utilizada para a determinação dos valores de iniciação à fractura (J_{IC} ou δ_{IC}) ou ainda efectuar previsões do comportamento à fractura que uma determinada carga aplicada irá originar.

Neste trabalho desenvolveu-se um estudo sobre a obtenção da curva de resistência de através dos métodos da curva de resistência e de normalização contidos na ASTM E 1820, assim como, a obtenção do valor de iniciação à fractura, J_{IC} , pela norma anteriormente referida.

1.2 Objectivos

O principal objectivo deste trabalho foi para determinar a curva de resistência de um material metálico, através da aplicação dos procedimentos da ASTM E 1820. Identificar os problemas associados à aplicação dos mesmos, assim como, propor e abordar algumas das soluções.

Para atingir o objectivo definido foi necessário submeter amostras de material metálico, na forma de provetes de flexão em três pontos, também conhecidos por SENB, a uma rotina de ensaio criada para satisfazer os requisitos contidos na norma utilizada.

Com o auxílio de programas de cálculo (*Excel, Maple, Origin*) foram desenvolvidos processos de tratamento dos dados dos ensaios experimentais para a obtenção da curva de resistência e do valor de iniciação à fractura.

1.3 Metodologia

O ponto de partida para a abordagem ao tema foi a pesquisa de bibliografia e artigos científicos, relacionados com o objecto em estudo, e a análise de normas associadas.

No capítulo Um é efectuada a introdução ao tema, através das motivações que levaram ao desenvolvimento da dissertação, assim como, a definição dos objectivos e metodologia da dissertação.

No capítulo dois foi elaborada uma introdução teórica, onde consta um estado da arte sobre a mecânica da fractura os conceitos fundamentais da mesma.

A curva de resistência à fractura é abordada no capítulo três. Neste capítulo o conceito, normalização e os factores que influenciam a curva são abordados com base na pesquisa efectuada sobre o tema.

No quarto capítulo está descrito os passos efectuados para a correcta selecção da norma, com base em ensaios de tracção uniaxial e de Impacto. Neste capítulo é exposto o processo de preparação e ensaio dos provetes e também o processamento dos dados do ensaio para obtenção da curva de resistência.

No quinto capítulo são apresentados os resultados obtidos através do ensaio desenvolvido e a respectiva verificação com os requisitos normativos.

No sexto capítulo são apresentadas as conclusões sobre o trabalho desenvolvido e dos resultados obtidos, assim como sugestões para investigações futuras.

2 Introdução Teórica

2.1 Estado da arte

A preocupação com a falha das estruturas é uma temática que tem acompanhado a humanidade ao longo da sua evolução. Antes da revolução industrial a construção de estruturas estava limitada aos materiais que eram possíveis de extrair da natureza com maior facilidade (madeira e materiais de origem geológica) e aos poucos conhecimentos científicos existentes, no que diz respeito à resistência dos materiais e a estruturas. A utilização dos materiais metálicos até a revolução industrial ficou confinada a objectos e equipamentos de pequenas dimensões, devido principalmente à dificuldade de extracção e processamento dos mesmos.

Os desenvolvimentos tecnológicos e científicos verificados na revolução industrial proporcionaram a capacidade de extrair e processar materiais metálicos em maiores quantidades, o que levou à diversificação da utilização dos mesmos, como por exemplo na construção de reservatórios, caminhos-de-ferro, edifícios, pontes, etc. No entanto, algumas estruturas acabaram por ruir principalmente por dois motivos [4]:

1. Negligência durante o projecto, construção ou utilização
2. Aplicação de um novo formato/modelo, processo de fabrico ou material o que levou a um resultado inesperado e indesejável

2.1.1.1 A problemática da fractura frágil

Com a massificação da produção do aço e consequente utilização do mesmo verificou-se a possibilidade de que o material poderia romper de modo frágil, ao contrário do que seria espectável, o que poderia ditar a falha catastrófica de estruturas e consequentemente conduzir a perdas materiais e humanas. O acidente mais antigo que se encontra registado devido a uma rotura frágil ocorreu em 1898 em Long Island nos EUA. Na altura os aços produzidos tinham uma temperatura de transição por volta dos 20° C, o que implicava que a fractura frágil era susceptível de ocorrer [5].

O fenómeno da rotura frágil dos materiais metálicos (principalmente dos aços) e sua necessidade de o controlar fez surgir em 1901 o primeiro ensaio de tenacidade padronizado, o ensaio de impacto de Charpy, que foi inicialmente desenvolvido por S.B Russell, em meados de 1890, e aprimorado por Georges Charpy [6]. O ensaio visa

quantificar a tenacidade de um material, ou seja a energia que este é capaz de absorver antes de fracturar. O ensaio consiste em submeter um provete de material com um entalhe a uma carga de impacto aplicada por um pendulo. Os ensaios de impacto permitem obter valores de tenacidade que podem servir de comparação entre materiais [7]. Este ensaio contribuiu para a identificação do efeito da temperatura no comportamento mecânico dos materiais metálicos e permitiu desenvolver o conceito de temperatura de transição, temperatura abaixo da qual o material metálico apresenta uma fractura maioritariamente frágil.

Posteriormente ocorreu o famoso naufrágio do navio de passageiros RMS TITANIC (1912), de onde uma das conclusões retiradas da investigação foi que o aço utilizado na sua construção se tornava frágil a baixa temperatura o que pode ter contribuído para a ruptura do casco aquando a colisão com o *Iceberg* [8].

A segunda guerra mundial gerou a necessidade de uma produção em grande escala no menor tempo possível de estruturas e componentes metálicos, principalmente equipamentos bélicos. Nos Estados Unidos surgiu um programa inovador de construção de navios, que consistia na construção de navios com o casco inteiramente soldado, o que implicava uma redução significativa no tempo de produção comparando com a construção rebitada utilizada até ao momento. Os navios construídos através deste programa foram os navios da classe Liberty, e ficaram conhecidos não pela inovação do seu processo construtivo mas pela ocorrência de falhas catastróficas devido à ocorrência de fractura frágil em 700 navios (foram construídos 2400) dos quais 145 ficaram divididos em dois tal como se pode observar na Figura 1 [9].

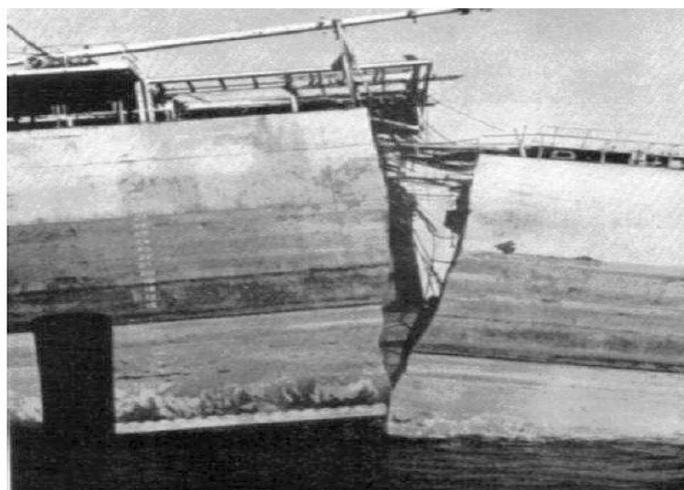


Figura 1-Fractura Frágil do casco de um dos navios Liberty [4]

As investigações efectuadas encontraram três causas para a fractura dos navios. As fendas tinham origem no convés e nos cantos das escotilhas quadradas, onde existia concentração de tensões devido à geometria das mesmas. As soldaduras dos navios foram efectuadas por mão-de-obra que não era completamente especializada e por isso ficaram com fendas e tensões residuais, e ainda o aço utilizado na sua construção tinha pouca tenacidade segundo os ensaios de Charpy realizados. Uma vez que a construção era soldada não existiam obstáculos à propagação de fendas, ao contrário da construção rebitada, o que fazia com que estas se propagassem ao longo do casco do navio. Com o problema identificado foram tomadas medidas correctivas como o reforço nas bordas das escotilhas e ainda a instalação dos chamados *crackarresters* que consistia na colocação de placas de alta resistência rebitadas em certas partes do convés do navio [4].

Após a segunda guerra mundial a utilização dos materiais metálicos aumenta novamente, por um lado para a reconstrução da europa nomeadamente aço estrutural (baixo carbono) e também do aço de alta resistência essencialmente pela indústria aeronáutica e espacial. Os materiais de alta resistência foram desenvolvidos para minimizar a quantidade de material utilizado, poupando peso e recursos. Estes materiais aliados a novos métodos de determinação de tensões locais permitiram cumprir os objectivos de poupança de peso, no entanto, o factor segurança baixou devido a estas se encontrarem menos sobredimensionadas. Contudo estas estruturas tornaram – se mais sensíveis a defeitos que se encontrassem nas mesmas [9].

O desenvolvimento da mecânica da fractura após a segunda guerra mundial lançou uma nova luz na problemática da fractura frágil, no entanto, os acidentes devido à fractura frágil continuaram a acontecer. Por exemplo, o caso da falha dos Havilland Comet que ocorreram em diversos voos da BOAC, entre 1953-1954, devido a fenómenos de fadiga e concentração de tensões juntos de janelas e escotilhas com a forma quadrada. Em 1988 o avião que fazia a ligação entre Hilo e Honolulu ficou sem parte da fuselagem durante o voo, e ainda o acidente ferroviário de Enshede, em 1998, onde a fractura frágil de uma roda devido a fenómenos de fadiga provocou um descarrilamento catastrófico.

2.1.2 Primórdios da Mecânica da fractura

O estudo da falha dos materiais não começou com a revolução industrial mas sim no renascimento com Leonardo Da Vinci. Este efectuou experiências com fios metálicos de diferentes comprimentos traccionados com pesos, e verificou que os fios de maior comprimento eram os primeiros a partir. Isto aconteceria devido ao maior volume de material, existindo assim maior probabilidade de conter impurezas e imperfeições. A conclusão, chegada por Leonardo, é que as imperfeições do material determinavam a sua resistência.

Os resultados das experiencias de Leonardo Da Vinci apenas foram qualitativos. Os primeiros estudos com objectivos quantitativos foram efectuados por Inglis, que visava a determinação das tensões à volta de uma fenda com forma elíptica numa placa [10].

Griffith publicou em 1920, aproveitando os estudos de Inglis, um estudo onde relacionou quantitativamente o tamanho do defeito (fenda) com a tensão a que ocorria a falha. Este último ainda tentou aplicar o seu modelo a materiais metálicos, no entanto, não foi bem sucedido pois estes não tem um comportamento inteiramente frágil como tem o vidro (material que utilizou nos seus estudos).

Uma vez que Griffith não conseguiu estabelecer uma ligação directa entre os seus estudos e os materiais metálicos, os seus estudos foram ignorados e a fractura frágil dos metais foi considerado um problema metalúrgico. Outros tentaram explicar o fenómeno, como por exemplo, Ludwik, em 1909, explicou o fenómeno de transição de comportamento dúctil para frágil, sugerindo que a força coesiva do material era pouco afectada pela temperatura, mas que para os aços com baixo teor em carbono a tensão de cedência aumentava com o decréscimo de temperatura e que por isso era mais fácil ao material romper fragilmente do que ceder. Orowan, em 1945, utilizou os conceitos de Ludwik para relacionar o entalhe com a temperatura de transição, sugerindo que o entalhe limitava a cedência e consequentemente aumentava a temperatura de transição. O mesmo Orowan, em 1933, já havia efectuado experiências com lâminas de mica e que concluiu que a redução de resistência do material era devido a presença de fendas no bordo das lâminas. Contudo como as suas experiências foram elaboradas num material de origem mineral, pouco influenciaram a corrente, que iria perdurar até 1960, de que a fractura frágil dos materiais metálicos era um problema metalúrgico. Assim sendo, o principal foco era a determinação da temperatura de transição, através do ensaio de impacto de Charpy, e de produção de

materiais com a menor temperatura de transição possível. No entanto, no início da década de 40, o efeito do tamanho de fenda começou a ser estudado no *Navy Research Laboratories* em Washington por uma equipa liderada por G.R.Irwin [5].

2.1.3 O desenvolvimento da mecânica da fractura linear elástica

Em 1956, G.R. Irwin conseguiu relacionar o trabalho de Griffith com os materiais metálicos, através do desenvolvimento do conceito de taxa de libertação de energia, “G”. Este desenvolveu o conceito de taxa de libertação energia, efectuando uma análise energética ao trabalho de Griffith. O conceito provou ser de grande utilidade para a resolução de problemas de engenharia pois pela primeira vez, relacionava o tamanho de fenda com a energia, o que até então não tinha sido efectuado.

A contribuição de Irwin não acabou com o desenvolvimento do conceito de “G. Após a análise do trabalho Westergaard, publicado em 1938, relacionou a taxa de libertação de energia com as tensões existentes na ponta da fenda, e acabou por desenvolver o conceito de factor de intensidade de tensões, “K”. Estes avanços na mecânica da fractura permitiram, em 1956, que Wells provasse que as falhas ocorridas no *Havilland Comet* ocorreram devido a fendas de fadiga que atingiram o tamanho crítico [4].

A mecânica da fractura linear elástica e os conceitos que nela vinculam, (Taxa de libertação de energia por unidade de espessura, “G”, factor de intensidade de tensões “K”, R energia necessária para a propagação de fenda) foram aplicados com grande sucesso noutras áreas, como por exemplo, na fadiga (lei de Paris), na corrosão sob tensão, no estudo dinâmico da fractura, na Fluência e na fractura Visco – elástica [5].

O conceito do factor de intensidade de tensões foi tão bem sucedido a descrever o estado de tensão na ponta de uma fenda, que também foi utilizado para descrever o estado de tensão presente em cantos e entalhes [11].

2.1.4 O desenvolvimento da mecânica da fractura elásto-plástica

Após a uma colaboração com Irwin, no *Naval Research Laboratory*, Wells retorna ao *British Welding Research Association* onde tentou aplicar os conceitos da MFLE a aço de média resistência e baixo carbono, no entanto, acabou por concluir que os conceitos não eram compatíveis para materiais com maior ductilidade.

O modelo de Irwin propõe que existem tensões na proximidade da ponta da fenda, o que significa que existe uma tensão singular na ponta da fenda. Uma vez que os materiais metálicos têm tensão acima da qual o material plastifica (tensão de cedência) é de prever que na proximidade da ponta da fenda existirá uma zona plástica. Nesta zona a solução

elástica proposta da MFLE não pode ser aplicada, pois, o material não tem comportamento linear. Irwin considerou esta área plástica circular, e que fora desta zona plástica, o campo de tensões que é representado pelo parâmetro “K” pode ser aplicado [12].

Nos materiais considerados de alta resistência, ou seja com elevada tensão de cedência e muito próxima da de rotura, a zona plástica na ponta da fenda é relativamente reduzida quando comparada com as dimensões dos espécimens ou componentes onde se insere. Estes materiais eram propícios para a aplicação dos conceitos da MFLE, no entanto na Europa, ao contrário do que acontecia nos Estados Unidos, o interesse era principalmente nos aços de baixa liga onde o principal problema era temperatura de transição [5].

Nas de ligas de média e baixa resistência a zona plástica toma dimensões consideráveis, o que acaba por inviabilizar a utilização dos conceitos da MFLE. Ao se deparar com este problema, Wells observou que neste grupo de materiais que o deslocamento das faces da fenda com a deformação plástica era bastante pronunciado, o que lhe permitiria mais tarde desenvolver o primeiro parâmetro quantitativo da mecânica da fractura elasto-plástica o *Crack Tip Opening Displacement*, conhecido pelo acrónimo CTOD.

O CTOD procura caracterizar a capacidade do material deformar plasticamente antes da fractura, através da medição do deslocamento das duas faces da fenda existente [13]. O conceito de CTOD e a sua curva semi-empírica, desenvolvidos por Wells, foram vastamente utilizados na década de 70, no Reino Unido. Aqui um dos principais focos industriais era a exploração petrolífera no mar do norte, onde eram utilizados materiais metálicos de comportamento dúctil na construção de plataformas de extracção e navios de transporte de petróleo [4].

O CTOD de Wells não é o único parâmetro disponível na MFEP. Em 1968 James Rice desenvolveu um parâmetro energético equivalente ao “G” de Irwin da MFLE, o integral “J”. O integral J é um integral de uma linha arbitrária à volta da ponta da fenda, que caracteriza a taxa de libertação de energia em materiais com comportamento não linear. Rice, Rosegren, e também Hutchinson, independentemente, demonstraram que J caracteriza as condições na ponta da fenda de um material não linear elástico relacionando as tensões e extensões com o “J”, dando origem as equações de singularidade de HRR. O integral “J” define as amplitudes destas tensões tal e qual o factor de intensidade de tensões caracteriza a singularidade linear elástica. No entanto, o conceito do integral J tem a limitação de só poder ser utilizado em pequenas propagações de fenda [4].

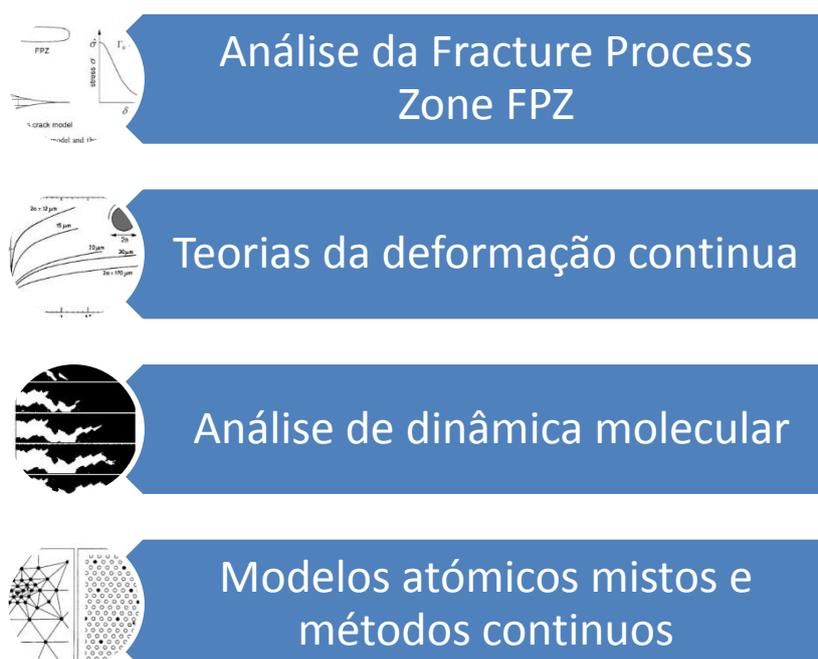
2.1.5 As tendências da mecânica da fractura e as suas outras abordagens.

Hoje em dia existe uma tendência para a continuação do estudo da fractura através das técnicas de elementos finitos com a confrontação dos mesmos com resultados experimentais ou vice-versa. Deste modo tenta-se melhorar ou encontrar novos modelos analíticos válidos, para auxiliar o dimensionamento na fase de projecto e para avaliar estruturas e equipamentos em serviço. Com esses mesmos modelos analíticos tenta-se reduzir a dependência dos ensaios destrutivos que comportam muitas vezes custos elevados.

Apesar da MFLE e a MFEP serem as abordagens com mais sucesso, devido ao facto de os modelos formulados dependerem apenas de um parâmetro, estas têm limitações nomeadamente [5]:

- Só são aplicadas a defeitos tipo fenda ou entalhe
- A zona onde se desenvolve o processo de fractura é relativamente pequena, em relação as dimensões do espécimen ou componente
- E no caso da MFEP só pode ser aplicada a pequenas propagações de fenda.

Para suprimir as limitações acima mencionadas existem abordagens com dois ou mais parâmetros que efectivamente podem ultrapassar as dificuldades mas com a desvantagem de serem de um elevado grau de complexidade. Essas abordagens encontram-se sintetizadas no seguinte esquema.



Neste grupo encontramos abordagens que tentam modelar a zona de fractura, designada FPZ, *Fracture Process Zone*, onde se encontram os modelos de fenda fictícia e o modelo de fenda de banda (*Crack Band Model*). O pioneiro deste tipo de abordagem foi Banrenblatt, em 1962, que criou um modelo tendo por base o modelo de banda de cedência de Dugdale.

As teorias da deformação continua, que dizem que a tensão num ponto é dependente da extensão no ponto, são perfeitas a não ser que o gradiente de extensões seja muito elevado. Flec et al, em 1994 efectuaram experiências com fios de cobre aplicando estas teorias.

A análise dinâmica molecular, os modelos atómicos mistos e métodos contínuos são tentativas de abordar o problema da fractura a partir de uma escala micro para uma escala macro, o que é exactamente o inverso das abordagens tradicionais da mecânica da fractura. No entanto, estes tipos de análises são efectuados através de simulações computacionais, que além de complexas requerem bastantes recursos informáticos. Apesar deste inconveniente os estudos desta vertente foram já iniciados. Abraham et al publicaram um estudo sobre a dinâmica da fractura através da dinâmica molecular em 1998 e Shenoy et al publicaram um artigo, em 1999, sobre a aplicação de elementos finitos a um modelo de mecânica à escala atómica quase continua.

2.2 Conceitos da Mecânica da fractura

A análise de sistemas à fractura é efectuada de acordo com os três modos possíveis de propagação de fenda, que também se podem ser designados como modos de falha. O primeiro, designado modo I é o modo de tração, o segundo modo, ou modo II, é o de corte no plano da fenda, e o por fim o modo III é modo de corte longitudinal. Na Figura 2 estão representados esquematicamente os três modos de falha referidos em cima [14].

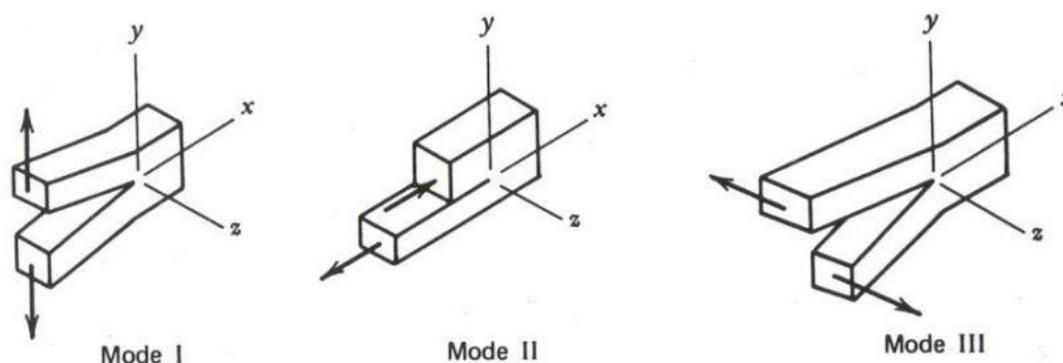


Figura 2 - Modos de propagação de fenda [14]

Os conceitos de mecânica da fractura apresentados nesta dissertação referem-se ao modo I, uma vez que este é considerado como sendo o mais crítico, mas também porque os parâmetros dos modos II e III são deduzidos a partir do primeiro.

2.2.1 Mecânica da fractura linear elástica (MFLE)

Os primeiros parâmetros utilizados para caracterizar os fenómenos de fractura, em materiais metálicos, foram “G”, a taxa de libertação de energia, e “R”, resistência à propagação da fenda. Estes conceitos foram adaptados por Irwin aos materiais metálicos, tendo por base a teoria de Griffith para materiais frágeis. O último deduz os conceitos através da decomposição das energias de um placa infinita com fenda central carregada remotamente com uma tensão remota σ , segundo a equação (1).

$$U = U_0 + U_a + U_\gamma - F \quad (1)$$

A energia total da placa U corresponde a soma da energia da placa antes da introdução da fenda, U_0 com a variação da energia elástica da placa causada pela introdução da fenda,

U_a , a variação da energia da superfície da placa devido a introdução da fenda, U_γ , menos o trabalho realizado pelo sistema de carregamento durante a introdução do fenda, F [12].

Na equação (2) está a dedução elaborada por Griffith, para a condição de propagação de fenda.

$$\begin{aligned} \frac{dU}{da} < 0 &\leftrightarrow \frac{d(U_0 + U_a + U_\gamma - F)}{da} < 0 \leftrightarrow \frac{d(U_a + U_\gamma - F)}{da} \\ &< 0 \leftrightarrow -\frac{d(F - U_a)}{da} > \frac{dU_\gamma}{da} \leftrightarrow -\frac{dU_P}{da} > \frac{dU_\gamma}{da} \end{aligned} \quad (2)$$

Foi na última inequação que surge o conceito de “G” como sendo $\frac{dU_P}{da}$, ou seja a taxa de libertação de energia e $\frac{dU_\gamma}{da}$ como a resistência a fenda do material “R”.

A taxa de libertação de energia, “G”, representa a energia libertada, por unidade de espessura durante o crescimento da fenda. Este parâmetro é habitualmente representado pela equação (3) [15].

$$G = -\frac{dU}{da} \quad (3)$$

Em que o numerador representa a variação de energia devido a propagação da fenda e o denominador representa o aumento de área, mais uma vez, devido ao avanço da fenda. Esta taxa de libertação de energia é a que está disponível para provocar o aumento de fenda, no entanto, isso só irá acontecer se for ultrapassada a resistência do material a fenda. Esta é representada pela energia por unidade de espessura necessária para a criação de uma nova área de superfície da fenda, designada pela letra “R”. Em baixo encontra-se na equação (4) que define este parâmetro. [15].

$$R = \frac{dU_\gamma}{da} \quad (4)$$

O parâmetro “G” depende da geometria do corpo, das cargas que neste se encontram aplicadas e do tamanho de fenda. “R” é a propriedade do material que representa a resistência à fractura. Estes dois parâmetros foram deduzidos para placas com fenda central onde é relativamente fácil efectuar análise energética e consequentemente determinar “R” experimentalmente a com esse mesmo tipo de placas. Quando a geometria do corpo deixa

de ser uma placa, a análise energética torna-se mais complexa, deixando de ser prática para a determinação da resistência à fractura do material.

2.2.2 Factor de intensidade de tensões elásticas-“K”

Devido a dificuldade prática do uso dos parâmetros energéticos, para além do uso em placas, em 1950, Irwin desenvolveu o conceito de factor de intensidade de tensões, “K”.

Da teoria linear elástica, Irwin, chegou à equação (5) que representa as tensões na proximidade da fenda elíptica, a semelhança da que está representada na Figura 3.

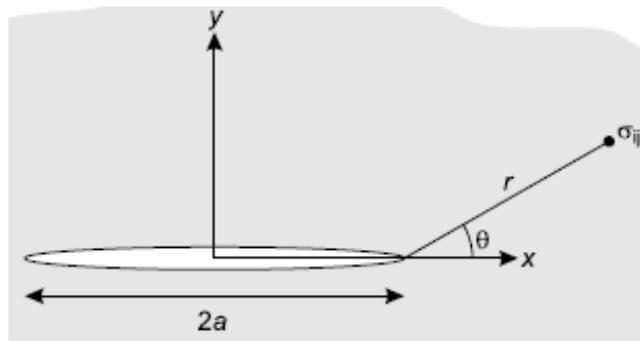


Figura 3 - Referencial utilizado por Irwin para o desenvolvimento da equação que representa as tensões na proximidade da fenda [12]

$$\sigma_{i,j} = \frac{K}{\sqrt{2\pi * r}} \cdot f_{i,j}(\theta) + (...)$$
 (5)

Nesta equação r e theta são as coordenadas cilíndricas de um ponto na proximidade da fenda e “K” é o valor que quantifica o campo de tensões elásticas na proximidade da fenda. Este foi denominado de factor de intensidade de tensões [12].

O desenvolvimento deste conceito permitiu superar as dificuldades existentes com os parâmetros energéticos. Isto foi possível através da equação (6) que quantifica o parâmetro “K” com base na tensão aplicada e no tamanho de fenda.

$$K = \sigma \sqrt{\pi a} \cdot f\left(\frac{a}{W}, \frac{b}{W}, \frac{L}{W}, etc\right)$$
 (6)

Esta equação permite quantificar o factor de intensidade de tensões elástica na proximidade de uma fenda de tamanho, a, num componente arbitrário, ao qual está aplicada uma tensão remota, sigma. O que permite que este parâmetro seja versátil é o chamado factor de forma, f, que é uma função dependente do tamanho da fenda e das características geométricas do corpo em estudo [12]. Os factores de forma estão amplamente estudados e estão disponíveis sob a forma de artigos e atlas de fractura e fadiga. Em baixo encontra-se uma

lista de fontes bibliográficas onde é possível encontrar várias soluções para o factor de intensidade de tensões “K”.

- Kujaswski, D. 1991. “Estimations of stress Intensity Factors for small cracks at Notches” – *Fatigue of engineering Materials and Structures*, Vol. 14, No 10, pp 953-965.
- Murakami, Y. 1987. *Stress Intensity factors Handbook*, Pergamon Press, Oxford, UK.
- Rooke, D. P. e D. J. Cartwright, *Compendium of Stress Intensity Factors*, Her Majesty’s Stationary Office, London.
- Newman, J.C., Jr, and I. S., Raju, “Stress-Intensity Factor Equations for Cracks in Three Dimensional Finite Bodies Subjected to Tension and Bending Loads”, *Computational Methods in Mechanics of Fracture*, S. N. Alturi, ed., Elsevier Science Publishers, New York, NY.
- Raju I. S. e J. C., Newman, Jr. “Stress-Intensity Factor for internal and external surface cracks in cylindrical vessels”, *Jnl. of Pressure vessel Technology*, ASME, Vol. 104 Nov. 1982, pp. 293-298.
- Raju I. S. e J. C., Newman, Jr. “Stress-Intensity Factor for circumferential surface cracks in pipes and rods under tension and bending loads”, *Fracture Mechanics*, Seventeenth Volume, J. H. Underwood, et al, ed., ASTM STP 905, American Society for Testing Materials, West Conshohocken, PA.

Outra característica que confere versatilidade a este conceito é a possibilidade de se obter o valor do factor de intensidade de tensões de um sistema multiplamente carregado, através da sobreposição dos valores de “K” que cada carga provocaria se fosse aplicada isoladamente. Designa-se a isto o princípio da sobreposição e está representado esquematicamente através da Figura 4 [9].

$$K_{Ia} = K_{Ib} + K_{Id} - K_{Ie} .$$

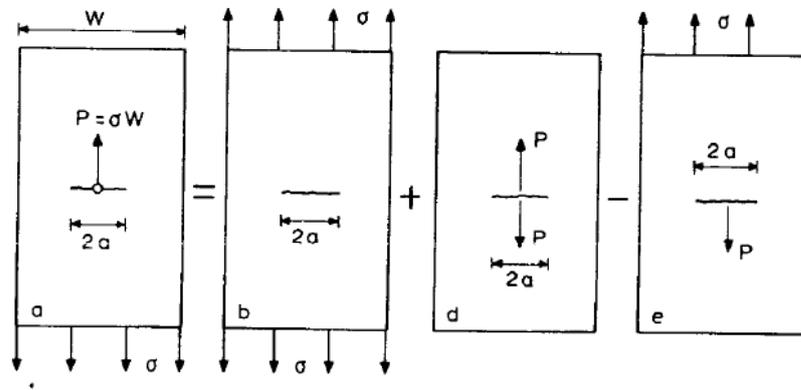


Figura 4 - Princípio da sobreposição [9]

Além do factor de intensidade de tensões ser mais prático e versátil, é possível relaciona-lo com o parâmetro energético G através das equações (7) e (8).

$$G = \frac{K^2}{E}, \text{ Em tensão Plana} \quad (7)$$

$$G = \frac{K^2}{E} (1 - \nu^2), \text{ Em deformação Plana} \quad (8)$$

2.2.3 Plasticidade da ponta da fenda e o significado da tensão plana ou extensão plana na mecânica da fractura.

Através da análise das tensões na proximidade da fenda dada pela equação (5), se r tender para zero as tensões tendem para infinito. Os materiais metálicos têm como uma das suas características a deformação plástica acima da tensão de cedência, o que implica que existirá uma região de material plástico a volta da fenda. Esta zona foi designada como a zona plástica da ponta da fenda.

Irwin foi o primeiro a desenvolver um modelo para determinar a dimensão da zona plástica na ponta da fenda, considerando que esta zona teria uma forma circular e considerando um modelo elásto-plástico. Este último chegou à equação que exprime o tamanho da zona plástica da fenda, em função do estado de tensão na proximidade da fenda, tensão de cedência e por último o factor de intensidade de tensões. Na Figura 5 encontra-se representada a zona plástica de Irwin, e a equação (9) que define o raio da mesma.

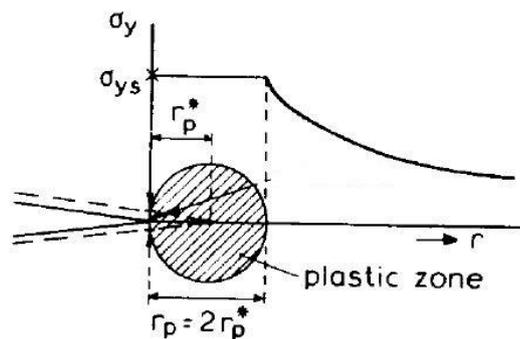


Figura 5 - Zona plástica da fenda segundo o modelo de Irwin [9]

$$Ry = \frac{1}{\pi} \cdot \left(\frac{K_I^2}{\sigma_{YP}^2} \right) \quad (9)$$

Além do modelo desenvolvido por Irwin para a plasticidade da ponta da fenda, cujo objectivo era ter uma ideia do tamanho da zona plástica na ponta fenda, existe o modelo de Dugdale, que através do princípio da sobreposição e da derivação das funções de tensão obteve um resultado semelhante.

A abordagem de Irwin e Dugdale foi assumir uma forma circular e determinar o tamanho da zona plástica. Para a determinar a forma da zona plástica foi assumido um tamanho aproximado e foram aplicados os critérios de cedência de *Von Mises* ou *Tresca* para

determinar a fronteira onde termina o material plástico [12]. Na Figura 6 encontra-se a representação da zonas plásticas segundo o critério de *Von Mises* para o modo I (a), assim como as zonas plásticas para os modos II (b) e III (c).

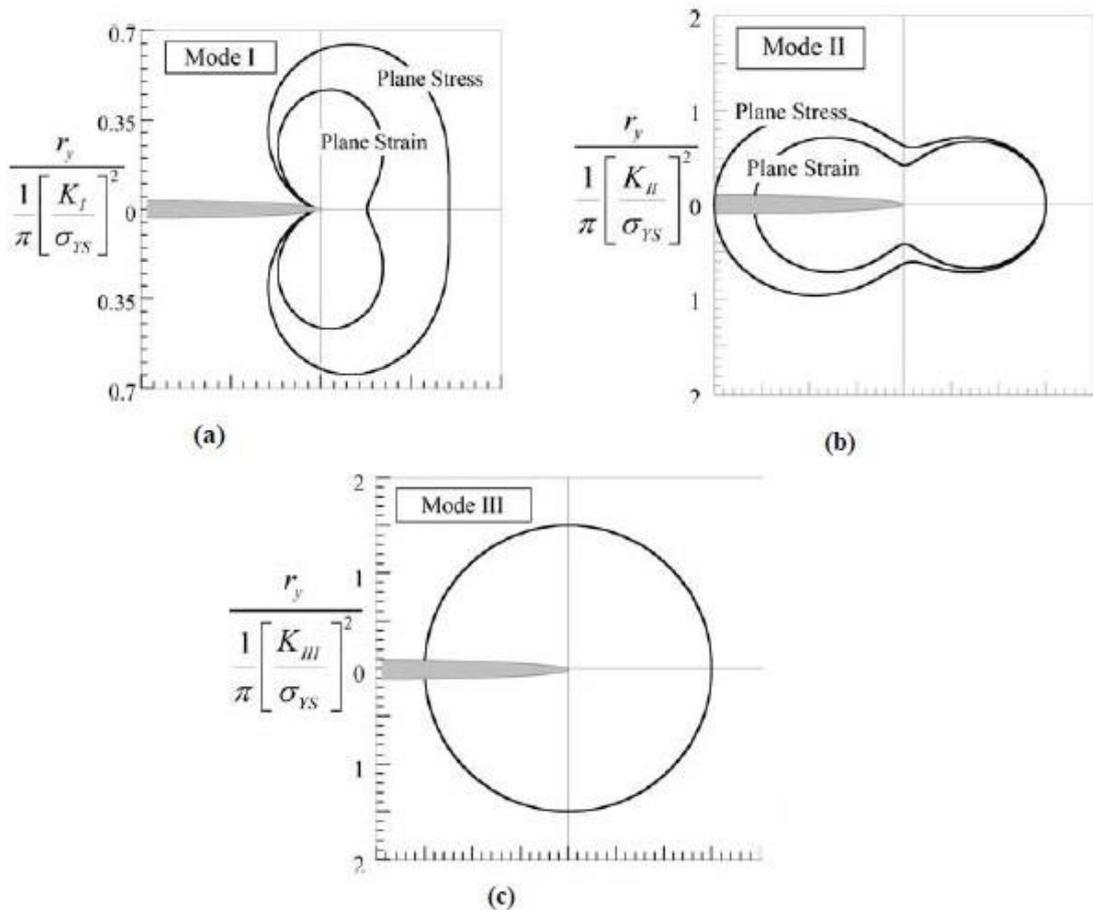


Figura 6 - Zona plástica da fenda segundo os critério de *Von Mises* para o modo I (a), II (b) e III (c) [12]

Na mecânica da fractura é muitas vezes mencionado o estado de tensão plana e deformação plana. Estes termos estão ligados à definição que se encontra na mecânica dos sólidos, no entanto, na mecânica da fractura estes termos têm um significado mais restritivo. Na mecânica da fractura as respectivas designações não caracterizam o estado de tensão ou extensão em todo o corpo, mas sim da zona plástica da ponta da fenda. Devido ao grande gradiente de tensões perto da ponta da fenda a zona plástica é estrangida pelo material elástico em seu redor. Se a zona plástica é pequena comparada com o comprimento da frente de fenda, considera-se que a fenda se encontra num estado de deformação plana. Num estado de tensão plana, o que acontece é que as tensões lineares elásticas a volta da zona plástica da fenda não são suficientes para constringer o material plástico em todas as direcções do espaço, como consequência o material plástico fica constringido apenas em duas direcções [16].

No interior da placa existe a condição de deformação plana, pois o material no interior da placa está constringido em todas as direções pelo material adjacente. À superfície da placa vamos ter um estado tensão plana, pois não existe constringimento devido à superfície livre. À medida que nos aproximamos do interior, o material vai ser gradualmente constringido até atingir o estado de deformação plana. Na Figura 7 está representada a zona plástica da fenda em três dimensões [9].

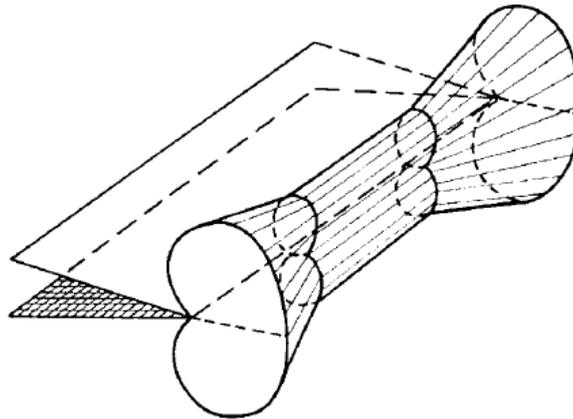


Figura 7 - Representação tridimensional da zona plástica na ponta da fenda [9]

Então num corpo com fenda passante, vai sempre existir dois estados de tensão na zona plástica da fenda, tensão plana junto à superfície e deformação plana no interior. A zona plástica atinge a sua maior dimensão no plano da superfície livre e a sua menor dimensão no interior onde se verifica o estado da deformação plana.

Na Figura 8 em baixo encontra-se representada a variação da zona plástica ao longo da espessura crescente.

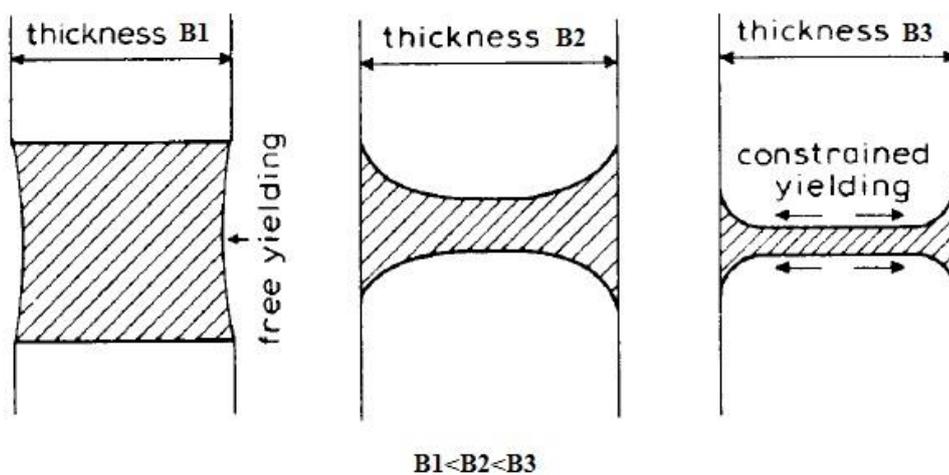


Figura 8 - Influência da espessura no tamanho da zona plástica [9]

O estado de tensão da zona plástica na ponta da fenda é muitas vezes associado ao tamanho da mesma e também ao comportamento á fractura do material. Isto acontece de tal modo que é comum encontrar na literatura termos como *Plane Strain fracture toughness* ou *Plane stress fracture toughness*, em que o primeiro está associado a testes com provetes de espessura elevada e o segundo associado a provetes de espessura fina. Também se associa o estado de deformação plana a uma zona plástica reduzida e a fenómenos de fractura frágil, enquanto o estado de tensão plana é associado a grandes zonas plásticas e fractura dúctil.

Esta abordagem bidimensional, apesar de prevalecer em grande parte da literatura da especialidade, é simplista e pode se tornar totalmente incorrecta. Em primeiro lugar porque não existe correspondência directa entre o tamanho da zona plástica e a existência ou ausência do estado de deformação plana (apenas se sabe a relação entre o tamanho das respectivas zonas plásticas). Em segundo lugar já foi verificado que existe o estado de deformação plana mesmo quando existe uma grande zona plástica (inclusivé também em casos de plastificação da secção), o que significa apenas que nos casos em que a zona plástica da ponta da fenda é de grande dimensão apenas não se pode aplicar os conceitos da MFLE, no entanto, não invalida a utilização dos conceitos da MFEP. Em terceiro lugar, o estado de tensão plana apenas se verifica na superfície do provete, muito raramente sendo predominante a não ser quando o provete é efectivamente de uma espessura bastante fina [17].

Uma vez que muita da literatura associada ao tema utiliza este tipo de expressões, estas continuarão a ser utilizadas no presente documento. No entanto, quando se menciona o estado de tensão plana, está-se a designar um estado em que não predomina a condição de deformação plana e não a existência de um estado de tensão plana.

2.2.4 Os valores críticos de “K” e “G”

Através do balanço energético, Griffith, chegou a condição energética necessária para que houvesse propagação instável de fenda representada pela equação (10) .

$$-\frac{dU_P}{da} > \frac{dU_\gamma}{da} \quad (10)$$

Em que $\frac{dU_P}{da}$ é variação da energia potencial da placa e $\frac{dU_\gamma}{da}$ é a variação da energia de superfície.

Irwin e Orowan, de forma independente, verificaram que a energia necessária para o crescimento da fenda num material metálico era muito maior que apenas a energia de superfície. Isto deve-se à existência da zona de deformação plástica na ponta da fenda, que durante a propagação da mesma, parte da energia é gasta na formação de uma nova zona plástica na ponta da fenda propagante [9]. Assim sendo Irwin modifica a teoria de Griffith adaptando “R” a esta nova perspectiva, adicionando o trabalho de deformação plástica, $U_{\gamma P}$, à energia de superfície da placa. Na equação (11), em baixo, encontra-se expresso “R” em como soma da energia de superfície U_γ com do trabalho de deformação plástica $U_{\gamma P}$.

$$R = 2 \cdot (U_\gamma + U_{\gamma P}) \quad (11)$$

O trabalho de deformação plástica $U_{\gamma P}$ pode ser interpretado como a energia necessária para plastificar o material que se encontra na proximidade da ponta da fenda, o que torna dependente da ductilidade do material. Os materiais metálicos apresentam um diversificado tipo de comportamentos, dependendo da sua composição e microestrutura, tratamentos térmicos, mecânicos e temperatura. Estes podem ir de um comportamento quase perfeitamente frágil até um quase perfeitamente dúctil. Dependendo então das propriedades do metal e do respectivo estado de tensão na ponta da fenda. As parcelas de “R” variam originando diferentes comportamentos à fractura.

Os materiais metálicos de comportamento frágil necessitam de pouca energia para criar uma nova zona plástica na ponta da fenda, uma vez que esta tem dificuldade em se desenvolver fora das proximidades da fenda. A energia de superfície é constante seja qual for o estado de tensão na ponta da fenda. Quando existir igualdade entre “G” e “R” e se o material se encontrar num estado predominantemente de deformação plana,(estado em que a zona plástica toma a menor dimensão) irá ocorrer a propagação instável de fenda, à

semelhança dos materiais perfeitamente frágeis. Neste caso é comum se considerar a parcela do trabalho plástico desprezável face a energia de superfície.

Os valores de “G” e “K” críticos neste caso são constantes (são designados de G_{IC} e K_{IC} respectivamente), e independentes da carga aplicada, sempre que se atingir o valor crítico para um dado material vai existir propagação instável da fenda. Na Figura 9 está representada graficamente o critério energético para o estado de deformação plana.

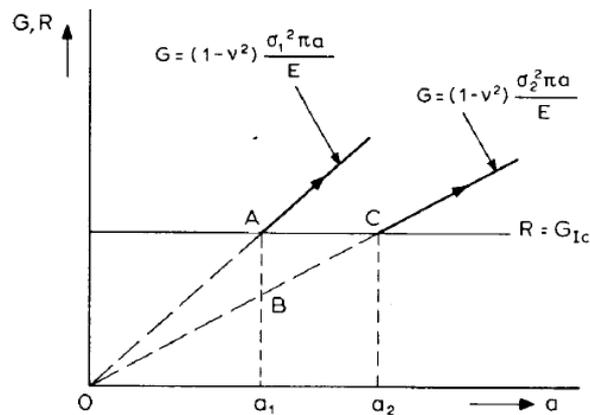


Figura 9 - Critério energético para o estado de deformação plana [9]

Se o material anterior não estiver sujeito a um estado predominantemente de deformação plana, comportamento à fractura estará sujeito à influência da zona plástica de transição. O que implicará maior energia despendida para criar uma nova zona plástica com o avanço da fenda. Neste caso o trabalho de deformação plástica deixa de ser desprezável. Ao contrário do que acontece com a energia de superfície, U_γ , o trabalho de deformação plástica, varia com a progressão da fenda o que significa que “R” deixa de ser constante. Isto vai significar que o comportamento à fractura destes materiais não será descrito por um valor pontual, mas sim por uma curva, designada “Curva R”.

Na Figura 10 está representado esquematicamente o parâmetro energético para o caso de tensão plana comparando com o caso da deformação plana.

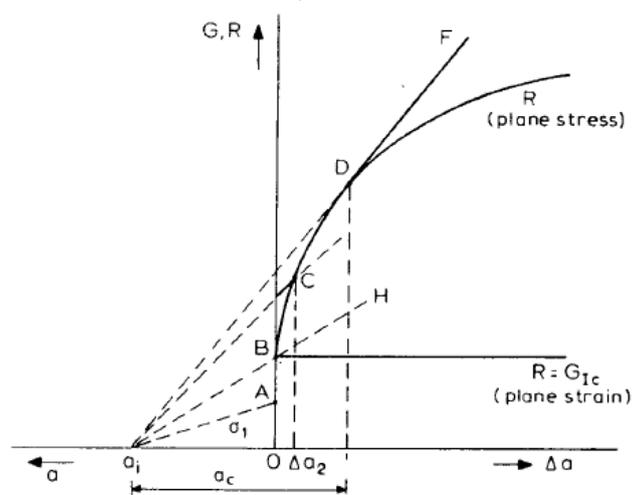


Figura 10 - Critério energético para o estado de tensão plana [9]

Nos casos de tensão plana, em que a resistência à fractura é definida pela curva “R” podemos obter dois comportamentos possíveis:

1. Propagação estável de fenda quando existe igualdade entre “G” e “R”
2. Propagação instável de fenda quando existe não só igualdade entre “G” e “R” mas também quando existe tangência da recta de “G” com a curva “R” ou seja $\frac{\partial G}{\partial a} = \frac{\partial R}{\partial a}$

Estes dois comportamentos podem acontecer isoladamente ou primeiro ocorre a propagação estável e quando se atinge o tamanho crítico de fenda (onde vai existir $\frac{\partial G}{\partial a} = \frac{\partial R}{\partial a}$) a fenda propagará instavelmente.

O ponto crítico para o qual acontece a fractura instável é um valor superior ao que se verifica no estado de deformação plana, e que varia com a aproximação ou distanciação a este estado.

Como já foi referido os valores de “G” e “K” que levam à fractura instável no estado de deformação plana e tensão plana são diferentes, no entanto, neste último os valores críticos variam mesmo dentro do próprio estado de tensão plana. A Figura 11 demonstra esquematicamente a variação dos valores críticos de “K” em função da variação da espessura.

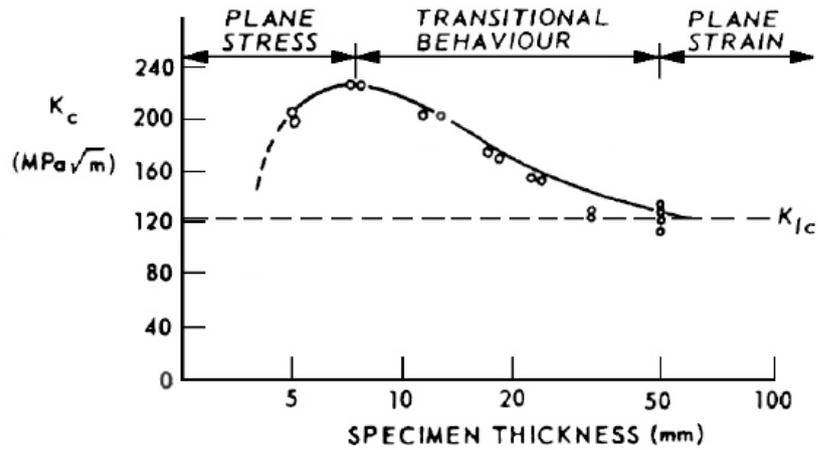


Figura 11 - Variação dos valores de "K" crítico com a variação da espessura. [12]

O aumento da espessura provoca uma diminuição do valor crítico até que se entre no estado de deformação plana onde o valor se torna constante.

De acordo com o que foi dito no final do subcapítulo anterior, esta tendência não reflecte a transição do estado de deformação plana para deformação plana, mas sim a diferença de contribuições de dois mecanismos de fractura diferentes, nomeadamente fractura dúctil e clivagem (fractura frágil). Em métodos de teste recentes é aconselhado a utilização de *sidegrooves* com o intuito de eliminar a influência da zona plástica junto a superfície, com o intuito de se medir apenas a resistência à fractura da zona afectada pelo estado de deformação plana [17].

2.2.5 A determinação experimental dos valores críticos para o estado de deformação plana (K_{IC})

A partir de um determinado valor de espessura entramos no estado de deformação plana, onde vamos obter os valores mais baixos do factor de intensidade de tensões “K”. Este valor é denominado de K_{IC} e pode ser considerado uma propriedade do material, no entanto não deixa de ser dependente da temperatura e da velocidade de carregamento [12].

A obtenção desta propriedade do material encontra-se hoje em dia normalizada através de diversos institutos de normalização, no entanto, à que destacar a primeira e a aquela que é a base das restantes, a ASTM E 399.

Esta norma cobre a determinação do K_{IC} de materiais metálicos com comportamento predominantemente linear elástico e em deformação. A determinação do K_{IC} através desta norma caracteriza a resistência à fractura de um material num ambiente neutro e na presença de uma fenda sujeita essencialmente a tensões linear elásticas e um severo constrangimento, de modo a que o estado de tensão na proximidade da ponta da fenda se aproxime o mais possível de deformação plana. E que a zona plástica na proximidade da fenda seja pequena comparada com o tamanho da fenda, a espessura da amostra e do ligamento á frente da fenda [18].

Os provetes mais utilizados para a obtenção do K_{IC} são o provetes de flexão em três pontos (*SENB*) e o de tracção (*Compact Tension*). No entanto, existem mais dois tipos de provetes que também são susceptíveis de serem utilizados. Nas Figura 12 e Figura 13 encontra-se representado os provetes *SENB* e *Compact Tension* respectivamente.

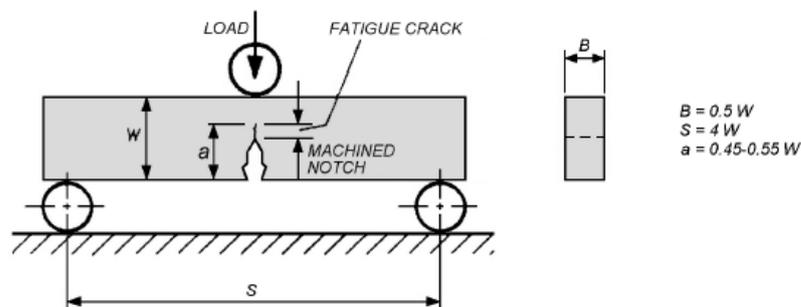


Figura 12- Requisitos dimensionais para o provete *Senb* segundo ASTM E399 [12]

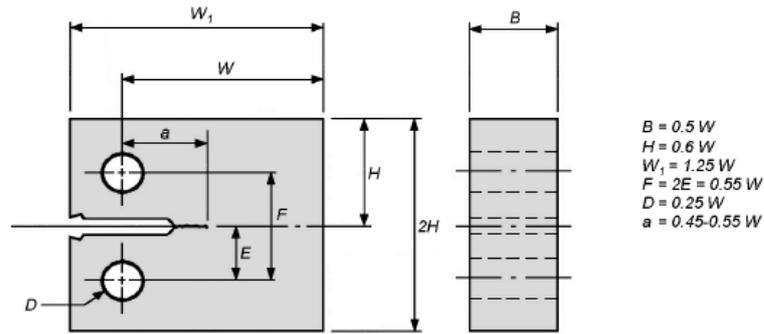


Figura 13 - Requisitos dimensionais para o provete compacttension segundo ASTM E 399 [12]

A fenda é simulada através de um entalhe mecânico e de uma fenda de fadiga a partir do mesmo. É possível escolher entre três tipos de entalhes, o entalhe Chevron, entalhe simples, e o entalhe com furo no final. Na Figura 14 estão representados os três tipos de entalhes referidos anteriormente.

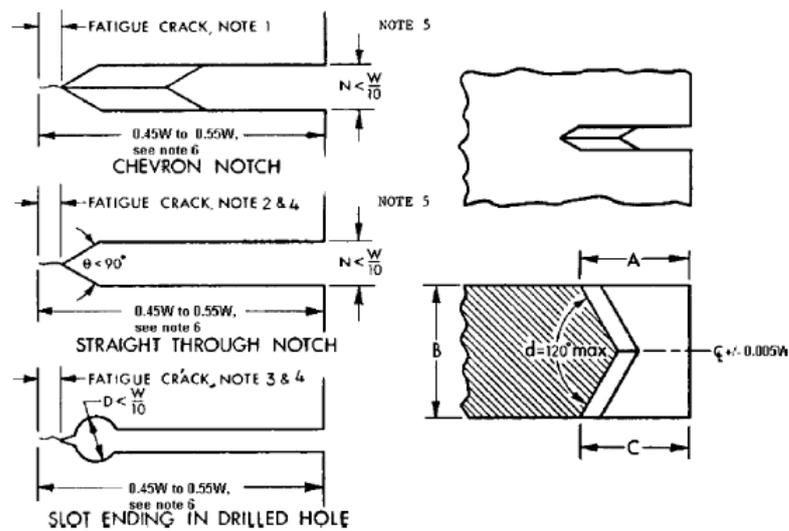


Figura 14 - Requisitos dos entalhes para a determinação do K_{IC} segundo ASTM E399 [18]

Os provetes têm requisitos que devem ser cumpridos após a execução do ensaio, para se poder confirmar a aplicabilidade da MFLE e validar a utilização do conceito “K”. Os requisitos não passam da comparação das medidas geométricas do provete com uma estimativa do tamanho da zona plástica. A equação (12) valida o K_Q , como sendo K_{IC} , em função das dimensões do provete.

$$a, B, (W - a) \geq 2,5 \cdot \left(\frac{K_Q}{\sigma_{YS}} \right)^2 \quad (12)$$

Isto levanta a questão de que apenas podemos saber se o ensaio é válido após a sua realização o que nem sempre é conveniente, no entanto, a norma propõe um ligamento mínimo em função do rácio $\frac{\sigma_{Ys}}{E}$ (deformação à cedência) na tentativa de minimizar este inconveniente. Na Tabela 1 em baixo está representado o tamanho do ligamento em função da relação acima mencionada.

$\frac{\sigma_{Ys}}{E}$	$(W - a)$ [mm]
0,0050 a 0,0057	76
0,0057 a 0,0062	64
0,0062 a 0,0065	51
0,0065 a 0,0068	44
0,0068 a 0,0071	38
0,0071 a 0,0075	32
0,0075 a 0,0080	25
0,0080 a 0,0085	19
0,0085 a 0,01	13
Superior a 0,01	6.4

Tabela 1 - Ligamento mínimo para a determinação do K_{IC} [18]

Os valores de K_{IC} para materiais metálicos podem variar devido a diversos factores, entre eles constam a direcção de propagação da fenda (anisotropia ,por exemplo provocada por um processo de laminagem), tratamento térmico, temperatura entre outros. Como tal as condições em que o K_{IC} foi obtido devem ser especificadas [9].

2.2.6 Limitações da MFLE

Para a MFLE ser válida a zona plástica tem de ser pequena o suficiente para que na região à volta da mesma seja possível aplicar as equações do campo de tensões elásticas “K”. Mesmo em estados de tensão plana, onde se verifica um aumento da zona plástica, a zona dominada pelo “K” deve ser bastante superior para que se possa considerar que este campo de tensões elásticas caracterize correctamente a severidade da fenda apesar da ocorrência da plasticidade. No entanto se a zona plástica for de grande dimensão o comportamento à fractura não poderá ser caracterizado pelos conceitos da MFLE. Na prática compara-se a dimensão da zona plástica com a distância da ponta da fenda até aos limites físicos do elemento onde está inserida [19]. Na Figura 15 está representado esquematicamente a comparação de diferentes zonas plásticas com as dimensões dos provetes onde estão inseridas.

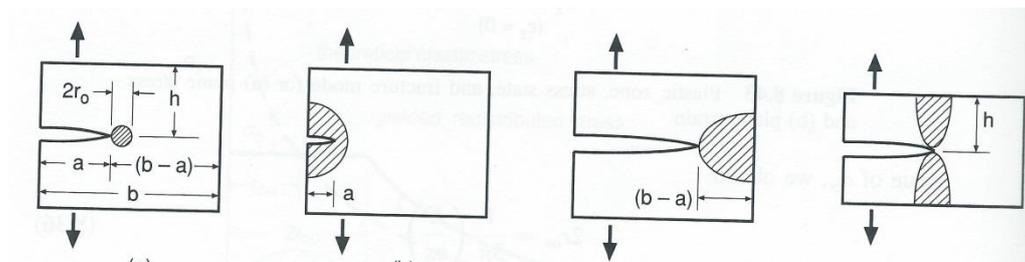


Figura 15- Zona plástica e as dimensões do provete [19]

A verificação efectuada na imagem mais a esquerda é idêntica a que é necessária efectuar para se verificar a validade do ensaio do K_{IC} . No entanto apenas podemos comparar o tamanho da zona plástica se tivermos valores de “K”, o que nem sempre se torna prático.

Existe possibilidade de se verificar a aplicabilidade dos conceitos da MFLE através do quociente entre o módulo de Young e a tensão de cedência ($\frac{E}{\sigma_{YS}}$). Os conceitos da MFLE poderão ser aplicados caso o valor deste quociente seja inferior a 200, para propriedades obtidas à temperatura ambiente [9]. Este cociente é em tudo idêntico ao apresentado na ASTM E399 que define a espessura mínima necessária dos provetes do ensaio do K_{IC} , com a diferença que o parâmetro é inverso.

2.2.7 Mecânica da fractura elasto-plástica

Com o aumento da ductilidade do material a zona plástica da fenda toma dimensões cada vez maiores, o que torna conceitos da MFLE inadequados para caracterizar correctamente a magnitude do campo de tensões na proximidade da fenda, devido à não linearidade do campo de tensões no material plástico. O aumento da plasticidade provoca uma mudança no comportamento à fractura, nomeadamente a ocorrência de crescimento estável de fenda a anteceder, ou não, a propagação instável de fenda.

A fractura elasto-plástica aplica-se a materiais que exibem um comportamento não linear independente do tempo (deformação plástica). Os parâmetros utilizados com mais sucesso são o *Crack Tip Opening Displacement (CTOD)*, e o integral “J”, estes parâmetros tem a capacidade de definir a resistência a fractura mesmo existindo uma grande plasticidade na ponta da fenda [4].

2.2.8 Crack Tip Opening Displacement (CTOD)

O CTOD é o parâmetro de tenacidade à fractura mais utilizado na indústria petrolífera e do gás. O parâmetro foi desenvolvido por Allan Wells no TWI, em 1961, em alternativa aos parâmetros da MFLE, que não descreviam correctamente o comportamento á fractura dos materiais mais dúcteis. O CTOD pode ser considerado como a abertura das faces da fenda deformada na posição da fenda original. Na Figura 16 está representada esquematicamente o conceito do CTOD.

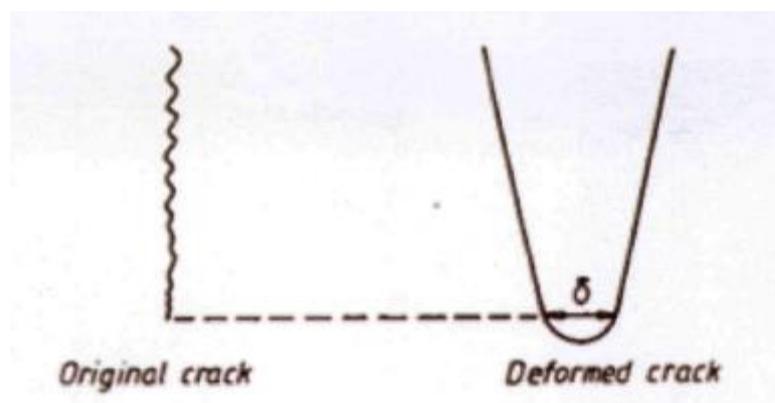


Figura 16 - Conceito do CTOD [20]

O parâmetro foi normalizado pela primeira vez em 1979, na forma da BS 5762 em que adoptava o modelo de articulação plástica para calcular o CTOD através do deslocamento da abertura da boca da fenda (*crack mouth open displacement-CMOD*).

A mesma metodologia foi adoptada noutros testes normalizados como ASTM E 1290 e ISO 12135. O parâmetro tem sido utilizado com sucesso na avaliação de falhas de estruturas soldadas, em particular nas indústrias do gás e do petróleo. Em 2002 a ASTM efectuou a revisão da E 1290 e propôs o cálculo do CTOD a partir do parâmetro “J”, em detrimento da utilização do modelo de articulação plástica [21].

Este conceito de abertura da ponta da fenda foi primeiro desenvolvido por Dugdale e Irwin que chegaram a expressões semelhantes de forma independente. Estas expressões tornam compatível o conceito de CTOD com a MFLE num regime linear elástico, no entanto este não se limita a gama a qual a MFLE é aplicável, uma vez que a plasticidade da ponta da fenda está inerente ao mesmo [12]. Nas equações (13) e (14), estão representados o CTOD de Dugdale e Irwin em função do factor de intensidade de tensões num regime linear elástico.

$$\delta_{Dugdale} = \frac{K_I^2}{E \cdot \sigma_{ys}} \quad (13)$$

$$\delta_{Irwin} = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{K_I^2}{E \cdot \sigma_{ys}} \quad (14)$$

A abordagem de quantificar a tenacidade à fractura a partir do CTOD foi elaborada por Wells no TWI, onde se acabou por desenvolver a curva de projecto do CTOD (*CTOD design Curve*) com o intuito de fornecer um método rápido e simples de se obter o tamanho de fenda admissível para estruturas soldadas sujeitas as cargas de projecto. Actualmente o CTOD continua a ser vastamente utilizado para se realizar a avaliação de danos em estruturas soldadas, principalmente na indústrias do gás e do petróleo onde a utilização do parâmetro para o efeito já foi implementada à várias décadas. Recentemente este parâmetro tem vindo a ser utilizado no estudo da fractura com constrangimento reduzido (*low constrain*) através da utilização de provetes *SENT* (*Single Edge Notch Traction*), numa tentativa de obter valores de tenacidade a fractura que se adequem as condições de constrangimento de fendas que se encontram em tubos soldados [20].

2.2.9 Integral J

O integral J desenvolvido por James Rice tem sido utilizado com grande sucesso para caracterizar o comportamento à fractura de materiais que saem claramente fora da zona

de validade de MFLE. Rice desenvolveu o integral “J” considerando um corpo homogêneo de material elástico, linear ou não linear, com uma fenda e sujeito a um campo de deformações. Idealizando as deformações elasto-plásticas como sendo elásticas não lineares torna o conceito apto para ser utilizado em materiais metálicos elasto-plásticos [22].

A resposta de um material elástico não linear é igual à resposta de um material elasto-plástico quando carregados, no entanto, a sua resposta difere no momento do descarregamento [4]. Na Figura 17 representado esquematicamente o comportamento dos dois tipos de materiais referidos anteriormente.

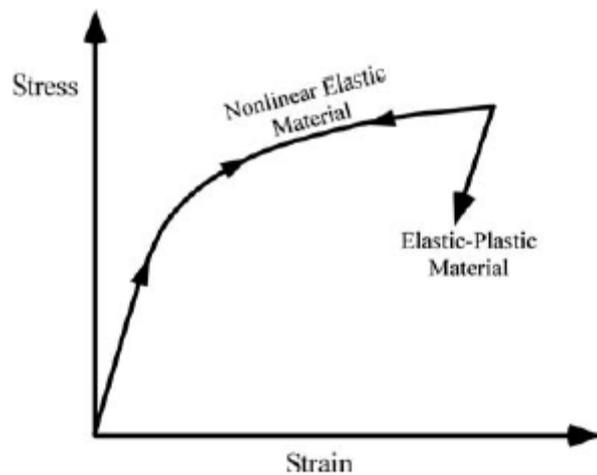


Figura 17 - Material elástico não linear vs Material elasto-plástico [4]

O integral J desenvolvido por Rice é um integral de contorno Γ que envolve a ponta da fenda, que é definido analiticamente pela equação (15).

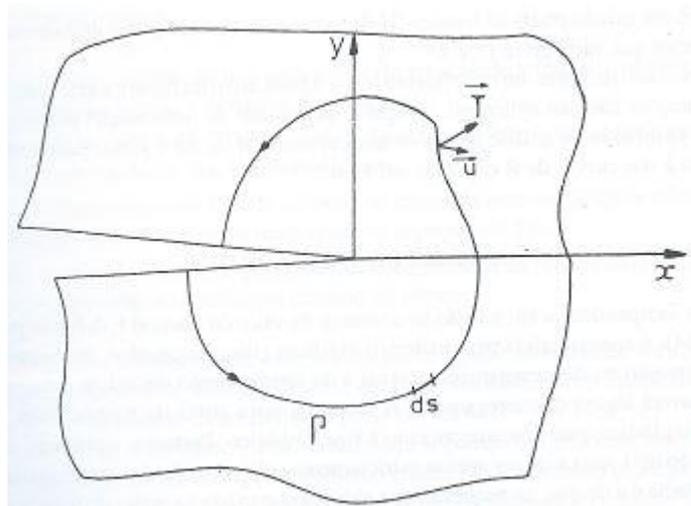


Figura 18 - Integral de contorno à volta da ponta da fenda [13]

$$J = \int_{\Gamma} \left(W_d dy - T \cdot \frac{du}{dx} ds \right) \quad (15)$$

Onde “T” é o vector de tracção, “u” é o deslocamento e “ds” é o elemento de contorno de Γ e “W” é a densidade de energia de deformação dos pontos do contorno dado pela equação (16).

$$W_d(\varepsilon) = \int_0^{\varepsilon} \sigma_{i,j} d\varepsilon_{i,j} \quad (16)$$

Onde ε é o tensor de deformação infinitesimal.

Apesar de a formulação matemática ser de alguma complexidade o seu significado físico é simples. O integral “J” representa a taxa de libertação de energia para um material elástico (linear ou não), ou seja, é o equivalente ao conceito de “G” [14]. Uma vez que o conceito é aplicado a materiais elásticos, Rice, demonstrou que existe igualdade entre “J” e “G” quando o material é linear elástico.

Além de parâmetro energético da MFEP, o integral “J” pode também ser considerado um factor de intensidade de tensões não lineares elásticas. Este pode ser utilizado para caracterizar as tensões e deformações na proximidade da ponta da fenda de um material elasto-plástico. Esta utilização do integral “J” foi desenvolvida por Hutchinson e também de forma independente por Rice e Rosengren [12]. Este campo de tensões controlado por “J” à semelhança de do campo controlado por “K” da MFLE, tem na ponta da fenda uma zona inelástica, o que implica que essa zona não pode estar sujeita ao campo de tensões controlado por “J”, como tal essa zona inelástica deve ser pequena em comparação com o tamanho da zona controlada por “J”.

O conceito do integral “J” também tem limitações que delimitam a sua aplicação. Como foi dito anteriormente um material elástico não linear é apenas idêntico ao material elasto-plástico quando estão a sofrer um carregamento, o que significa que o integral “J” para ser considerado válido, para materiais elasto-plástico se não sofrer descarregamento. Isto implica que o conceito apenas deve ser utilizado para fendas estacionárias ou em que a propagação de fenda seja muito pequena. Outra desvantagem é que “J” não representa aquilo que se designa na literatura, *Crack driving Force*, para materiais elasto-plásticos mas apenas para materiais elásticos não lineares [23].

2.2.10 Determinação experimental dos δ_C e J_{IC}

A fractura de materiais metálicos de comportamento dúctil está associada á grande plasticidade na ponta da fenda e a ocorrência de propagação estável de fenda, que por sua vez leva ao desenvolvimento de um comportamento à fractura caracterizado por curvas de resistência. Estas curvas são pouco cómodas de trabalhar do ponto de vista da avaliação da integridade estrutural de componentes ou estruturas. Para esse efeito é desejável ter valores pontuais de tenacidade à fractura que caracterizem sumariamente o comportamento de fractura dúctil [24]. No caso do CTOD este é designado de δ_C , se for o valor para o qual ocorre a instabilidade ou δ_{IC} se for o valor de iniciação à fractura dúctil. No caso do integral “J” também se pode retirar o valor para a ocorrência da instabilidade J_C mas o mais usual é o valor de iniciação à fractura dúctil J_{IC} .

O δ_C é a abertura da boca da fenda máxima para a qual ocorre a instabilidade. Os primeiros ensaios normalizados para a determinação do CTOD crítico (BS 7448-1991 e ASTM 1290-89). Estes eram efectuados no provete de flexão de três pontos (SENB) instrumentado com um extensómetro de palhetas (conhecido como *clip gage*) para a medição do CMOD (*crack mouth opening displacement*), que será relacionado com o CTOD através do modelo de articulação plástica. Durante o teste o output do extensómetro é relacionado com a carga aplicada, efectuando um registo de força versus CMOD, através do qual através do qual se obtém o valor máximo de força e o respectivo CMOD e consequentemente o valor de CTOD [9]. Na Figura 19 está representado esquematicamente o modelo de articulação plástica e o digrama de força vs CMOD do ensaio do CTOD.

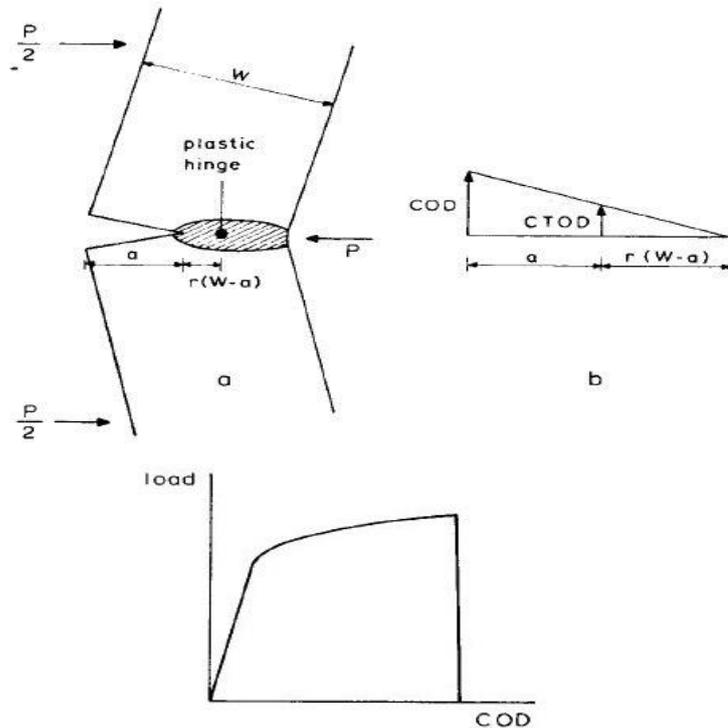


Figura 19 - Modelo de articulação plástica e diagrama de F vs $CMOD$ [9]

O modelo de articulação plástica foi abandonado pela ASTM E1290, em 2002, que passou a efectuar o cálculo do $CTOD$ baseado no integral “J”. Esta mudança está relacionada com o facto que os valores de $CTOD$ obtidos através do modelo de articulação plástica, demonstraram ser dependentes do tamanho de fenda para relações de $\frac{a}{W}$ inferiores a 0,45 e também serem dependentes do encruamento. O $CTOD$ baseado no integral “J” apenas é dependente do primeiro, como tal, além de terem sido adoptado um modelo baseado no integral “J” foi também definido intervalo de tamanhos de fenda para as quais são válidas ($0,45 < \frac{a}{W} < 0,7$) [25].

A ASTM E1290 foi retirada em 2013, no entanto, o procedimento normalizado para a obtenção do δ_c e δ_{IC} encontra-se na ASTM E 1820. O método de obtenção destas propriedades é baseado na análise gráfica de uma curva de resistência do tipo δ -a, de modo idêntico ao que acontece com a obtenção do J_{IC} e J_C .

O J_{IC} é o valor de integral “J” em que se inicia o processo de fractura dúctil do material, e a sua obtenção foi normalizada pela primeira vez através da ASTM E 813, esta foi sendo actualizado sucessivamente para E 1152, E 1737 e até ser incorporada na ASTM E 1820 onde se encontra actualmente.

A determinação do J_{IC} é realizada através da aplicação do anexo A9, da ASTM E 1820, que através da análise gráfica de uma curva de resistência do tipo J-a, vai delinear a zona de dados válidos e retirar um valor J_Q . Esse valor J_Q só será efectivamente o valor de J_{IC} se passar as condições de validação descritas nesse mesmo anexo [25]. Na Figura 20 está representado uma curva de resistência usada para a obtenção do J_{IC} .

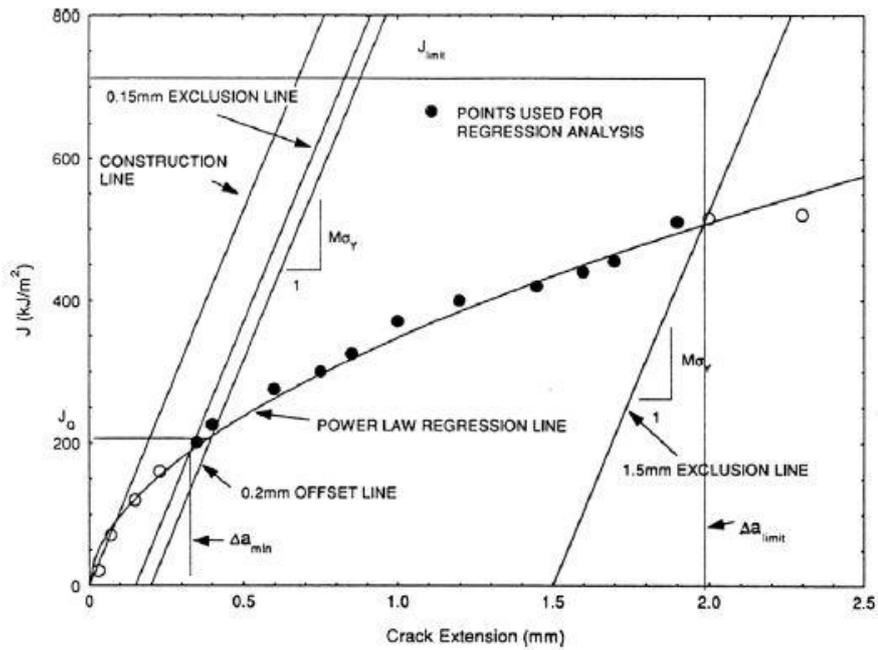


Figura 20 - Obtenção do J_{IC} [25]

3 Curva de Resistência

3.1 O conceito

Os componentes metálicos de estruturas e equipamentos podem apresentar dois comportamentos distintos à fractura:

1. Propagação instável de fenda.
2. Propagação estável de fenda seguida de propagação instável.

O comportamento à fractura dos materiais metálicos vai ser definido essencialmente pelas suas propriedades mecânicas e pela natureza do carregamento (cargas estáticas ou dinâmicas).

Considerando apenas o caso de aplicação da carga de forma estática, apenas irá depender da natureza do material. Como já foi referido no capítulo anterior, materiais metálicos com elevados módulos de Young, tensão de cedência e de rotura, vão apresentar pouca plasticidade na ponta da fenda, e conseqüentemente irão exibir um comportamento à fractura do primeiro tipo, designado também de fractura frágil. Este tipo de comportamento é facilmente caracterizado através de único valor crítico (G_{IC} , K_{IC} , δ_{IC}), que caracteriza o ponto de instabilidade.

No caso dos materiais metálicos que apresentam evidentes sinais de plasticidade, denominados de comportamento dúctil, irão apresentar elevada plasticidade na ponta da fenda, apresentam um comportamento à fractura do segundo tipo, também denominado de fractura dúctil. Nos materiais em que ocorre fractura dúctil o comportamento à fractura não é correctamente caracterizado se for apenas descrito através de um único valor pontual. Este tipo comportamento pode ser quantificado através de curvas de resistência, também denominadas Curva “R” [26].

A Curva “R” é a representação da energia total dissipada no processo de fractura dúctil em função da variação do tamanho de fenda. Esta representação da resistência do material é representada não só por parâmetros energéticos como “G” e “J” mas também através de parâmetros equivalentes como “K” e “CTOD” [27].

A energia necessária para a propagação da fenda, em fractura dúctil, é representada pelo trabalho necessário para criação de uma nova zona plástica somada com o trabalho requerido para a iniciação (crescimento e coalescência do micro vazios à frente da fenda)

[9]. Em baixo está representada a equação que define “R” em função do trabalho plástico e da energia de superfície (energia necessária para a iniciação).

$$R = 2 (\gamma_P + \gamma_S) \quad (17)$$

Este registo da resistência do material é utilizado na previsão do possível comportamento à fractura de componentes com formas arbitrárias, assim como, a condição crítica de carga (força, pressão, momento), deformação e tamanho de fenda para o qual ocorre a iniciação e propagação do processo de fractura [28]. Em suma, a curva de resistência pode ser utilizada para efectuar a avaliação de parâmetros críticos como G_C , K_C , δ_C ou os parâmetros de iniciação à fractura J_{IC} e δ_{IC} . As curvas de resistência, sendo o registo da resistência à fractura do material, permitem efectuar a previsão do efeito que uma determinada carga originará. Na Figura 21 está representada a utilização da curva de resistência como referência para a previsão de falha de um componente.

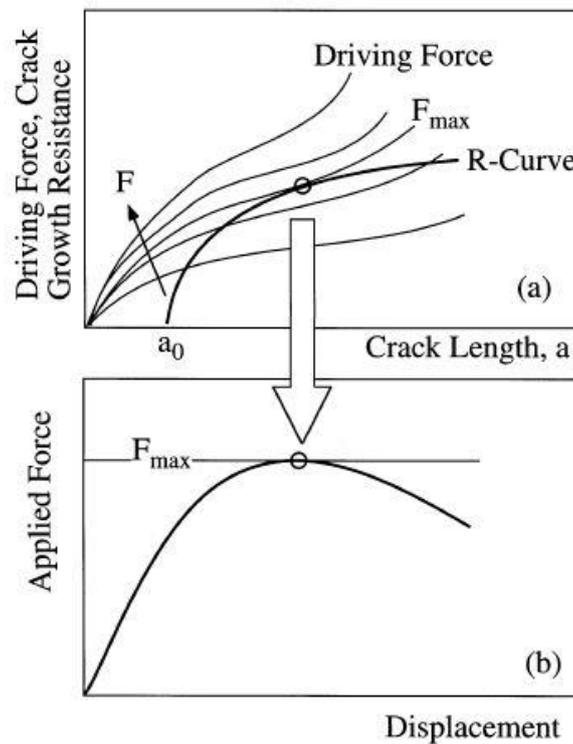


Figura 21 – Sobreposições de curvas de carga com a curva de resistência do material (a) Diagrama de força deslocamento que gera a curva de resistência com o ponto de carga máxima referenciado.(b) [28]

O comportamento à fractura de materiais caracterizados pela curva de resistência pode variar em função das condições de carregamento a que o componente está sujeito. Estes comportamentos podem ser previstos através da intersecção de uma recta (ou curva) representativa do parâmetro (“G”, ”K”, ”J”) com a curva de resistência.

A condição necessária para o crescimento de fenda é $G = R$, tal e qual a que acontece para os materiais de comportamento frágil em deformação plana. No entanto, esta condição em materiais dúcteis, e ou em tensão plana, apenas é suficiente para provocar a propagação estável da fenda. Durante esta propagação estável, “R” aumenta, pelo que é necessário um aumento de carga (que consequentemente provoca um aumento de “G”), para manter o crescimento estável de fenda, caso contrário a fenda pára de propagar. A condição para a ocorrência de instabilidade é não só a igualdade entre “G” e “R”, mas também, a igualdade entre as respectivas derivadas em ordem ao tamanho de fenda ($\frac{\partial G}{\partial a} = \frac{\partial R}{\partial a}$). Esta condição é representada graficamente pela tangência entre a recta representativa da carga e a curva de resistência [9].

O aumento da resistência do material pode ser explicado pelo consumo da energia na formação de uma nova zona plástica na ponta da fenda. Em materiais metálicos de comportamento dúctil esta zona é de maior dimensão, o que implica um maior gasto de energia na sua formação, ficando menos energia disponível para o crescimento da físico da fenda.

Na Figura 22 está representada esquematicamente uma curva “R” sobreposta com rectas representativas de diferentes carregamentos para um tamanho de fenda inicial genérico “ a_i ”.

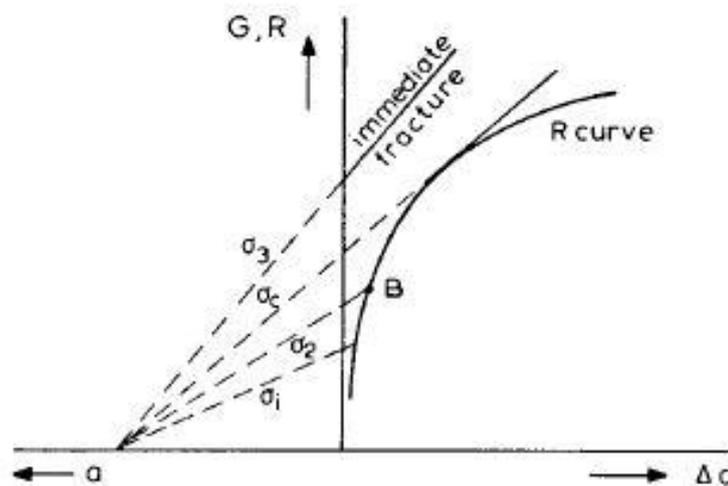


Figura 22 - Previsão do comportamento à fractura através da curva de resistência [9]

Em cima estão representados os possíveis comportamentos à fractura passíveis de serem representados pela curva de resistência. Daqui é possível identificar 3 situações distintas:

1. Início de propagação estável de fenda com uma tensão remota “ σ_i ”, continuação da propagação estável devido ao aumento da tensão até “ σ_c ” passando por “ σ_2 ”, propagação instável de fenda no momento em que se atinge “ σ_c ”.
2. Ocorrência apenas de propagação estável de fenda se a tensão apenas variar ou estiver compreendida entre “ σ_i ” e “ σ_2 ”
3. Ocorrência de propagação instável de imediato se a tensão aplicada for igual ou superior a “ σ_c ”.

Pode-se considerar que existem dois tipos de curvas de resistência. Uma associada à ocorrência de fractura dúctil dentro dos limites da MFLE, designada de “Kr”, e outra associada às condições elasto plásticas da MFEP, nomeada “Jr” [29].

Idealmente a curva “R” representaria a resistência à fractura do material independentemente do tamanho de fenda, geometria e tamanho do componente. No entanto, o que se verifica é que estes factores podem influenciar o comportamento à fractura do material e consequentemente a curva de resistência que o representa. A dependência da curva R com estes factores leva a que possa haver um problema de transferibilidade dos resultados obtidos em laboratório para as estruturas [28].

O comportamento à fractura representado pela curva de resistência, em fractura dúctil, à semelhança do que acontece na fractura frágil, é dependente do estado de tensão que se verifica na ponta da fenda. Isto torna a curva “R” dependente de todos os factores que intervêm no constrangimento da fenda.

O efeito do constrangimento da ponta da fenda em metais de comportamento dúctil é substancialmente diferente daquele que se verifica nos metais de comportamento frágil. Nestes últimos, tal como foi referido no capítulo 2, o elevado constrangimento da ponta leva a formação do estado de deformação plana e consequentemente ao acontecimento de fractura frágil. No entanto, nestes materiais quando o constrangimento deixa de ser suficiente para que se esteja no estado de deformação plana passa a acontecer o fenómeno de fractura dúctil. Nos materiais metálicos dúcteis, o estado de deformação plana não é sinónimo de fractura frágil, pelo contrário, o material continua a apresentar fractura dúctil devido ao elevado tamanho da zona plástica, quando comparado com a zona plástica em deformação plana de um material de comportamento frágil. Fora do estado de deformação plana a resistência à fractura do material dúctil tende a aumentar com a diminuição do constrangimento e consequente aproximação do estado de tensão plana. O efeito do

constrangimento da ponta da fenda no comportamento à fractura está ilustrado esquematicamente na Figura 23.

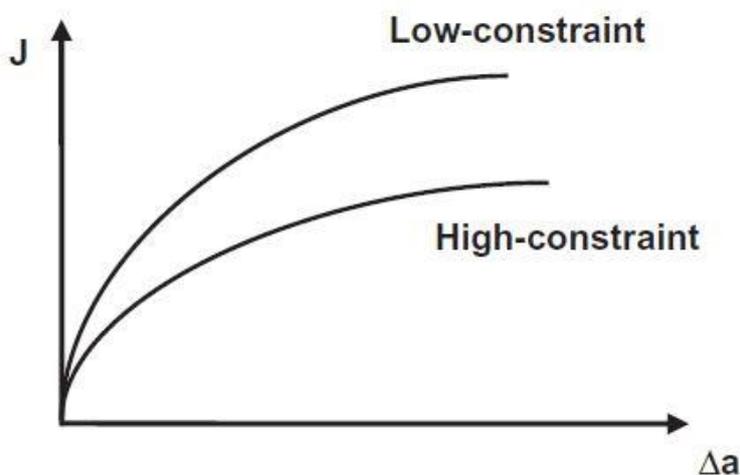


Figura 23 - Influência do constrangimento da zona plástica na ponta da fenda na curva "R" [30]

O estado de deformação plana irá gerar a curva de resistência mais conservadora existente para um dado material. Esta curva define o limite inferior em termos de comportamento à fractura do material, e é independente do tamanho do provete. Devido a este facto, os ensaios normalizados, que visam a obtenção da curva de resistência, estão direccionados para a aquisição desta curva representativa do estado de deformação plana. Como tal, asseguram através de requisitos geométricos e dimensionais que o estado de tensão na ponta da fenda seja deformação plana. Tendo de ter se em atenção a quem apesar da curva R ser independente em termos dimensionais, não é independente em termos de geometria [31].

O constrangimento do material plástico na ponta da fenda, que é responsável pelo respectivo estado de tensão, depende da forma da fenda (e da sua localização face as fronteiras externas), da espessura do material, do carregamento (tracção ou flexão), da magnitude da carga aplicada e das propriedades do material (expoente de encruamento, tensão de cedência, modulo de Young) [32]. Estas dependências foram verificadas através de análise numérica (elementos finitos) por Newman et al (1994) [32] e experimentalmente por Schwalbe et al (1999) [28]. Este último ainda relacionou o constrangimento da ponta a fenda com a esbeltez do provete designando essa relação de *Slenderness*, que é o quociente entre o ligamento não fendido e a espessura. Em baixo está representado esquematicamente nas Figuras Figura 24, Figura 25, Figura 26 a relação de cada um dos

parâmetros anteriormente referidos e a sua influência na aproximação de um estado triaxial de tensões (deformação plana).

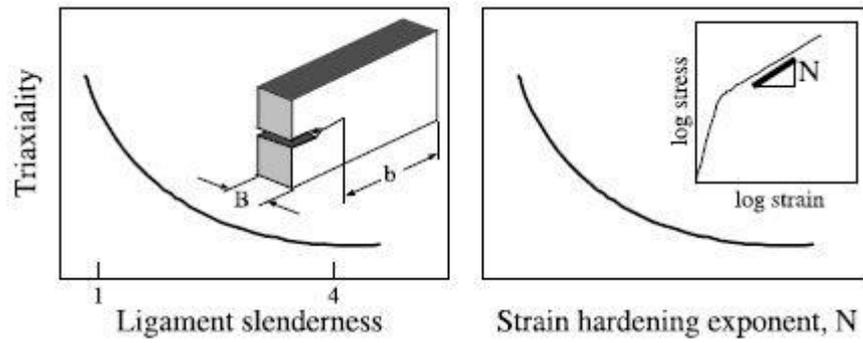


Figura 24 - Influência do parâmetro slenderness e do expoente de endurecimento [31]

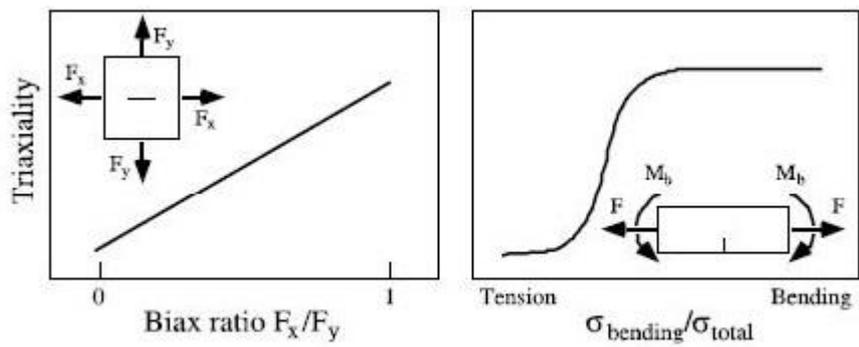


Figura 25 - Influência das cargas biaxiais e das cargas de flexão [31]

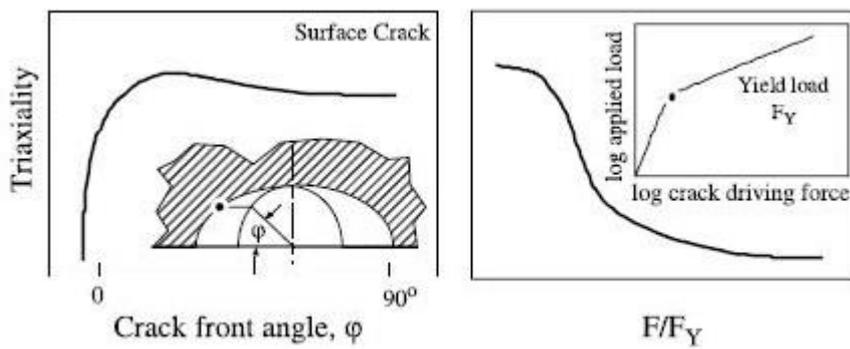


Figura 26 - Influência da posição angular na frente de fenda e do rácio entre carga aplicada e carga de cedência [31]

3.2 Normalização e o problema da transferibilidade

Num primeiro momento, as agências de normalização (ASTM, ESIS, ISO, BSi) procuraram desenvolver testes normalizados em que as amostras (provetes) utilizadas reflectissem fendas com elevados níveis de constrangimento, de modo a se obter um estado predominantemente de deformação plana. Para esse efeito foram utilizado provetes de flexão (SENB e CT) e profundamente fendidos ($0,45 < \frac{a}{W} < 0,75$).

Em geral as fendas encontradas em estruturas e equipamentos de engenharia (vasos de pressão, tubos, veios, etc.) apresentam fendas superficiais e muitas vezes submetidas a esforços de tração. Estas condições que se vão desenvolver na ponta das fendas muitas vezes não correspondem a um estado de deformação plana. O que acontece quando se transpõe os resultados dos testes normalizados, para serem utilizados para a avaliação estrutural, é que estes podem levar a intervenções desnecessárias de reparação ou substituição na estrutura, devido a valores conservadores de resistência à fractura. Para se evitar este inconveniente, é necessário que a condição de constrangimento da ponta da fenda, existente nas estruturas, seja transferida para o provete a ser ensaiado no laboratório, para que a resistência à fractura depois encontrada reflecta o melhor possível a realidade encontrada nas estruturas. Para se ajustar a esta realidade a ASTM na sua norma E1820, no anexo X2 prevê a realização de ensaios para a determinação da curva R para provetes com fenda superficiais ($0,05 < \frac{a}{W} < 0,45$) em provete SENB. No entanto, este anexo torna-se controverso pois as equações para o cálculo dos valores de J não têm em conta o crescimento de fenda, o que causa depois inconsistência com a mesma equação para fendas profundas [33]. Na Figura 27 encontram-se diversas curvas de resistência obtidas para diferentes relações de $\frac{a}{W}$ segundo os procedimentos da ASTM E 1820.

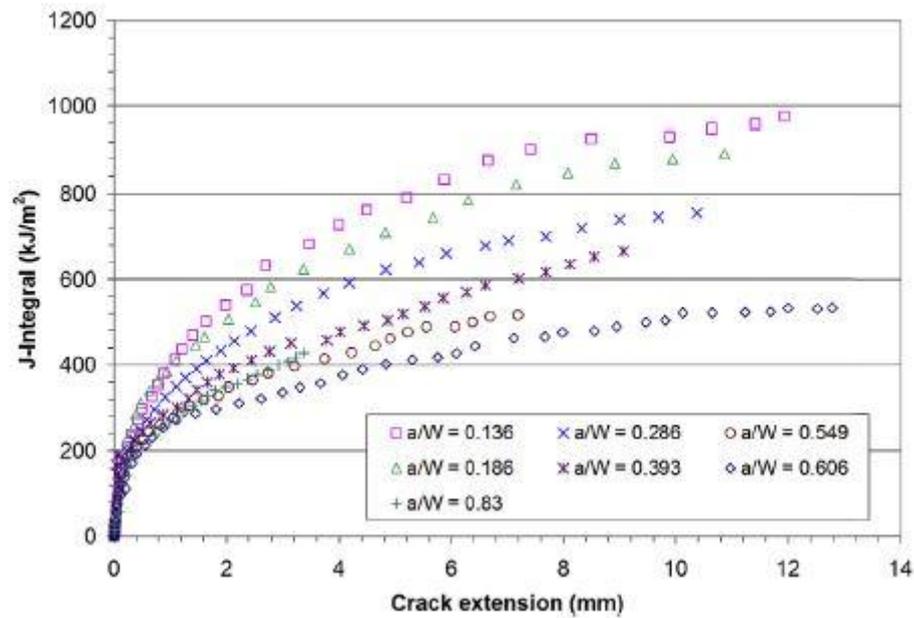


Figura 27 - Curvas de resistência à fratura para diferentes relações de a/w [33]

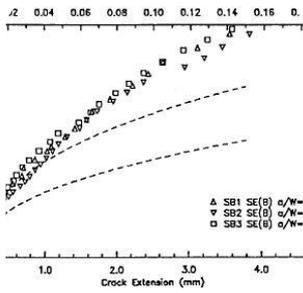
Além desta adaptação da ASTM dos testes existentes, foi desenvolvido por esta agência um método de teste normalizado para caracterizar a resistência à fratura em condições de baixo constrangimento: A ASTM E 2472 (*Standard Test Method for Determination of Resistance to stable Crack Extension under Low-Constraint Conditions*) que foi lançado em 2012. O objectivo deste método de teste é caracterizar a resistência do material à propagação estável de fenda em termos de um único valor crítico de CTOA (*Crack Tip Opening Angle- Ψ_C*) ou de uma curva de resistência expressa em COD (*Crack Opening Displacement*) elaboradas através de provetes do tipo CT e MT [34].

Devido à necessidade de valores de resistência à fratura em condições de baixo constrangimento, por parte da indústria petrolífera e do gás, foi iniciada a investigação de testes realizados em provetes do tipo SENT pois estes simulavam melhor as condições de baixo constrangimento encontradas nos equipamentos [21]. Estas investigações deram origem, em 2014, à BS 8571 (*Method of test for determination of fracture toughness in metallic materials using single edge notched tension (SENT) specimens*).

Uma outra maneira de resolver o problema da transferibilidade é através de um método desenvolvido por Chao e Zhu, que consiste na correcção do constrangimento da curva de resistência normalizada para as condições de constrangimento existentes na estrutura. O método baseia-se no pressuposto que a curva de resistência (J-R) é uma função de dois parâmetros e é representada pela equação (18).

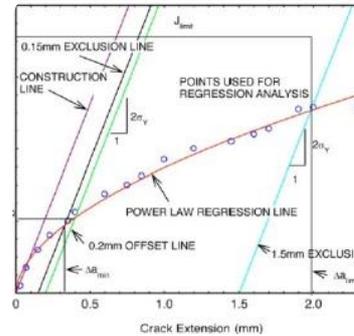
$$J(\Delta a, q) = C_1(q) \cdot \left(\frac{\Delta a}{1mm}\right)^{C_2(q)} \quad (18)$$

Onde Δa é a propagação da fenda e q é uma constante arbitrária associada a uma de três teorias do constrangimento da fractura (J-T, J-Q, J-A2) [35]. A selecção do parâmetro arbitrário deve ser em função do tamanho da zona plástica da fenda. É sugerido para grandes zonas plásticas (*Large Scale Yielding*), materiais dúcteis, a utilização da teoria J-Q ou J-A2 (parâmetros Q e A2. Para pequenas zonas plásticas (*Small Scale Yielding*), materiais frágeis, é mais adequada a teoria J-T ou seja o parâmetro T [33]. O método consiste em quatro passos, com o objectivo de descobrir os parâmetros C1 e C2, que representam o constrangimento da fenda e são função da Variável arbitrária q . O procedimento inicia-se com a determinação experimental de diversas curvas de resistência, pelo menos três e para diferentes níveis de constrangimento e de preferência que abarquem desde um nível de constrangimento alto a um baixo. Isto é conseguido através de diferentes comprimentos de fenda ou através de diferentes tipos de provetes, sejam eles normalizados ou não. Com as curvas de resistência para diversos níveis de constrangimento, é calculado o valor de J_{IC} e de T_R ($\Delta a = 1mm$). Com o valor da carga para a qual ocorre o J_{IC} é efectuado um estudo de elementos finitos onde é determinado o valor do parâmetro de constrangimento (Q, A2, T) que diz respeito a cada uma das curvas. Uma vez calculados os respectivos valores de q calculam-se os parâmetros de ajuste da curva, C1 e C2. Com os parâmetros de cada uma das curvas calculados é possível ver como cada um deles (C1 e C2) se desenvolve com a variação do parâmetro de constrangimento, “ q ”, e retirar uma equação que descreva a variação dos mesmos, desde o alto ao baixo nível de constrangimento. Deste modo é possível construir uma família de curvas que descrevam o comportamento à fractura do material para diferentes níveis de constrangimento na ponta da fenda [35]. Na Figura 28 está representado um esquema que sumariza o método desenvolvido por Chao e Zhu.

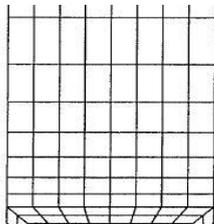


Obtenção experimental de curvas de resistência

- No mínimo 3 curvas
- As curvas devem representar diferentes estados de constringimento

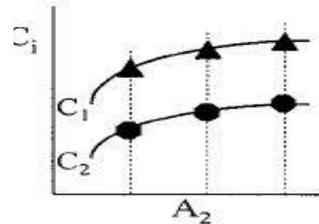


Determinação do J_{ic} e do $Tr(\Delta a=1mm)$



Modelo de elementos Finitos e calculo do parâmetro de constringimento

- Modelo dos provetes utilizados
- Valor da carga que provoca o J_{ic}



Cálculo dos parâmetros C_1 e C_2

- Calculo de C_1 e C_2 para cada uma dos diferentes parametros
- Obtenção das equações que descrevem o comportamento dos parametros da curva com o de constringimento

Figura 28 - Método desenvolvido por Zhu e Chao

3.3 Curva “Kr”

A curva de resistência “Kr” é o registo contínuo da resistência desenvolvida em termos do factor de intensidade de tensões “K” versus a extensão de fenda, à medida que a fenda é aberta através de um aumento contínuo do factor de intensidade de tensões. [36]

Esta curva, associada a MFLE, é designada de curva “Kr” e está associada a um material metálico com espessura insuficiente para que seja possível obter o estado de deformação plana. Como tal vai caracterizar o comportamento à fractura do material no estado de transição entre a deformação plana e tensão plana, e também deste último referido.

Uma importante propriedade desta curva é que esta é independente do tamanho de fenda quando nos encontramos no estado de tensão plana. Em estados intermédios (entre a tensão plana e deformação plana) esta independência não se verifica [12]. A curva “Kr” é ainda uma propriedade do material dependente da espessura, temperatura e da velocidade de deformação [36].

A curva “Kr” é muitas vezes associada a placas de materiais de alta resistência, em que apesar de a espessura da placa ser insuficiente para que seja aplicada o conceito do K_{IC} , o componente permanece predominantemente elástico, o que possibilita a construção de uma curva baseada no factor de intensidade de tensões. O conceito teve bastante sucesso na indústria aeroespacial onde ainda são realizados testes com grandes painéis de fenda central (*Middle-Cracked Tension Panel-M(T)*), na ordem dos 2 m de altura, que representam os materiais estruturais das aeronaves [25]. A utilização de grandes provetes para a obtenção de curvas “Kr” não é propriamente necessária é possível retirar a mesma curva através de provetes mais reduzidos do tipo M(T) ou *Compact Tension (C(T))* com dimensões na ordem dos 305mm e 125mm respectivamente, reduzindo significativamente os custos. A normalização dos ensaios com provetes de reduzida dimensão foi efectuada, pela primeira vez, em 1974 pela ASTM E 561, e nesta constavam os provetes C(T), M(T) e C(W), no entanto este último foi removido na actualização de 2010 [25]. Na Figura 29 estão representados os provetes que são utilizados pela ASTM E561 para obtenção da curva “Kr”, nomeadamente os provete M(T) e C(T) e o já não admitido C(W).

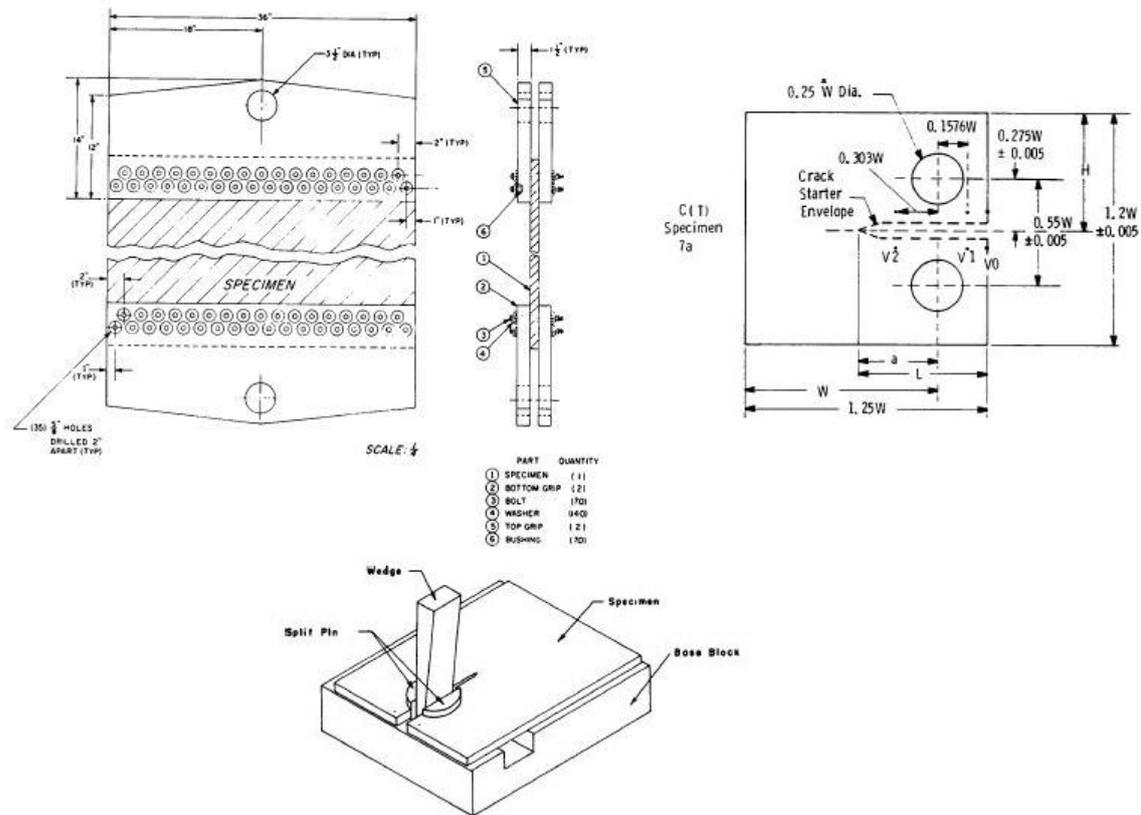


Figura 29 - Provetes utilizados para a determinação da curva “Kr” [36]

A ASTM E 561 considera que a curva é definida pelo factor de intensidade de tensões efectivo, nomeado de K_{eff} . Este factor de intensidade de tensões resulta da utilização do tamanho de fenda efectivo, a_{eff} , que é a soma do tamanho da fenda real ($a_0 + \Delta a$), com o raio da zona plástica de Irwin. Na equação (19) está a expresso o tamanho de fenda efectivo e nas equações (20) e (22) o cálculo factor de intensidade de tensões para os dois tipos de provetes actualmente aceites.

$$a_{eff} = a_0 + \Delta a + \left(\frac{1}{2\pi} \cdot \left(\frac{K_I^2}{\sigma_{YP}^2} \right) \right) \quad (19)$$

Para o provete C(T):

$$K_{eff} = \frac{P}{B \cdot \sqrt{W}} \cdot f\left(\frac{a}{W}\right) \quad (20)$$

Onde $f\left(\frac{a}{W}\right)$ é dado por:

$$\left(\frac{a}{W}\right) = \left[\frac{2 + \frac{a}{W}}{\left(1 - \frac{a}{W}\right)^{3/2}} \right] \cdot \left[0,886 + 4,64 \cdot \left(\frac{a}{W}\right) - 13,32 \cdot \left(\frac{a}{W}\right)^2 + 14,72 \cdot \left(\frac{a}{W}\right)^3 - 5,6 \cdot \left(\frac{a}{W}\right)^4 \right], \text{ para } C(T) \quad (21)$$

Para o provete M(T):

$$K_{eff} = \frac{P}{B \cdot W} \cdot f\left(\frac{a}{W}\right) \quad (22)$$

Para este tipo de provete são aceites as seguintes expressões para o factor de forma;

$$f\left(\frac{a_{eff}}{W}\right) = \sqrt{a} \cdot \left[1,77 - 0,177 \cdot \left(\frac{2a}{W}\right) + 1,77 \cdot \left(\frac{2a}{W}\right)^2 \right] \quad (23)$$

$$f\left(\frac{a}{W}\right) = \sqrt{\pi \cdot a \cdot \sec\left(\frac{\pi \cdot a}{W}\right)}$$

Os provetes utilizados na obtenção desta curva, devido a serem de baixa espessura, muitas vezes podem sofrer de encurvadura, o que levará à invalidadez dos dados recolhidos. O fenómeno de encurvadura provoca a sobreposição de dois modos de fractura (por exemplo I e II), logo a curva não seria representativa do modo I. Para evitar este fenómeno, a norma prevê que os provetes sejam equipados com dispositivos anti encurvadura. Em baixo, na Figura 30, está demonstrado esquematicamente o efeito da encurvadura num provete M(T) e o dispositivo de prevenção do mesmo, assim como um dispositivo anti encurvadura para o provete C(T).

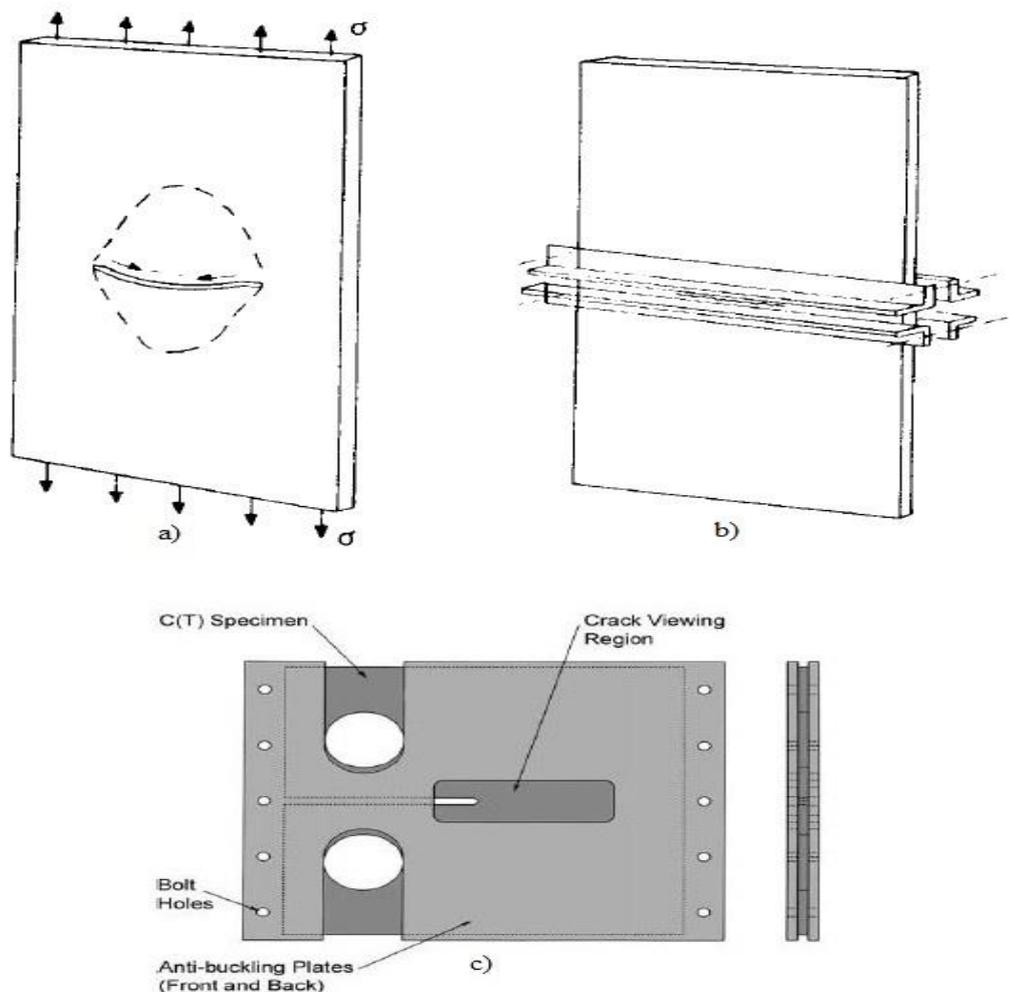


Figura 30 – a) Representação esquemática da zona onde ocorre encurvadura [9] - b) Dispositivo anti encurvadura para uma placa com fenda central [9] - c) Dispositivo anti-encurvadura do provete C(T) [31]

Com a utilização dos dispositivos de prevenção da encurvadura pode vir a existir atrito excessivo entre os provetes e os dispositivos, o que é indesejável. Para o evitar é proposto que as áreas de contacto entre o dispositivo e o provete estejam lubrificadas (por exemplo com folha de teflon) [4]. A encurvadura e o atrito excessivo podem ser identificados no diagrama de força e deslocamento. A Figura 31, é apresentada pela ASTM E 561 para a identificação da encurvadura ou atrito excessivo através do diagrama de Força vs deslocamento. A encurvadura e o atrito são identificados no diagrama de força deslocamento se forem efectuados descarregamentos parciais. Se a diferença entre a recta descarregamento e carregamento for superior a 2% é considerado que o provete está a sofrer de encurvadura ou de atrito excessivo. [36]

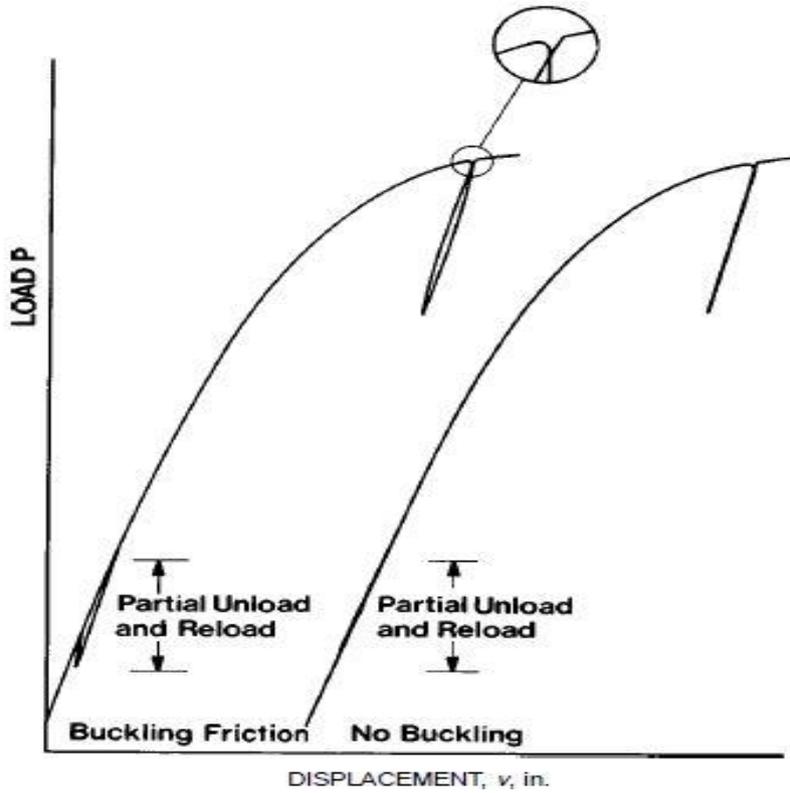


Figura 31 - Efeito da encurvadura e fricção no diagrama F-Deslocamento [36]

É considerado que este conceito é válido para ser utilizado quando o tamanho da amostra a ser ensaiada tem dimensões suficientes para que esta se mantenha maioritariamente elástica durante o ensaio. A norma do ensaio normalizado apenas propõe a verificação desta condição através da comparação do tamanho do ligamento não fendido ($W - a$) com o equivalente a oito vezes o raio plástico de Irwin para o estado de tensão plana. A equação (24) é proposta pela ASTM para a confirmação da elasticidade do provete.

$$(W - a) \geq \frac{4}{\pi} \cdot \left(\frac{K_{max}^2}{\sigma_{YP}^2} \right) \quad (24)$$

À semelhança do que acontece com a verificação do K_{IC} , também esta apenas se pode efectuar após a realização do ensaio, o que em parte a torna inconveniente.

3.3.1 Factores que influenciam a curva de resistência nas condições de tensão plana

Os factores que influenciam a curva R nas condições de tensão plana já foram abordados em diversos artigos na década de 80 e 90. De todos os factores estudados aqueles que são considerados como relevantes foram, o modo de carregamento (tração ou flexão), que está directamente relacionado com o tipo de provete, e a influência da dimensão do ligamento nos mesmos. Foi verificado experimentalmente, por Schwalbe e Heerens, que o modo de carregamento pode não ter qualquer efeito na resistência à fractura, como por exemplo o alumínio 2024-FC, ou pelo contrário, ter influência na mesma, como é o caso do aço 20MnMoNi55. Neste último caso existe um aumento da resistência à fractura nos provetes que apenas sofrem esforços de tracção (CCT). [28] Na Figura 32 estão as curvas de resistência representativas dos estudos efectuados por Schwalbe e Heerens.

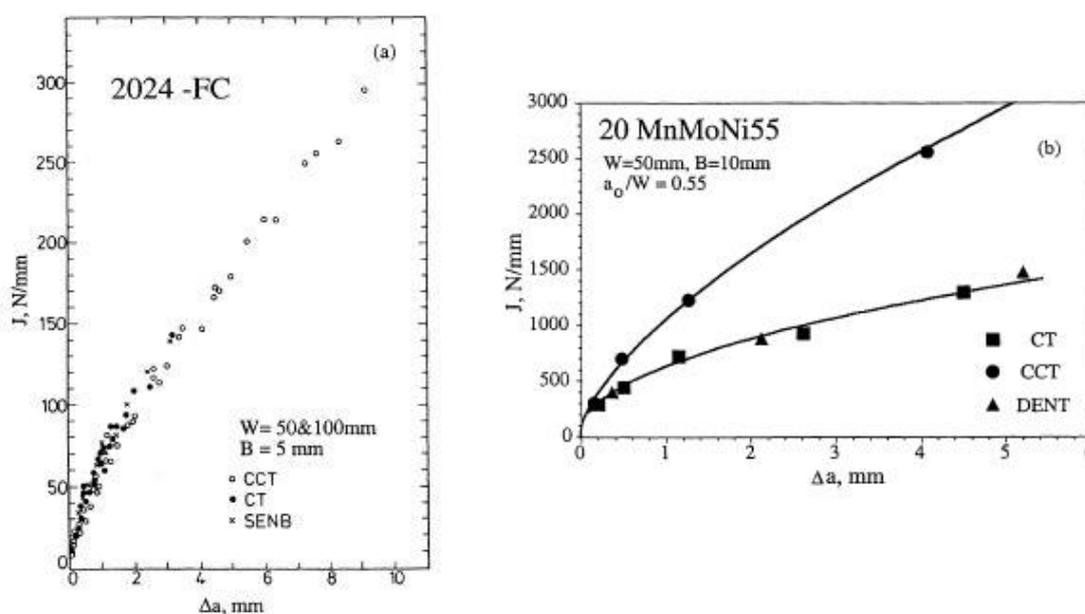


Figura 32 – Estudos efectuados em placas finas onde identificou a influência, na resistência à fractura, do tipo de carregamento em materiais diferentes [28].

Os ensaios pretenderam comparar o efeito dos esforços de flexão (representados pelos provetes SENB e CT) com a tracção (representado pelo provete CCT) na resistência à fractura de placas finas. O comportamento observado no alumínio 2024-FC, também é observado noutros materiais, como os aços austeníticos e nas ligas de alumínio de alta resistência. No entanto o comportamento mais usual é aquele observado no gráfico do aço 20MnMoNi55 em que existe um aumento da resistência à fractura quanto menor for o

esforço de flexão. O efeito combinado do modo de carregamento, com a dimensão do ligamento está sumarizado na Figura 33 [28].

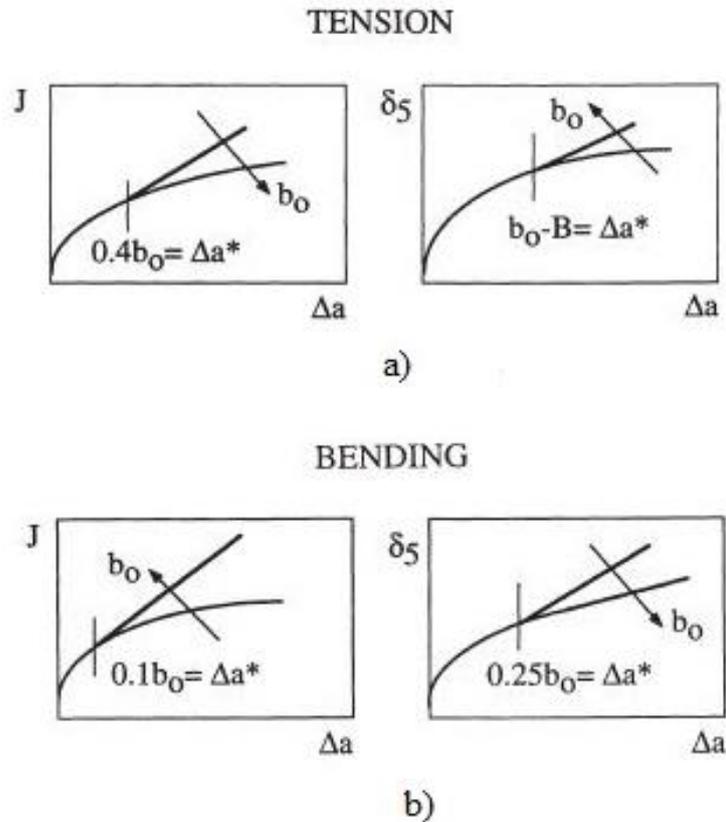


Figura 33 - Efeito do ligamento combinado [28] com esforços de tração a) e flexão b)

Em 2009 Zhu e Leis, no artigo “*Revisit of ASTM round robin test data for determining R curves of thin sheet materials*”, mostraram que a ASTM E 561 e a ASTM E 1820 podem ser equivalentes, no que diz respeito, a determinar curvas de resistência (independentes do tamanho) para provetes finos de ligas de alumínio de baixa tenacidade [34]. Também consideraram que a ASTM E 1820 pode ser aplicada a placas finas de materiais metálicos se o requisito de espessura, necessário para a obtenção de um estado de deformação plana, for desprezado. Devido aos resultados obtidos nesses estudos foi então concluído que uma curva “Jr” é mais geral e de maior utilidade que uma curva “Kr” para materiais metálicos [37].

Brocks et al [38] fez experiências idênticas com a finalidade de identificar qual o melhor método para quantificar o fenómeno de fractura dúctil em placas metálicas de espessura fina. Após análise dos seus resultados, este considerou que o conceito da curva “Kr”, apesar de ser aceite na indústria aeroespacial, baseia-se num fundamento que está obsoleto, e que apesar de funcionar bem nuns casos noutros falha completamente. Além disso, as

duas equações propostas pela ASTM E561, para o cálculo do a_{eff} , proporcionam resultados diferentes (o que é ambíguo), e o conceito de a_{eff} não é realmente necessário para a quantificação do fenómeno [38].

3.4 Curva " J_R "

A curva " J_r " é a representação da resistência à fractura do material metálico (neste caso) em condições elasto plásticas. A curva é baseada no integral " J ", e com o mesmo é possível quantificar a energia dissipada no processo de fractura de materiais elasto plásticos. Através da curva, expressa em integral " J ", é possível identificar e caracterizar os fenómenos associados à fractura dúctil (à semelhança do que era feito com a curva K_r). Como se sabe, se o material for linear elástico o conceito de curva " J_R " permanece todavia válido havendo equivalência total com os conceitos de G_I e K_I [29].

Após o desenvolvimento do conceito do integral " J " não surgiu logo a necessidade de obtenção da curva de resistência para efeitos de avaliação estrutural, mas sim do valor de " J " a partir do qual se inicia a propagação estável de fenda, J_{IC} . Com este objectivo em vista Begley e Landes, em 1972, apresentaram, o primeiro método experimental para obter a esta propriedade e conseqüentemente foi este o primeiro ensaio experimental onde se obteve a curva " J_r ". O primeiro ensaio normalizado expresso no parâmetro J foi lançado em 1981 através da ASTM E 813, onde o objectivo, mais uma vez, era a obtenção do valor de J_{IC} e não da curva em si mesma. A obtenção da curva " J_R " foi normalizada através da ASTM E 1152, culminando mais tarde na ASTM E 1737, que juntou o ensaio normalizado para obtenção da curva " J_r " e do J_{IC} [39].

Em 1999 a ASTM elaborou um procedimento normalizado que pretende efectuar a avaliação da resistência à fractura através de qualquer um dos parâmetros existentes até então (" K ", " J ", "CTOD"). O procedimento foi designado de E 1820 e reuniu o conhecimento dos ensaios normalizados, para a obtenção de propriedades à fractura existentes (E 399 - K_{IC} , E 1737 - J_{IC} e curva " R ", E 1270 - CTOD), e elaborou um método genérico para se poder caracterizar qualquer um dos fenómenos que aconteça durante o ensaio, quer seja fractura frágil ou dúctil.

Está previsto na ASTM E 1820 a monitorização contínua da carga vs deslocamento da linha de carga (LLD) ou da carga vs abertura da boca da fenda (CMOD). Isto para que seja possível caracterizar a resistência à fractura do material caso aconteça uma de duas situações possíveis: (1) a ocorrência de propagação instável de fenda (fractura frágil) que originará um valor único de tenacidade à fractura ou (2) de propagação estável de fenda que originará um registo de um parâmetro de tenacidade à fractura vs propagação de fenda, ou seja uma curva de resistência [40].

A ASTM E 1820 proporciona três métodos para a realização do ensaio de tenacidade à fractura:

1. Método Básico (*Basic Method*)
2. Método de curva de resistência (*Resistance curve Method*)
3. Método de normalização (*Normalization Method*)

O método de teste básico é o de maior simplicidade, é o método multi-provete. Este pressupõe a obtenção do integral “J” através do diagrama de força e deslocamento (deslocamento ao longo da linha de carga ou da abertura da boca da fenda) e do tamanho de fenda inicial. As equações utilizadas por este método para o cálculo do integral “J” são equações de fenda estacionária, o que obriga à correcção dos valores de “J” através do anexo A16 da norma. No entanto, apesar de corrigidos para pequenos tamanhos de propagação de fenda (inferiores a 2 mm) a correcção tem pouco efeito na curva de resistência obtida por este método. Como tal é apenas aconselhado utilizar as curvas “R”, obtidas por este método, apenas para a determinação do J_{IC} [39].

Para a obtenção de uma curva de resistência, para a caracterização da resistência à fractura, é proposto o segundo método chamado de “Curva de Resistência”. Este método é exclusivamente realizado com um único provete, e as equações utilizadas já têm em conta a propagação de fenda. O diagrama de força vs deslocamento (CMOD ou LLD) é utilizado em conjunto com o comprimento de fenda, para calcular os valores de “J”. Com os valores de “J” e os respectivos valores de comprimento de fenda, obtêm-se a curva de resistência como propriedade do material à fractura. Além desta curva poder ser usada para avaliação estrutural, poderá ser também utilizada para retirar o valor de iniciação à fractura J_{IC} , através do anexo A9 da ASTM E 1820 [39].

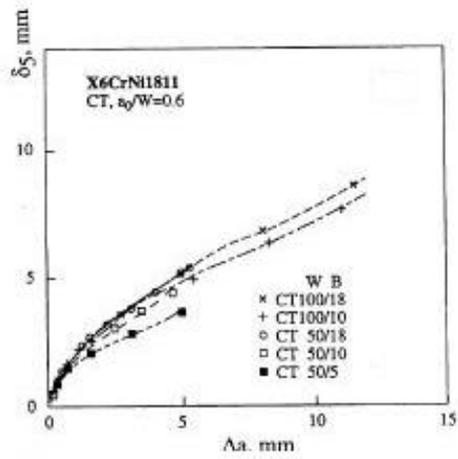
O terceiro método ou “Método de Normalização” infere o comprimento de fenda através do padrão de deformação apresentado na superfície de fractura e a sua relação com as características de deformação provocadas pelo teste efectuado. Sabendo o padrão de deformação do provete com um determinado comprimento de fenda é possível inferir o comprimento de fenda através dos desvios a este mesmo padrão [41].

O método utiliza apenas o diagrama de força vs deslocamento (LLD) e os valores inicial e final do comprimento de fenda. Este método tem a particularidade de normalizar os valores de Força e deslocamento que formam o diagrama de Força vs Deslocamento normalizados. Depois a partir deste diagrama, retira-se a equação de uma curva tipo que interpola todos

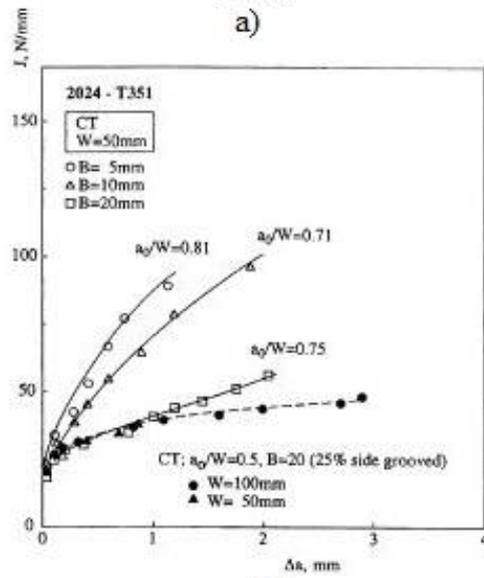
os pontos do diagrama, e que em conjunto com um processo iterativo, descrito na norma, obtêm-se os valores intermédios de comprimento de fenda. Por fim, com todos os valores de comprimento de fenda obtidos e o diagrama de força vs deslocamento do ensaio, aplicam-se as equações do método da curva de resistência, para a obtenção do valor do integral “J”, e constrói-se a curva “Jr” do material. Este método foi desenvolvido para os casos em que se torna difícil a aplicação dos dois métodos anteriores, nomeadamente condições de carregamento rápido, temperatura elevada, e ou ambientes agressivos. No entanto este método apenas poderá ser aplicado a provetes com uma relação de $\frac{a}{w}$ compreendida entre 0,45 e 0,70 e em que a propagação da fenda não seja superior a 4 mm ou 15% do ligamento não fendido original (b_0) [40].

3.4.1 Factores que influenciam a curva de resistência em condições elasto-plásticas

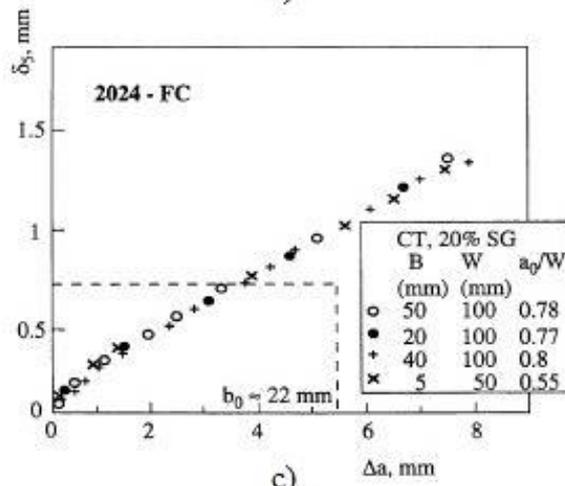
No início deste capítulo foram referidos genericamente os factores que influenciam a curvas de resistência. No caso da curva “Kr” nem todos esses factores se aplicam (*slenderness* e expoente de encruamento) devido às condições em que esta é considerada válida (materiais frágeis e de baixa espessura). Contudo, na curva “Jr” todos os factores referidos anteriormente são aplicáveis, e as diferentes interacções desses factores podem originar distintos comportamentos à fractura. Na Figura 34, representam-se diferentes comportamentos de curvas de resistência em três materiais metálicos diferentes: a) aço austenítico, b) um alumínio sujeito a tratamento de envelhecimento, c) alumínio recozido.



a)



b)



c)

Figura 34 - Curvas de resistência de diversos materiais metálicos [28]

4 Obtenção da curva de resistência à fractura – Caso estudo

4.1 Verificação e selecção do material de ensaio

O material disponível para ensaiar encontrava-se na forma de provetes de flexão de três pontos, com diferentes dimensões e sem qual quer informação acerca das propriedades mecânicas, presença de soldaduras, tratamentos térmicos ou superficiais. Para se ter uma ideia do material que se tinha em mãos, os provetes foram inventariados segundo as referências contidas nos mesmos, e em função das suas dimensões. No total foram inventariados 57 provetes, o inventário dos mesmos encontra-se no anexo A.



Figura 35 - Material disponível para ensaio

Foi necessário verificar se o material disponível era ou não proveniente de chapa soldada, como tal foi seleccionado um provete de cada referência para se proceder a verificação. Para esse efeito foi necessário efectuar um polimento parcial nas faces dos provetes (com lixas 120, 240, 500) e contrastar com uma solução de álcool e ácido nítrico, conhecida como Nital. A solução reage com a perlite e a austenite presentes na solduras, criando um contraste entre as regiões afectadas e não afectadas, sendo assim possível detectar a presença de soldaduras. Na Figura 36 e Figura 37 é possível observar as reacções do metal base e do metal soldado ao contrastante químico.



Figura 36 - Provete de material base



Figura 37- Provete proveniente de chapa soldada

Após se verificar os provetes seleccionados, conclui-se que os provetes marcados com as referências 5.2, 5.6 e 5.7 eram provenientes de chapas soldadas, como tal estes foram excluídos. Uma vez identificados e rejeitados os provetes em que existia soldadura, foram seleccionados 31 provetes que se encontravam marcados com a referência CBL, os quais se encontram descritos na Tabela 2.

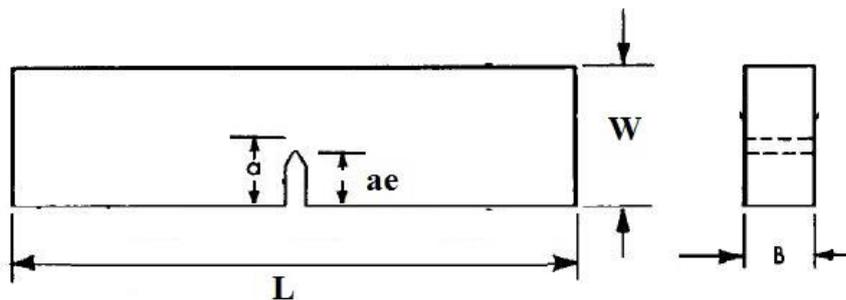


Figura 38 - Dimensões de referência do provete de flexão em três pontos

Tabela 2 - Dimensões dos provetes seleccionados

Referência	L [mm]	W [mm]	B [mm]	ae [mm]
211	140	28,02	13,93	11,03
213_1	179	36,93	18,57	16,23
213_2	180	37,07	18,65	15,87
213_3	180	37,34	18,55	15,45
213_4	179	37,12	18,52	16,12
213_5	180	37,04	18,42	15,46
213_6	180	36,96	18,44	16,24
213_7	180	36,99	18,48	16,27
217_1	195	37,1	18,59	15,73
217_2	195	37,09	18,67	15,94
217_3	195	37,08	18,65	15,96
217_4	198	37,07	18,62	15,7
217_5	196	37,16	18,82	16,07
217_6	194	37,14	18,58	15,9
217_7	199	37,07	18,53	16,03

No grupo de provetes seleccionado existia dois conjuntos de provetes com dimensões idênticas, e um provete isolado de menores dimensões (211 CBL). Os dois conjuntos foram seleccionados para se efectuar os ensaios experimentais. O provete singular foi utilizado para se obter as propriedades mecânicas, químicas e metalúrgicas do material.

Numa primeira fase foram consideradas como propriedades do material, de todos os provetes, aquelas que foram obtidas através do sacrifício deste provete. Estas propriedades foram utilizadas para o planeamento da pré-fissuração e preparação dos ensaios.

Este pressuposto foi assumido de modo a se evitar o sacrifício, de mais provetes para a obtenção das propriedades básicas dos materiais.

Após se terem ensaiado os provetes, foram obtidas novas propriedades do material através das sobras dos provetes ensaiados. Com as propriedades correctas de cada amostra de material foram efectuados os cálculos que dizem respeito a curva de resistência à fractura e ao cálculo do valor de iniciação à fractura J_{IC} .

4.2 Obtenção das propriedades mecânicas do material

O provete que foi sacrificado, gerou 3 provetes de tracção uniaxial e 16 provetes do tipo A para o ensaio de impacto de Charpy. Além dos provetes ainda foram retiradas amostras para a análise química e para as micrografias. Na Figura 39 encontram – se representados os provetes do ensaio de tracção e de impacto.



Figura 39 - Provetes de tração e de Impacto de Charpy

4.2.1 Ensaio de impacto (EN ISO 148)

Os provetes de Charpy tipo A, também designados de Charpy V, têm secção quadrada de 10 mm de lado, entalhe em V de 45° com 2 mm de profundidade. Na Figura 40 está representado um dos provetes utilizados no ensaio.



Figura 40 - Provede de Impacto de Charpy Tipo A

Os ensaios foram realizados a sete temperaturas diferentes, com o objectivo de se obter uma noção do comportamento do material com a variação da temperatura. As temperaturas a que se efectuaram os ensaios foram 20°, 0°, -20°, -35°, -50°, -65°. A temperatura da sala

onde foi realizado os ensaios era controlada e encontrava-se nos 20°. Para se obter as restantes temperaturas de ensaio, os provetes foram mergulhados num recipiente com acetona arrefecida com gelo seco (CO₂) durante 10 min, para que se obtenha uma temperatura uniforme em todo o provete. Uma vez que a acetona tem um ponto de congelação na ordem dos -80° C, torna-se possível que seja arrefecido até aproximadamente até os -70°C. A temperatura do banho foi controlada através de um termopar mergulhado no líquido.

Os resultados dos ensaios de impacto encontram-se representados na Figura 41.

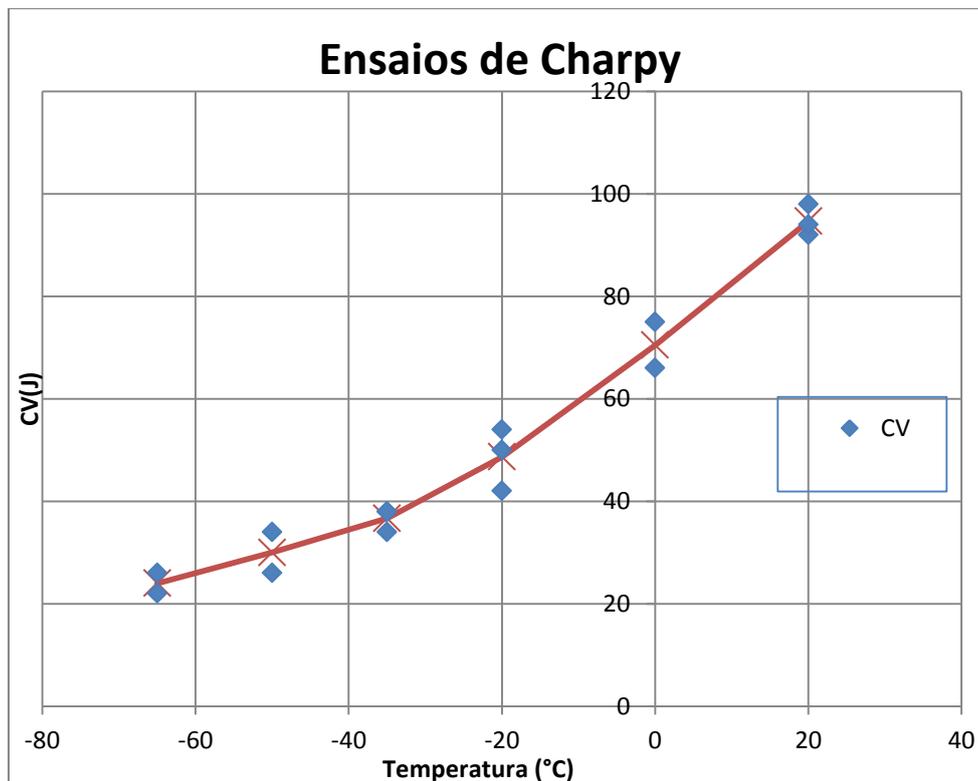


Figura 41- Resultados do ensaio de Impacto

Para se obter uma noção de como varia a ductilidade (ou fragilidade) com a variação da temperatura, foi fotografada as superfícies de fractura de cada um dos provetes, para uma posterior análise das superfícies de fractura. Como meio complementar à análise da ductilidade, foi efectuada a medição da expansão lateral dos provetes, segundo o anexo B da norma EN ISO NP 148-1. Os resultados da análise das superfícies de fractura e encontra-se representados na Figura 42

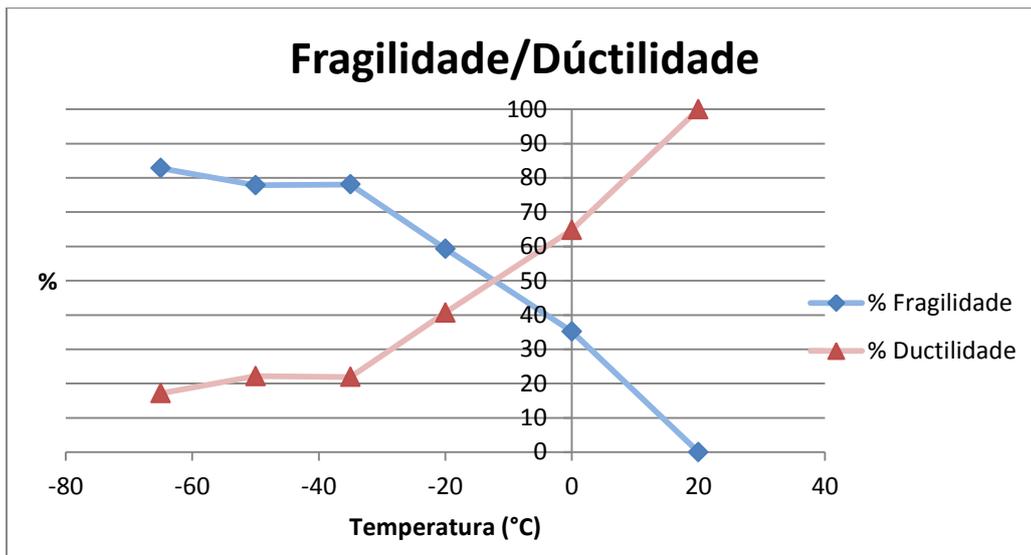


Figura 42 - Ductilidade do material em função da variação de temperatura

Os ensaios de Charpy demonstraram o material à temperatura ambiente (20°C) tem uma superfície de fractura dúctil, no entanto, com a diminuição da temperatura evidencia sinais de fragilidade. Por exemplo a uma temperatura de 0°C já existe uma superfície de fractura frágil significativa (cerca de 35%).

Através do gráfico podemos estimar que a temperatura de transição deste aço deverá andar perto dos -13°C. No entanto, para se terem certezas quanto a este ponto seria necessário a realização de ensaios a um maior número de provetes.

A análise da superfície de fractura pode ser considerada subjectiva, pois depende da imagem que é recolhida para ser analisada assim como a avaliação do apreciador do que é fractura frágil ou dúctil. Para se obter algum tipo de validação desta última análise podemos recorrer à medição da expansão lateral. Na Figura 43, é indicada a média da expansão lateral dos provetes de impacto, *versus* a variação de temperatura.

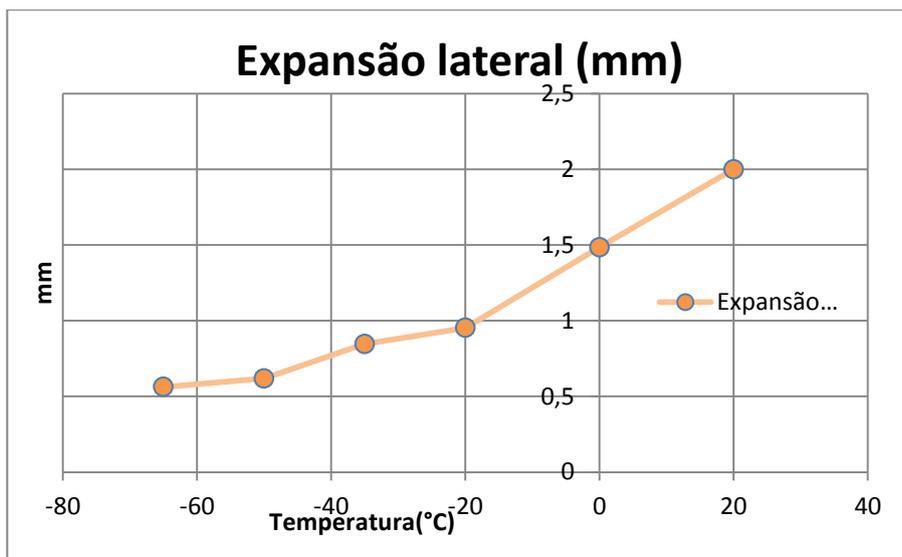


Figura 43 - Expansão lateral

Pode-se dizer que a expansão lateral varia de forma semelhante à curva da ductilidade apresentada no gráfico anterior. Os resultados da expansão lateral, de forma alternativa, reforçam os resultados obtidos na análise da superfície de fractura dos provetes de impacto.

Na Figura 44 faz-se o resumo dos dados obtidos através dos ensaios de impacto.

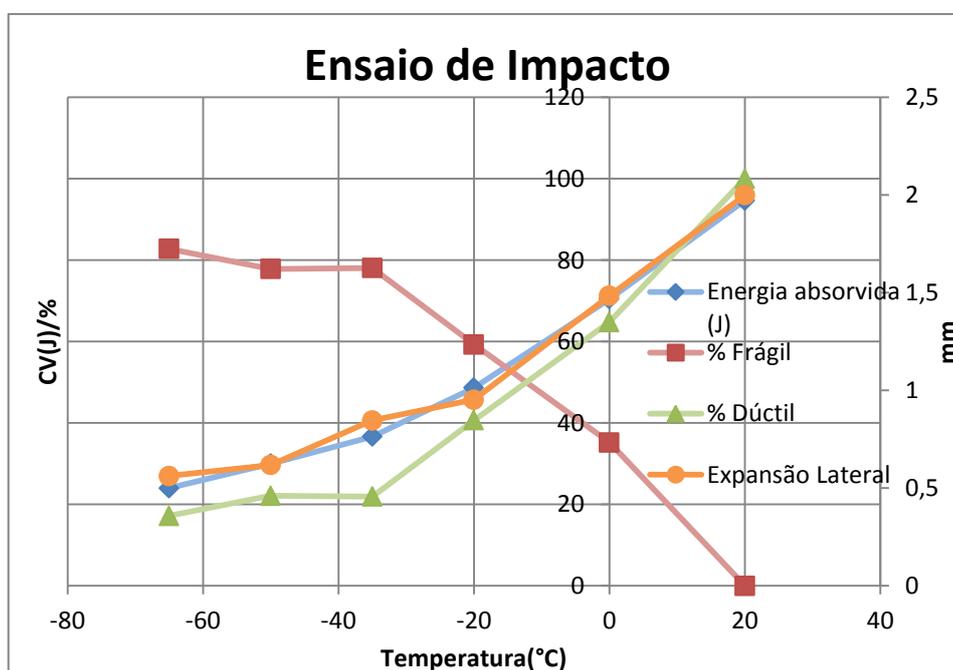


Figura 44 - Compilação dos ensaios de impacto

4.2.2 Composição química, Dureza e microestrutura

A Tabela 3 apresenta os resultados obtidos na análise química efectuada aos provetes. Os materiais em questão são diferentes variações de aço carbono (sem liga). Pois os elementos presentes no mesmo (excepto o carbono) estão em quantidades inferiores às encontradas nos aços ligados. Os aços encontrados nas amostras 213 e 217 não apresentam grandes diferenças no que diz respeito à composição química podendo ser considerados idênticos.

Tabela 3 - Composição Química dos materiais metálicos

Ref	C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]
211	0,21	0,44	1,5	0,02	0,027
213	0,134	0,32	1,36	0,009	0,009
217	0,14	0,22	1,45	0,009	0,006

Na Tabela 4 apresentam-se os resultados dos ensaios de dureza pelo método Vickers (HV), efectuados a algumas amostras de material. É de realçar que a variação de dureza existente entre as amostras 213 a 217 é bastante significativa.

Tabela 4 - Dureza Vickers

Ref	211	213	217
HV	-	153	218

Na Figura 45 pode-se observar a existência de dois tipos de microestruturas distintas, *a* e *b* e correspondem a a ferrite (cor clara) e perlite (cor escura) disposta em colunas, e *c* corresponde a martensite em ripas [42].

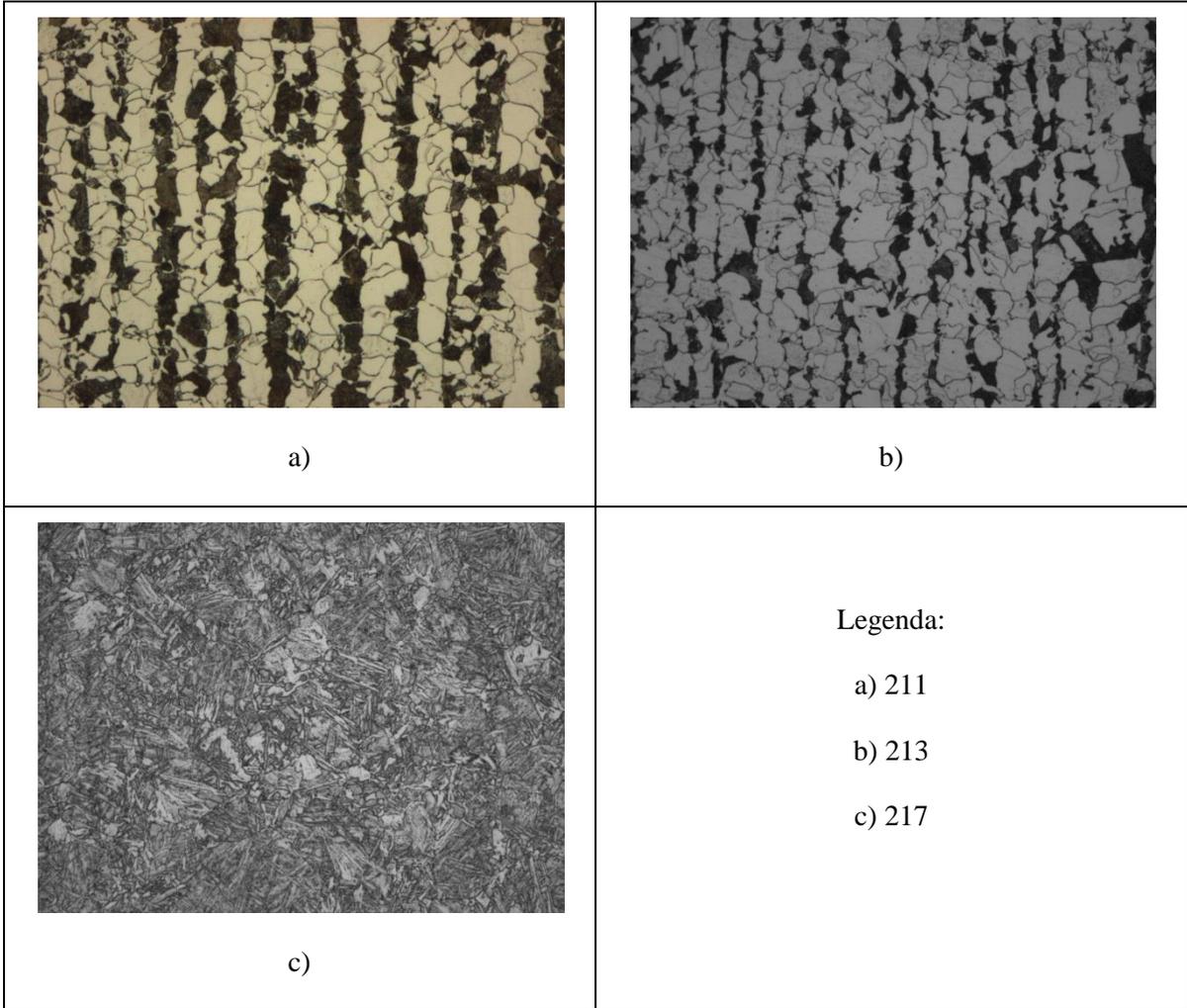


Figura 45 - Micrografias obtidas através de microscópio óptico (500 X)

4.2.3 Ensaio de tracção (EN ISO 6892)

Os ensaios foram realizados a temperatura de 20°C e de acordo com a norma EN ISO 6892. A Tabela 5 resume as propriedades médias obtidas através dos ensaios de tração.

Tabela 5 - Resultados dos ensaios de tracção.

Amostra	Tensão de rotura [MPa]	Tensão de cedência a 0,2% [MPa]	Módulo de Young [GPa]
211	590,2	377,8	193,4
213	543,7	374,3	161,5
217	695,3	585,4	192

À temperatura ambiente as amostras evidenciaram um patamar de cedência, o que comprova a natureza dúctil do material. Como era de esperar a amostra com as propriedades mecânicas mais elevadas foi a 217, uma vez que é aquela que apresenta uma microestrutura martensítica. As amostras 211 e 21, têm idêntico teor em carbono e microestrutura também idêntica, o que fazia prever que as suas propriedades mecânicas também seriam.

4.3 Selecção da curva “R”

A Curva “R” define a resistência à fractura de um material em duas situações:

1. Materiais metálicos de comportamento maioritariamente frágil, em que o estado de tensão na ponta da fenda se aproxima mais da tensão plana, podendo a curva ser expressa através do conceito de factor de intensidade de tensões, “K”, da MFLE. Contudo, também podem ser aplicados os conceitos da MFEP.
2. Materiais metálicos de comportamento maioritariamente dúctil, geram uma grande zona plástica na ponta da fenda, impossibilitando assim o uso da MFLE. Neste caso apenas se poderá recorrer aos conceitos da MFEP.

Para se poder definir qual o procedimento utilizar (ASTM E 561, ou ASTM E 1820) para obter a curva “R” do material, é necessário saber se o material originará uma zona plástica admissível segundo MFLE.

A maiorias das verificações baseia-se na comparação do tamanho da zona plástica com as dimensões do provete. No entanto, para se obter uma estimativa do tamanho da zona plástica através da equação do raio plástico de Irwin, é necessário obter o valor do factor de intensidade de tensões, o que implicaria realizar um ensaio. Em alternativa ao ensaio, e consequente destruição de um dos provetes, foi utilizada uma relação que não empregava o factor de intensidade de tensões.

Na literatura especializada, [9], é proposto como limite de utilização dos conceitos da MFLE, o quociente entre o módulo de Young e a tensão de cedência ($\frac{E}{\sigma_{Ys}}$) de 200 (à temperatura ambiente). Com os dados obtidos através dos ensaios de tração podemos calcular este quociente e compara-lo com o valor limite.

$$\frac{E}{\sigma_{Ys}} < 200 \leftrightarrow \frac{193428 \text{ (MPa)}}{377,834 \text{ (Mpa)}} = 511,933 > 200 \quad (25)$$

Utilizando a equação (25), verifica-se que o valor obtido ultrapassa em mais de duas vezes o limite estabelecido para a MFLE. Este resultado indica que a abordagem a seguir deve ser através dos parâmetros da MFEP, ou seja, a utilização da ASTM E 1820 para a obtenção da curva “Jr”. A decisão pode ser ainda apoiada pelos resultados do ensaio de impacto, que indicam que a temperatura ambiente (20°C) o material têm um comportamento dúctil. É necessário ter em atenção que para uma temperatura inferior o

material irá começar a apresentar diferentes de valores de ductilidade, o que vai provocar uma alteração dos valores das propriedades obtidas através do ensaio de tracção, e consequentemente o valor do quociente $\frac{E}{\sigma_{Ys}}$.

4.4 Equipamentos de ensaio

4.4.1 Máquinas de ensaio e fadiga

Para efectuar os testes de acordo com as especificações da ASTM E 1820, foram utilizadas duas máquinas de ensaio universais. Uma para efectuar a pré fissuração e fadiga pós ensaio, outra para realizar o ensaio de resistência à fractura.

Os procedimentos de fadiga foram efectuados numa máquina óleo hidráulica Instron 8502, com capacidade de carga até 250 kN, com controlo por consola ou computador. Na Figura 46 está representada esta máquina e a respectiva consola.



Figura 46 - Instron 8502 e respectiva consola

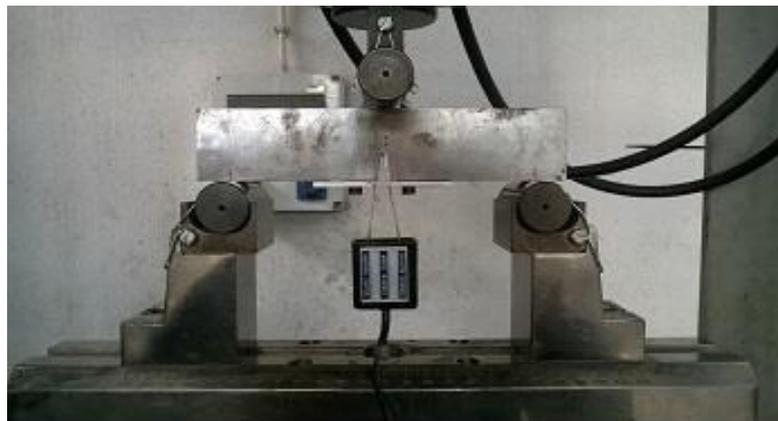
Os ensaios de resistência à fractura foram efectuados numa máquina óleo hidráulica Instron 8504 com capacidade de carga até 500 kN, com controlo por computador.



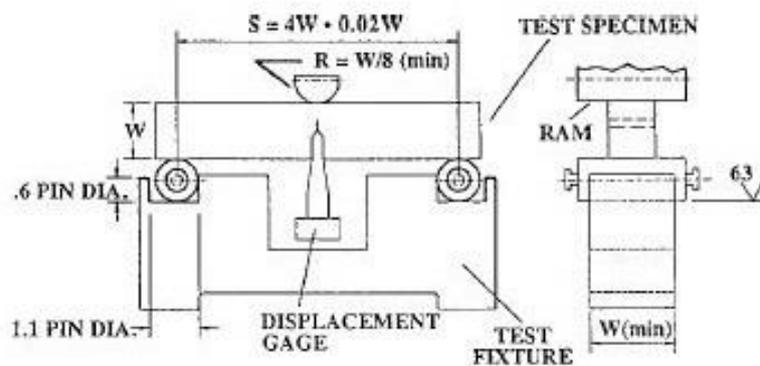
Figura 47 - Instron 8204 com o comando e computador de controlo

4.4.2 Dispositivos

Para se poder efectuar os procedimentos nas máquinas referidas anteriormente, foi necessário colocar dispositivos para adaptar o movimento da máquina de tração/compressão para flexão. A adaptação é efectuada através de um punção de raio variável e com o dispositivo de flexão, ambos representados na Figura 48.



a)



b)

Figura 48 – a)- Dispositivo de flexão b)- Requisitos dimensionais do dispositivo

A dimensão do rolos de contacto (punção e dispositivo) e a abertura do dispositivo devem de estar de acordo com as condições da ASTM E1820:

$$R_{\text{Punção}} > \frac{W}{8} \quad (26)$$

$$\frac{W}{2} < D_{\text{Rolo}} < W \quad (27)$$

$$l_{\text{Rolo}} > W \quad (28)$$

$$S = 4 \cdot W \pm 0,02 \cdot W \quad (29)$$

De modo a cumprir estes requisitos, os rolos e o Vão do dispositivo foram seleccionados segundo a Tabela 6.

Tabela 6 - Dimensões dos rolos do dispositivo de flexão

B [mm]	W [mm]	Diâmetro do punção [mm]	Diâmetro dos rolos [mm]	Comprimento dos rolos [mm]	Vão (S) [mm]
18,5	37	24,87	24,81	57,84	148

4.4.3 Extensómetro

Uma vez que o ensaio requer a medição da abertura da boca da fenda (*CMOD*) é necessário a utilização de um extensómetro de palhetas (*clip gage*), como aquele que está representado na Figura 49. As características do extensómetro utilizado estão discriminadas na Tabela 7.



Figura 49 - Extensómetro de palhetas Instron 10/4

Tabela 7 - Características do Extensómetro

<i>Gage Lenght</i> [mm]	<i>Travel</i> [mm]
10	4

No ponto 6.2 a 6.2.4, da ASTM E1820, estão descritas algumas informações sobre este tipo de extensómetro. O ponto 6.2.2 especifica que o erro do extensómetro deve ter uma precisão de $\pm 1\%$ e que os pontos recolhidos pelo mesmo, durante a calibração, não devem ter um desvio da recta ou curva de regressão, retirada a partir dos mesmos, em mais de 0,2%.

Para verificar se o extensómetro cumpria os requisitos exigidos, o mesmo foi calibrado manualmente com o auxílio do calibrador. Foi então confirmado que o extensómetro cumpria os requisitos anteriormente referidos. Os dados referentes a esta calibração e verificação encontram – se no anexo B.

4.5 Verificação dimensional dos provetes

4.5.1 Requisitos dimensionais do provete e entalhe da ASTM E1820

Para que o ensaio efectuado pelo procedimento normalizado da ASTM E1820 seja válido, é necessário que os provetes cumpram determinados critérios dimensionais. Esses requisitos dimensionais são específicos de cada um dos tipos de provetes, SENB, C(T) DC(T), que estão descritos nos anexos A1, A2 e A3 da norma. No que diz respeito aos provetes do tipo SENB os requisitos dimensionais estão resumidos na Figura 50. [40]

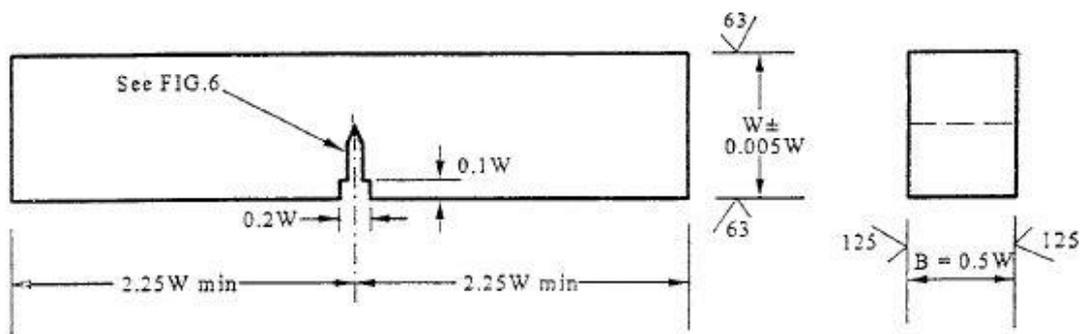


Figura 50 - Requisitos dimensionais do provete SENB [40]

A relação de W/B , de qualquer tipo de provete, é dois. No entanto, a norma aceita qualquer outra relação desde que esteja compreendida entre 1 e 4.

No que diz respeito à geometria e as dimensões do entalhe, são permitidos 4 tipos de entalhe: Entalhe em V, entalhe estreito, entalhe com terminação num furo e o entalhe em Chevron. Na Figura em baixo estão representados esquematicamente os entalhes admitidos.

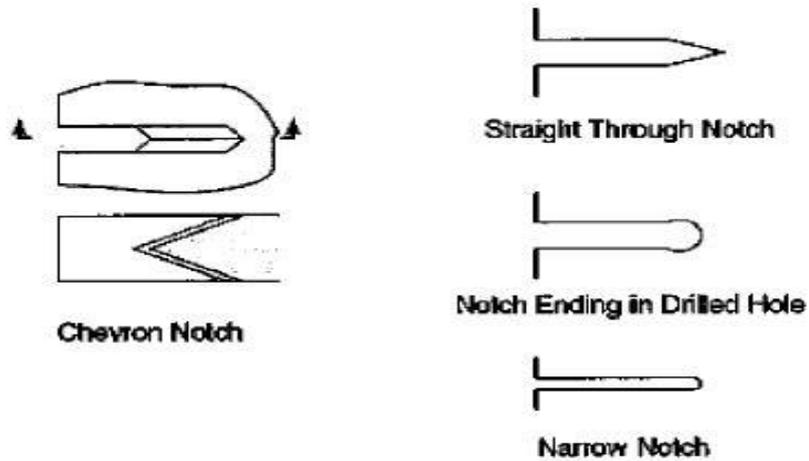


Figura 51 - Tipos de entalhe [40]

As condições geométricas consideradas válidas para o entalhe em “V” e estreito e estão resumidas na Figura 52.

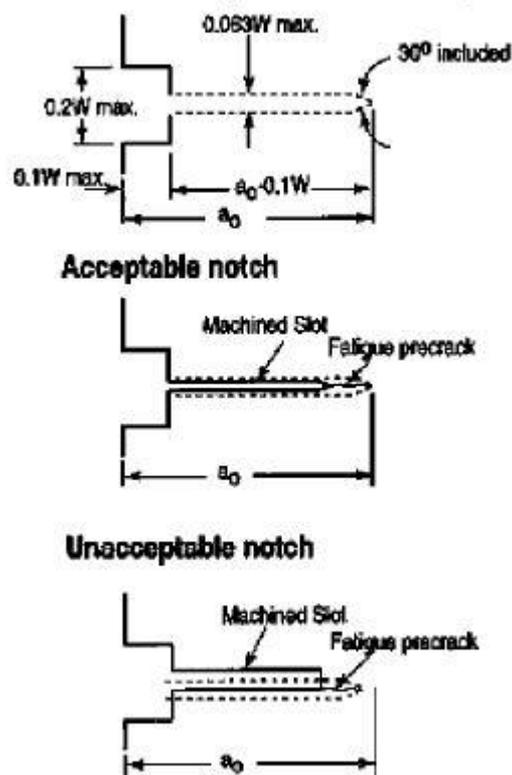


Figura 52 - Requisitos dimensionais dos entalhes em “V” e estreito [40]

Além das condições contidas na imagem em cima, a fenda de fadiga tem de ter no mínimo um comprimento $0,05B$ para o entalhe em V e $0,025B$ para o entalhe estreito.

4.5.2 Verificação dos requisitos dimensionais

Com base nos requisitos expostos anteriormente foi elaborada a verificação dimensional dos provetes seleccionados. Nas Tabela 8 e Tabela 9 mostra-se a verificação dimensional das medidas básicas dos provetes, de acordo com as equações (30), (31) e (32).

$$B_{min} > 0,5 \cdot (W - 0,005W) \quad (30)$$

$$B_{max} < 0,5 \cdot (W + 0,005W) \quad (31)$$

$$L > 4,5 \cdot W \quad (32)$$

Tabela 8 - Verificação dimensional dos provetes – amostra 213

Referência	L [mm]	W [mm]	B [mm]	Bmin [mm]	Bmax [mm]	Lmin [mm]
1	180,24	37,07	18,45	Válido	Válido	Válido
2	180,1	36,87	18,35	Válido	Válido	Válido
3	180	37,34	18,58	Válido	Válido	Válido
4	180	37,08	18,47	Válido	Válido	Válido
5	179,4	37,06	18,5	Válido	Válido	Válido
6	180,23	36,98	18,44	Válido	Válido	Válido
7	179,71	37,03	18,49	Válido	Válido	Válido

Tabela 9 - Verificação dimensional dos provetes - Amostra 217

Referência	L [mm]	W [mm]	B [mm]	Bmin [mm]	Bmax [mm]	Lmin [mm]
1	196,31	37,17	18,5	Válido	Válido	Válido
2	193,84	37,07	18,57	Válido	Válido	Válido
3	193,71	37,07	18,6	Válido	Válido	Válido
4	196,08	37,03	18,6	Válido	Válido	Válido
5	195,09	37,06	18,62	Válido	Válido	Válido
6	194,42	37,04	18,61	Válido	Válido	Válido
7	193,7	37,09	18,63	Válido	Válido	Válido
8	193,31	37,12	18,61	Válido	Válido	Válido
9	193,25	37,03	18,5	Válido	Válido	Válido

Os provetes das amostras 213 e 217 têm entalhe em escada. Este último tipo de entalhe não está previsto na ASTM E 1820. No entanto, este tipo de entalhe já foi utilizado em normas anteriores da ASTM e possivelmente poderá ser admitido em normas equivalentes, provenientes de outras instituições de normalização. Um exemplo disso é o procedimento ESIS P2-92 da *European Structural Integrity Society* que permite a utilização deste tipo de entalhe em alternativa ao entalhe em V [43]. Nas Figuras Figura 53 e Figura 54 estão representados os dois tipos de entalhe existentes.



Figura 53 - Entalhe em V

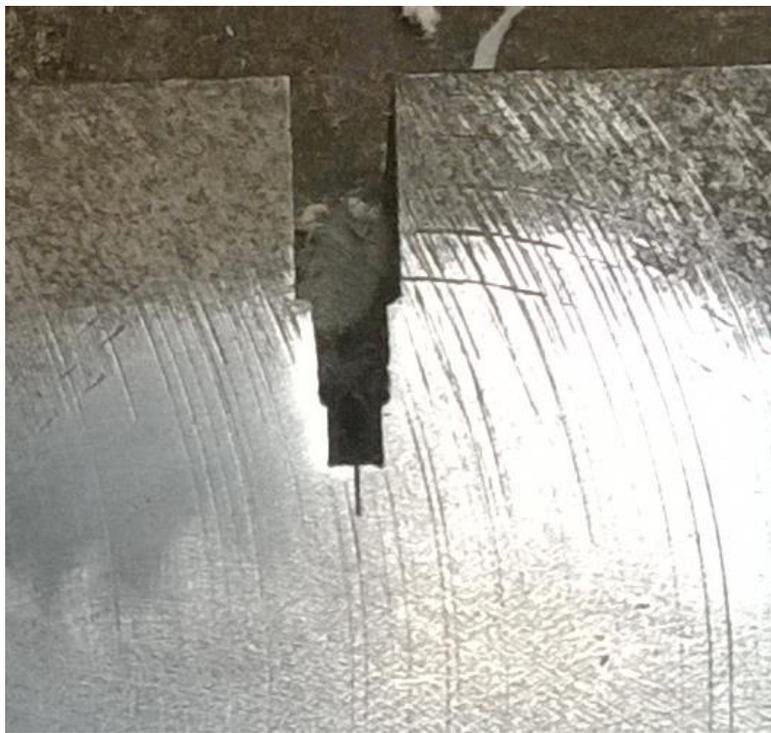


Figura 54 - Entalhe em escada

Com base nos requisitos da norma, que dizem respeito ao entalhes, foi elaborada as tabelas Tabela 10 e Tabela 11, para verificar as dimensões dos entalhes. Os provetes com entalhe em escada foram verificados segundo os requisitos do entalhe estreito.

Tabela 10 - Verificação dos entalhes em escada - Amostra 213

Ref	ae [mm]	Le[mm]	Largura máxima	Verificação largura
1	15,66	0,23	0,37	Ok
2	16,11	0,23	0,36	Ok
3	16,32	0,24	0,37	Ok
4	16,16	0,26	0,37	Ok
5	15,80	0,28	0,37	Ok
6	15,98	0,25	0,36	Ok
7	16,063	0,29	0,37	Ok

Tabela 11 - Verificação dos entalhes estreitos - Amostra 217

Ref	ae [mm]	Le[mm]	Largura máxima [mm]	Verificação largura
1	15,99	0,20	0,37	OK
2	15,97	0,21	0,37	OK
3	15,96	0,23	0,37	OK
4	16,10	0,24	0,37	OK
5	15,65	0,29	0,37	OK
6	15,86	0,21	0,37	OK
7	15,89	0,16	0,37	OK
8	15,94	0,21	0,37	OK
9	16,02	0,20	0,37	OK

4.6 Pré-fissuração dos provetes

A fenda de fadiga no fim do entalhe é utilizada para recriar as fendas existentes nos componentes mecânicos. Em todos os ensaios normalizados de tenacidade à fractura (ASTM E 1820, BS 7448 e ISO 12315), está especificado os requisitos necessários à realização da pré-fissuração. Parte-se do princípio que quando cumpridos os requisitos, a pré-fissuração não influenciará os resultados dos ensaios de fractura.

Recentemente foi realizado um estudo, por Nowak-Coventry et al, sobre a influência das forças utilizadas na realização da pré-fissura, dos diferentes procedimentos normalizados, nos resultados experimentais. Neste estudo foi concluído que quando é ultrapassada o limite máximo de força na pré-fissuração, existente num qualquer procedimento normalizado, existe o risco de ocorrer um aumento do valor de tenacidade à fractura, o que pode ser preocupante em regimes de transição ou quando se tenta obter valores que dizem respeito ao limite inferior de resistência à fractura. No que diz respeito à ASTM E1820, alerta para o facto, que o procedimento poder induzir à utilização de uma força de pré-fissuração incorrecta [44]. Posteriormente neste capítulo será devidamente sinalizada a fonte geradora deste possível erro.

4.6.1 Requisitos da ASTM E 1820

Como foi referido anteriormente, a fenda de fadiga é utilizada para simular uma fenda real no provete. A pré-fissura é efectuada carregando ciclicamente o provete durante um determinado número de ciclos (entre 10^4 e 10^6 dependendo da carga aplicada e do tamanho do provete).

O tamanho da fenda de fadiga é variável, tendo apenas de se garantir dois requisitos:

1. O comprimento do entalhe juntamente com a fenda de fadiga tem de estar dentro da gama de $0,45W$ e $0,7W$.
2. A fenda de fadiga tem de estar dentro do envelope de fenda e cumprir o tamanho mínimo de fenda, requerido para cada tipo de entalhe ($0,05B$ ou $1,3\text{mm}$ se for entalhe em V e $0,025B$ ou $0,06\text{mm}$ para o entalhe estreito).

O equipamento que realiza a pré-fissuração deve garantir uma distribuição de tensões uniforme ao longo da espessura do provete para proporcionar um crescimento uniforme da fenda ao longo da espessura.

A pré-fissuração deve ser executada em dois passos, o primeiro terá de ser responsável de no máximo de 50% do comprimento de fenda final desejado. O segundo terá de ser responsável no mínimo de 50% do tamanho da fenda de fadiga. Cada um dos passos pode ser subdividido em passos mais pequenos com força decrescente entre cada um deles até se chegar ao valor pretendido. Deste modo é possível controlar o processo com mais exactidão.

Para o primeiro passo, a força máxima é limitada pelo factor de intensidade de tensões máximo que é dado pela equação (33).

$$K_{max} = \left(\frac{\sigma_{YS}^f}{\sigma_{YS}^T} \right) \cdot (0,063 \cdot \sigma_{YS}^f) \quad (33)$$

σ_{YS}^f é a tensão de cedência obtida à temperatura a que será realizada a pré-fissuração e σ_{YS}^T é a tensão de cedência à temperatura de teste. A força máxima a poder ser aplicada no primeiro passo da pré fenda pode ser retirada através da equação (34).

$$P = \frac{K_I \cdot (B \cdot B_N)^{\frac{1}{2}} \cdot W^{\frac{3}{2}}}{f \cdot S} \quad (34)$$

O procedimento de pré-fissuração da ASTM E 1820, alerta para o facto que para algumas ligas de alumínio e aços de alta resistência, a equação (33) gera valores muito elevados de “K” e conseqüentemente de força de pré-fissuração. Nesses casos deve ser utilizado o valor de “K”, obtido através da expressão (33), multiplicado por 0,7 e utilizar a valor de força máxima que gera esse respectivo valor de “K”.

Para o segundo passo da pré-fissuração o valor da máximo do factor de intensidade de tensões é dado por:

$$K_{max} = 0,6 \cdot \left(\frac{\sigma_{YS}^f}{\sigma_{YS}^T} \right) \cdot K_F \quad (35)$$

Onde K_F é o valor de factor de intensidade de tensões que resulta do valor de um dos valores de J que é retirado do teste (J_{Qc}, J_{Qu}, J_Q), que é transformado em factor de intensidade de tensões através da equação (36):

$$K_F = \sqrt{\frac{E \cdot J}{(1 - \nu^2)}} \quad (36)$$

Para encontrar a força máxima para o segundo passo, podemos recorrer à equação (34), substituindo “K” pelo valor obtido na equação (35).

No entanto na ASTM E 1820 também faz referência a uma força P_m , que não deve ser excedida em qualquer um dos passos de pré-fissuração. A força P_m depende do tipo de provete e das suas dimensões (assim como da tensão σ_Y). Para cada tipo de provete a norma propõe uma expressão correspondente para a força P_m , que é possível encontrar no respectivo anexo. Em relação ao provete de flexão de 3 pontos a expressão da força P_m é dada pela equação (37).

$$P_m = \frac{0,5 \cdot B \cdot b_0^2 \cdot \sigma_Y}{S} \quad (37)$$

Em que b_0 é o tamanho do ligamento no início do teste e σ_Y é a média aritmética da tensão de cedência a 0,2% e a tensão de rotura.

A força P_m representa o ponto a partir do qual o provete transita de um comportamento linear elástico para um comportamento elasto plástico. O que significa que ultrapassar este valor de força durante o procedimento de pré fissuração provoca, uma deformação permanente na amostra.

A multiplicidade de equações fornecida pela ASTM E 1820 pode levar à utilização de uma força máxima de pré-fissuração incorrecta, pois em determinadas condições a força P_m vai ser superior à força obtida através das equações dos factores de intensidade de tensões máximos do primeiro passo [44].

Uma vez que é necessário estabelecer um limite de força, para o primeiro passo do procedimento de pré-fissuração, o valor máximo de força utilizado será o menor que for obtido pelas equações anteriormente mencionadas.

Outro problema poderá ocorrer na obtenção do limite máximo de força para o segundo passo da execução da fenda de fadiga. A equação (35) está dependente do valor obtido no final do teste, o que à partida é uma impossibilidade. O procedimento sugere a utilização de um valor obtido em ensaios anteriores do mesmo material, no entanto, nada refere para o caso de não existir histórico.

Uma possível solução, nestes casos, é utilizar a força P_m como valor máximo para o segundo passo de pré-fissuração e utilizar a equação (35), como critério de validação final.

A fenda de fadiga é normalmente efectuada através de uma onda sinusoidal efectuada perto da maior frequência possível e com um rácio de $\frac{F_{min}}{F_{max}}$ de 0,1.

Além dos requisitos referidos anteriormente, existem alguns detalhes normativos que não podem ser desprezados. E são eles:

- Após a realização da pré fenda de fadiga, não pode ser efectuada qualquer tipo de tratamento térmico. (Estes devem ser realizados antes da pré-fissuração.)
- Os dispositivos utilizados na pré-fissuração devem ter sido construídos com tolerâncias iguais ou inferiores as dos dispositivos de teste.
- Se durante a elaboração da fenda de fadiga existir assimetria do tamanho de fenda, ou seja, a existência de uma fenda de maior dimensão de um dos lados do provete. O procedimento deve ser parado e a causa da assimetria identificada e corrigida. (Normalmente pode se corrigir a assimetria virando o provete no dispositivo.)
- Caso não seja possível efectuar a fenda de fadiga no provete devido ao material ser demasiado frágil, a ASTM E 1820 não deve ser aplicada.

Elaboração de pré fendas de fadiga

Os equipamentos existentes para a elaboração da pré-fissuração dos provetes são as máquinas óleo Hidráulicas utilizadas e o Vibrophore.

Independentemente do equipamento, é sempre necessário efectuar primeiro algum planeamento, para que o processo seja o mais eficiente e controlado possível. Para cada provete foi designado um valor de $\frac{a}{W}$ dentro dos limites normativos. Nas Tabela 12 e Tabela 13, em baixo, encontra-se o planeamento efectuado para cada grupo de provetes.

Tabela 12 - Planeamento da amostra 213

Referência	B	a/w	Método
1	18,45	0,6	Normalização
2	18,35	0,65	Curva de Resistência
3	18,58	0,65	Curva de Resistência
4	18,47	0,55	Curva de Resistência
5	18,5	0,55	Curva de Resistência
6	18,44	0,55	Normalização
7	18,49	0,6	Curva de Resistência

Tabela 13 - Planeamento da amostra 217

Referência	B	a/w	Método
1	18,5	0,6	Curva de Resistência
2	18,57	0,5	Curva de Resistência
3	18,6	0,5	Curva de Resistência
4	18,6	0,65	Curva de Resistência
5	18,62	0,65	Curva de Resistência
6	18,61	0,56	Normalização
7	18,63	0,56	Normalização
8	18,61	0,61	Curva de Resistência
9	18,5	-	-

Uma vez seleccionada a relação $\frac{a}{w}$ e definida o tamanho da fenda de fadiga efectua-se o planeamento do processo de pré fissuração de cada provete.

O planeamento da pré fissuração é a selecção das condições a que o provete estará sujeito durante o processo, mais concretamente as forças dinâmicas aplicadas. O procedimento da ASTM E 1820 impõe limites quantificados relativamente ao factor de intensidade de tensões (e o limite adicional da força P_m). No entanto, muitos equipamentos não têm capacidade para efectuar o controlo neste parâmetro (requer software apropriado e a utilização de um extensómetro).

A utilização do parâmetro de força será a escolha mais lógica para efectuar o controlo, no entanto, este tem alguns inconvenientes nomeadamente:

- O factor de intensidade de tensões está dependente da intensidade da força aplicada e do tamanho de fenda. A variação do último durante o processo implica um aumento do factor de intensidade de tensões mesmo que a intensidade de força se mantenha (o mesmo acontece com a força P_m uma vez que esta depende de b_0).
- Além da força, é também necessário controlar o tamanho da fissura de fadiga, o que muitas vezes pode ser complicado especialmente se for efectuado de modo visual.

Estes inconvenientes realçam a importância do planeamento. Assim sendo, é necessário efectuar o cálculo dos limites máximos de cada passo do processo definidos pelas equações (33), (35), (37).

Cálculo do K_{max} do 1º passo

Uma vez que os provetes são todos do mesmo material metálico e que a temperatura de ensaio será idêntica à de pré fissuração, o valor de K máximo para o primeiro passo será igual para todos os provetes.

$$\begin{aligned}
 K_{max\ 1^\circ\ Passo} &= \left(\frac{\sigma_{YS}^f}{\sigma_{YS}^T} \right) \cdot (0,063 \cdot \sigma_{YS}^f) \\
 &= \left(\frac{484,015}{484,015} \right) \cdot (0,063 \cdot 484,015) \quad (38) \\
 &= 23,803 [MPa\sqrt{m}]
 \end{aligned}$$

Cálculo do K_{max} do 2º passo e P_m

Como foi referido anteriormente, o factor de intensidade de tensões máximo admissível, para o segundo passo, está dependente do resultado final do ensaio ou de um valor de histórico. Uma vez que não existe este último, o valor de referência para o segundo passo será a força P_m para o tamanho final de fenda seleccionado para cada provete.

Como já foi mencionado o valor de P_m é dependente do tamanho de fenda final de cada provete, o que significa que este será diferente para cada um dos provetes, e será calculado através da equação (37).

Para melhor planejar o processo foi elaborada uma folha de cálculo onde se contabiliza o parâmetro “K” e P_m em função das dimensões do provete e da carga aplicada.

Nessa folha de cálculo a força P_m é calculada através da equação (37). E o factor de intensidade de tensões é calculado através da expressão, no anexo A1 da ASTM E 1820, representada na equação (39).

$$K = \frac{F \cdot S}{(B \cdot B_n)^{\frac{1}{2}} \cdot W^{\frac{3}{2}}} \cdot f\left(\frac{a}{W}\right) \quad (39)$$

Em que $f\left(\frac{a}{W}\right)$ é o factor de forma é obtido através da equação (40):

$$f\left(\frac{a}{W}\right) = \frac{3 \cdot \left(\frac{a}{W}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot \left[1,99 - \left(\frac{a}{W}\right) \cdot \left(1 - \frac{a}{W}\right) \cdot \left(2,15 - 3,393 \cdot \left(\frac{a}{W}\right) + 2,7 \cdot \left(\frac{a}{W}\right)^2\right)\right]}{2 \cdot \left(1 + 2 \cdot \frac{a}{W}\right) \cdot \left(1 - \frac{a}{W}\right)^{\frac{3}{2}}} \quad (40)$$

O planeamento é efectuado tendo em conta que a em cada passo de fissuração a força máxima atingida pela onda sinusoidal se manterá constante, variando apenas o comprimento de fenda com o decorrer do tempo.

Uma vez seleccionadas as forças máximas de cada passo do processo, é necessário definir algumas forças respeitantes à caracterização da onda de fadiga. Estas forças estão representadas na Figura 55.

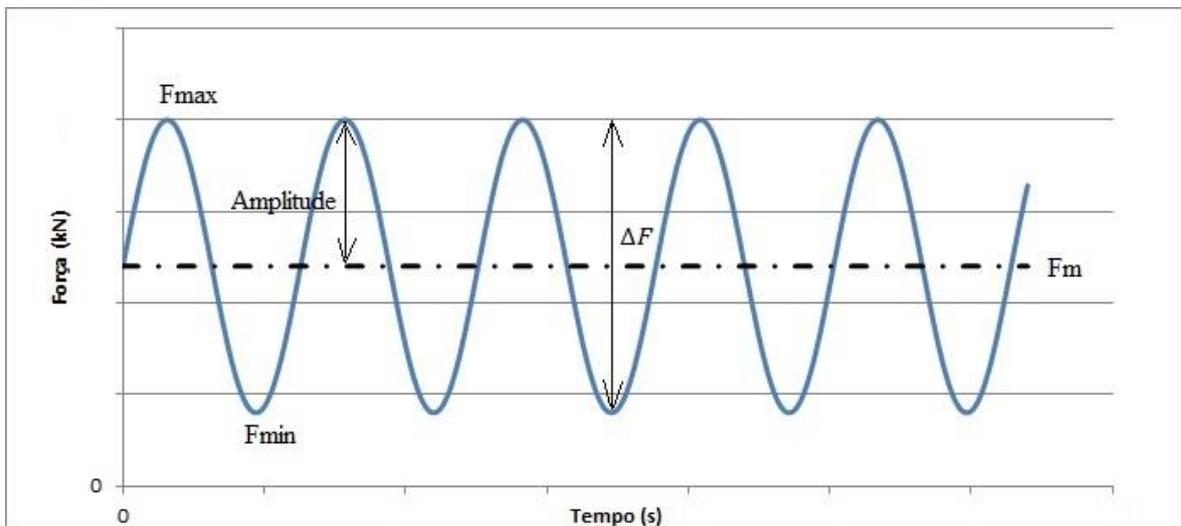


Figura 55- Forças no ciclo de fadiga

Em que F_M é a força média. F_{min} a força mínima, ΔF a variação entre a força máxima e mínima.

Uma vez que a o procedimento recomenda uma relação $\frac{F_{min}}{F_{max}}$ de 0,1; as forças acima referidas são calculadas na folha de cálculo recorrendo as equações (41), (42), (43) e (44).

$$F_{min} = 0,1 \cdot F_{max} \quad (41)$$

$$F_M = \frac{F_{max} + F_{min}}{2} \quad (42)$$

$$\Delta F = F_{max} - F_{min} \quad (43)$$

$$Amplitude = \frac{\Delta F}{2} \quad (44)$$

Estes valores são calculados para facilitar a programação correcta do ciclo de fadiga que a máquina irá efectuar.

Além do planeamento das forças a utilizar no processo, é necessário também controlar o crescimento da fenda de fadiga. Existem dois métodos passíveis de serem realizados:

1. Método visual: Observação da fenda na face dos provetes e medição periódica da mesma até atingir o objectivo definido.
2. Utilização de programas de fadiga que recorrem a medição da fenda através do método da *elastic compliance* ou um equivalente.

O primeiro método é o mais simples e não requer nenhum tipo de dispositivo, equipamento ou *software* para ser realizado, no entanto, têm a desvantagem de ter de se recorrer a paragens periódicas para a medição da fenda. Outra desvantagem deste método é que as superfícies do provete necessitam de estar descontaminadas, e de preferência polidas na zona do entalhe, para ser possível efectuar este tipo de controlo.

O segundo método necessita de *software* com a capacidade de efectuar a medição do tamanho de fenda, muitas vezes sendo necessário a utilização de extensómetros de palhetas. Esta abordagem tem a vantagem de o processo poder ser totalmente controlado pelo *software*, eliminando a necessidade de paragem do processo. Além de não ser necessário existir grandes cuidados com a condição superficial do provete. A desvantagem

é que está dependente de *software* especializado, que muitas vezes necessita de transdutores externos para poder ser utilizado.

4.6.2 Controlo do processo de pré fissuração

Após o planeamento é necessário iniciar e controlar o processo de pré fissuração para garantir não são ultrapassados os limites máximos estabelecidos.

No caso de ser utilizado *software* para o processo de pré-fissuração será apenas necessário nutrir o programa com os dados geométricos do provete, as forças a serem utilizadas, e o tamanho de fenda pretendido. Depois será preciso iniciar o processo que será controlado de forma automática.

Se for utilizado o método visual é necessário registar o comprimento de fenda com o decorrer do processo e verificar se as condições aplicadas não excedem os limites. Para este fim foi realizada uma tabela de Excel semelhante à realizada para o planeamento, mas com o intuito de registar o progresso da fenda, ao longo de cada um dos passos do processo, e controlar o valor de “K” e P_m . As tabelas de controlo de prefissuração de cada um dos provetes encontra-se no anexo C.

4.7 Ensaio – Procedimento da curva de resistência

O método da *Compliance* elástica é utilizado pelo procedimento de curva de resistência, para se adquirir múltiplos pontos através de um único provete. Com os dados recolhidos poder ser desenvolvida a curva de resistência à fractura (curva R). Outros métodos podem ser utilizados para medir o a propagação da fenda, como por exemplo, a medição da queda de potencial (*Potencial Drop Method*) [40].

Requisitos

O ensaio deve ser realizado em controlo de deslocamento, da máquina, ou em função da deformação do extensómetro, e deve ser carregado de modo que o tempo para chegar a força P_m se encontre no intervalo entre 0,3 e 3 minutos, e o tempo para qualquer sequência de carregamento e descarregamento não pode ultrapassar os 10 minutos.

Cada provete deve ser submetido aos seguintes passos:

1. Iniciar o ensaio e efectuar no mínimo 3 sequências de carregamento e descarregamento, compreendida entre a força máxima de pré fissuração e metade da mesma, a fim de se obter o tamanho de fenda inicial a_{0q}
2. Prosseguir com o teste e realizar 1 sequência de carregamento/descarregamento no intervalo máximo de $0,01b_0$ (ou $0,01W$ no caso de se pretender obter a a curva de resistência em função δ). É aconselhado que a distância média entre sequências seja $0,005b_0$. (ou $0,005W$). É necessário existirem no mínimo 8 pontos (sequências) antes de se atingir a força máxima.
3. Antes de se iniciar o descarregamento pode existir uma pequena pausa a força constante para evitar a ocorrência de o descarregamento, não ser efectuado de forma linear.
4. As sequências de carregamento devem possuir uma amplitude máxima de $0,5 P_m$
5. Após a conclusão da última sequência de descarregamento, a força é levada até zero sem movimento adicional ao do deslocamento máximo, verificado no teste.

4.8 Método desenvolvido

Com o intuito de criar de um ensaio que satisfizesse os requisitos acima referidos, foi criado no *software* da *Instron, WaveMatrix*, um método modelo. Na Figura 56, está representado o método desenvolvido no *software*.

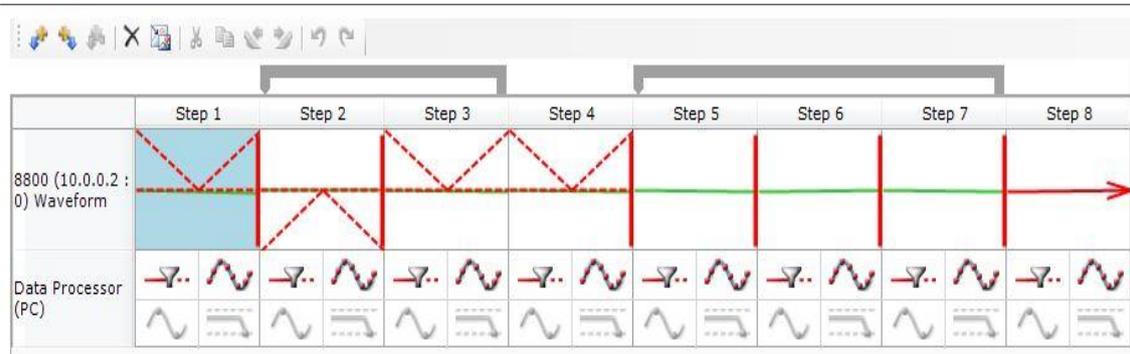
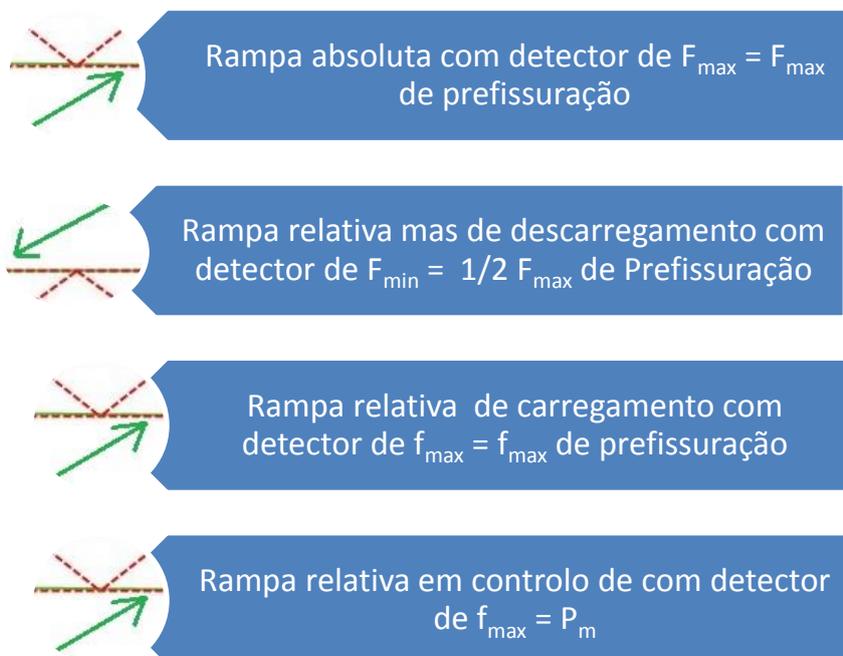


Figura 56 - Método desenvolvido no WaveMatrix

O ensaio desenvolvido pode ser dividido em duas partes distintas, a rampa inicial (os 4 primeiros passos) e a zona de carregamentos e descarregamentos, que em comum têm a velocidade e o controlo de deslocamento. A velocidade é definida em função da espessura do provete na Tabela 14. A primeira parte foi desenvolvida para satisfazer o primeiro passo do procedimento. No esquema, em baixo, está descrito em detalhe os quatro primeiros passos do ensaio desenvolvido.



Para cumprir o requisito dos três carregamentos para o cálculo do a_0 existe um “loop” que força a repetição do segundo e do terceiro passo, antes de se proceder ao quarto e último passo.

A segunda parte é referente ao carregamento do provete e à execução dos descarregamentos para a obtenção do comprimento de fenda instantâneo. Esta parte é composta por um loop com três passos. No esquema seguinte estão detalhados os três passos que compõem cada um dos loops da segunda parte do ensaio.



O loop força a repetição dos 3 passos até um máximo de 60 repetições, sendo que este número de repetições muito dificilmente será atingido.

O ensaio desenvolvido não pode ser considerado genérico, devido aos requisitos do procedimento que estão associados a parâmetros dependentes da geometria do provete e de propriedades do material. (por exemplo a força P_m).

O procedimento indica que o ensaio só deve ser conduzido em controlo de deslocamento. Para cumprir este requisito, o ensaio foi elaborado por inteiro no canal de deslocamento. Isto implica que todas as acções têm de ser programadas, recorrendo apenas, a comandos directos sobre o deslocamento do actuador. No entanto, efectuando o ensaio deste modo é mais difícil os requisitos relacionados com os limites e amplitudes de força.

Na rampa Inicial, o problema é ultrapassado colocando detectores de força que fazem avançar o ensaio para o passo seguinte quando os limites são atingidos. No entanto, estes detectores não podem ser utilizados após a rampa inicial pois estes apenas podem ser utilizados com valores absolutos de força. Isto implica que os descarregamentos durante o

ensaio, apenas seriam inteiramente controlados através de um valor relativo de deslocamento.

Foram realizadas experiências preliminares efectuadas, em provetes de dimensões e de material idêntico àqueles que seriam ensaiados, foi possível definir a velocidade e a amplitude dos descarregamentos, adequadas para realizar os ensaios. Na Tabela 14 estão apresentados os respectivos parâmetros definidos para as séries 213 e 217.

Tabela 14 - Parâmetros de ensaio para as séries 213 e 217

Referência	Velocidade [mm/min]	Amplitude dos descarregamentos [mm]
213 e 217 (B=15mm)	0,3	±0,17

A norma indica o intervalo máximo entre sequências de carregamento/descarregamento, deve ser inferior a $0,01b_0$ (recomendando o valor de $0,005b_0$). Isto significa que o valor de deslocamento a definir, no quinto passo do método, teria de algum modo tentar satisfazer este requisito.

Para se encontrar valores de deslocamento que cumprissem esta imposição da norma, foi estudado, em regime elástico, a relação entre o deslocamento (vertical do punção) e abertura da boca da fenda (CMOD). O estudo foi efectuado para os provetes de 15 milímetros de espessura com diferentes comprimentos de fenda. e encontra-se representado no **Erro! A origem da referência não foi encontrada..**

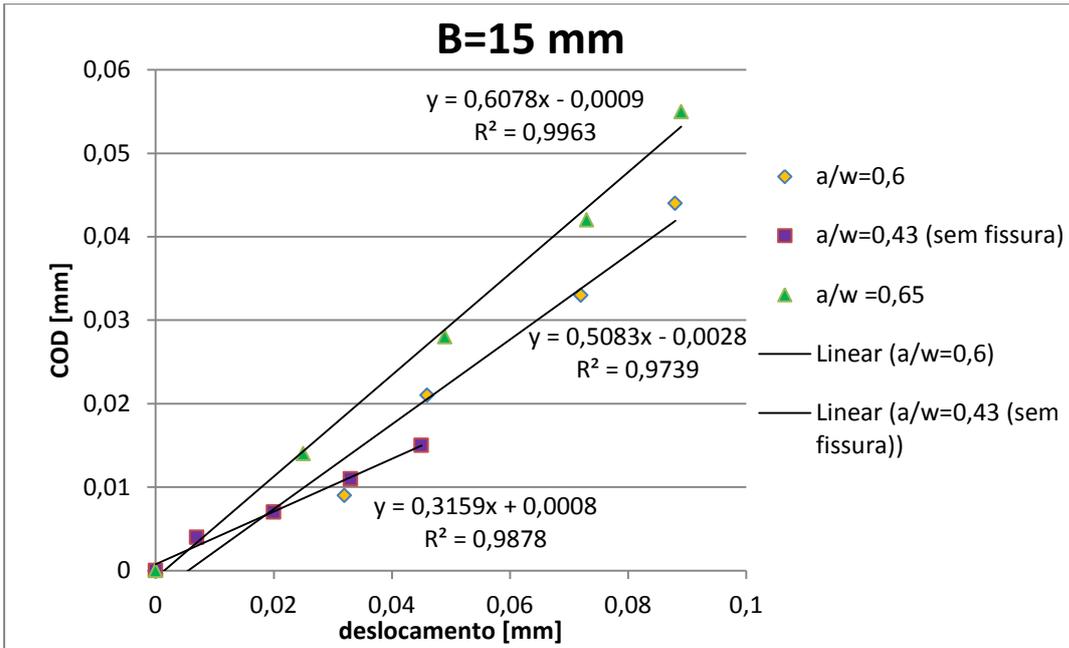


Figura 57- Relação entre o deslocamento vertical e a abertura da boca da fenda (B=1,5mm)

Como era expectável a relação é diferente para diferentes comprimentos de fenda. A fenda irá aumentar com o decorrer do ensaio, e como consequência, a abertura da boca da fenda aumenta para o mesmo deslocamento vertical. Uma vez que a condição mais desfavorável é para maiores comprimentos de fenda relativos, para os provetes de 37 mm de espessura foi tirada apenas a relação de um provete com comprimento de fenda relativo de 0,65. Tendo em conta o que foi referido anteriormente foi tomada a decisão de adoptar as expressões presentes na Tabela 15.

Tabela 15 - Expressões de cálculo do deslocamento no passo 5

B=15 mm	B=37mm
$d_{5^{\circ} \text{Passo}} = \frac{0,05b_0}{0,60}$	$d_{5^{\circ} \text{Passo}} = \frac{0,05b_0}{0,45}$

4.9 Processamento de dados e obtenção da curva de resistência

Durante o ensaio são recolhidos os dados relativos à força, deslocamento do actuador (LLD – *Load Line Displacement*) e abertura da boca da fenda (COD – *Crack Opening Displacement*) através do extensómetro. Os dados do último muitas vezes são adquiridos em valores percentuais, necessitando de ser convertidos para milímetros para poderem ser utilizados. A equação (45) faz a conversão do valor percentual adquirido, para o valor correspondente em milímetros.

$$COD[mm] = \frac{COD[\%]}{100} \cdot GageLength \quad (45)$$

Também os dados de deslocamento do actuador muitas vezes são adquiridos em valor absoluto (segundo o referencial da máquina), sendo assim necessário subtrair o valor inicial aos restantes valores adquiridos.

Após o ajustamento dos dados, pode-se construir o gráfico Força vs deslocamento (COD ou LLD), que terá um aspecto idêntico ao da Figura 58.

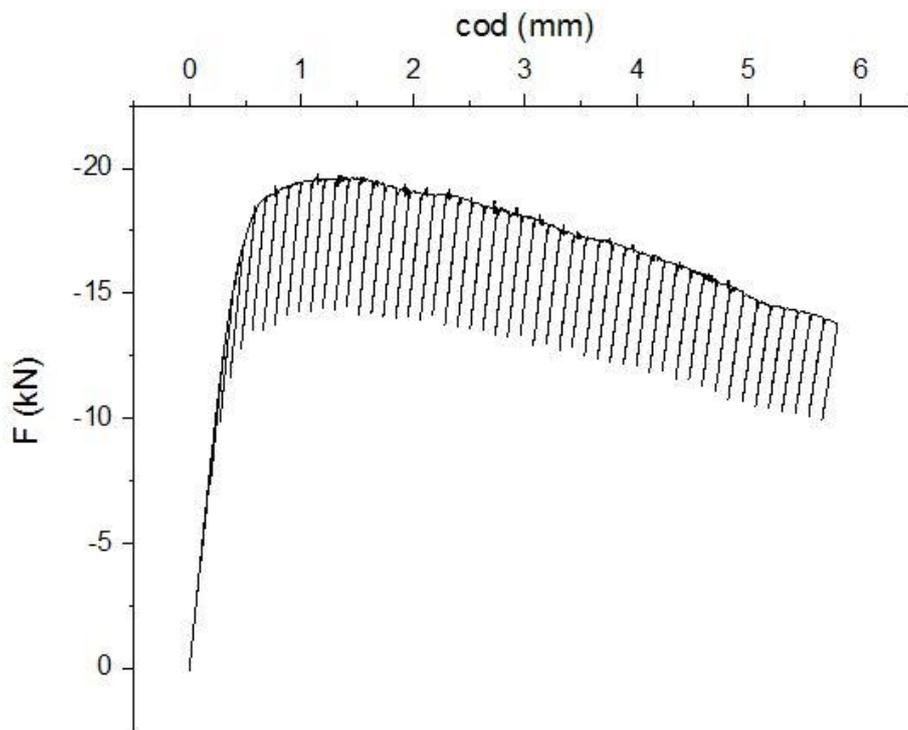


Figura 58 - Diagrama força vs deslocamento do ensaio de um provete SENB utilizando o método de curva de resistência

A curva de resistência será obtida através das equações indicadas no anexo A1 da ASTM E 1820. Para se efectuar se esses cálculos, é necessário retirar três conjuntos de dados do digrama de força vs deslocamento:

1. Deslocamento (COD ou LLD) - V
2. Força - F
3. *Compliance* - C

A *compliance* é o inverso da rigidez retirada de uma recta de descarregamento. Esta será utilizada para inferir o comprimento de fenda de um determinado momento do ensaio. A cada valor desta, está associado um par de valores de força e deslocamento, que correspondem aos valores imediatamente antes do início do descarregamento.

Uma vez obtidos todos os valores de *compliance*, e dos respectivos pares de força deslocamento, é possível aplicar as equações indicadas no anexo A1 da norma, e obter a curva de resistência do material.

4.9.1 Cálculo do comprimento de fenda

A primeira etapa para a obtenção da curva é o cálculo dos comprimentos de fenda. Com o valor de *compliance* de um determinado descarregamento é calculada a variável u , através da equação (46).

$$u = \frac{1}{\left(\frac{B_e \cdot W \cdot E \cdot C_i}{\frac{S}{4}}\right)^{\frac{1}{2}} + 1} \quad (46)$$

Com o valor de u é possível obter a relação a/W através da equação (47).

$$\frac{a}{W} = 0,999748 - 3,9504 \cdot u + 2,9821 \cdot u^2 - 3,21408 \cdot u^3 + 51,51564 \cdot u^4 - 113,031 \cdot u^5 \quad (47)$$

Uma vez calculada a relação a/W basta efectuar a multiplicação da relação, pela largura do provete (W) para se adquirir o valor do comprimento de fenda.

4.9.2 Cálculo do Integral J

O método de curva de resistência tem em conta o crescimento da fenda com o decorrer do ensaio. Para ter em conta este efeito, o integral “J” é calculado de forma iterativa, onde cada conjunto de dados recolhidos (*Compliance*, Força e deslocamento) representa um ponto “i” na curva de resistência. No cálculo de cada valor de “J”, há que calcular as partes elástica (J_{el}) e plástica (J_{pl}), somando as duas no final para se obter o valor total.

O $J_{elástico}$ é calculado através do factor de intensidade de tensões dado pela equação (39). Este será convertido em integral J através da equação (48).

$$J_{el(i)} = \frac{K_{(i)}^2 \cdot (1 - \nu^2)}{E} \quad (48)$$

O cálculo $J_{plástico}$ é baseado nas áreas abaixo do digrama força vs deslocamento, através da equação (49).

$$J_{pl(i)} = \left[J_{pl(i-1)} + \left(\frac{\eta_{pl(i)}}{b_{(i-1)}} \right) \cdot \left(\frac{A_{pl(i)} - A_{pl(i-1)}}{B_N} \right) \right] \cdot \left[1 - \gamma_{pl(i-1)} \cdot \left(\frac{a_{(i)} - a_{(i-1)}}{b_{(i-1)}} \right) \right] \quad (49)$$

Em que o η_{pl} e γ_{pl} são factores plásticos de geometria e são calculados através das equações (50) e (51).

$$\eta_{pl(i)} = 3,667 - 2,199 \cdot \left(\frac{a_{(i)}}{W} \right) + 0,437 \cdot \left(\frac{a_{(i)}}{W} \right)^2 \quad (50)$$

$$\gamma_{pl(i)} = 0,131 + 2,131 \cdot \left(\frac{a_{(i)}}{W} \right) \quad (51)$$

As expressões acima referidas são para o caso de ser utilizado o digrama de força vs *CMOD*. Se for utilizado o diagrama de força vs *LLD*, η_{pl} e γ_{pl} tomam os valores de 1,9 e 0,9 respectivamente.

$A_{pl(i)} - A_{pl(i-1)}$ representa o incremento de área, do gráfico Força vs deslocamento (*CMOD* ou *LLD*), compreendido entre dois pares de força deslocamento consecutivos. $A_{pl(i)}$ é calculado segundo a equação (52).

$$A_{pl(i)} = A_{pl(i-1)} + [F_{(i)} + F_{(i-1)}] \cdot \frac{[V_{pl(i)} - V_{pl(i-1)}]}{2} \quad (52)$$

Em que $V_{pl(i)}$ é o deslocamento plástico que é obtido através da equação (53)

$$V_{pl(i)} = v_{(i)} - (F_{(i)} \cdot C_{(i)}) \quad (53)$$

Para outros métodos, que não *elastic compliance* para a determinação do comprimento de fenda, são dadas equações que criam uma “*compliance* fictícia”, para ser possível calcular o deslocamento plástico. As equações (54) e (55) são utilizadas para esse mesmo efeito.

$$C_{(i)LLD} = \frac{1}{E \cdot B_e} \cdot \left(\frac{S}{W - a_{(i)}} \right)^2 \cdot \left[1,193 - 1,98 \cdot \left(\frac{a_{(i)}}{W} \right) + 4,478 \cdot \left(\frac{a_{(i)}}{W} \right)^2 - 4,443 \cdot \left(\frac{a_{(i)}}{W} \right)^3 + 1,739 \cdot \left(\frac{a_{(i)}}{W} \right)^4 \right] \quad (54)$$

$$C_{(i)CMOD} = \frac{6 \cdot S}{E \cdot W \cdot B_e} \cdot \left(\frac{a_{(i)}}{W} \right) \cdot \left[0,63 - 2,28 \cdot \left(\frac{a_{(i)}}{W} \right) + 3,87 \cdot \left(\frac{a_{(i)}}{W} \right)^2 - 2,04 \cdot \left(\frac{a_{(i)}}{W} \right)^3 + \frac{0,66}{\left(1 - \frac{a_{(i)}}{W} \right)^2} \right] \quad (55)$$

4.9.3 Condições iniciais do cálculo

É possível observar através da equação (49), que valor de J_{pl} está sempre dependente do valor imediatamente anterior, assim como outras variáveis (γ_{pl} e A_{pl}). Isto levanta o problema da condição inicial, pois o primeiro valor do cálculo não tem valores anteriores para poder ser calculado.

A ASTM E 1820 não especifica as condições iniciais a utilizar no cálculo, como tal foram tomadas as seguintes considerações iniciais:

$$F_1 = P_m$$

$$a_1 = a_0$$

$$\eta_{pl(1)} = 3,667 - 2,199 \cdot \left(\frac{a_{(1)}}{W}\right) + 0,437 \cdot \left(\frac{a_{(1)}}{W}\right)^2$$

$$\gamma_{pl(1)} = 0,131 + 2,131 \cdot \left(\frac{a_{(1)}}{W}\right)$$

$$V_{pl(1)} = 0$$

$$A_{pl(1)} = 0$$

$$J_{pl(1)} = 0$$

É considerado que o primeiro conjunto de dados, retirados do gráfico do ensaio, conterà os valores correspondentes à força P_m , o deslocamento para o qual esta ocorre e o valor da *compliance* inicial (que gera a_0). Como já foi dito anteriormente, no subcapítulo que diz respeito a pré fissuração, a força P_m é força a partir da qual se deixa de verificar um comportamento linear elástico. Assim sendo, primeiro valor de “J” corresponderá apenas ao valor de $J_{elástico}$. A partir deste primeiro ponto o cálculo procede de acordo com as equações anteriormente mencionadas.

Após a obtenção de todos os valores de “J”, os mesmos podem ser emparelhados num gráfico, com os respectivos comprimentos de fenda. A Figura 59, em baixo, é um exemplo do aspecto final do gráfico.

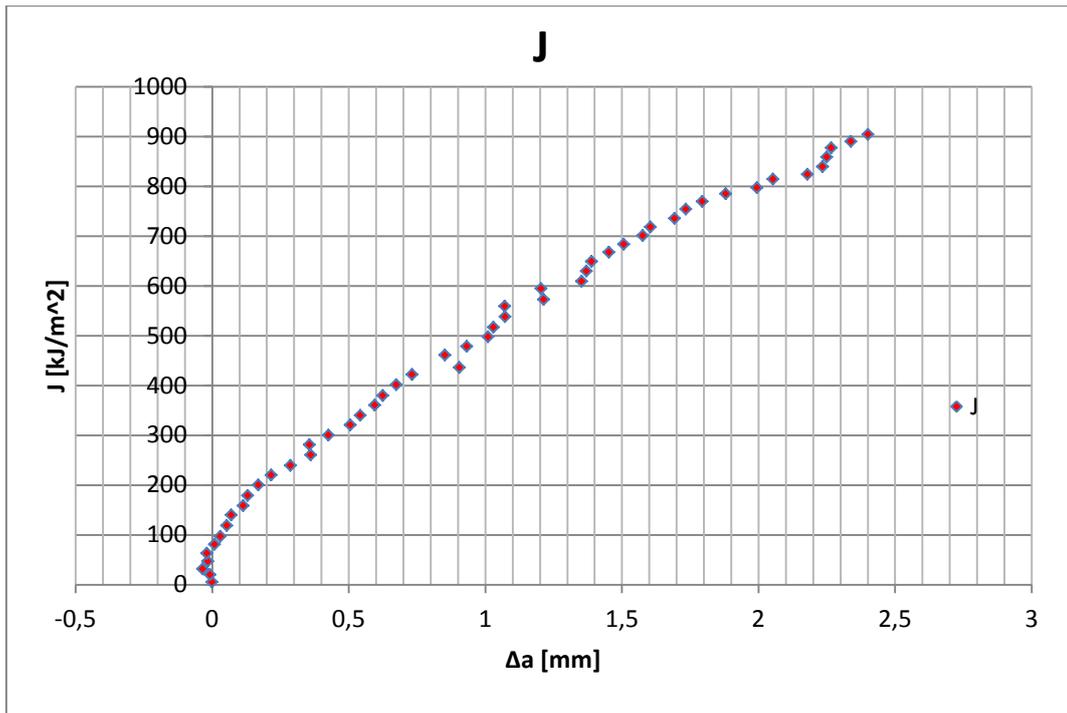


Figura 59 - Exemplo de uma Curva de Resistência

Para obter as curvas de resistência a partir dos diagramas de força deslocamento, através da aplicação das equações contidas na norma, foi desenvolvida uma folha cálculo no software *Maple*. Esta elabora o cálculo do “ J ” tendo como entrada os dados de força, deslocamento e compliance, recolhidos do diagrama de ensaio, e as propriedades geométricas dos provetes. Um exemplar da folha de cálculo encontra-se no anexo D.

4.10 Medição óptica do tamanho de fenda na superfície de fractura.

Para atestar se os dados recolhidos são susceptíveis de serem utilizados, é necessário confrontar a estimativa dos tamanhos de fenda inicial e final, com os valores obtidos por medição óptica na superfície de fractura.

Dependendo do material e do tamanho do provete, muitas vezes, torna-se difícil identificar a zona correspondente à propagação de fenda dúctil. Para o efeito são propostos dois métodos para auxiliar na sua identificação. (1) Efectuar uma fenda de fadiga no provete após a realização do ensaio, ou (2) tingir a fenda com *Heat tinting* e levar ao forno a 300°C durante meia hora [40]. Na Figura 60 está representada uma superfície de fractura, em que foi efectuada uma fenda de fadiga, após o ensaio. Na imagem é possível observar a fenda dúctil entre as duas fendas de fadiga.

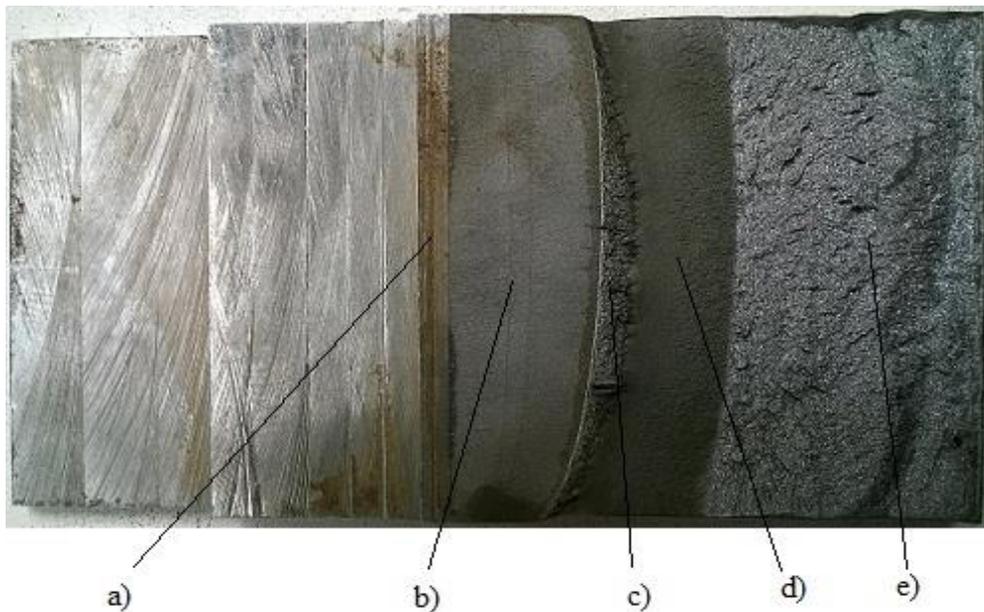


Figura 60 - Superfície de Fractura de um provete ensaiado: a)-Entalhe, b)-Pré-fenda de fadiga c)- Fenda dúctil d)- Fenda de fadiga posterior ao ensaio e)- Fractura frágil provocada a baixa temperatura

Uma vez salientada a fenda dúctil, é necessário partir o provete de modo a expor a superfície de fractura, com a menor deformação possível. Uma maneira de minimizar a deformação da superfície de fractura, é arrefecer o provete de modo a assegurar um comportamento frágil no momento da separação.

A medição do tamanho de fenda inicial e final tem de ser efectuada em nove pontos igualmente intervalados entre si. As referências para a medição são, a linha contida no plano que separa a espessura em dois e as linhas de $0,005W$, a contar do *sidegroove* ou da

superfície plana do provete, quando o anterior não existe [40]. Tendo isto em conta é possível quantificar o espaçamento entre cada medição, desde $0,005W$, a partir da seguinte expressão:

$$\Delta x = \frac{B - 0,01W}{10} \quad (56)$$

Na Figura 56 está representado esquematicamente uma superfície de fractura. Na figura estão identificadas as linhas limite (Vermelha espessa), a linha de centro (linha vermelha de menor espessura) e as linhas guia para a medição (preto). Também estão identificados os pontos correspondentes ao tamanho de fenda inicial (losângulos verdes) e final (círculos azuis).

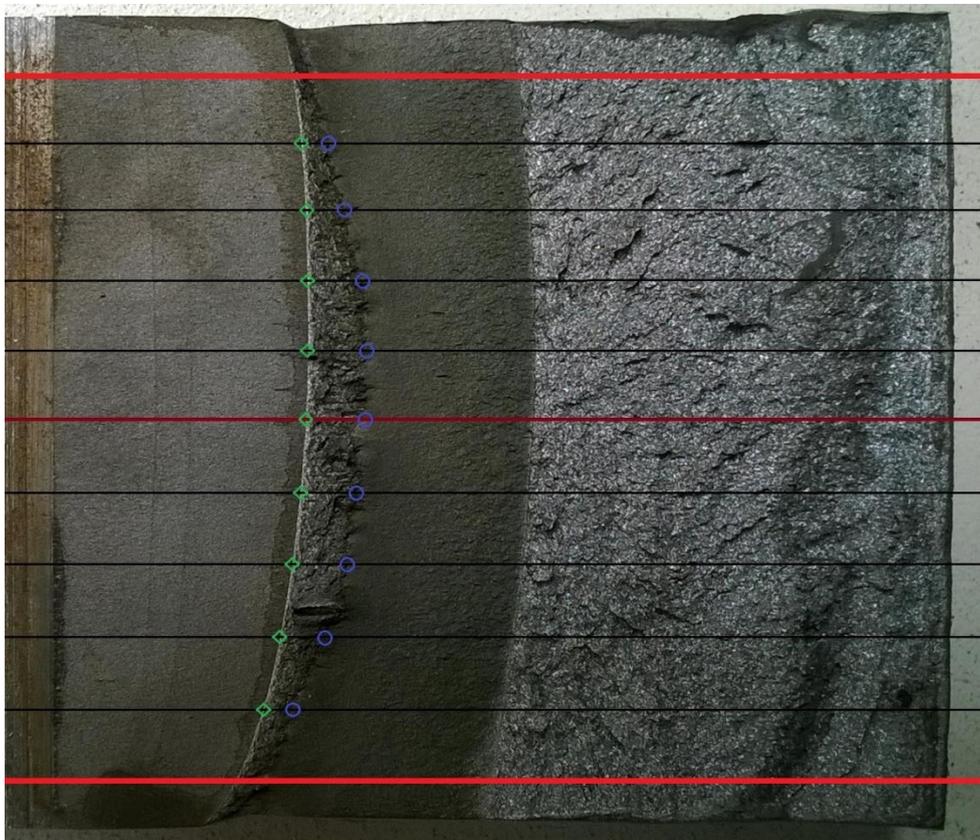


Figura 61 - Representação da medição óptica dos comprimentos de fenda inicial e final

Após serem realizadas as medições efectua-se o cálculo do tamanho de fenda inicial (a_0), final (a_p) e da respectiva variação (Δa) através das equações (57), (58) e (59):

$$a_0 = \frac{\left(\frac{a_{0_1} + a_{0_9}}{2}\right) + \sum_{i=2}^8 a_{0_i}}{8} \quad (57)$$

$$a_p = \frac{\left(\frac{a_{p_1} + a_{p_9}}{2}\right) + \sum_{i=2}^8 a_{p_i}}{8} \quad (58)$$

$$\Delta a_p = a_p - a_0 \quad (59)$$

Com os valores calculados procede-se à verificação dos valores anteriormente medidos através das equações (60), (61) e (62), que se indicam de seguida, estando descritas na norma, nos pontos 9.1.4.1, 9.1.4.2 e 9.1.5.1 respectivamente.

$$(a_0 - a_{0_i}) < 0,05B \quad (60)$$

$$(a_p - a_{p_i}) < 0,05B \quad (61)$$

$$(a_{p_i} - a_{0_i}) < 0,5\Delta a \quad (62)$$

Esta verificação serve para atestar se o ensaio decorreu dentro de condições de deformação plana. Caso algum dos valores medidos não cumpram a condição respectiva, considera-se que o ensaio não é representativo do estado de deformação plana. Por outras palavras, o estado de tensão plana teve influência no teste e não pode ser considerado desprezável.

Uma vez verificados e validados os valores da medição óptica, utiliza-se o valor calculado de Δa_p para verificar a previsão efectuada através do método da *elastic compliance* ou de outro método indirecto. As equações seguintes, validam as previsões efectuadas por métodos indirectos:

$$(\Delta a_p - \Delta a_{previsão}) < 0,15\Delta a_p, \text{ se } \Delta a_p < 0,2b_0 \quad (63)$$

$$(\Delta a_p - \Delta a_{previsão}) < 0,03b_0, \text{ se } \Delta a_p \geq 0,2b_0 \quad (64)$$

Esta verificação corresponde ao ponto 9.1.5.2 da norma.

As medições e verificações efectuadas aos provetes ensaiados encontram-se detalhadas no anexo E.

4.11 Método de normalização

Como já foi referido, o método de normalização vai inferir os comprimentos de fenda intermédios através do registo normalizado de força vs deslocamento (LLD) e com uma função analítica, que foi calculada utilizando os valores de a_0 e de a_p medidos na superfície de fractura do provete [45].

O procedimento inicia-se com a medição óptica do a_0 e a_p . De seguida normaliza-se os valores de força, através da equação 65.

$$P_{n_i} = \frac{F_i}{W \cdot B \cdot \left(\frac{W-a_{b_i}}{W}\right)^{\eta_{pl}}} \quad (65)$$

Na qual $\eta_{pl} = 1,9$ e que a_{b_i} é o tamanho de fenda corrigido para o arrombamento (*crack blunting*) e é calculado pela equação (66):

$$a_{b_i} = a_0 + \frac{J_i}{2 \cdot \sigma_y} \quad (66)$$

Neste caso, o valor de J_i é calculado com as equações (48), (49) e com o tamanho de fenda inicial, medido na superfície de fractura, e a *compliance* calculada através da equação (54).

O deslocamento será normalizado através da expressão:

$$v_{pl'_i} = \frac{v_i - (F_i \cdot C_i)}{W} \quad (67)$$

Nesta equação, C_i é obtido através da equação (54). Em que o valor correspondente ao comprimento de fenda é a_{b_i} .

O último valor do par força-deslocamento será normalizado segundo as equações anteriores, não se aplicando qualquer correcção do arrombamento de fenda ao comprimento de fenda final ($a_{b_i} = a_p$).

Após a normalização de todos os valores até à força máxima (esta não incluída) e o último par, correspondente a a_p , são colocados num gráfico para se encontrar a função de normalização. Na Figura 62 em baixo encontra-se exemplificado um o gráfico de força deslocamento normalizado (P_n vs v_{pl}') com os pontos acima referidos.

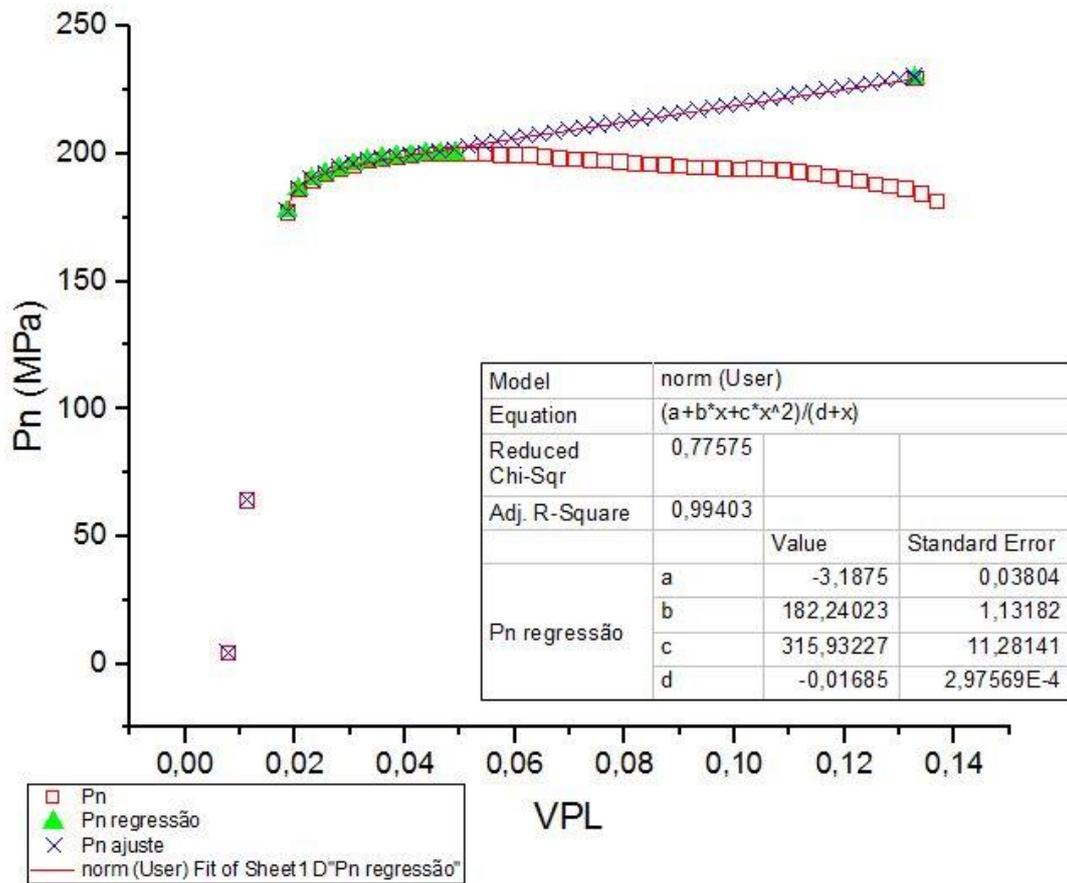


Figura 62 - Diagrama Força vs deslocamento Normalizado

Para se efectuar o ajustamento e encontrar a equação, não devem estar no gráfico os pontos em que v_{pl}' seja inferior a 0,001. Deverão sobrar no mínimo 10 pontos para a encontrar a função. A equação de normalização é regida pela seguinte fórmula:

$$P_N = \frac{a + b \cdot v_{pl}' + c \cdot v_{pl}'^2}{d + v_{pl}'} \quad (68)$$

Em que a, b, c e d são coeficientes de ajustamento.

A equação encontrada deverá ajustar-se aos pontos que a geraram, incluindo o último par, com um desvio máximo correspondente a 1% P_n do último par.

Para encontrar os novos comprimentos de fenda, de modo iterativo altera-se a_i e recalcula-se o par P_{ni} e $v_{pl}'_i$. Inicia-se depois o procedimento, ajustando o primeiro ponto em que o $v_{pl}'_i$ é superior a 0,002, normaliza-se esse par com a_i , e verifica-se se o valor obtido de P_n

difere do da função, P_N , em $\pm 0,1\%$. Se isso acontecer procede-se à análise do par seguinte. Se a diferença for superior fazem-se pequenos ajustes a a_i . Os pares seguintes serão ajustados da mesma maneira até ao par final.

Uma vez obtidos os valores do comprimento de fenda intermédios, e em conjunto com os dados de força e deslocamento, é possível obter a curva de resistência aplicando as equações do método de curva de resistência, com a diferença de que os valores da compliance serão gerados pela equação (54).

Para ser aplicado o método de normalização foi necessário a utilização de mais do que uma ferramenta de cálculo. O método de normalização foi desenvolvido quase na sua totalidade em duas folhas de cálculo do Microsoft Excel. A primeira realiza a normalização do diagrama de força vs deslocamento, recorrendo as equações (65) e (67). Os Valores de “J” utilizados neste processo foram importados de uma folha do software *Maple*. Após a normalização do diagrama, os valores do mesmo são transferidos para o software *Origin*, para poder ser efectuado o ajuste segundo a equação (68) (uma vez que o Excel não consegue efectuar este passo) e encontrar os respectivos coeficientes de ajuste. Uma vez encontrados os coeficientes, é realizado o processo iterativo para encontrar a *compliance* dos pontos entre o comprimento de fenda inicial e final. O exemplo das folhas desenvolvidas (Maple e Excel) encontram-se no anexo F.

O cálculo da curva de resistência, após a determinação dos comprimentos de fenda intermédios, é efectuado com recurso à folha de cálculo Maple idêntica a presente no anexo D.

4.12 Obtenção do J_{IC}

Apesar de a curva de resistência por si só poder ser utilizada como propriedade do material, esta é muitas vezes utilizada para a obtenção do valor iniciação a fractura dúctil, J_{IC} .

No caso de ser utilizado o método de curva de resistência na obtenção da curva, a norma exige que o valor de a_0 seja corrigido pelo valor de a_{0q} .

O a_{0q} é obtido seleccionando todos pares J_i, a_i antes de se atingir a carga máxima. Estes têm de ser no mínimo oito. Estes dados são aproximados pela equação (69):

$$a = a_{0q} + \frac{J}{2\sigma_y} + B \cdot J^2 + C \cdot J^3 \quad (69)$$

A norma impõe que os coeficientes a_{0q} , B e C sejam encontrados através de um procedimento de ajuste, usando o método dos mínimos quadrados, fazendo uso de um mínimo de oito pontos obtidos antes de ser atingida a carga máxima. A relação de correlação entre os dados e a equação de ajuste deverá também ser superior a 0,96. Na Figura 63 está representado a obtenção do a_{0q} através do software *Origin*.

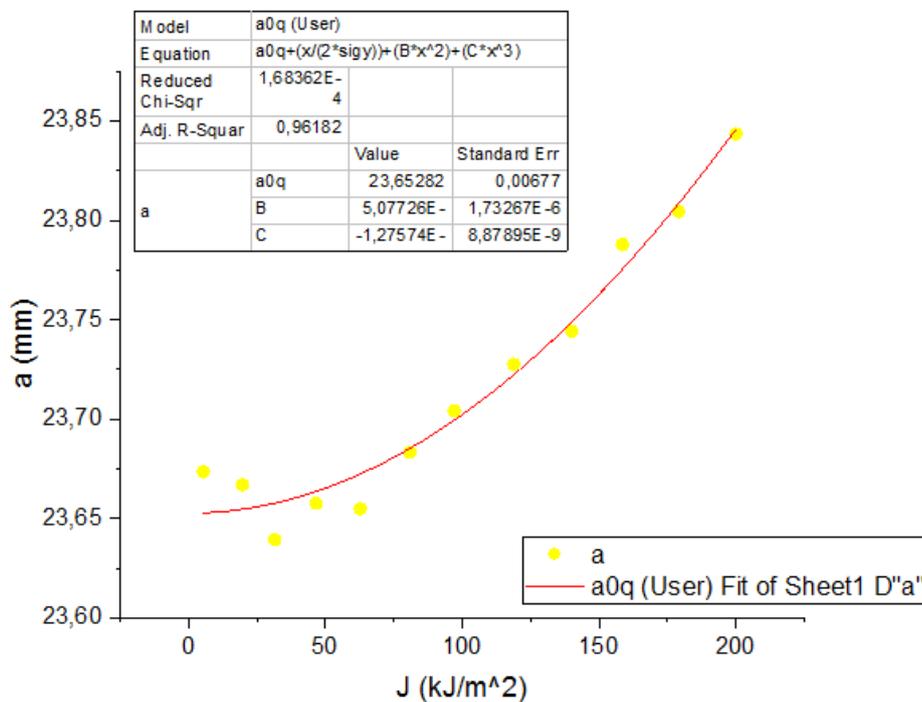


Figura 63 - Obtenção do a_{0q}

O a_{0q} obtido não pode divergir, relativamente ao comprimento medido de forma óptica, em mais de 0,5mm ou 0,01W. Uma vez obtido e verificado este valor substitui-se e corrigem-se os valores de J_i . A norma refere que devem existir no mínimo três pontos entre $0,4J_Q$ e J_Q , no entanto, esta condição só poderá ser verificada após a obtenção do J_Q .

Após a correção da curva de resistência, tem de se calcular as variações Δa_i através da equação:

$$\Delta a_i = a_i - a_{0q} \quad (70)$$

Finalmente constrói-se o gráfico de J vs Δa com as seguintes linhas de construção/restricção representada na Figura 64.

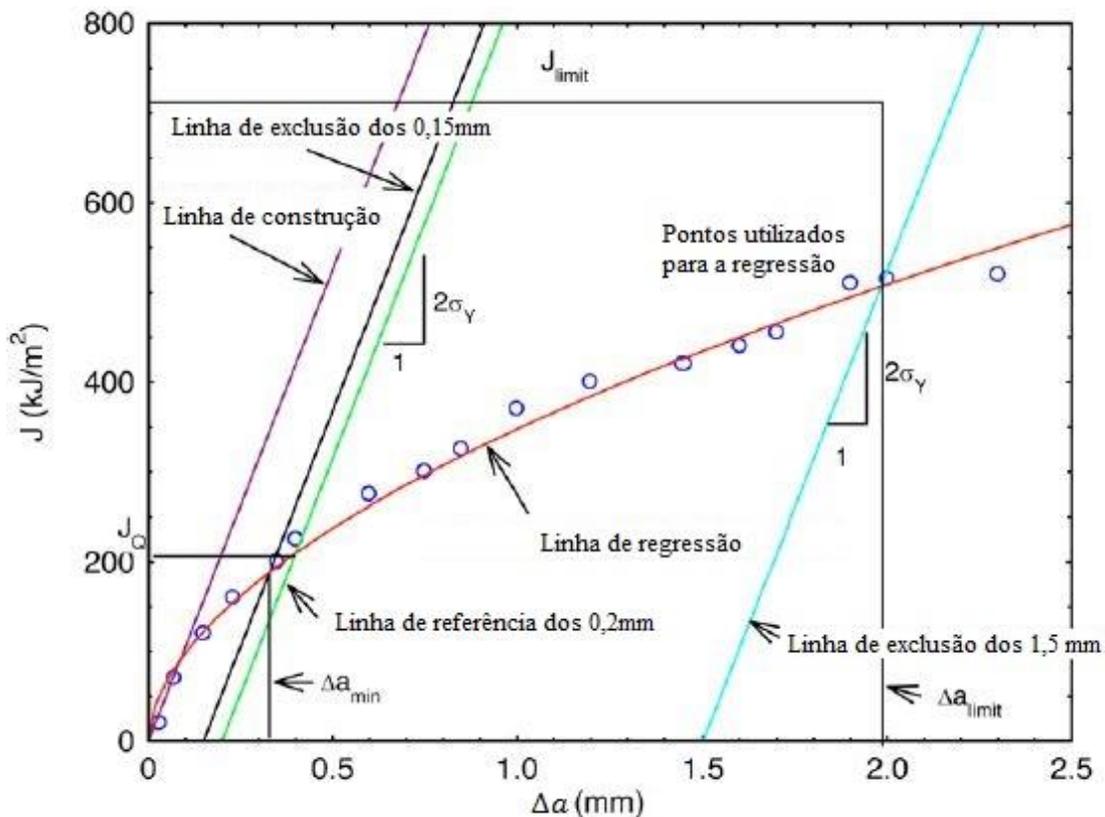


Figura 64 - Curva de resistência restringida para obtenção do J_{ic}

As linhas representadas na imagem em cima podem ser descritas através das equações (73)(71), (72), (73), (74), (75) representadas em baixo.

$$Lc = J = (2 \cdot \sigma Y) \cdot \Delta a \quad (71)$$

$$LE_{0,15mm} = (2 \cdot \sigma Y) \cdot (\Delta a - 0,15) \quad (72)$$

$$J_{limit} = b_0 \cdot \frac{\sigma y}{7,5} \quad (73)$$

$$LR_{0,2mm} = (2 \cdot \sigma Y) \cdot (\Delta a - 0,2) \quad (74)$$

$$LE_{1,5mm} = (2 \cdot \sigma Y) \cdot (\Delta a - 1,5) \quad (75)$$

Após a construção destas linhas, fica delimitada a região de dados válidos, que se pode observar na Figura 65.

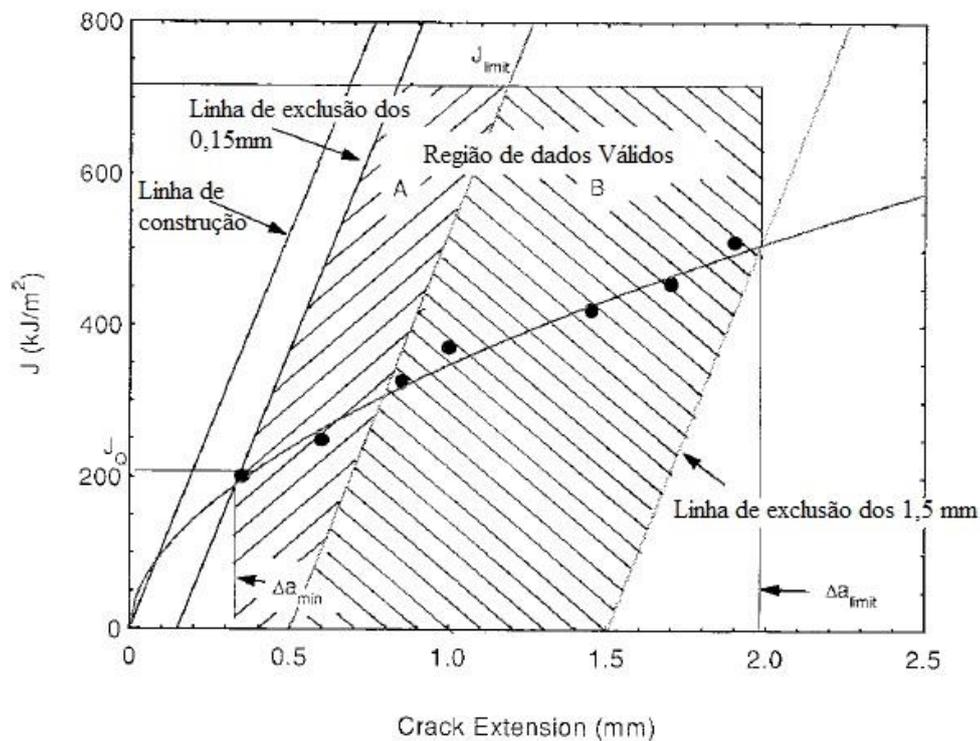


Figura 65 - Delimitação da região de dados válidos

Depois de serem ignorados todos os pares de dados que se encontram fora da zona de admissão, os dados são linearizados. Esses dados (linearizados) são ajustados através de equação (76) e retiram-se os coeficientes C_1 e C_2 . A norma refere que o coeficiente C_2 tem de ser obrigatoriamente menor que 1. A equação (77) representa analiticamente a curva de resistência através dos coeficientes C_1 e C_2 .

$$\ln(J) = \ln C_1 + C_2 \cdot \ln(\Delta a) \quad (76)$$

$$J = C_1 \cdot (\Delta a)^{C_2} \quad (77)$$

Após a determinação dos coeficientes C_1 e C_2 , a curva de ajuste aos valores, dada pela equação (77) pode representar-se no gráfico (ver Figura 65). De seguida determina-se o ponto intersecção entre a linha de referência que passa pela abcissa de 0,2 mm e a linha que representa a equação (77). O par de valores retirado representa Δa_Q e J_Q .

A norma, no ponto 9.6.6 recomenda um procedimento iterativo para a determinação do J_Q . O processo é baseado nas equações (78) e (79), e inicia-se com o valor aproximado do J_Q , retirado visualmente do gráfico. Com este valor inicial calcula-se Δa_{q_1} e J_{q_2} e verifica-se a diferença entre o J_{q_2} e o inicial. Se esta diferença for inferior a $\pm 2\%$, o valor de J_{q_2} pode ser considerado o valor de J_Q . Caso essa diferença seja superior reinicia-se o procedimento com o valor de J_{q_2} .

$$\Delta a_{q_i} = \frac{J_{q_i}}{2 \cdot \sigma Y} + 0,2 \quad (78)$$

$$J_{q_{i+1}} = C_1 \cdot \left(\frac{\Delta a_{q_i}}{k} \right)^{C_2} \quad (79)$$

É relevante referir que diversos autores, como por exemplo Dzugan e Viehrig (2004) [46], Zhu e Joyce (2007) [45], Chen Bao et al (2015) [47], aparentam não retirar o J_Q como foi anteriormente referido. Estes autores, preferiram utilizar o ponto de intersecção entre a recta de 0,2 mm com a aproximação analítica da curva de resistência (equação (77)) ou com um dos pontos dos obtidos no ensaio. As razões que levam a estas práticas são desconhecidas, no entanto, esta simplificação provavelmente é realizada pois o valor obtido opticamente em muitos casos pode ser mais conservador do que o método recomendado pela norma. Tarpani e Spinelli (2000) [48] recomendam que a aproximação à curva deve ser logarítmica, quando esta é utilizada em avaliação estrutural, pois na maioria dos casos acaba por ser a aproximação mais conservadora, quando comparado com a aproximação dada pela equação (77).

Para se poder validar J_Q como J_{IC} é necessário validar todas as condições que dizem respeito à pré fissuração, medição óptica da fenda, obtenção do a_{0q} (no caso de a curva ter

side obtida pelo método da curva de resistência), e ainda as condições representadas pelas equações (80) e (81).

$$B > 10 \cdot \frac{J_Q}{\sigma_Y} \quad (80)$$

$$b_0 > 10 \cdot \frac{J_Q}{\sigma_Y} \quad (81)$$

A obtenção detalhada dos valores de J_{IC} está apresentada no anexo G.

5 Resultados - Tratamento, verificação e interpretação

As figuras Figura 66 e Figura 67 representam os diagramas de força vs deslocamento de modo reduzido, ou seja, apresentando a força em função do deslocamento ao longo do ensaio, e assinala os pontos que foram utilizados para o cálculo da curva de resistência. No caso do método de curva de resistência, os pontos assinalados são também onde ocorreram os descarregamentos.

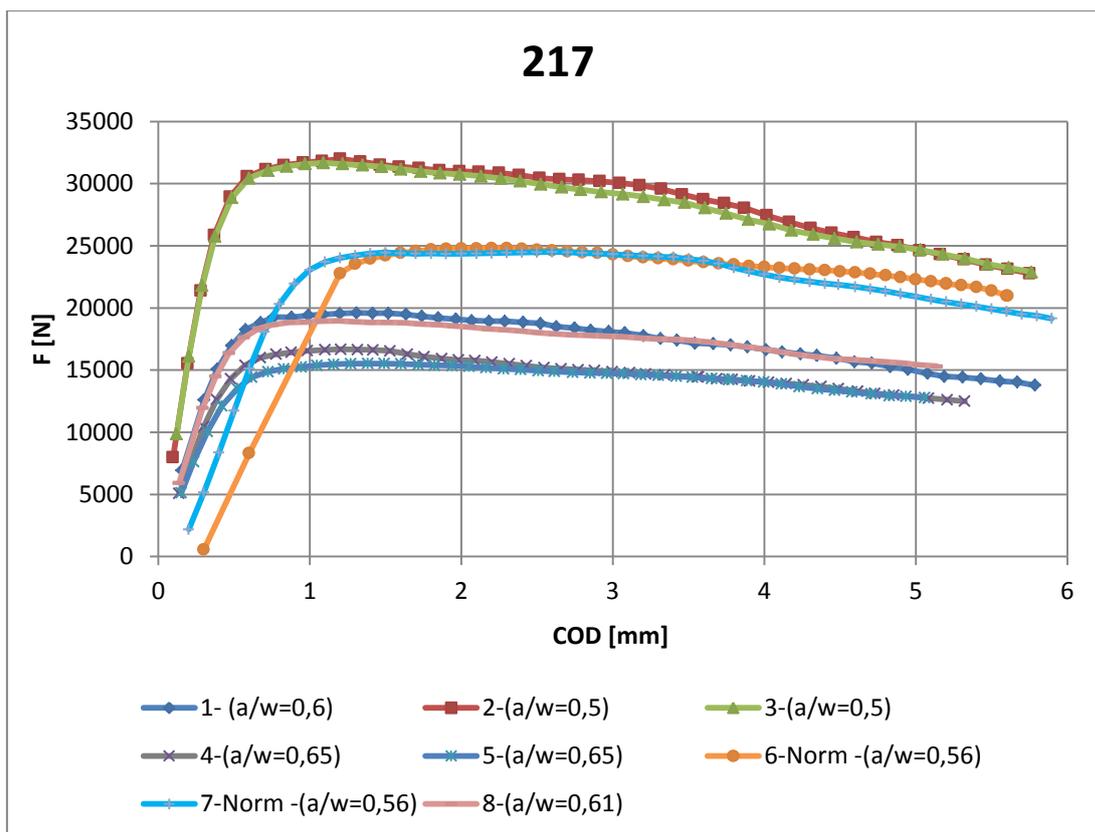


Figura 66 - Diagrama reduzido F vs V amostra - 217

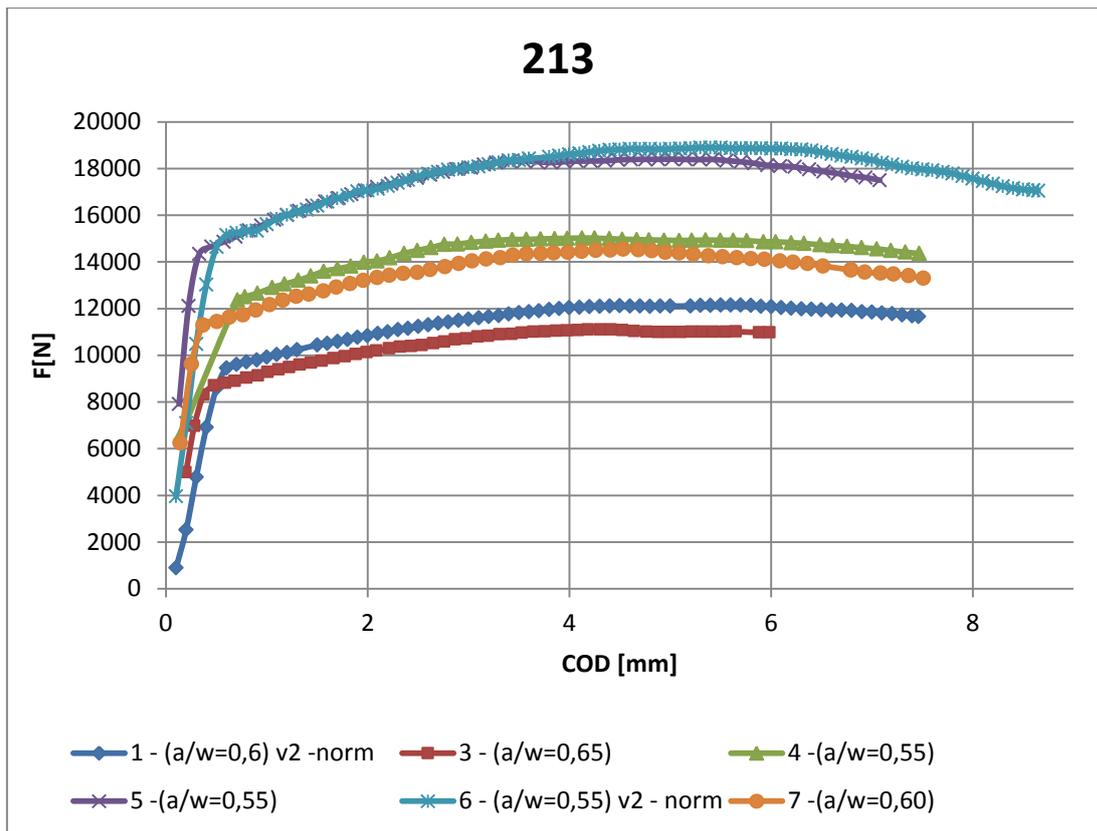


Figura 67 - Diagrama de F vs deslocamento reduzido amostra - 213

Através da análise das figuras é possível constatar que os provetes com maiores comprimentos de fenda demonstraram menor capacidade de carga devido à menor secção resistente e maior factor de intensificação de tensões. Comparando também os gráficos **Erro! A origem da referência não foi encontrada. e Erro! A origem da referência não i encontrada.** é possível constatar que os provetes 213, em relação aos 217, apresentam um diagrama bastante mais alongado, um sinal evidente de maior plasticidade.

A diferença na plasticidade e nas forças suportadas é explicada pelas diferentes estruturas micrográficas de cada um dos materiais. Como já foi referido no capítulo anterior, as amostras 213 apresentam uma microestrutura de ferrite e perlite; por sua vez, a amostras 217 apresenta martensite na sua microestrutura. A martensite é obtida através de tratamento térmico de têmpera, que proporciona um aumento da resistência mecânica do aço, devido à elevada concentração de deslocações que se forma por solução sólida intersticial causada pelos átomos de carbono [7]. A esta melhoria das propriedades mecânicas do material, como sejam a resistência, está também associada a perda de ductilidade e tenacidade, verificada nas amostras 217.

5.1 Verificação dos ensaios referentes ao método de curva de resistência

Os requisitos para a obtenção da curva através deste método estão descritos no capítulo anterior, no sub capítulo “Ensaio – Procedimento da curva de resistência”. Os requisitos 2 e 4 contêm medidas quantitativas com o objectivo de “regular/avaliar” o ensaio, ao nível dos descarregamentos. Estes requisitos correspondem aos pontos da norma 8.6.3.2 [40] e 8.6.3.4 [40]. É relevante referir que a validação destes pontos da norma não tem como fim efectuar qualquer avaliação do ensaio, mas sim auxiliar na sua construção, garantido que no caso de serem cumpridos, a curva de resistência obtida vai ter bastante precisão, caso contrario a mesma será definida aproximadamente.

Nas tabelas Tabela 16 e

Tabela 17 indica-se o resultado da avaliação feita aos ensaios relativos ao método de curva de resistência, decorrente da validação dos pontos da norma referidos.

Tabela 16 - Verificação dos ensaios efectuados através do método de curva de resistência, amostra 217

Provete	Nº de C/D antes do Fmax	intrevalo C/D [mm]	Amp. Máxima C/D [N]	8.6.3.2	8.6.3.2	8.6.3.4
217_1	11	0,1155	5170	Cumpre	Cumpre	Não cumprir
217_2	9	0,148	8250	Cumpre	Cumpre	Não cumprir
217_3	9	0,1425	6000	Cumpre	Cumpre	Não cumprir
217_4	9	0,1194	4569,8	Cumpre	Cumpre	Não cumprir
217_5	11	0,1175	4158,39	Cumpre	Cumpre	Não cumprir
217_8	9	0,1171	5191,65	Cumpre	Cumpre	Não

						cumpre
--	--	--	--	--	--	--------

Tabela 17 - Verificação dos ensaios efectuados através do método de curva de resistência, amostra 213

Provete	Nº de C/D antes do Fmax	Intervalo C/D [mm]	Amp. Máxima C/D [N]	8.6.3.2	8.6.3.2	8.6.3.4
213_3	38	0,11338815	3984,62	Cumpre	Cumpre	Não cumpre
213_4	23	0,1506	4862,616	Cumpre	Não Cumpre	Não cumpre
213_5	28	0,1457	5926,187	Cumpre	Não Cumpre	Não cumpre
213_7	27	0,1454	4590,498	Cumpre	Cumpre	Cumpre

É possível constatar através das tabelas Tabela 16 e Tabela 17 que a grande maioria dos ensaios não foi capaz de cumprir os três requisitos em simultâneo, mas na sua grande maioria conseguiram alcançar dois requisitos e todos conseguiram pelo menos um.

A não satisfação dos requisitos prende-se quase única e exclusivamente com o facto do controlo do ensaio ser efectuado através do canal de deslocamento. No caso da amplitude dos descarregamentos, é difícil estabelecer a amplitude do descarregamento em deslocamento, que provoque a amplitude de força desejada (mesmo que seja estabelecida com precisão no início, esta não se manterá com o decorrer do ensaio, devido à perda de rigidez que ocorre com a propagação da fenda). O mesmo acontece com o intervalo entre descarregamentos, pois o valor que é possível fornecer ao software corresponde ao deslocamento vertical da máquina e não ao da abertura do extensómetro (COD), ao qual o requisito faz referência. À semelhança do caso anterior, a perda de rigidez com o decorrer do ensaio, vai alterar a relação entre o deslocamento vertical e a abertura do extensómetro.

5.2 Curvas de Resistência

Na Figura 68 estão representadas as curvas de resistência obtidas através do método de curva de resistência e normalização, correspondentes à amostra 217.

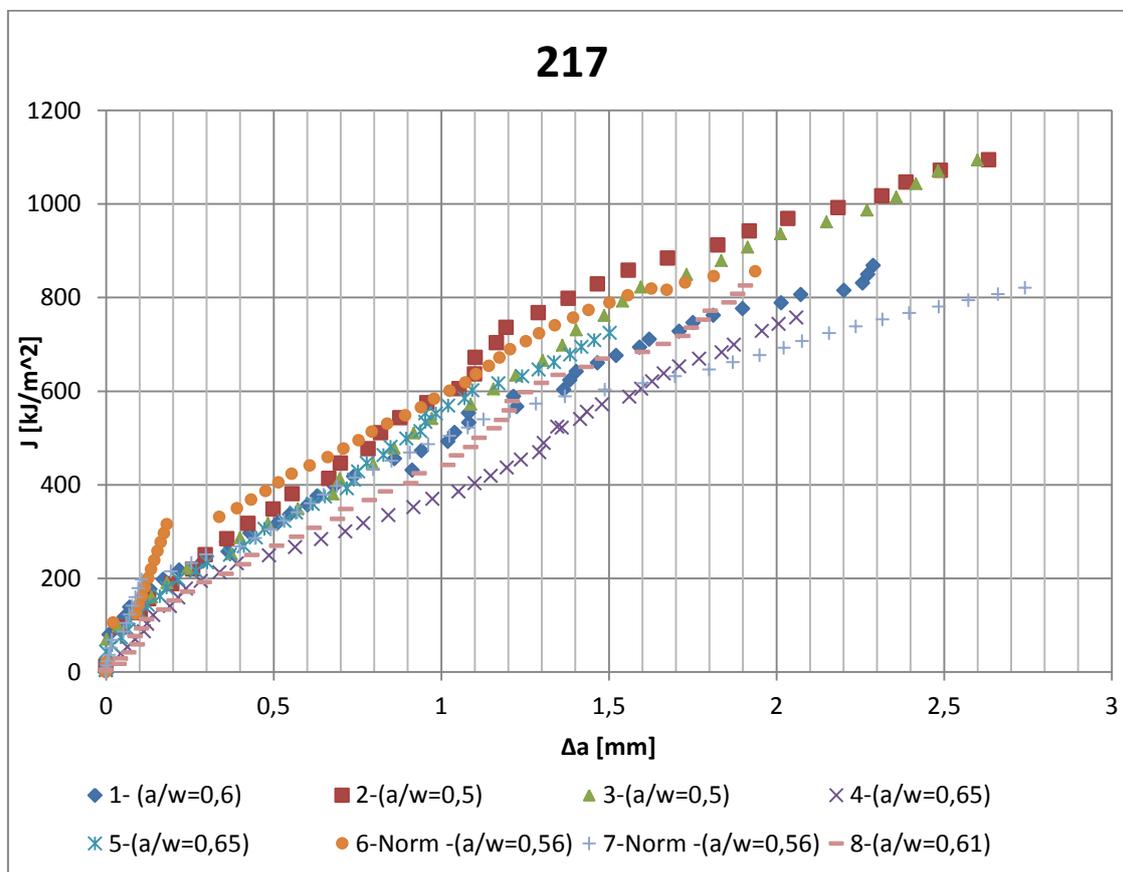


Figura 68 - Curvas de resistência: Amostra 217

À primeira vista poderá parecer que existe uma dispersão significativa entre curvas obtidas, no entanto, estas podem ser explicadas através dos comprimentos de fenda relativos. As duas curvas mais que acabam juntas mais acima (provetes 2 e 3), correspondem aos provetes com comprimentos de fenda relativos de menor dimensão. Em oposição, as curvas dispostas mais abaixo, deveriam corresponder ao maior comprimento de fenda relativo, o que de facto acontece para o provete 4, mas que não acontece com o provete 5, em que a sua curva aparece numa zona intermédia do gráfico. Os provetes 1 e 8, que correspondem a um comprimento de fenda intermédio, encontram-se entre as curvas de maior e menor comprimento de fenda relativo.

Ainda no mesmo gráfico, no que diz respeito às curvas obtidas através do método de normalização, estas não apresentam um comportamento consistente uma vez que uma delas (provete 6) tem comportamento semelhante ao dos provetes homólogos do método de

resistência (2 e 3) com uma pente inicial invulgar. Por sua vez, o segundo provete do método de normalização (proвете 7), apesar de ter uma zona inicial mais de acordo com o esperado, a curva cruza-se com as restantes ao longo da sua progressão.

Na Figura 69, estão representadas as curvas de resistência correspondentes à amostra 213.

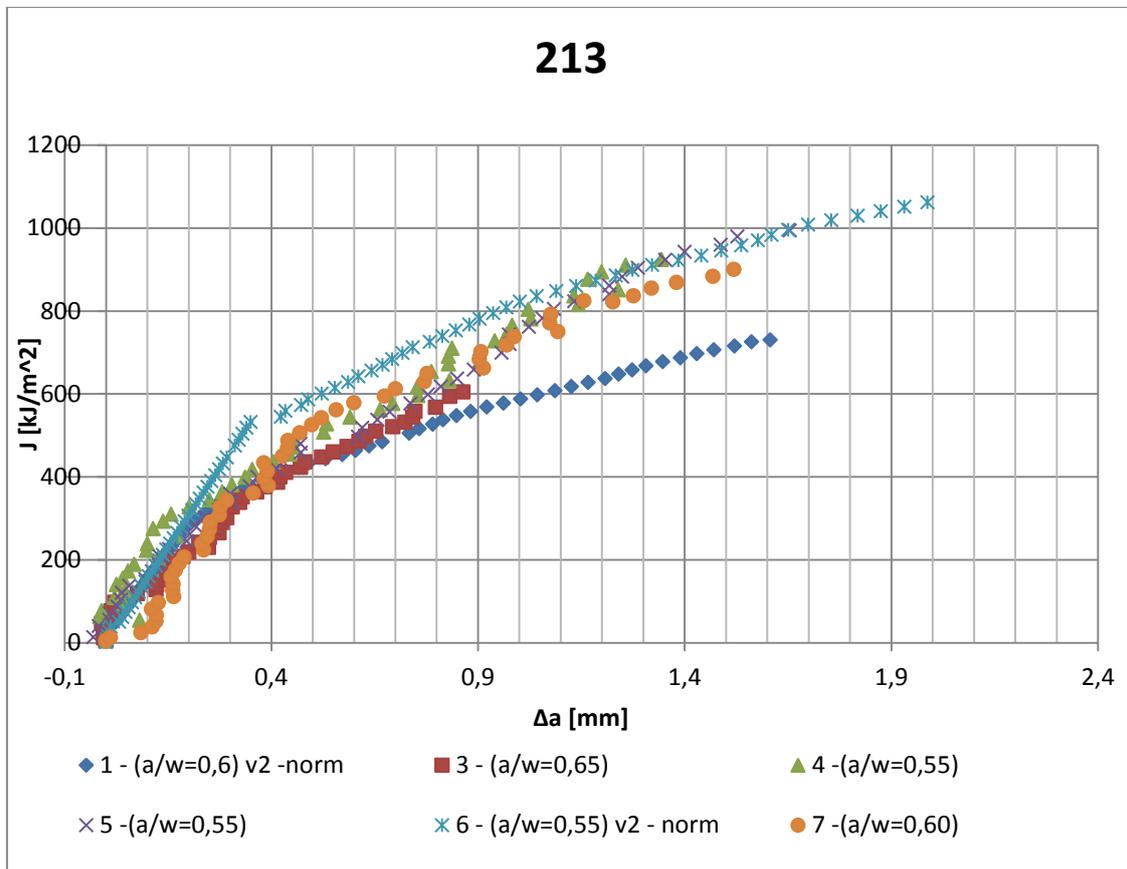


Figura 69 - Curvas de resistência: Amostra 213

Da análise dos resultados da amostra 213, pode pensar-se que têm menor dispersão. No entanto, à semelhança do que aconteceu com a amostra 217, as curvas correspondentes com o menor comprimento de fenda relativo (4 e 5) são as mais periféricas, relativamente ao limite superior do gráfico (dentro do método de curva de resistência). A curva correspondente ao maior comprimento de fenda relativo (proвете 3) é efectivamente uma curvas localizada no limite inferior, contudo, está relativamente perto da curva do provete 5. A curva correspondente aos comprimento de fenda intermédio (proвете 7) apresentou um comportamento invulgar no início e vindo a coincidir, na parte final, com as curvas dos provetes 4 e 5.

Em relação às curvas do método de normalização (1 e 6), estas apresentam alguma coincidência entre elas na fase inicial e divergem perto dos 0,2 mm, tendo a curva do

provete 6 um comportamento relativamente parecido com as do método de curva de resistência. Por sua vez, a curva do provete 1 interceptou as restantes, estabelecendo o limite inferior.

Na Figura 70 está representado a comparação entre algumas curvas de resistência das amostras 217 e 213, para comprimentos de fenda relativos idênticos

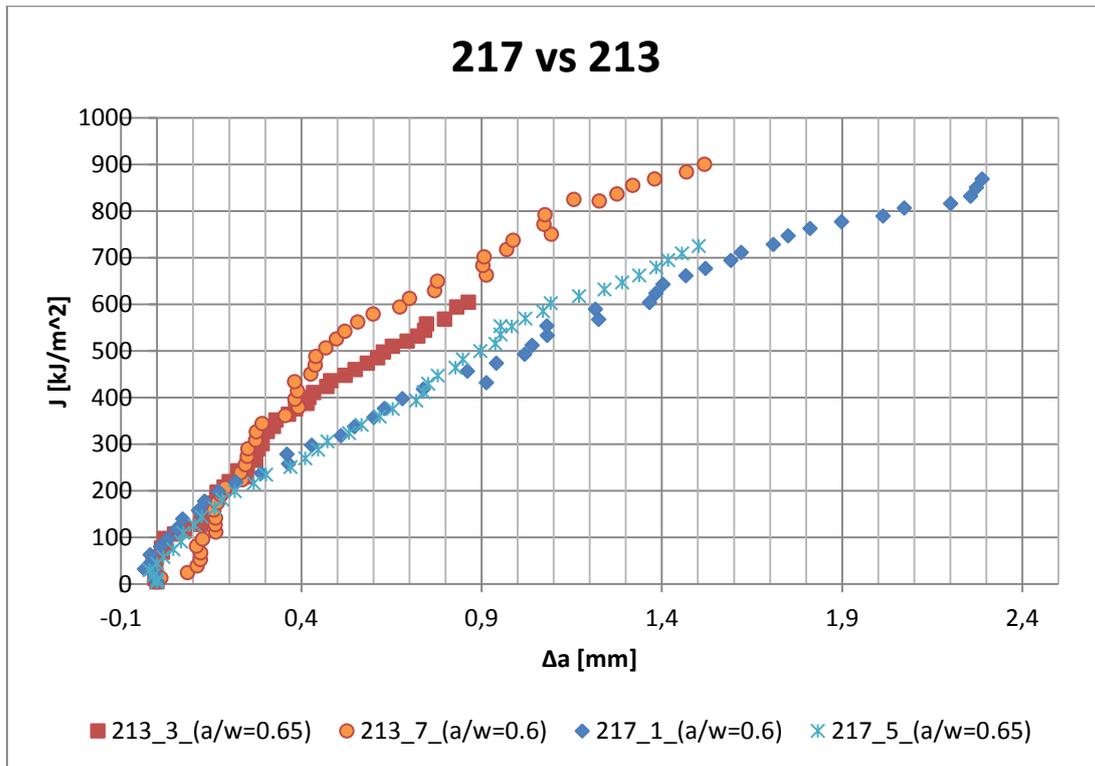


Figura 70 - Comparação entre as amostras 213 e 217

Sobrepondo dois exemplares de cada amostra (217 e 213) no mesmo gráfico, é possível observar o diferente comportamento à fractura de cada uma das respectivas amostras. A amostra 213 apresenta maior resistência à fractura (maior energia requerida para a mesma propagação de fenda). Esta diferença é uma vez mais explicada pela diferença da estrutura microscópica de cada uma das amostras, em que a amostra baseada em martensite (a 217) apresenta menor resistência à fractura que a de ferrite e perlite (a 213).

5.3 Medição óptica e previsão do tamanho de fenda

A norma requer a verificação da uniformidade da frente de fenda de fadiga e da fenda dúctil, e também a verificação da previsão dos comprimentos de fenda, obtidos através de métodos indirectos. Estas verificações são efectuadas pelos pontos 9.1.4.1, 9.1.4.2, 9.1.5.1 e 9.1.5.2 da norma. A Tabela 18 contém o resumo das verificações efectuadas à amostra 217. Na **Erro! A origem da referência não foi encontrada.** está representada o erro relativo da previsão dos comprimentos de fenda através do método da “*elastic compliance*”.

Tabela 18 - Verificação da medição directa e indirecta do comprimento de fenda - Amostra 217

Provete	Medição óptica (uniformidade de frente de fenda)			Erro da Previsão (%)			9.1.5.2 (Equação 63 e 64)
	9.1.4.1 (Equação 60)	9.1.4.2 (Equação 61)	9.1.5.1 (Equação 62)	a0	af	Δa	
1	Cumpre	Não cumpre	Não cumpre	0,64	7,16	43,25	Não cumpre
2	Cumpre	Não cumpre	Não cumpre	1,01	7,22	39,49	Não cumpre
3	Cumpre	Não cumpre	Não cumpre	1,01	9,25	45,43	Não cumpre
4	Cumpre	Não cumpre	Não cumpre	0,26	4,719	40,27	Não cumpre
5	Cumpre	Não cumpre	Não cumpre	0,08	3,79	41,69	Não cumpre
8	Cumpre	Não cumpre	Não cumpre	0,11	5,15	41,69	Não cumpre

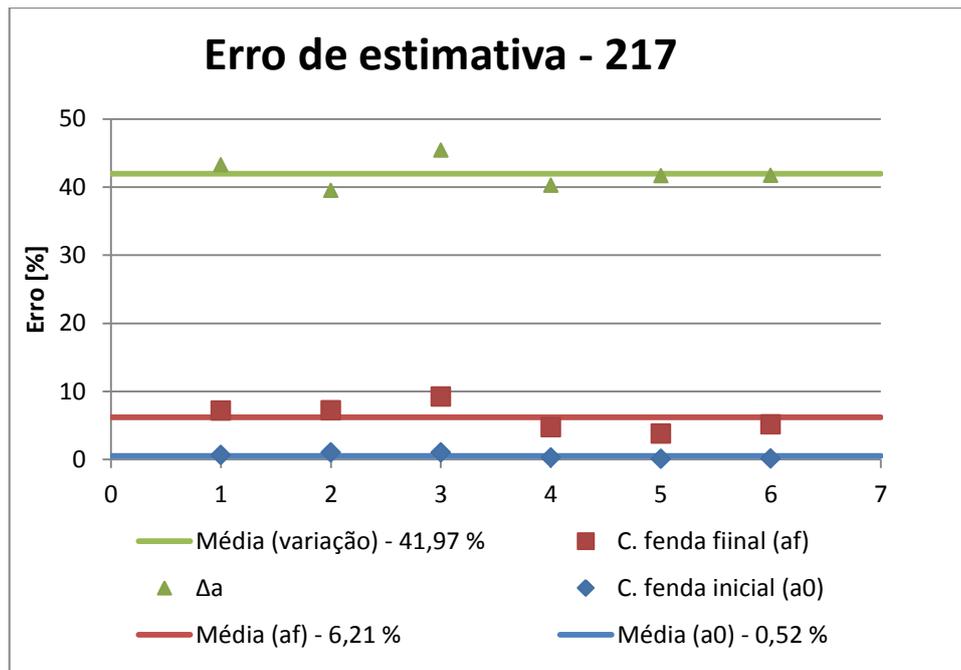


Figura 71 - Erro da previsão - Amostra 217

Através da análise da Tabela 18 é possível constatar que todas as superfícies de fractura da amostra 217 originaram frentes de fenda por fadiga uniformes e dentro dos requisitos normativos. No entanto, as frentes de fenda dúctil não cumpriram esses mesmos requisitos, o que significa, que as curvas obtidas não podem ser consideradas como representativas do estado de deformação plana. A não uniformidade da frente dúctil de fenda está relacionada com o chamado efeito de Túnel (“*Tunneling effect*”) e a formação dos lábios de corte ou “*shearlips*”.

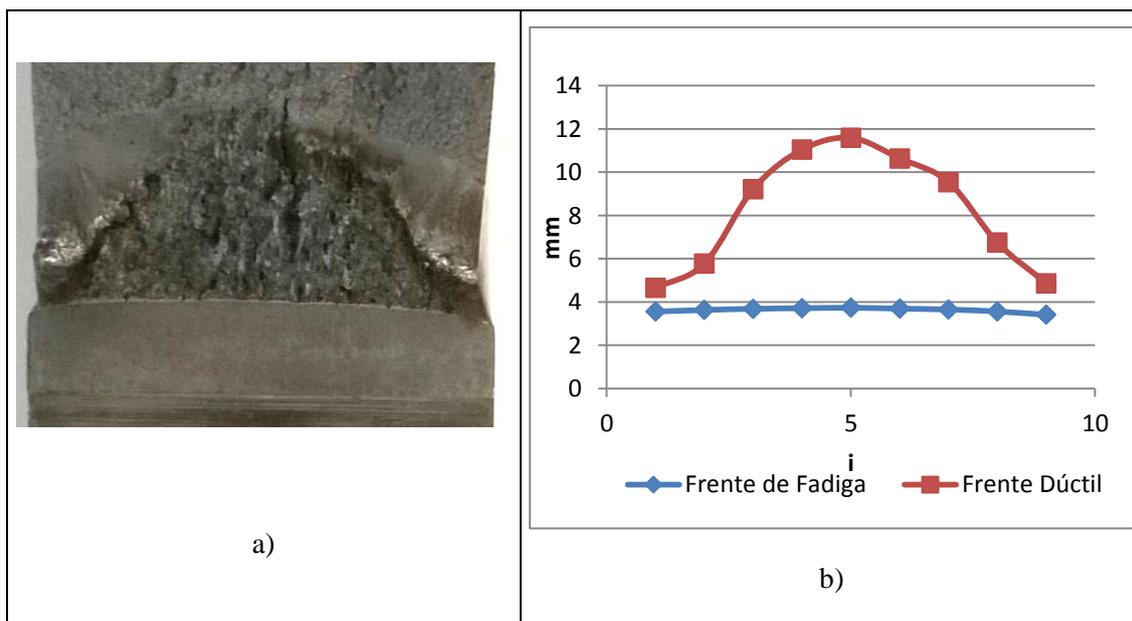


Figura 72 - Frente de fenda sujeita a “*Tunneling effect*” (a) e b) medição dos pontos de contorno das respectivas frentes de fenda.

Na Figura 72 está representada, em a), uma fotografia da superfície de fractura de um dos provetes da amostra 217 com a respectiva medição de nove pontos., em b). O efeito túnel ocorre devido à condição de baixa triaxialidade, encontrada junto às superfícies livres do provete, tendo zona plástica de maior dimensão [17], sendo, por isso, uma zona de maior resistência à fractura. Devido a este factor, a fenda tende a propagar com mais intensidade no interior, onde a resistência é menor, provocando uma frente de fenda arqueada.

A previsão dada através do método da “*elastic compliance*” perde precisão com a ocorrência deste fenómeno, pois as equações que computam a rigidez do descarregamento em comprimento de fenda, foram desenvolvidas tendo em conta uma perda de rigidez provocada por uma fenda uniforme ao longo da espessura do provete. Isto é observável através da diferença entre o erro relativo da previsão da *compliance* do comprimento de fenda inicial e final, no primeiro caso. o erro máximo verificado foi de 1,01%, enquanto que no segundo caso, o mesmo ascende aos 9,25%. Este factor afecta muito o erro no comprimento de fenda final e consequentemente erro na previsão da extensão de fenda (Δa). Na Tabela 19 apresenta-se um resumo da verificação das superfícies de fractura da amostra 213 e da respectiva previsão.

Tabela 19 - Verificação da medição directa e indirecta do comprimento de fenda - Amostra 213

Provete	Medição óptica (uniformidade de frente de fenda)			Erro da Previsão(%)			9.1.5.2 (Equação 63 ou 64)
	9.1.4.1 (Equação 60)	9.1.4.2 (Equação 61)	9.1.5.1 (Equação 62)	a0	af	Δa	
3	Cumpre	Não cumpre	Não cumpre	3,62	5,95	44,07	Não cumpre
4	Cumpre	Não cumpre	Não cumpre	3,75	7,7	45,18	Não cumpre
5	Cumpre	Não cumpre	Não cumpre	5,14	9,16	40,58	Não cumpre
7	Cumpre	Não cumpre	Não cumpre	4,12	7,31	37,95	Não cumpre

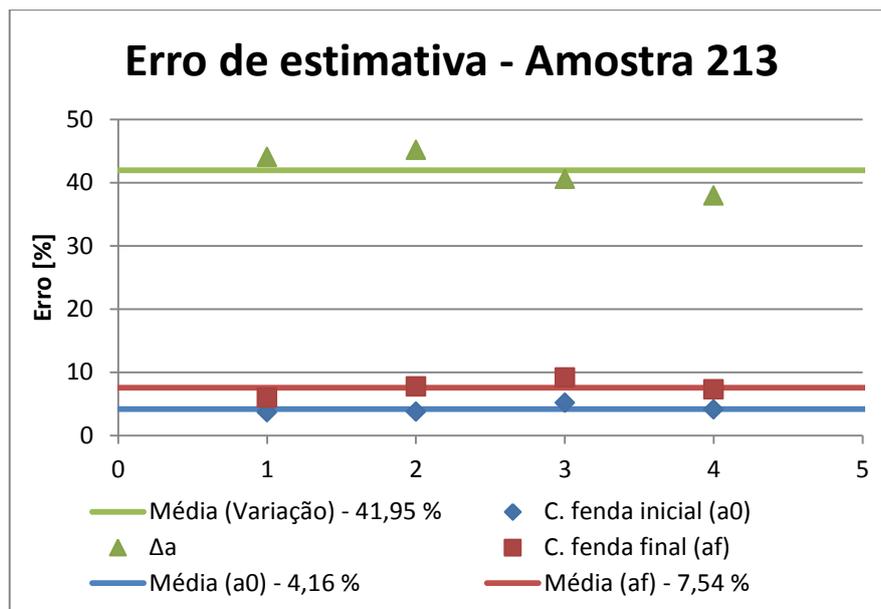


Figura 73 - Erro da previsão - amostra 213

Á semelhança do que aconteceu com a amostra 217, os provetes desta amostra desenvolveram também “*crack tunneling*” o que induziu erro na previsão e a aceitação através dos requisitos normativos. Apenas referir que desta vez se verificou um maior erro na previsão do comprimento de fenda inicial (em média 4,16 %).

Na Tabela 20 está resumida a aptidão de cada um dos provetes utilizados para o método de normalização.

Tabela 20 - Verificação da aplicabilidade do método de normalização - Amostras 217 e 213

Amostra	Medição óptica (uniformidade de frente de fenda)			Δa (mm)	Aptidão para o método de normalização
	9.1.4.1	9.1.4.2	9.1.5.1		15.2.1 ($\Delta a < 4\text{mm}$ ou $\Delta a < 15\% b_0$)
213_1	Cumpre	Não cumpre	Não cumpre	2	Não cumpre
213_6	Cumpre	Não cumpre	Não cumpre	2,84	Não cumpre
217_6	Cumpre	Não cumpre	Não cumpre	2,56	Não cumpre
217_7	Cumpre	Não cumpre	Não cumpre	4,03	Não cumpre

A semelhança do que aconteceu com os provetes do método de curva de resistência, a frente de fenda dúctil não se desenvolveu de modo uniforme falhando a aceitação nos

pontos 9.1.4.2 e 9.1.5.1 . O tamanho de fenda dúctil desenvolvido durante o ensaio também excedeu os limites da norma para que fosse aceitável ser usado o método de normalização. No entanto, apesar deste facto foram obtidas as curvas de resistência a partir do mesmo com fim puramente académico.

5.4 J_Q - Valor de iniciação à fractura.

Uma vez que as curvas não representam a resistência à fractura do material no estado de deformação plana, o valor de iniciação à fractura retirado através da aplicação do anexo A9, da norma, não pode ser considerado como J_{IC} , mas sim como um valor dependente da espessura J_Q .

Na Figura 74 está representada a comparação dos valores de J_Q entre o método de curva de resistência e método de normalização. Na Figura 75 está representada a influência do comprimento de fenda relativo na amostra 217.

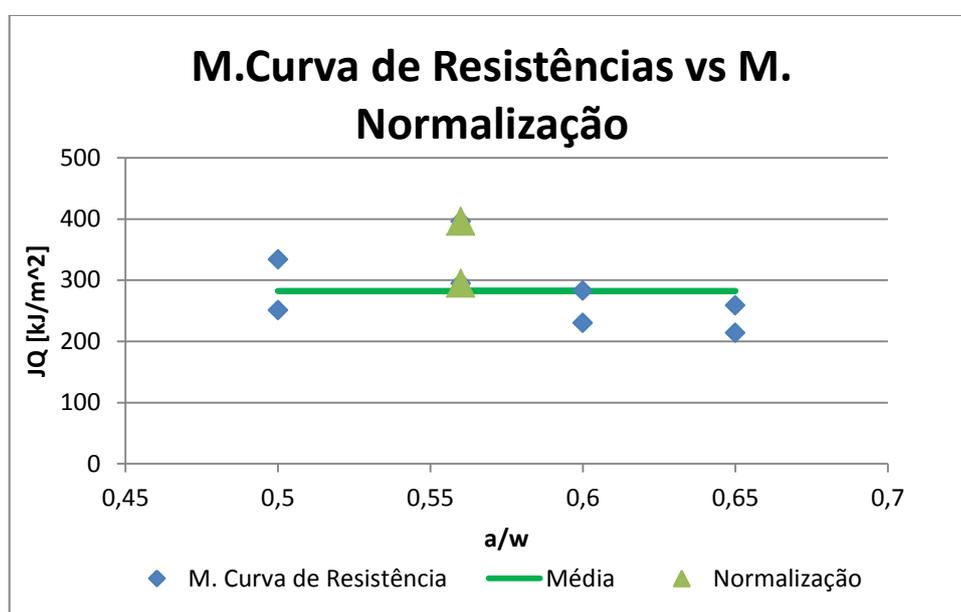


Figura 74 - J_Q M. Curva de Resistência vs M normalização - Amostra 217

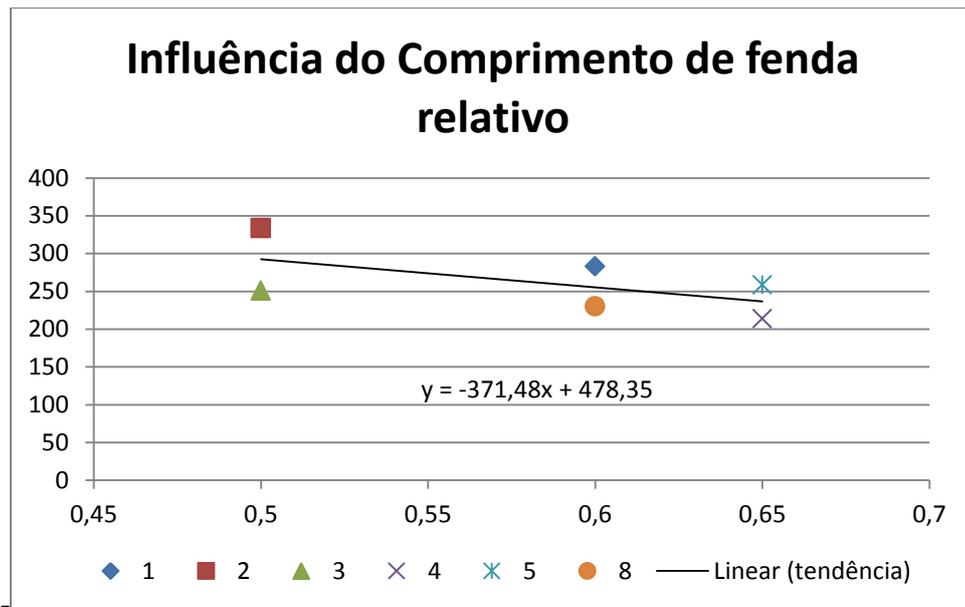


Figura 75 - J_Q Influência do comprimento de fenda relativo - Amostra 217

É possível observar que existe alguma dispersão nos valores de J_Q tanto no método de curva de resistência como no método de normalização. A dispersão apresentada entre os dois valores correspondentes ao método de normalização é justificada pelo diferente comportamento que apresentaram em termos de curva de resistência. No método de curva de resistência a dispersão tende a diminuir com o aumento da fenda relativa assim como também o valor do J_q .

Nas Figura 76 e Figura 77 estão representadas comparações anteriores mas para a amostra 213.

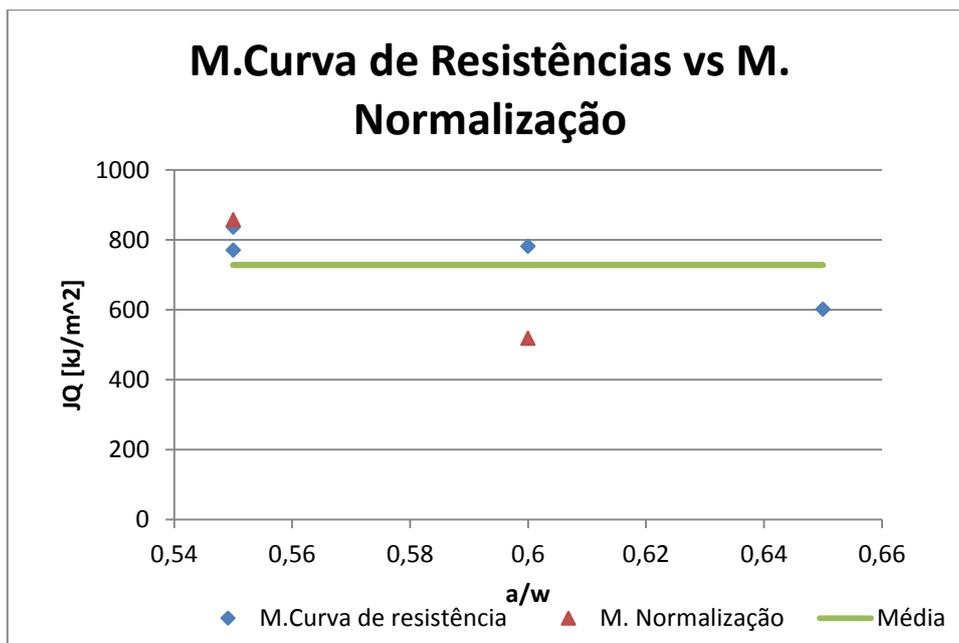


Figura 76 - JQ M. Curva de Resistência vs M. Normalização - Amostra 213

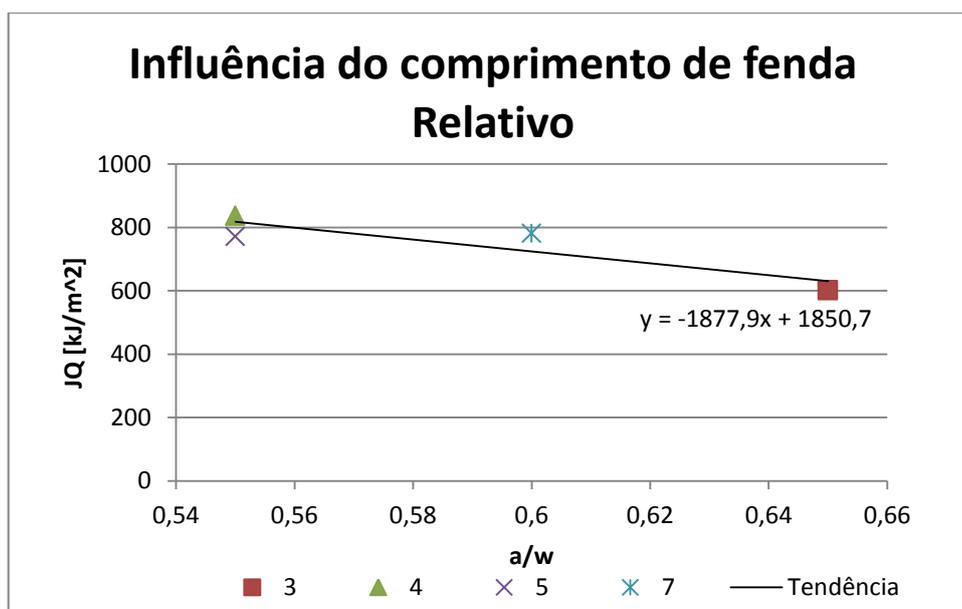


Figura 77 - JQ: Influência do comprimento de fenda relativo - Amostra 213

No caso da amostra 213 existe bastante menos dispersão, no que diz respeito ao comprimento de fenda relativo de 0,55, tanto para os valores do método de curva de resistência assim como para o método de normalização. O mesmo não se verificou para o comprimento de fenda relativo de 0,6 onde a diferença entre o método de normalização já parece ser significativa. Em relação à tendência decrescente com o aumento do comprimento de fenda também se verifica nesta amostra. Se compararmos a evolução do JQ de cada um dos materiais, observa-se que na amostra 217 a tendência decrescente é

menos acentuada em comparação com a 213. Isto pode significar que as condições encontradas na amostra 217 se encontram mais próximas do estado de deformação plana.

6 Conclusões

Pela verificação efectuada através das superfícies de fractura, as curvas de resistência obtidas não são representativas de um estado de deformação plana. Isto acontece mesmo quando foram cumpridas todos os requisitos iniciais para que fosse possível obter esse mesmo estado. O que significa que *à priori* não é possível determinar ou não a validade do ensaio. No entanto, as curvas obtidas não são desprovidas de significado. Estas curvas representam a resistência à fractura real do material metálico ensaiado. Esta resistência é a soma da resistência do material que está sujeito a um estado de deformação plana no interior do provete, com a resistência do material junto as superfícies livres onde este se encontra num estado entre a deformação plana e a tensão plana. Apesar destas curvas não poderem ser utilizadas para determinação da propriedade J_{IC} , estas podem ser utilizadas como método de comparação entre materiais.

É necessário referir que mesmo quando os ensaios são efectuados sob condições de deformação plana, também se encontra alguma dispersão. No trabalho de Zhu e Joyce (2007) [45], curvas com comprimento de fenda dentro do intervalo normativo não apresentaram coincidência perfeita.. Esta dispersão, contudo, poderá ser considerada pouco relevante, pois parece ser idêntica à encontrada no trabalho de Park e Gravel (2015) [49], onde as curvas com o mesmo comprimento relativo de fenda não também não apresentam coincidência.

A frente de fenda dúctil, obtida durante a realização do ensaio, não se desenvolveu de forma uniforme, devido a elevada plasticidade junto as superfícies livres do provetes (onde é necessário dispendir mais energia para a fenda propagar). A fenda apresentou o fenómeno designado de *tunneling effect* (ou *crack tunneling*) (efeito túnel) afectando severamente a previsão através do método da *elastic compliance*. A possível solução é, após a prefissuração do provete, efectuar os rasgos laterais ou “*sidegrooves*” para minimizar ou eliminar o efeito de túnel (uma vez que que está a ser retirado o material que não está sujeito a um estado de deformação plana e também concentra as tensões ao longo do ligamento garantindo que a fenda cresce sempre num estado triaxial de tensões). No entanto a utilização desta técnica não significa que a frente de fenda se propage de forma uniforme e cumpra os requisitos da norma, como se verifica nos ensaios efectuados por Lott (2004) [50] em provetes C(T) com *sidegrooves* em que as fendas dúcteis obtidas, não

conseguiram cumprir os requisitos normativos relativos ao comprimento final de fenda (ponto 9.4.1.2).

Foi possível verificar que os provetes com menor comprimento de fenda relativo, mais próximo do limite inferior da norma, apresentaram maior efeito de túnel, também se ter verificado a situação inversa para os comprimentos relativos de fenda mais próximos do limite superior.

O ensaio desenvolvido para efectuar o método de curva de resistência possui limitações que o impedem de cumprir plenamente o procedimento descrito na norma. No entanto, quando observando os ensaios de Lott (2004) [50] obtidos através de software comercial (*Instron J_{IC} Unloading compliance software*, desenvolvido de acordo com ASTM E 813), Minnebruggen et al (2011) [51] e Prakash (2015) [52], verifica-se que os ensaios efectuados também não cumprem todos os pontos do procedimento da ASTM E1820. Isto demonstra a dificuldade em se obter um ensaio perfeitamente de acordo com o procedimento normativo.

Os resultados obtidos através do método de normalização não podem ser considerados válidos, pois a frente de fenda dúctil desenvolvida não cumpre os requisitos normativos. No entanto, as curvas obtidas através deste método, aproximam-se das obtidas através do método de curva de resistência. O método de normalização apesar, de experimentalmente ser mais simples de executar, possui um o processamento de dados mais complexo. É importante referir também, que a norma não especifica se o comprimento de fenda a utilizar para a obtenção da curva “R” é o real ou corrigido (a_{b_i}). Contudo, os melhores resultados foram obtidos utilizando este último.

A validade dos resultados obtidos pelo método de curva de resistência e de normalização apenas pode ser comprovada após a elaboração do ensaio, o que se torna inconveniente do ponto de vista experimental, pois muitas vezes corre-se o risco de elaborar o ensaio e este ser considerado “inválido” segundo os requisitos normativos. Para se minimizar este inconveniente muitas vezes a elaboração de *sidegrooves* poderá ser suficiente, no entanto, esta solução não garante a validade dos resultados.

6.1 Sugestões para estudos posteriores

Os estudos que poderão ser desenvolvidos posteriormente, podem recair sobre a obtenção da curva de resistência em condições de baixo constrangimento, recorrendo à ASTM E 2472. Uma vez que é a situação de constrangimento mais habitual em tubos e estruturas. Ainda relacionado com a ASTM E 1820 poderá ser abordada a temática da dispersão de dados na obtenção das curvas de resistência e valores de iniciação à fractura J_{IC} , à semelhança dos estudos efectuados por Chen (1997) [53] para os valores de K_{IC} .

Outra área que pode ser abordada é a obtenção da curva de resistência em provetes não normalizados, à semelhança dos estudos efectuados por Bergant et al (2016) e em provetes de dimensão reduzida, em analogia aos estudos efectuados por Holzman e Valka (1993) [54] onde foram obtidas curvas de resistência em provetes com as dimensões idênticas as utilizada no ensaio de impacto (10x10 mm).

Uma outra opção interessante de estudo, é a verificação e aplicação dos estudos de Pherson e Landes (2007) [24] sobre a obtenção do J_{IC} directamente do diagrama de força vs deslocamento.

Um tópico que poderá ser igualmente abordado, é a possibilidade da correcção dos valores do comprimento de fenda, obtidos através do método de *elastic compliance*, quando afectados pelo efeito de túnel.

Ainda sobre a obtenção do comprimento de fenda, também deveria ser estudada a possibilidade de ser aplicado o método das secantes descrito na ASTM E 561 [36], como método alternativo ao método da *elastic compliance*.

Poderá também ser efectuado um estudo sobre aplicação do conceito do integral J como ferramenta para a análise estrutural. Assim como, a tentativa de obtenção da curva de resistência através de métodos de elementos finitos. Tendo em conta os problemas assinalados por Broek (1986) [9] nestes dois temas, e verificar se já foram encontrados soluções para os mesmos.

7 Bibliografia

- [1] T. M. Osman e J. D. Rigney, “ASM Handbook - Vol 8 - Mechanical Testing and Evaluation,” A. S. M. International, Ed., ASM International, 2000, pp. 20-21.
- [2] C. Q. Bowles, “ASM Handbook - Vol 19 - Fatigue and Fracture,” A. S. M. International, Ed., ASM International, 2000, p. 13 to 19.
- [3] C. K. R. C. U.Zerbest, “Fracture Mechanics as a tool in failure analysis - Prospects and limitations,” *Engineering Failure Analysis*, pp. 376-410, 2015.
- [4] T. L. Anderson, *Fracture Mechanics Fundamental and Applications*, 2nd ed., CRC PRESS, 1995.
- [5] B. Cotterel, “The past,present, and the future of fracture mechanics,” *Engineering Fracture Mechanics*, pp. 533-553, 2002.
- [6] B. N. Leis, “The Charpy impact test and its applications,” *Journal of Pipeline Engineering*, vol. 12, pp. 183-198, September 2013.
- [7] W. F. Smith, *Princípios De Ciência e Engenharia Dos Materiais*, 2nd ed., McGraw-Hill, 1998.
- [8] D. Roylance, *Mechanics of Materials*, Jhon Wiley and Sons,Inc, 1996.
- [9] D. Broek, *Elementary Engineering Fracture Mechanics*, 4th ed., Kluwer Academic Publishers, 1986.
- [10] C. E. Inglis, *Stress in a plate due to the presence of cracks and sharp corners*, 1913.
- [11] D. Radaj, “State-of-the-art review on extended stress intensity factor concept,” *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, 2013.
- [12] J. Z. R. J. H. W. M. Janssen, *Fracture Mechanics*, 2nd ed., Dup Blue Print, 2002.

- [13] C. A. G. D. M. Branco, *Mecânica dos Materiais*, 5th ed., Fundação Caloust Gulbenkian, 2011.
- [14] A. A. F. P. M. S. T. D. C. Carlos A.G. De Moura Branco, *Fadiga De Estruturas Soldadas*, 2ª ed., Fundação Caloust Gulbenkian, 1999.
- [15] A. P. J. G. W. D. R. Moore, *Fracture Mechanics Testing Method for Polymers, Adhesives and Composites*, 1st ed., Elsevier Science, 2001.
- [16] P. C. P. G. R. I. Hiroshi Tada, *The Stress Analysis of Crack Handbook*, 3rd ed., The American Society of Mechanical Engineers, 2000.
- [17] T. L. Anderson, *Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications*, 3rd ed., Taylor & Francis, 2005.
- [18] *E 399- 05 Standard Test method for Linear-Elastic Plane-Strain Fracture Toughness K_{ic} of Metallic Materials*, 2005.
- [19] N. E. Dowling, *Mechanical Behaviour of Materials: Engineering method for deformation, fracture and fatigue*, 2nd ed., Prentice Hall, 1998.
- [20] Y. K. M. O. T. H. T. K. Y. Y. K. T. H. Y. S. A. Y. H. Tetsuya Tagawa, “Comparison of CTOD standards : BS 7448-Part 1 and revised ASTM E 1290,” *Engineering Fracture Mechanics*, pp. 327-336, 2008.
- [21] H. P. Philipa Moore, “CTOD and pipelines: the past, present, and future,” *Journal of Pipeline Engineering*, 2013.
- [22] J. R. Rice, “A path Independent Integral and the Approximate Analysis of Stress Strain Concentration by Noches and Cracks,” *Journal of Applied Mechanics*, vol. 35, pp. 379-386, 1968.
- [23] R. S. F. D. F. O. Kolendnik, “A new view on J-integrals in elastic-plastic materials,” *International Journal of Fracture*, 2014.
- [24] J. D. L. B. P. Pherson, “A direct estimate of J_{ic} from the load versus load-line

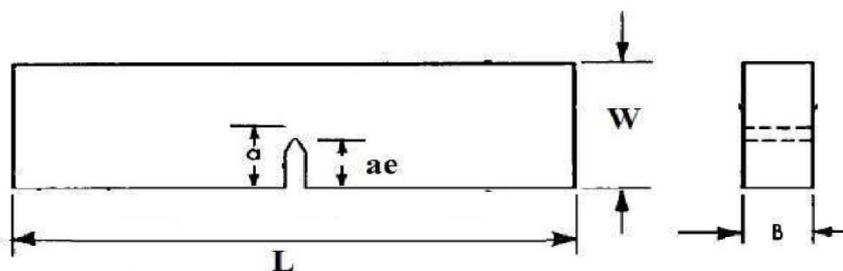
- displacement record,” *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 2007.
- [25] J. A. J. Xian-Kui Zhu, “Review of fracture toughness (G,K,J,CTOD,CTOA) testing and standardization,” *Engineering Fracture Mechanics*, pp. 1-46, 2012.
- [26] J. D. Landes, “ASM Handbook - Vol 19 - Fatigue and Fracture,” vol. 19, ASM International, 2000, pp. 963-980.
- [27] F. Erdogan, “Fracture mechanics,” *International Journal of Solids and Structures*, pp. 171-183, 2000.
- [28] J. H. K. H. Shwalbe, “R-curve testing and its relevance to structural assessment,” *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, pp. 1259-1271, 1999.
- [29] A. Saxena, *Nonlinear Fracture Mechanics for Engineers*, CRC PRESS, 1998.
- [30] D. W. Zhou, “Measurement and modelling of R-curves for Low-Constraint specimens,” *Engineering Fracture Mechanics*, pp. 605-622, 2011.
- [31] J. C. N. J. J. L. S. J. Karl-Heinz. Schwalbe, “Fracture mechanics testing on specimens with low constraint - standardisation activities within ISO and ASTM,” *Engineering Fracture Mechanics*, pp. 557-576, 2005.
- [32] J. H. C. J. C. A. B. D. S. D. J. C. Newman Jr, *Variations of a Global Constraint Factor in CrCrack Bodies Under Tension and Bending Loads*, 1994.
- [33] X.-K. Zhu, “Review of fracture toughness test methods for ductile materials in low-constraint conditions,” *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, pp. 173-183, 2016.
- [34] *E 2472-12 Standard Test Method for Determination of Resistance to Stable Crack Extension under Low-Constraint Conditions*, 2012.
- [35] Y. J. Chao e X. K. Zhu, “Constraint-modified J-R curves and its application to ductile crack growth,” *International Journal of Fracture*, pp. 135-160, 2000.

- [36] *E 561-98 Standard Practice for R-curve Determination*, 1998.
- [37] X.-K. Zhu, "Fracture-toughness (K_I) testing, evaluation, and standardization," *Journal of Pipeline Engineering*, vol. 12, pp. 145-153, September 2013.
- [38] P. A. I. S. Wolfgang Brocks, "Ductile tearing resistance of metal sheets," *Engineering Failure Analysis*, pp. 607-616, 2010.
- [39] X.-K. Zhu, "J-integral resistance curve testing and evaluation," *Journal of Zhejiang University. Science A*, pp. 1541-1560, 2009.
- [40] *E1820-13 Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness*, 2013.
- [41] J. D. L. J. H. K. H. Shwalbe, "Comprehensive Structural integrity, Online update Fracture of Materials from Nano to Macro," R. R. B. K. Milne, Ed., Elsevier Science, 2007, pp. 3-42.
- [42] J. a. M. G. Barralis, *Prontuário de metalurgia - Elaboração, Estrutura-Propriedades e Normalização*, 3 edição ed., F. C. Gulbenkian, Ed., Fundação Caloust Gulbenkian, 1997.
- [43] "ESIS Procedure for Determining the Fracture Behaviour of Materials ESIS P2-92," 1992.
- [44] M. a. P. H. a. M. P. Nowak-Coventry, "The effect of fatigue pre-cracking forces on fracture toughness.," *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, pp. 135-148, 2016.
- [45] X.-K. a. J. J. A. Zhu, "J-Resistance curve testing of HY80 steel using SE(B) specimens and normalization method," *Engineering Fracture Mechanics*, pp. 2263-2281, 2007.
- [46] J. a. V. H.-W. Dzigan, "Application of the normalization method for the determination of J-R curves," *Materials Science and Engineering A*, pp. 307-311, 2004.

- [47] C. a. C. L. a. S. K. a. D. C. a. Y. Y. Bao, "Improved Normalization method for determination based on dimensionless load separation principle," *Acta Mechanica Sinica*, vol. 28, #sep# 2015.
- [48] J. R. a. S. D. Tarpani, "J-R CURVE FIT METHODS AFFECTING STRUCTURAL INTEGRITY ASSEMENT," em *Jornadas SAM 2000 - IV Coloquio Latinoamericano de Fractura y Fadiga*, 2000.
- [49] D. Y. a. G. J. P. Park, "Fracture toughness mmeasurment using two single notched bend test methods in a single specimen," *Engineering Fracture Mechanics*, 2015.
- [50] R. Lott, "Fracture Toughness Testing of Compact Tension Specimens from Watts Bar Unit 1 Surveillance Capsule X," 2004.
- [51] K. V. a. P. D. V. a. W. W. D. a. V. M. a. H. S. a. D. R. Minnebruggen, "Implementation of unloading compliance procedure for measurment of crack growth in pipeline steel," *Sustainable Construction and Design 2011*, 2011.
- [52] R. V. Prakash, "Limitation of unloading compliance method to correlate with physical crack size during single specimen J-integral testing," *ecf15*, 2015.
- [53] J. H. Chen e G. Z. Wang, "On scattering of measured values of fracture toughness parameters.," *International Journal of Fracture*, vol. 94, pp. 33-49, 1998.
- [54] M. a. M. J. Holzman e L. Válka, "J-R curves and fracture toughness transition behaviour at static, rapid and impact loading of Cr-Ni-Mo-V reactor pressure vessel steel," em *Structural Mechanics in Reactor Technology*, 1993.

8 Anexos

8.1 Anexo A – Lista de provetes originais

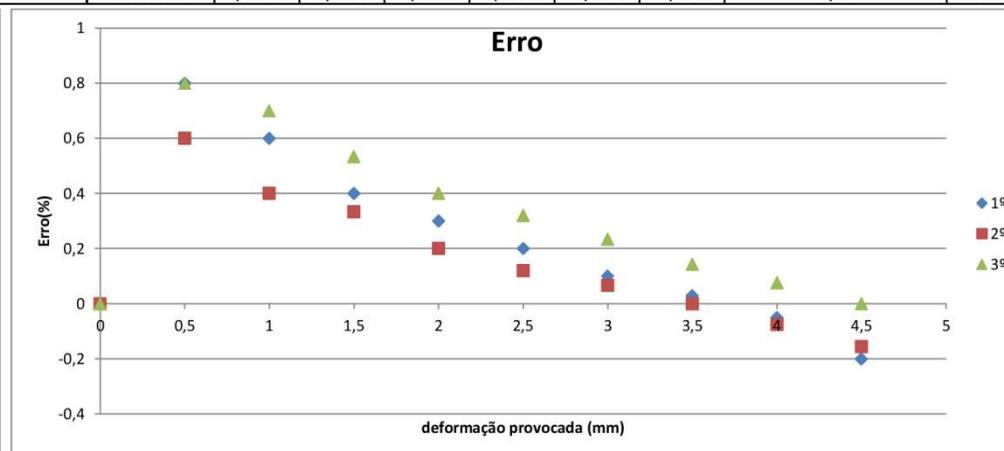
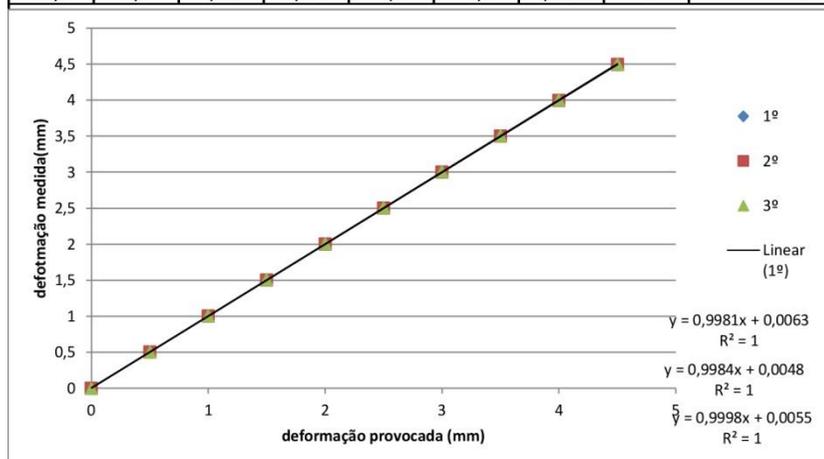


Referência	L [mm]	W [mm]	B [mm]	ae [mm]	Anotações
5.2	145,44	27	13,57	11,41	Entalhe não centrado
5.6	145,39	27,02	13,51	11,04	Entalhe não centrado
5.7	145,67	27,22	13,64	11,03	Entalhe não centrado
5.9	145	26,99	13,48	11,24	Entalhe não centrado
218	150	29,06	14,5	11,61	Entalhado
218	151	29,13	14,52	11,61	Entalhado
206 CO DBL	140,04	27,94	14,05	11,4	fissurado
206 COD BL	140	28,16	14	12,13	Entalhado
207 COD BL	205	42,02	21,31	18,36	Entalhado
209 BL COC	348	74,13	37,1	34,8	Entalhado
209 BL COD	348	73,78	37,08	35,25	Entalhado
209 BL COD	343	74,06	37,06	35,05	Entalhado
209 BL COD	343	73,96	37,13	34,5	Entalhado
209 BL COD	349	74,13	37,02	35,14	Entalhado
209 BL COD	344	73,92	37,14	34,81	Entalhado
209 BL COD	348	73,97	37,13	34,37	Entalhado
209 BL COD	347	74,05	37,15	35,81	Entalhado
209 BL COD	345	73,97	37,06	34,39	Entalhado
209 BL COD	347	74,18	36,99	34,77	Entalhado
211 CBL	140	28,02	13,93	11,03	Entalhado
213 CBL	179	36,93	18,57	16,23	Entalhado
213 CBL	180	37,07	18,65	15,87	Entalhado
213 CBL	180	37,34	18,55	15,45	Entalhado
213 CBL	179	37,12	18,52	16,12	Entalhado
213 CBL	180	37,04	18,42	15,46	Entalhado
213 CBL	180	36,96	18,44	16,24	Entalhado
213 CBL	180	36,99	18,48	16,27	Entalhado
214 CBL	330	65,27	32,53	28,85	Entalhado
214 CBL	330	65,07	32,41	28,53	Entalhado
214 CBL	329	65,19	32,53	27,97	Entalhado
214 CBL	331	65,26	32,5	28,27	Entalhado
214 CBL	332	65,05	32,52	27,37	Entalhado
214 CBL	338	65,25	32,56	28,18	Entalhado
214 CBL	330	65,3	32,55	28,48	Entalhado
214 CBL	337	65,11	32,45	28,33	Entalhado
214 CBL	332	62,28	32,56	28,35	Entalhado
214 CBL	337	65,16	32,55	28,1	Entalhado
215 CBL	328	72,05	36,01	31,89	Entalhado
215 CBL	330	72,11	36,16	30,75	Entalhado

215 CBL	330	71,97	36,02	31,42	Entalhado
215 CBL	331	72,04	36,02	31,6	Entalhado
215 CBL	328	72,11	36,02	31,56	Entalhado
215 CBL	339	72,02	36,13	31,52	Entalhado
217 CBL	195	37,1	18,59	15,73	Entalhado
217 CBL	195	37,09	18,67	15,94	Entalhado
217 CBL	195	37,08	18,65	15,96	Entalhado
217 CBL	198	37,07	18,62	15,7	Entalhado
217 CBL	193	36,87	18,57	16,21	Entalhado
217 CBL	196	37,16	18,82	16,07	Entalhado
217 CBL	194	37,14	18,58	15,9	Entalhado
217 CBL	199	37,07	18,53	16,03	Entalhado
7 COD 1	183	35,93	18,03	0	Não entalhado
7 COD 11	205	36,25	18,14	0	Não entalhado
7 COD 12	205	36,3	18,15	0	Não entalhado
7 COD 2	183	36,34	18,11	0	Não entalhado
7 COD 5	185	35,98	18,83	0	Não entalhado
SEM REF	208	47,03	23,65	20,15	Entalhado e sem referência

8.2 Anexo B – Verificação do extensómetro

Medições					Erro				Verificações								
Dispositivo	Acausada	1º	2º	3º	1º	2º	3º	Δ(%) permitida ASTM 1820	Status	eq_tend1	eq_tend2	eq_tend3	Δeq-1	Δeq-2	Δeq-3	Δeq permitida ASTM 1820	Status
10	0	0	0	0	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	1		0,0063	0,0048	0,0055				0,08	
10,5	0,5	0,504	0,503	0,504	0,8	0,6	0,8	1	Conforme	0,50535	0,504	0,5054	-0,00135	-0,001	-0,0014	0,08	Conforme
11	1	1,006	1,004	1,007	0,6	0,4	0,7	1	Conforme	1,0044	1,0032	1,0053	0,0016	0,0008	0,0017	0,08	Conforme
11,5	1,5	1,506	1,505	1,508	0,4	0,333333	0,533333	1	Conforme	1,50345	1,5024	1,5052	0,00255	0,0026	0,0028	0,08	Conforme
12	2	2,006	2,004	2,008	0,3	0,2	0,4	1	Conforme	2,0025	2,0016	2,0051	0,0035	0,0024	0,0029	0,08	Conforme
12,5	2,5	2,505	2,503	2,508	0,2	0,12	0,32	1	Conforme	2,50155	2,5008	2,505	0,00345	0,0022	0,003	0,08	Conforme
13	3	3,003	3,002	3,007	0,1	0,066667	0,233333	1	Conforme	3,0006	3	3,0049	0,0024	0,002	0,0021	0,08	Conforme
13,5	3,5	3,501	3,5	3,505	0,028571	0	0,142857	1	Conforme	3,49965	3,4992	3,5048	0,00135	0,0008	0,0002	0,08	Conforme
14	4	3,998	3,997	4,003	-0,05	-0,075	0,075	1	Conforme	3,9987	3,9984	4,0047	-0,0007	-0,0014	-0,0017	0,08	Conforme
14,5	4,5	4,491	4,493	4,5	-0,2	-0,15556	0	1	Conforme	4,49775	4,4976	4,5046	-0,00675	-0,0046	-0,0046	0,08	Conforme



8.3 Anexo C – Registo da pré-fissuração

Planeamento_213_1																					
L [mm]	W [mm]	B [mm]	BN [mm]	ae [mm]	aff [mm]	a0 [mm]	b0	S [mm]	a/w	Pm [N]	(f ₀ /w)	Kmax_1 [MPa.m ^{1/2}]	K_imposto [MPam ^{1/2}]	Força resultante [N]	Força imposta [N]	K resultante [MPam ^{1/2}]	Fmin [N]	ΔF [N]	Fmédio [N]	kmin [MPa.m ^{0,5}]	ΔK [MPa.m ^{0,5}]
180,24	37,07	18,45	18,45	15,663	0	15,663	21,407	148,28	0,422525	13799,21	2,110963	23,8	23	9675,980221	7500	17,82765116	750	6750	4125	1,782765116	16,0488604
180,24	37,07	18,45	18,45	15,663	0,5	16,163	20,907	148,28	0,46013	13162,13	2,194123	23,8	23	9309,247544	7500	18,52996365	750	6750	4125	1,852996365	16,67696549
180,24	37,07	18,45	18,45	15,663	1	16,663	20,407	148,28	0,448501	12540,1	2,28212	23,8	23	8950,290051	7500	19,27311841	750	6750	4125	1,927311841	17,34580657
180,24	37,07	18,45	18,45	15,663	1,5	17,163	19,907	148,28	0,462989	11933,13	2,375386	23,8	23	8598,868102	7500	20,06077986	750	6750	4125	2,006077986	18,05470187
180,24	37,07	18,45	18,45	15,663	2	17,663	19,407	148,28	0,476477	11341,21	2,474405	23,8	23	8254,766638	7500	20,89701715	750	6750	4125	2,089701715	18,80731543
180,24	37,07	18,45	18,45	15,663	2,5	18,163	18,907	148,28	0,489965	10764,35	2,579713	23,8	23	7917,791182	7500	21,78637906	750	6750	4125	2,178637906	19,60774115
180,24	37,07	18,45	18,45	15,663	3	18,663	18,407	148,28	0,509353	10202,55	2,691917	23,8	23	7587,764772	7500	22,7339678	750	6750	4125	2,27339678	20,46057102
180,24	37,07	18,45	18,45	15,663	3,5	19,163	17,907	148,28	0,516941	9655,801	2,811695	23,8	23	7264,525656	5000	15,83095224	500	4500	2750	1,583095224	14,24731702
180,24	37,07	18,45	18,45	15,663	4	19,663	17,407	148,28	0,530429	9124,109	2,939817	23,8	23	6947,925609	5000	16,55170283	500	4500	2750	1,655170283	14,89653255
180,24	37,07	18,45	18,45	15,663	4,5	20,163	16,907	148,28	0,543917	8607,474	3,077156	23,8	23	6637,828749	5000	17,32494229	500	4500	2750	1,732494229	15,59244806
180,24	37,07	18,45	18,45	15,663	5	20,663	16,407	148,28	0,557405	8105,895	3,224704	23,8	23	6334,110755	5000	18,15566611	500	4500	2750	1,815566611	16,3400995
180,24	37,07	18,45	18,45	15,663	5,5	21,163	15,907	148,28	0,570893	7619,372	3,383599	23,8	23	6036,658427	5000	19,05027448	500	4500	2750	1,905027448	17,14524704
180,24	37,07	18,45	18,45	15,663	6	21,663	15,407	148,28	0,584381	7147,905	3,551447	23,8	23	5745,369507	5000	20,01611904	500	4500	2750	2,001611904	18,01450714
180,24	37,07	18,45	18,45	15,663	6,5	22,163	14,907	148,28	0,597869	6691,494	3,740854	23,8	23	5460,152727	5000	21,06168393	500	4500	2750	2,106168393	18,95551373
180,24	37,07	18,45	18,45	15,663	7	22,663	14,407	148,28	0,611357	6250,14	3,942466	23,8	23	5180,928033	5000	22,19679549	500	4500	2750	2,219679549	19,97711594

0,45W	16,6815
0,7W	25,949
1passo	19,163
2passo	22,663
1-s/2	15,98
	74,14
alinh	19,99

Controlo																	
L [mm]	W [mm]	B [mm]	BN [mm]	ae [mm]	aff [mm]	a0 [mm]	b0	S [mm]	a/w	Pm [N]	(f ₀ /w)	Fmédio [N]	Fmáximo [N]	K máxima [MPam ^{0,5}]	R (Fmin/Fmax)	Frequência [Hz]	tempo [s]/ciclos
180,24	37,07	18,45	18,45	15,663	0	15,663	21,407	148,28	0,422525	13799,21	2,110963	4200	7500	17,82765116	0,12	20	
180,24	37,07	18,45	18,45	15,663	0,425	16,088	20,982	148,28	0,439399	13256,73	2,18135	4200	7500	18,42209559	0,12	25	
180,24	37,07	18,45	18,45	15,663	2,05	17,713	19,357	148,28	0,477826	11282,85	2,484643	4200	7500	20,98348315	0,12	25	
180,24	37,07	18,45	18,45	15,663	6,2	21,863	15,207	148,28	0,597776	6963,534	3,627639	2750	5000	20,42426028	0,1	25	
180,24	37,07	18,45	18,45	15,663	8	23,663	13,407	148,28	0,638833	5412,599	4,401893	2750	5000	24,78345095	0,1	25	

Tração		
σ _y [MPa]	σ _t [MPa]	σ _y [MPa]
377,83	590,2	484,015

dados para o ensaio															
L [mm]	W [mm]	B [mm]	BN [mm]	ae [mm]	aff [mm]	a0 [mm]	b0	S [mm]	a/w	Pm [N]	(f ₀ /w)	0,01b0	0,005b0	0,01b0 [%]	0,05b0 [%]
180,24	37,07	18,45	18,45	15,663	8,21	23,873	13,197	148,28	0,643998	5244,367	4,509358	0,13197	0,065985	1,3197	0,65985

0,005b0/0,6
0,109975

Planeamento 213_2: Acidentado																						
L [mm]	W [mm]	B [mm]	BN[mm]	ae [mm]	aff[mm]	a0[mm]	b0	S [mm]	a/w	Pm [N]	(f _g /w)	Kmax_1[Mpa m*(1/2)]	K_Imposto [MPam*1/2]	Força resultante [N]	Força imposta [N]	K resultante [MPam*1/2]	Fmin [N]	ΔF[N]	Fmédio[N]	kmin [Mpa m*0,5]	ΔK [Mpa m*0,5]	
180,1	36,87	18,35	18,34	16,112	0	16,112	20,758	147,48	0,436995	12974,86	2,200361	23,8	23	9205,094626	6200	15,49142141	620	5580	3410	1,549142141	13,94227927	
180,1	36,87	18,35	18,34	16,112	0,5	16,612	20,258	147,48	0,492556	12357,34	2,289219	23,8	23	8847,78847	6200	16,11702184	620	5580	3410	1,611702184	14,50531966	
180,1	36,87	18,35	18,34	16,112	1	17,112	19,758	147,48	0,464117	11754,87	2,383441	23,8	23	8498,018349	6200	16,78038269	620	5580	3410	1,678038269	15,10234442	
180,1	36,87	18,35	18,34	16,112	1,5	17,612	19,258	147,48	0,477678	11167,45	2,483521	23,8	23	8155,569327	6200	17,4849841	620	5580	3410	1,74849841	15,73648569	
180,1	36,87	18,35	18,34	16,112	2	18,112	18,758	147,48	0,491289	10595,09	2,590011	23,8	23	7820,247031	6200	18,23471809	620	5580	3410	1,823471809	16,41124628	
180,1	36,87	18,35	18,34	16,112	2,5	18,612	18,258	147,48	0,504801	10037,79	2,703533	23,8	23	7491,8746	6200	19,0395447	620	5580	3410	1,90395447	17,13055902	
180,1	36,87	18,35	18,34	16,112	3	19,112	17,758	147,48	0,518362	9495,544	2,824785	23,8	23	7170,290401	6200	19,8876185	620	5580	3410	1,98876185	17,89885665	
180,1	36,87	18,35	18,34	16,112	3,5	19,612	17,258	147,48	0,531923	8968,353	2,954559	23,8	23	6855,346369	6200	20,80128302	620	5580	3410	2,080128302	18,72115472	
180,1	36,87	18,35	18,34	16,112	4	20,112	16,758	147,48	0,545484	8456,217	3,093755	23,8	23	6546,906844	6200	21,78127831	620	5580	3410	2,178127831	19,60315047	
180,1	36,87	18,35	18,34	16,112	4,5	20,612	16,258	147,48	0,559045	7959,137	3,243398	23,8	23	6244,847818	4200	15,46875166	420	3780	2310	1,546875166	13,92187649	
180,1	36,87	18,35	18,34	16,112	5	21,112	15,758	147,48	0,572606	7477,113	3,404662	23,8	23	5949,056519	4200	16,23786893	420	3780	2310	1,623786893	14,61408203	
180,1	36,87	18,35	18,34	16,112	5,5	21,612	15,258	147,48	0,586168	7010,145	3,578898	23,8	23	5659,431256	4200	17,06885297	420	3780	2310	1,706885297	15,36196767	
180,1	36,87	18,35	18,34	16,112	6	22,112	14,758	147,48	0,599729	6558,232	3,767666	23,8	23	5375,881496	4200	17,9691461	420	3780	2310	1,79691461	16,17223149	
180,1	36,87	18,35	18,34	16,112	6,5	22,612	14,258	147,48	0,613229	6121,375	3,972778	23,8	23	5098,328113	4200	18,94738782	420	3780	2310	1,894738782	17,05264904	
180,1	36,87	18,35	18,34	16,112	7	23,112	13,758	147,48	0,626861	5699,574	4,196348	23,8	23	4826,703794	4200	20,01365821	420	3780	2310	2,001365821	18,01229239	
180,1	36,87	18,35	18,34	16,112	7,5	23,612	13,258	147,48	0,640412	5292,828	4,440854	23,8	23	4560,953568	4200	21,1797815	420	3780	2310	2,11797815	19,06180335	
180,1	36,87	18,35	18,34	16,112	8	24,112	12,758	147,48	0,653993	4901,138	4,709221	23,8	23	4301,035444	4200	22,45970796	420	3780	2310	2,245970796	20,21373716	

0,45W	16,5915
0,7W	25,809
1passo	20,612
2passo	24,112
1-s/2	16,31
alinh	20,04

Controlo																	
L [mm]	W [mm]	B [mm]	BN[mm]	ae [mm]	aff[mm]	a0[mm]	b0	S [mm]	a/w	Pm [N]	(f _g /w)	Fmédio[N]	Fmáximo[N]	K máximo [Mpa m*0,5]	R (Fmin/Fmax)	Frequência [Hz]	tempo [s]/ciclos
180,1	36,87	18,34	18,35	16,112	0	16,112	20,758	147,48	0,436995	12967,79	2,200361	3720	6200	15,49142141	0,2	25	

Tração		
σys[MPa]	σts [MPa]	σy[MPa]
377,83	590,2	484,015

dados para o ensaio															
L [mm]	W [mm]	B [mm]	BN[mm]	ae [mm]	aff[mm]	a0[mm]	b0	S [mm]	a/w	Pm [N]	(f _g /w)	0,01b0	0,005b0	0,01b0 [%]	0,05b0[%]
180,1	36,87	18,34	18,35	16,112	0	16,112	20,758	147,48	0,436995	12967,79	2,200361	0,20758	0,10379	2,0758	0,010379

Planeamento_213_3																					
L [mm]	W [mm]	B [mm]	BN[mm]	ae [mm]	aff[mm]	a0[mm]	b0	S [mm]	a/w	Pm [N]	f(a/w)	Kmax_1[Mpa m^(1/2)]	K_Imposto [MPam^1/2]	Força resultante [N]	Força imposta [N]	K resultante [MPam^1/2]	Fmin [N]	ΔF[N]	Fmédio [N]	kmin [Mpa m^0,5]	ΔK [Mpa m^0,5]
180,1	37,13	18,45	18,45	16,323	0	16,323	20,807	148,52	0,439618	13015,45	2,217149	23,8	23	9220,019266	6200	15,46634512	620	5580	3410	1,546634512	13,91971061
180,1	37,13	18,45	18,45	16,323	0,5	16,823	20,307	148,52	0,458084	12397,43	2,306361	23,8	23	8863,380385	6200	16,08866976	620	5580	3410	1,608866976	14,47980279
180,1	37,13	18,45	18,45	16,323	1	17,323	19,807	148,52	0,46655	11794,45	2,400949	23,8	23	8514,199587	6200	16,74849157	620	5580	3410	1,674849157	15,07364241
180,1	37,13	18,45	18,45	16,323	1,5	17,823	19,307	148,52	0,480016	11206,5	2,501405	23,8	23	8172,268458	6200	17,44925546	620	5580	3410	1,744925546	15,70432991
180,1	37,13	18,45	18,45	16,323	2	18,323	18,807	148,52	0,493462	10633,58	2,608283	23,8	23	7837,398159	6200	18,19481378	620	5580	3410	1,819481378	16,3753324
180,1	37,13	18,45	18,45	16,323	2,5	18,823	18,307	148,52	0,506949	10075,69	2,722203	23,8	23	7509,4166	6200	18,98949114	620	5580	3410	1,898949114	17,09054203
180,1	37,13	18,45	18,45	16,323	3	19,323	17,807	148,52	0,520415	9532,828	2,843862	23,8	23	7188,166325	6200	19,83816088	620	5580	3410	1,983816088	17,85434479
180,1	37,13	18,45	18,45	16,323	3,5	19,823	17,307	148,52	0,538881	9005,003	2,974052	23,8	23	6873,502979	6200	20,74633566	620	5580	3410	2,074633566	18,6717021
180,1	37,13	18,45	18,45	16,323	4	20,323	16,807	148,52	0,547347	8492,209	3,113669	23,8	23	6565,294243	6200	21,72027554	620	5580	3410	2,172027554	19,54824799
180,1	37,13	18,45	18,45	16,323	4,5	20,823	16,307	148,52	0,560813	7994,446	3,263737	23,8	23	6263,419156	4200	15,42288606	420	3780	2310	1,542288606	13,88059746
180,1	37,13	18,45	18,45	16,323	5	21,323	15,807	148,52	0,574728	7511,716	3,425427	23,8	23	5967,767742	4200	16,18695703	420	3780	2310	1,618695703	14,56826133
180,1	37,13	18,45	18,45	16,323	5,5	21,823	15,307	148,52	0,587746	7044,017	3,600086	23,8	23	5678,240903	4200	17,01231097	420	3780	2310	1,701231097	15,31107987
180,1	37,13	18,45	18,45	16,323	6	22,323	14,807	148,52	0,601212	6591,351	3,789268	23,8	23	5394,750505	4200	17,90629611	420	3780	2310	1,790629611	16,1156666
180,1	37,13	18,45	18,45	16,323	6,5	22,823	14,307	148,52	0,614678	6153,715	3,994778	23,8	23	5117,219652	4200	18,87743864	420	3780	2310	1,887743864	16,98969478
180,1	37,13	18,45	18,45	16,323	7	23,323	13,807	148,52	0,628144	5731,112	4,218719	23,8	23	4845,583086	4200	19,93568128	420	3780	2310	1,993568128	17,94211315
180,1	37,13	18,45	18,45	16,323	7,5	23,823	13,307	148,52	0,641611	5323,541	4,46356	23,8	23	4579,787722	4200	21,09268068	420	3780	2310	2,109268068	18,98341261
180,1	37,13	18,45	18,45	16,323	8	24,323	12,807	148,52	0,655077	4931,001	4,732207	23,8	23	4319,793278	4200	22,36218119	420	3780	2310	2,236218119	20,12596307

0,45W	16,7085
0,7W	25,991
1passo	20,323
2passo	24,323
1-s/2	15,79
alinh	19,99

Tração		
σys[MPa]	σts [MPa]	σy[MPa]
377,83	590,2	484,015

Controlo																	
L [mm]	W [mm]	B [mm]	BN[mm]	ae [mm]	aff[mm]	a0[mm]	b0	S [mm]	a/w	Pm [N]	f(a/w)	Fmédio[N]	Fmáximo[N]	K máximo [Mpa m^0,5]	R (Fmin/Fmax)	Frequência [Hz]	ciclos
180,1	37,13	18,45	18,45	16,323	0	16,323	20,807	148,52	0,439618	13015,45	2,217149	3720	6200	15,46634512	0,2	25	20984
180,1	37,13	18,45	18,45	16,323	3,3075	19,6305	17,4995	148,52	0,528696	9206,436	2,922865	3410	6200	20,38926263	0,1	25	65861
180,1	37,13	18,45	18,45	16,323	5,6985	22,0215	15,1085	148,52	0,593092	6862,509	3,673358	2310	4200	17,35856162	0,1	25	211551
180,1	37,13	18,45	18,45	16,323	8,1455	24,4685	12,6615	148,52	0,658995	4819,595	4,815334	2310	4200	22,7550026	0,1	25	17360

dados para o ensaio															
L [mm]	W [mm]	B [mm]	BN[mm]	ae [mm]	aff[mm]	a0[mm]	b0	S [mm]	a/w	Pm [N]	f(a/w)	0,01b0	0,005b0	0,01b0 [%]	0,05b0[%]
180,1	37,13	18,45	18,45	16,323	8,1455	24,4685	12,6615	148,52	0,658995	4819,595	4,815334	0,126615	0,0633075	1,26615	0,633075
													0,005b0/0,6		
													0,1055125		

Planeamento 213_4																					
L [mm]	W [mm]	B [mm]	BN[mm]	ae [mm]	aff[mm]	a0[mm]	b0	S [mm]	a/w	Pm [N]	f ₀ /w	Kmax_1 [Mpa m ^{1/2}]	K imposto [MPam ^{1/2}]	Força resultante [N]	Força imposta [N]	K resultante [MPam ^{1/2}]	F _{min} [N]	AF [N]	Fmédio [N]	kmin [Mpa m ^{0,5}]	ΔK [Mpa m ^{0,5}]
180	37,08	18,47	18,47	16,164	0	16,164	20,916	148,32	0,435922	13184,18	2,193548	23,8	23	9323,036395	8000	19,73605939	800	7200	4400	1,973605939	17,76245345
180	37,08	18,47	18,47	16,164	0,5	16,664	20,416	148,32	0,449407	12561,38	2,281487	23,8	23	8963,685764	8000	20,52727024	800	7200	4400	2,052727024	18,47454321
180	37,08	18,47	18,47	16,164	-1	17,164	19,916	148,32	0,462891	11953,64	2,374689	23,8	23	8611,877377	8000	21,36584068	800	7200	4400	2,136584068	19,22925661
180	37,08	18,47	18,47	16,164	1,5	17,664	19,416	148,32	0,476575	11360,97	2,473636	23,8	23	8267,395929	8000	22,25610114	800	7200	4400	2,225610114	20,03049103
180	37,08	18,47	18,47	16,164	2	18,164	18,916	148,32	0,48986	10783,37	2,578866	23,8	23	7930,046724	6300	18,27227569	630	5670	3465	1,827227569	16,44504812
180	37,08	18,47	18,47	16,164	2,5	18,664	18,416	148,32	0,503344	10220,84	2,690982	23,8	23	7599,652602	6300	19,06666102	630	5670	3465	1,906666102	17,15999491
180	37,08	18,47	18,47	16,164	3	19,164	17,916	148,32	0,516828	9673,377	2,810663	23,8	23	7276,051632	6300	19,91464703	630	5670	3465	1,991464703	17,92318232
180	37,08	18,47	18,47	16,164	3,5	19,664	17,416	148,32	0,530313	9140,982	2,938677	23,8	23	6959,095424	6300	20,82167167	630	5670	3465	2,082167167	18,7395045
180	37,08	18,47	18,47	16,164	4	20,164	16,916	148,32	0,543797	8623,655	3,075893	23,8	23	6648,647937	6300	21,79390477	630	5670	3465	2,179390477	19,61451429
180	37,08	18,47	18,47	16,164	4,5	20,664	16,416	148,32	0,557282	8121,396	3,223305	23,8	23	6344,584703	6300	22,83837426	630	5670	3465	2,283837426	20,55453684

0,45W	16,686
0,7W	25,956
1passo	17,664
2passo	20,664
l-s/2	15,84
aling	19,98

Controlo																	
L [mm]	W [mm]	B [mm]	BN[mm]	ae [mm]	aff[mm]	a0[mm]	b0	S [mm]	a/w	Pm [N]	f ₀ /w	Fmédio[N]	Fmáximo[N]	K máximo [Mpa m ^{0,5}]	R (Fmin/Fmax)	Frequência [Hz]	ciclos
180	37,08	18,47	18,47	16,164	0	16,164	20,916	148,32	0,435922	13184,18	2,193548	4800	8000	19,73605939	0,2	25	
180	37,08	18,47	18,47	16,164	0,444	16,608	20,472	148,32	0,447896	12630,38	2,271384	4800	8000	20,43637484	0,2	25	47267
180	37,08	18,47	18,47	16,164	0,444	16,608	20,472	148,32	0,447896	12630,38	2,271384	4400	8000	20,43637484	0,1	25	7500
180	37,08	18,47	18,47	16,164	6,1745	22,3385	14,7415	148,32	0,602441	6549,066	3,807313	3465	6300	26,97630052	0,1	25	59554

Tração		
σ _y [MPa]	σ _{ts} [MPa]	σ _y [MPa]
377,83	590,2	484,015

dados para o ensaio															
L [mm]	W [mm]	B [mm]	BN[mm]	ae [mm]	aff[mm]	a0[mm]	b0	S [mm]	a/w	Pm [N]	f ₀ /w	0,01b0	0,005b0	0,01b0 [%]	0,05b0 [%]
180	37,08	18,47	18,47	16,164	6,1745	22,3385	14,7415	148,32	0,602441	6549,066	3,807313	0,147415	0,0737075	1,47415	0,737075

0,005b0/0,6
0,122845833

Planeamento 213_5																					
L [mm]	W [mm]	B [mm]	BN [mm]	ae [mm]	aff [mm]	a0 [mm]	b0	S [mm]	a/w	Pm [N]	f ₀ [w]	Kmax_1 [MPa m ^{1/2}]	K imposto [MPam ^{1/2}]	Força resultante [N]	Força imposta [N]	K resultante [MPam ^{1/2}]	Fmin [N]	Af [N]	Fmédio [N]	kmin [MPa m ^{0,5}]	ΔK [MPa m ^{0,5}]
179,4	37,06	18,5	18,5	15,802	0	15,802	21,258	148,24	0,42639	13648,34	2,134319	23,8	23	9594,732078	7500	17,97861562	750	6750	4125	1,797861562	16,18075406
179,4	37,06	18,5	18,5	15,802	0,5	16,302	20,758	148,24	0,439881	13013,86	2,218847	23,8	23	9329,217331	7500	18,69064232	750	6750	4125	1,869064232	16,82157809
179,4	37,06	18,5	18,5	15,802	1	16,802	20,258	148,24	0,453373	12394,48	2,308334	23,8	23	8871,430252	7500	19,44444076	750	6750	4125	1,944444076	17,49989668
179,4	37,06	18,5	18,5	15,802	1,5	17,302	19,758	148,24	0,466865	11790,2	2,403226	23,8	23	8521,137943	7500	20,24377509	750	6750	4125	2,024377509	18,21939758
179,4	37,06	18,5	18,5	15,802	2	17,802	19,258	148,24	0,480356	11201,02	2,504022	23,8	23	8178,130912	7500	21,09283916	750	6750	4125	2,109283916	18,98355525
179,4	37,06	18,5	18,5	15,802	2,5	18,302	18,758	148,24	0,493848	10626,94	2,611279	23,8	23	7842,219355	7500	21,99632428	750	6750	4125	2,199632428	19,79669185
179,4	37,06	18,5	18,5	15,802	3	18,802	18,258	148,24	0,507339	10067,96	2,725622	23,8	23	7513,230308	6200	18,97985209	620	5580	3410	1,897985209	17,08186689
179,4	37,06	18,5	18,5	15,802	3,5	19,302	17,758	148,24	0,520831	9524,085	2,847755	23,8	23	7191,00553	6200	19,83032823	620	5580	3410	1,983032823	17,84729541
179,4	37,06	18,5	18,5	15,802	4	19,802	17,258	148,24	0,534323	8995,309	2,978477	23,8	23	6875,399967	6200	20,74061156	620	5580	3410	2,074061156	18,6665504
179,4	37,06	18,5	18,5	15,802	4,5	20,302	16,758	148,24	0,547814	8481,634	3,118695	23,8	23	6566,280686	6200	21,71701254	620	5580	3410	2,171701254	19,54531129
179,4	37,06	18,5	18,5	15,802	5	20,802	16,258	148,24	0,561306	7983,06	3,26944	23,8	23	6263,526204	6200	22,76672842	620	5580	3410	2,276672842	20,49005557

0,45W	16,677
0,7W	25,942
1passo	18,302
2passo	20,802
1-ε/2	15,58
alin	19,965

Controlo																	
L [mm]	W [mm]	B [mm]	BN [mm]	ae [mm]	aff [mm]	a0 [mm]	b0	S [mm]	a/w	Pm [N]	f ₀ [w]	Fmédio [N]	Fmáximo [N]	K máximo [MPam ^{0,5}]	R (Fmin/Fmax)	Frequência [Hz]	ciclos
179,4	37,06	18,5	18,5	15,802	0	15,802	21,258	148,24	0,42639	13648,34	2,134319	4500	7500	17,97861562	0,2	25	
179,4	37,06	18,5	18,5	15,802	0,273	16,075	20,985	148,24	0,433756	13300,04	2,179882	4125	7500	18,36241674	0,1	25	83871
179,4	37,06	18,5	18,5	15,802	0,5815	16,3835	20,6765	148,24	0,442208	12911,87	2,233084	4125	7500	18,81056724	0,1	25	29393
179,4	37,06	18,5	18,5	15,802	1,383	17,185	19,875	148,24	0,463708	11930,25	2,380512	4125	7500	20,05243615	0,1	25	35199
179,4	37,06	18,5	18,5	15,802	1,6675	17,4695	19,5905	148,24	0,471384	11591,14	2,436309	4125	7500	20,52245072	0,1	25	15269
179,4	37,06	18,5	18,5	15,802	3,114	18,916	18,144	148,24	0,510416	9942,629	2,752755	3410	6200	19,16879694	0,1	25	80853
179,4	37,06	18,5	18,5	15,802	5,0815	20,8835	16,1765	148,24	0,563505	7903,224	3,295088	3410	6200	22,94532793	0,1	25	57989
dados para o ensaio																	
L [mm]	W [mm]	B [mm]	BN [mm]	ae [mm]	aff [mm]	a0 [mm]	b0	S [mm]	a/w	Pm [N]	f ₀ [w]	0,01b0	0,005b0	0,01b0 [%]	0,05b0 [%]		
179,4	37,06	18,5	18,5	15,802	5,0815	20,8835	16,1765	148,24	0,563505	7903,224	3,295088	0,161765	0,0808825	1,61765	0,808825		
														0,005b0/0,6			
														0,134804167			

Tração		
σ _y [MPa]	σ _{ts} [MPa]	σ _y [MPa]
377,83	590,2	484,015

Planeamento 213_6																					
L [mm]	W [mm]	B [mm]	BN [mm]	ae [mm]	aff [mm]	a0 [mm]	b0	S [mm]	a/w	Pm [N]	f(a/w)	Kmax_1 [MPa m^(1/2)]	K_Imposto [MPa m^(1/2)]	Força resultante [N]	Força imposta [N]	K resultante [MPa m^(1/2)]	Fmin [N]	ΔF [N]	Fmédio [N]	kmin [Mpa m^0,5]	ΔK [Mpa m^0,5]
180,23	36,98	18,5	18,5	15,979	0	15,979	21,001	147,92	0,432098	13349,15	2,169508	23,8	23	9428,917122	8000	19,51443603	800	7200	4400	1,951443603	17,56299243
180,23	36,98	18,5	18,5	15,979	0,5	16,479	20,501	147,92	0,449619	12721,07	2,256275	23,8	23	9066,319097	8000	20,29489565	800	7200	4400	2,029489565	18,26540608
180,23	36,98	18,5	18,5	15,979	1	16,979	20,001	147,92	0,45914	12108,13	2,348208	23,8	23	8711,371314	8000	21,12181807	800	7200	4400	2,112181807	19,00963626
180,23	36,98	18,5	18,5	15,979	1,5	17,479	19,501	147,92	0,472661	11510,32	2,445777	23,8	23	8363,850168	8000	21,99943762	800	7200	4400	2,199943762	19,79949385
180,23	36,98	18,5	18,5	15,979	2	17,979	19,001	147,92	0,486182	10927,64	2,549507	23,8	23	8023,553916	6200	17,77267299	620	5580	3410	1,777267299	15,99540569
180,23	36,98	18,5	18,5	15,979	2,5	18,479	18,501	147,92	0,499703	10360,1	2,659989	23,8	23	7690,29932	6200	18,54284132	620	5580	3410	1,854284132	16,68855719
180,23	36,98	18,5	18,5	15,979	3	18,979	18,001	147,92	0,513223	9807,694	2,777883	23,8	23	7363,919112	6200	19,36468853	620	5580	3410	1,936468853	17,42821968
180,23	36,98	18,5	18,5	15,979	3,5	19,479	17,501	147,92	0,526744	9270,419	2,90394	23,8	23	7044,26012	6200	20,2434319	620	5580	3410	2,02434319	18,21908871
180,23	36,98	18,5	18,5	15,979	4	19,979	17,001	147,92	0,540265	8748,278	3,039007	23,8	23	6731,181938	6200	21,18498673	620	5580	3410	2,118498673	19,06648805
180,23	36,98	18,5	18,5	15,979	4,5	20,479	16,501	147,92	0,553786	8241,271	3,18405	23,8	23	6424,556034	6200	22,19608627	620	5580	3410	2,219608627	19,97647765

0,45W	16,641
0,7W	25,886
1passo	18,979
2passo	0
l-s/2	16,155
alng	19,965

Controlo													Tração				
L [mm]	W [mm]	B [mm]	BN [mm]	ae [mm]	aff [mm]	a0 [mm]	b0	S [mm]	a/w	Pm [N]	f(a/w)	Fmédio [N]	Fmáximo [N]	K máximo [Mpa m^0,5]	R (Fmin/Fmax)	Frequência [Hz]	ciclos
180,23	36,98	18,5	18,5	15,979	0,221	16,2	20,78	147,92	0,438075	13069,67	2,20725	4800	8000	19,8539225	0,2	25	82588
180,23	36,98	18,5	18,5	15,979	1,322	17,301	19,679	147,92	0,467847	11721,41	2,410364	4400	8000	21,68090792	0,1	25	29132
180,23	36,98	18,5	18,5	15,979	4,9325	20,9115	16,0685	147,92	0,565481	7814,916	3,318406	3410	6200	23,13268254	0,1	25	175453

Tração		
σys [MPa]	σts [MPa]	σy [MPa]
377,83	590,2	484,015

dados para o ensaio															
L [mm]	W [mm]	B [mm]	BN [mm]	ae [mm]	aff [mm]	a0 [mm]	b0	S [mm]	a/w	Pm [N]	f(a/w)	0,01b0	0,005b0	0,01b0 [%]	0,05b0 [%]
180,24	37,07	18,45	18,45	15,663	4,9325	20,5955	16,4745	148,28	0,555584	8172,729	3,204149	0,164745	0,0823725	1,64745	0,823725
													0,005b0/0,6		
													0,1372875		

Planeamento 213_7																					
L [mm]	W [mm]	B [mm]	BN [mm]	ae [mm]	aff [mm]	a0 [mm]	b0	S [mm]	a/w	Pm [N]	f(a/w)	Kmax_1 [MPa m ^{1/2}]	K_Imposto [MPam ^{1/2}]	Força resultante [N]	Força imposta [N]	K resultante [MPam ^{1/2}]	Fmín [N]	ΔF [N]	Fmédio [N]	Kmín [Mpa m ^{0,5}]	ΔK [Mpa m ^{0,5}]
179,71	37,03	18,49	18,49	16,063	0	16,063	20,967	148,12	0,433783	13280,81	2,180054	23,8	23	9384,569901	7200	17,64598716	720	6480	3960	1,764598716	15,88138845
179,71	37,03	18,49	18,49	16,063	0,5	16,563	20,467	148,12	0,447286	12654,95	2,267319	23,8	23	9023,372689	7200	18,35233961	720	6480	3960	1,835233961	16,51710565
179,71	37,03	18,49	18,49	16,063	1	17,063	19,967	148,12	0,460789	12044,19	2,359792	23,8	23	8669,777288	7200	19,10083668	720	6480	3960	1,910083668	17,19075301
179,71	37,03	18,49	18,49	16,063	1,5	17,563	19,467	148,12	0,474291	11448,54	2,457946	23,8	23	8323,56385	7200	19,89532404	720	6480	3960	1,989532404	17,90579164
179,71	37,03	18,49	18,49	16,063	2	18,063	18,967	148,12	0,487794	10867,99	2,562312	23,8	23	7984,533819	7200	20,74009626	720	6480	3960	2,074009626	18,66608663
179,71	37,03	18,49	18,49	16,063	2,5	18,563	18,467	148,12	0,501296	10302,55	2,673486	23,8	23	7652,5067	7200	21,63996799	720	6480	3960	2,163996799	19,47597119
179,71	37,03	18,49	18,49	16,063	3	19,063	17,967	148,12	0,514799	9752,213	2,792136	23,8	23	7327,31763	7200	22,60035778	720	6480	3960	2,260035778	20,340322
179,71	37,03	18,49	18,49	16,063	3,5	19,563	17,467	148,12	0,528301	9216,981	2,919019	23,8	23	7008,815585	5200	17,06422413	520	4680	2860	1,706422413	15,35780171
179,71	37,03	18,49	18,49	16,063	4	20,063	16,967	148,12	0,541804	8696,853	3,054993	23,8	23	6696,862119	5200	17,85911041	520	4680	2860	1,785911041	16,07319937
179,71	37,03	18,49	18,49	16,063	4,5	20,563	16,467	148,12	0,555307	8191,831	3,201034	23,8	23	6391,330516	5200	18,71284855	520	4680	2860	1,871284855	16,8415637
179,71	37,03	18,49	18,49	16,063	5	21,063	15,967	148,12	0,568809	7701,914	3,358259	23,8	23	6092,105296	5200	19,63196534	520	4680	2860	1,963196534	17,6687688
179,71	37,03	18,49	18,49	16,063	5,5	21,563	15,467	148,12	0,582312	7227,102	3,52795	23,8	23	5799,082001	5200	20,62395392	520	4680	2860	2,062395392	18,56155853
179,71	37,03	18,49	18,49	16,063	6	22,063	14,967	148,12	0,595814	6767,395	3,711583	23,8	23	5512,167207	5200	21,69745501	520	4680	2860	2,169745501	19,52770951
179,71	37,03	18,49	18,49	16,063	6,5	22,563	14,467	148,12	0,609317	6322,793	3,910873	23,8	23	5231,278726	5200	22,862479	520	4680	2860	2,2862479	20,5762311

0,45W	16,6635
0,7W	25,921
1passo	19,063
2passo	22,563
l-s/2	15,795
Aling	19,97

Controlo																	
L [mm]	W [mm]	B [mm]	BN [mm]	ae [mm]	aff [mm]	a0 [mm]	b0	S [mm]	a/w	Pm [N]	f(a/w)	Fmédio [N]	Fmáximo [N]	K máximo [Mpa m ^{0,5}]	R (Fmín/Fmáx)	Frequência [Hz]	ciclos
179,71	37,03	18,49	18,49	16,063	0,5	16,563	20,467	148,12	0,447286	12654,95	2,267319	4320	7200	18,35233961	0,2	25	100982
179,71	37,03	18,49	18,49	16,063	3,202	19,265	17,765	148,12	0,520254	9534,16	2,84236	3960	7200	23,00688349	0,1	25	87209
179,71	37,03	18,49	18,49	16,063	6,574	22,637	14,393	148,12	0,611315	6258,276	3,941815	2860	5200	23,0433626	0,1	25	126233

314424

Tração		
σys [MPa]	σts [MPa]	σy [MPa]
377,83	590,2	484,015

dados para o ensaio															
L [mm]	W [mm]	B [mm]	BN [mm]	ae [mm]	aff [mm]	a0 [mm]	b0	S [mm]	a/w	Pm [N]	f(a/w)	0,01b0	0,005b0	0,01b0 [%]	0,05b0 [%]
179,71	37,03	18,49	18,49	16,063	6,574	22,637	14,393	148,12	0,611315	6258,276	3,941815	0,14393	0,071965	1,4393	0,71965
													0,005b0/0,6		
													0,119941667		

Planeamento 217_1																					
L [mm]	W [mm]	B [mm]	BN [mm]	ae [mm]	aff [mm]	a0 [mm]	b0	S [mm]	a/w	Pm [N]	f(a/w)	Kmax_1 [Mpa m^(1/2)]	K imposto [MPam^(1/2)]	Força resultante [N]	Força imposta [N]	K resultante [MPam^(1/2)]	Fmin [N]	Af [N]	Fmédio [N]	kmin [Mpa m^(0,5)]	ΔK [Mpa m^(0,5)]
196,31	37,17	18,5	18,5	15,999	0	15,999	21,171	148,68	0,430428	13496,8	2,159124	23,8	23	9498,571445	7500	18,16062563	750	6750	4125	1,816062563	16,34456306
196,31	37,17	18,5	18,5	15,999	0,5	16,499	20,671	148,68	0,443879	12866,81	2,24483	23,8	23	9135,921986	7500	18,88150974	750	6750	4125	1,888150974	16,99335877
196,31	37,17	18,5	18,5	15,999	1	16,999	20,171	148,68	0,457331	12251,88	2,335593	23,8	23	8780,894501	7500	19,64492342	750	6750	4125	1,964492342	17,68043107
196,31	37,17	18,5	18,5	15,999	1,5	17,499	19,671	148,68	0,470783	11652,01	2,431869	23,8	23	8433,265109	7500	20,45471093	750	6750	4125	2,045471093	18,40923984
196,31	37,17	18,5	18,5	15,999	2	17,999	19,171	148,68	0,484235	11067,19	2,534168	23,8	23	8092,831911	7500	21,31515913	750	6750	4125	2,131515913	19,18364322
196,31	37,17	18,5	18,5	15,999	2,5	18,499	18,671	148,68	0,497686	10497,43	2,64306	23,8	23	7759,411591	7500	22,23106713	750	6750	4125	2,223106713	20,00796042
196,31	37,17	18,5	18,5	15,999	3	18,999	18,171	148,68	0,511138	9942,73	2,759188	23,8	23	7432,836832	5000	15,47188545	500	4500	2750	1,547188545	13,9246969
196,31	37,17	18,5	18,5	15,999	3,5	19,499	17,671	148,68	0,52459	9403,083	2,883273	23,8	23	7112,954397	5000	16,16768414	500	4500	2750	1,616768414	14,55091573
196,31	37,17	18,5	18,5	15,999	4	19,999	17,171	148,68	0,538041	8878,491	3,016136	23,8	23	6799,623763	5000	16,91270047	500	4500	2750	1,691270047	15,22143042
196,31	37,17	18,5	18,5	15,999	4,5	20,499	16,671	148,68	0,551493	8368,956	3,158708	23,8	23	6492,716181	5000	17,71215571	500	4500	2750	1,771215571	15,94094014
196,31	37,17	18,5	18,5	15,999	5	20,999	16,171	148,68	0,564945	7874,478	3,31205	23,8	23	6192,114104	5000	18,57200918	500	4500	2750	1,857200918	16,71480827
196,31	37,17	18,5	18,5	15,999	5,5	21,499	15,671	148,68	0,578397	7395,055	3,477382	23,8	23	5897,710898	5000	19,49909075	500	4500	2750	1,949909075	17,54918167
196,31	37,17	18,5	18,5	15,999	6	21,999	15,171	148,68	0,591848	6930,689	3,656105	23,8	23	5609,410803	5000	20,5012619	500	4500	2750	2,05012619	18,45113571
196,31	37,17	18,5	18,5	15,999	6,5	22,499	14,671	148,68	0,6053	6481,379	3,84984	23,8	23	5327,129079	5000	21,58761282	500	4500	2750	2,158761282	19,42885154

0,45w	8,325
0,7W	12,95
1p	18,499
2p	22,499
1-y/2	23,815
alinh	19,965

Controlo																	
L [mm]	W [mm]	B [mm]	BN [mm]	ae [mm]	aff [mm]	a0 [mm]	b0	S [mm]	a/w	Pm [N]	f(a/w)	Fmédio [N]	Fmáximo [N]	K máximo [Mpa m^(0,5)]	R (Fmin/Fmax)	Frequência [Hz]	ciclos
196,31	37,17	18,5	18,5	15,999	0,489	16,488	20,682	148,68	0,443584	12880,51	2,242892	4500	7500	18,8652061	0,2	25	57024
196,31	37,17	18,5	18,5	15,999	2,375	18,374	18,796	148,68	0,494323	10638,46	2,615185	4125	7500	21,99660684	0,1	25	60752
196,31	37,17	18,5	18,5	15,999	6,6975	22,6965	14,4735	148,68	0,610613	6308,05	3,930905	2750	5000	22,04218168	0,1	25	211353

Tração		
ots [MPa]	ots [MPa]	oy [MPa]
377,83	590,2	484,015

dados para o ensaio															
L [mm]	W [mm]	B [mm]	BN [mm]	ae [mm]	aff [mm]	a0 [mm]	b0	S [mm]	a/w	Pm [N]	f(a/w)	0,01b0	0,005b0	0,01b0 [%]	0,05b0 [%]
196,31	37,17	18,5	18,5	15,999	6,6975	22,6965	14,4735	148,68	0,610613	6308,05	3,930905	0,144735	0,0723675	1,44735	0,723675

0,005b0/0,6
0,1206125

Planeamento 217_2																					
L [mm]	W [mm]	B [mm]	BN[mm]	ae [mm]	aff[mm]	a0[mm]	b0	S [mm]	a/w	Pm [N]	f(a/w)	Kmax_1[Mpa m^(1/2)]	K_Imposto [MPam^(1/2)]	Força resultante [N]	Força imposta [N]	K resultante [MPam^(1/2)]	Fmin [N]	Af [N]	Fmédio [N]	kmin [Mpa m^(0,5)]	ΔK [Mpa m^(0,5)]
193,84	37,07	18,57	18,57	15,973	0	15,973	21,097	148,28	0,430888	13489,62	2,161974	23,8	23	9509,124462	7500	18,14047136	750	6750	4125	1,814047136	16,32642423
193,84	37,07	18,57	18,57	15,973	0,5	16,473	20,597	148,28	0,444376	12857,78	2,248084	23,8	23	9144,888408	7500	18,86299672	750	6750	4125	1,886299672	16,97669704
193,84	37,07	18,57	18,57	15,973	1	16,973	20,097	148,28	0,457864	12241,1	2,339295	23,8	23	8788,325396	7500	19,62831282	750	6750	4125	1,962831282	17,66548154
193,84	37,07	18,57	18,57	15,973	1,5	17,473	19,597	148,28	0,471351	11639,58	2,436067	23,8	23	8439,2101	7000	19,07761486	700	6300	3850	1,907761486	17,16985337
193,84	37,07	18,57	18,57	15,973	2	17,973	19,097	148,28	0,484839	11053,21	2,538918	23,8	23	8097,339318	7000	19,88307439	700	6300	3850	1,988307439	17,89476695
193,84	37,07	18,57	18,57	15,973	2,5	18,473	18,597	148,28	0,498327	10481,99	2,648426	23,8	23	7762,528547	7000	20,74066447	700	6300	3850	2,074066447	18,66659802
193,84	37,07	18,57	18,57	15,973	3	18,973	18,097	148,28	0,511815	9925,933	2,76524	23,8	23	7434,609397	7000	21,65547528	700	6300	3850	2,165547528	19,48992775

0,45w	16,6815
0,7W	25,949
1p	16,973
2p	18,973
1-s/2	22,78
aling	19,93

Controlo																	
L [mm]	W [mm]	B [mm]	BN[mm]	ae [mm]	aff[mm]	a0[mm]	b0	S [mm]	a/w	Pm [N]	f(a/w)	Fmédio[N]	Fmáximo[N]	K máximo [Mpa m^(0,5)]	R (Fmin/Fmax)	Frequência [Hz]	ciclos
193,84	37,07	18,57	18,57	15,973	0,2655	16,2385	20,8315	148,28	0,43805	13152,23	2,20709	4500	7500	18,51902549	0,2	25	32252
193,84	37,07	18,57	18,57	15,973	1,146	17,119	19,951	148,28	0,461802	12063,89	2,366955	4125	7500	19,8604054	0,1	25	36869
193,84	37,07	18,57	18,57	15,973	3,009	18,982	18,088	148,28	0,512058	9916,062	2,767414	3850	7000	21,67250045	0,1	25	68072

Tração		
σys [MPa]	σts [MPa]	σy [MPa]
377,83	590,2	484,015

dados para o ensaio															
L [mm]	W [mm]	B [mm]	BN[mm]	ae [mm]	aff[mm]	a0[mm]	b0	S [mm]	a/w	Pm [N]	f(a/w)	0,01b0	0,005b0	0,01b0 [%]	0,005b0 [%]
193,84	37,07	18,57	18,57	15,973	3,009	18,982	18,088	148,28	0,512058	9916,062	2,767414	0,18088	0,09044	1,8088	0,9044
												0,005b0/0,6			
												0,150733333			

Planeamento 217_3																					
L [mm]	W [mm]	B [mm]	BN[mm]	ae [mm]	aff[mm]	a0[mm]	b0	S [mm]	a/w	Pm [N]	f(a/w)	Kmax_1[Mpa m^(1/2)]	K_Imposto [MPam^1/2]	Força resultante [N]	Força imposta [N]	K resultante [MPam^1/2]	Fmin [N]	ΔF [N]	Fmédio [N]	fmin [Mpa m^0,5]	ΔK [Mpa m^0,5]
193,71	37,07	18,6	18,6	15,967	0	15,967	21,103	148,28	0,430726	13519,09	2,16097	23,8	23	9528,912094	7500	18,10280106	750	6750	4125	1,810280106	16,29252096
193,71	37,07	18,6	18,6	15,967	0,5	16,467	20,603	148,28	0,444214	12886,06	2,247022	23,8	23	9163,993914	7500	18,82367029	750	6750	4125	1,882367029	16,94130326
193,71	37,07	18,6	18,6	15,967	1	16,967	20,103	148,28	0,457702	12268,2	2,338168	23,8	23	8806,764033	7500	19,58721721	750	6750	4125	1,958721721	17,62849549
193,71	37,07	18,6	18,6	15,967	1,5	17,467	19,603	148,28	0,47119	11665,52	2,434871	23,8	23	8456,996469	7000	19,03749169	700	6300	3850	1,903749169	17,13374252
193,71	37,07	18,6	18,6	15,967	2	17,967	19,103	148,28	0,484678	11078,03	2,537646	23,8	23	8114,487446	7000	19,84105602	700	6300	3850	1,984105602	17,85695042
193,71	37,07	18,6	18,6	15,967	2,5	18,467	18,603	148,28	0,498166	10505,7	2,64707	23,8	23	7779,051959	7000	20,69660941	700	6300	3850	2,069660941	18,62694847
193,71	37,07	18,6	18,6	15,967	3	18,967	18,103	148,28	0,511654	9948,562	2,763792	23,8	23	7450,521162	7000	21,60922659	700	6300	3850	2,160922659	19,44830393

0,45w	16,6815
0,7W	25,949
1p	16,967
2p	18,967
1-s/2	22,715

Controlo																	
L [mm]	W [mm]	B [mm]	BN[mm]	ae [mm]	aff[mm]	a0[mm]	b0	S [mm]	a/w	Pm [N]	f(a/w)	Fmédio[N]	Fmáximo[N]	K máximo [Mpa m^0,5]	R (Fmin/Fmax)	Frequência [Hz]	ciclos
193,71	37,07	18,6	18,6	15,967	0,4465	16,4135	20,6565	148,28	0,44277	12953,07	2,237579	4500	7500	18,74456279	0,2	25	61177
193,71	37,07	18,6	18,6	15,967	0,8135	16,7805	20,2895	148,28	0,452671	12496,89	2,303547	4125	7500	19,29718727	0,1	25	16706
	37,07	18,6	18,6	15,967	3,0765	19,0435	18,0265	148,28	0,513717	9864,658	2,78234	3850	7000	21,75424323	0,1	25	79737

Tração		
σys [MPa]	σts [MPa]	σy [MPa]
377,83	590,2	484,015

dados para o ensaio															
L [mm]	W [mm]	B [mm]	BN[mm]	ae [mm]	aff[mm]	a0[mm]	b0	S [mm]	a/w	Pm [N]	f(a/w)	0,01b0	0,005b0	0,01b0 [%]	0,05b0 [%]
193,71	37,07	18,6	18,6	15,967	3,0765	19,0435	18,0265	148,28	0,513717	9864,658	2,78234	0,180265	0,0901325	1,80265	0,901325

0,005b0/0,6
0,150220833

Planeamento_217_4																					
L [mm]	W [mm]	B [mm]	BN[mm]	ae [mm]	aff[mm]	a0[mm]	b0	S [mm]	a/w	Pm [N]	fa/w	Kmax_1[Mpa m^(1/2)]	K_Imposto [MPam^1/2]	Força resultante [N]	Força imposta [N]	K resultante [MPam^1/2]	Fmin [N]	Δf[N]	Fmédio [N]	kmin [Mpa m^0,5]	ΔK [Mpa m^0,5]
196,08	37,03	18,6	18,6	16,098	0	16,098	20,932	148,12	0,434729	13315,26	2,186002	23,8	23	9414,712084	7500	18,32238718	750	6750	4125	1,832238718	16,49014846
196,08	37,03	18,6	18,6	16,098	0,5	16,598	20,432	148,12	0,448231	12686,73	2,273618	23,8	23	9051,909052	7500	19,05675356	750	6750	4125	1,905675356	17,1510782
196,08	37,03	18,6	18,6	16,098	1	17,098	19,932	148,12	0,461734	12073,41	2,366472	23,8	23	8696,736794	7500	19,83502595	750	6750	4125	1,983502595	17,85152336
196,08	37,03	18,6	18,6	16,098	1,5	17,598	19,432	148,12	0,475236	11475,27	2,465043	23,8	23	8348,975781	7500	20,66121696	750	6750	4125	2,066121696	18,59509526
196,08	37,03	18,6	18,6	16,098	2	18,098	18,932	148,12	0,488739	10892,34	2,569865	23,8	23	8008,427641	7500	21,53980878	750	6750	4125	2,153980878	19,3858279
196,08	37,03	18,6	18,6	16,098	2,5	18,598	18,432	148,12	0,502241	10324,59	2,68154	23,8	23	7674,911979	7500	22,4758278	750	6750	4125	2,24758278	20,22824502
196,08	37,03	18,6	18,6	16,098	3	19,098	17,932	148,12	0,515744	9772,047	2,800741	23,8	23	7348,263974	4400	13,77196034	440	3960	2420	1,377196034	12,3947643
196,08	37,03	18,6	18,6	16,098	3,5	19,598	17,432	148,12	0,529247	9234,694	2,928231	23,8	23	7028,33263	4400	14,39886319	440	3960	2420	1,439886319	12,95897687
196,08	37,03	18,6	18,6	16,098	4	20,098	16,932	148,12	0,542749	8712,536	3,064876	23,8	23	6714,979522	4400	15,07078311	440	3960	2420	1,507078311	13,5637048
196,08	37,03	18,6	18,6	16,098	4,5	20,598	16,432	148,12	0,556252	8205,573	3,211662	23,8	23	6408,077987	4400	15,79256685	440	3960	2420	1,579256685	14,21331017
196,08	37,03	18,6	18,6	16,098	5	21,098	15,932	148,12	0,569754	7713,805	3,369716	23,8	23	6107,512638	4400	16,56975695	440	3960	2420	1,656975695	14,91278126
196,08	37,03	18,6	18,6	16,098	5,5	21,598	15,432	148,12	0,583257	7237,232	3,540332	23,8	23	5813,179169	4400	17,40871855	440	3960	2420	1,740871855	15,66784669
196,08	37,03	18,6	18,6	16,098	6	22,098	14,932	148,12	0,596759	6775,854	3,725003	23,8	23	5524,984381	4400	18,31679386	440	3960	2420	1,831679386	16,48511448
196,08	37,03	18,6	18,6	16,098	6,5	22,598	14,432	148,12	0,610262	6329,671	3,92546	23,8	23	5242,864603	4400	19,30249186	440	3960	2420	1,930249186	17,37224267
196,08	37,03	18,6	18,6	16,098	7	23,098	13,932	148,12	0,623765	5898,682	4,143718	23,8	23	4966,695059	4400	20,37572245	440	3960	2420	2,037572245	18,3381502
196,08	37,03	18,6	18,6	16,098	7,5	23,598	13,432	148,12	0,637267	5482,889	4,382136	23,8	23	4696,472371	4400	21,54808801	440	3960	2420	2,154808801	19,39327921
196,08	37,03	18,6	18,6	16,098	8	24,098	12,932	148,12	0,65077	5082,29	4,643494	23,8	23	4432,133168	4400	22,83324895	440	3960	2420	2,283324895	20,54992405

0,45w	16,6635
0,7W	25,921
1p	18,598
2p	24,098
t-s/2	23,98
alin	19,915

Controlo																	
L [mm]	W [mm]	B [mm]	BN[mm]	ae [mm]	aff[mm]	a0[mm]	b0	S [mm]	a/w	Pm [N]	fa/w	Fmédio[N]	Fmáximo[N]	K máximo [Mpa m^0,5]	R (Fmin/Fmax)	Frequência [Hz]	ciclos
196,08	37,03	18,6	18,6	16,098	0,3655	16,4635	20,5665	148,12	0,444599	12854,31	2,249553	4500	7500	18,85504901	0,2	25	47099
196,08	37,03	18,6	18,6	16,098	2,67445	18,77245	18,25755	148,12	0,506952	10130,08	2,722237	4125	7500	22,81693993	0,1	25	75047
196,08	37,03	18,6	18,6	16,098	8,0005	24,0985	12,9315	148,12	0,650783	5081,897	4,643767	2420	4400	22,83459573	0,1	25	448018

Tração		
oys[MPa]	ots [MPa]	oy[MPa]
377,83	590,2	484,015

570164

dados para o ensaio															
L [mm]	W [mm]	B [mm]	BN[mm]	ae [mm]	aff[mm]	a0[mm]	b0	S [mm]	a/w	Pm [N]	fa/w	0,01b0	0,005b0	0,01b0 [%]	0,05b0[%]
196,08	37,03	18,6	18,6	16,098	8,0005	24,0985	12,9315	148,12	0,650783	5081,897	4,643767	0,129315	0,0646575	1,29315	0,646575
													0,005b0/0,6		
													0,1077625		

Planeamento 217_5																					
L [mm]	W [mm]	B [mm]	BN[mm]	ae [mm]	aff[mm]	a0[mm]	b0	S [mm]	a/w	Pm [N]	f(s/w)	Kmax_1[Mpa m^(1/2)]	K_Imposto [MPam^1/2]	Força resultante [N]	Força imposta [N]	K resultante [MPam^1/2]	Fmin [N]	Af [N]	Fmédio [N]	kmin [Mpa m^0,5]	ΔK [Mpa m^0,5]
195,09	37,06	18,62	18,62	15,65	0	15,65	21,41	148,24	0,422288	13934,02	2,109544	23,8	23	9770,386193	7500	17,65539218	750	6750	4125	1,765539218	15,88985296
195,09	37,06	18,62	18,62	15,65	0,5	16,15	20,91	148,24	0,43578	13290,8	2,192646	23,8	23	9400,085452	7500	18,35089701	750	6750	4125	1,835089701	16,51580731
195,09	37,06	18,62	18,62	15,65	1	16,65	20,41	148,24	0,449271	12662,78	2,28058	23,8	23	9037,639143	7500	19,08684306	750	6750	4125	1,908684306	17,17815876
195,09	37,06	18,62	18,62	15,65	1,5	17,15	19,91	148,24	0,462763	12049,96	2,373778	23,8	23	8682,804786	7500	19,86685227	750	6750	4125	1,986685227	17,88016705
195,09	37,06	18,62	18,62	15,65	2	17,65	19,41	148,24	0,476255	11452,34	2,472724	23,8	23	8335,364813	7500	20,69495503	750	6750	4125	2,069495503	18,62545953
195,09	37,06	18,62	18,62	15,65	2,5	18,15	18,91	148,24	0,489746	10869,92	2,577954	23,8	23	7995,122504	7500	21,5756544	750	6750	4125	2,15756544	19,41808896
195,09	37,06	18,62	18,62	15,65	3	18,65	18,41	148,24	0,503238	10302,69	2,690071	23,8	23	7661,898875	7500	22,51400114	750	6750	4125	2,251400114	20,26260102
195,09	37,06	18,62	18,62	15,65	3,5	19,15	17,91	148,24	0,51673	9750,666	2,809757	23,8	23	7335,530345	4400	13,79586686	440	3960	2420	1,379586686	12,41628018
195,09	37,06	18,62	18,62	15,65	4	19,65	17,41	148,24	0,530221	9213,839	2,937777	23,8	23	7015,867016	4400	14,42444672	440	3960	2420	1,442444672	12,98200205
195,09	37,06	18,62	18,62	15,65	4,5	20,15	16,91	148,24	0,543713	8692,212	3,075005	23,8	23	6702,771473	4400	15,09823219	440	3960	2420	1,509823219	13,58840897
195,09	37,06	18,62	18,62	15,65	5	20,65	16,41	148,24	0,557205	8185,784	3,22432	23,8	23	6396,117992	4400	15,82209711	440	3960	2420	1,582209711	14,2398874
195,09	37,06	18,62	18,62	15,65	5,5	21,15	15,91	148,24	0,570696	7694,554	3,381194	23,8	23	6095,792087	4400	16,60161609	440	3960	2420	1,660161609	14,94145448
195,09	37,06	18,62	18,62	15,65	6	21,65	15,41	148,24	0,584188	7218,523	3,552595	23,8	23	5801,690325	4400	17,4431923	440	3960	2420	1,74431923	15,69887307
195,09	37,06	18,62	18,62	15,65	6,5	22,15	14,91	148,24	0,597679	6757,692	3,738139	23,8	23	5513,720372	4400	18,35421334	440	3960	2420	1,835421334	16,51879201
195,09	37,06	18,62	18,62	15,65	7	22,65	14,41	148,24	0,611171	6312,059	3,939572	23,8	23	5231,801222	4400	19,34324255	440	3960	2420	1,934324255	17,40891829
195,09	37,06	18,62	18,62	15,65	7,5	23,15	13,91	148,24	0,624663	5881,625	4,158923	23,8	23	4955,863573	4400	20,42025542	440	3960	2420	2,042025542	18,37822988
195,09	37,06	18,62	18,62	15,65	8	23,65	13,41	148,24	0,638154	5466,39	4,398573	23,8	23	4685,850339	4400	21,59693389	440	3960	2420	2,159693389	19,4372405
195,09	37,06	18,62	18,62	15,65	8,5	24,15	12,91	148,24	0,651646	5066,355	4,661324	23,8	23	4421,717262	4400	22,88703551	440	3960	2420	2,288703551	20,59833196

0,45w	16,677
0,7W	25,942
1p	18,65
2p	24,15
f-s/2	23,425

alinh 19,905

Controlo																	
L [mm]	W [mm]	B [mm]	BN[mm]	ae [mm]	aff[mm]	a0[mm]	b0	S [mm]	a/w	Pm [N]	f(s/w)	Fmédio[N]	Fmáximo[N]	K máximo [Mpa m^0,5]	R (Fmin/Fmax)	Frequência [Hz]	ciclos
195,09	37,06	18,62	18,62	15,65	0,244	15,894	21,166	148,24	0,428872	13618,23	2,149519	4500	7500	17,98995978	0,2	25	64999
195,09	37,06	18,62	18,62	15,65	3,375	19,025	18,035	148,24	0,513357	9887,247	2,779086	4125	7500	23,25898655	0,1	25	79852
195,09	37,06	18,62	18,62	15,65	8,4155	24,0655	12,9945	148,24	0,649366	5132,893	4,615162	2420	4400	22,66038093	0,1	25	457388

Tração		
σys [MPa]	σts [MPa]	σy [MPa]
377,83	590,2	484,015

dados para o ensaio															
L [mm]	W [mm]	B [mm]	BN[mm]	ae [mm]	aff[mm]	a0[mm]	b0	S [mm]	a/w	Pm [N]	f(s/w)	0,01b0	0,005b0	0,01b0 [%]	0,05b0 [%]
195,09	37,06	18,62	18,62	15,65	8,4155	24,0655	12,9945	148,24	0,649366	5132,893	4,615162	0,129945	0,0649725	1,29945	0,649725
													0,005b0/0,6		
													0,1082875		

Planeamento 217_6																					
L [mm]	W [mm]	B [mm]	BN [mm]	ae [mm]	aff [mm]	a0 [mm]	b0	S [mm]	a/w	Pm [N]	f(a/w)	Kmax_1 [Mpa m^(1/2)]	K_Imposto [MPam^(1/2)]	Força resultante [N]	Força imposta [N]	K resultante [MPam^(1/2)]	Fmin [N]	ΔF [N]	Fmédio [N]	kmin [Mpa m^(0,5)]	ΔK [Mpa m^(0,5)]
194,42	37,04	18,61	18,61	15,86	0	15,86	21,18	148,16	0,428186	13636,29	2,145301	23,8	23	9599,783417	7500	17,9691554	750	6750	4125	1,79691554	16,17223986
194,42	37,04	18,61	18,61	15,86	0,5	16,36	20,68	148,16	0,441685	13000,06	2,230512	23,8	23	9233,047844	7500	18,68288813	750	6750	4125	1,868288813	16,81459932
194,42	37,04	18,61	18,61	15,86	1	16,86	20,18	148,16	0,455184	12379,03	2,320745	23,8	23	8874,059319	7500	19,43868007	750	6750	4125	1,943868007	17,49481206
194,42	37,04	18,61	18,61	15,86	1,5	17,36	19,68	148,16	0,468683	11773,2	2,416453	23,8	23	8522,586653	7500	20,24033395	750	6750	4125	2,024033395	18,21630056
194,42	37,04	18,61	18,61	15,86	2	17,86	19,18	148,16	0,482181	11182,57	2,518142	23,8	23	8178,421691	7500	21,09208922	750	6750	4125	2,109208922	18,9828803
194,42	37,04	18,61	18,61	15,86	2,5	18,36	18,68	148,16	0,49568	10607,13	2,626379	23,8	23	7841,375678	7500	21,99869093	750	6750	4125	2,199869093	19,79882184
194,42	37,04	18,61	18,61	15,86	3	18,86	18,18	148,16	0,509179	10046,9	2,741801	23,8	23	7511,27651	6200	18,98478905	620	5580	3410	1,898478905	17,08631014
194,42	37,04	18,61	18,61	15,86	3,5	19,36	17,68	148,16	0,522678	9501,863	2,865126	23,8	23	7187,966676	6200	19,8387119	620	5580	3410	1,98387119	17,85484071
194,42	37,04	18,61	18,61	15,86	4	19,86	17,18	148,16	0,536177	8972,027	2,997165	23,8	23	6871,301785	6200	20,75298167	620	5580	3410	2,075298167	18,6776835
194,42	37,04	18,61	18,61	15,86	4,5	20,36	16,68	148,16	0,549676	8457,389	3,138844	23,8	23	6561,149548	6200	21,7339963	620	5580	3410	2,17339963	19,56059667
194,42	37,04	18,61	18,61	15,86	5	20,86	16,18	148,16	0,563175	7957,951	3,291217	23,8	23	6257,389144	6200	22,78905734	620	5580	3410	2,278905734	20,5101516

0,45w	16,668
0,7W	25,928
1p	18,36
2p	20,86
f-s/2	23,13
alinh	19,91

Controlo																	
L [mm]	W [mm]	B [mm]	BN [mm]	ae [mm]	aff [mm]	a0 [mm]	b0	S [mm]	a/w	Pm [N]	f(a/w)	Fmédio [N]	Fmáximo [N]	K máximo [Mpa m^(0,5)]	R (Fmin/Fmax)	Frequência [Hz]	ciclos
194,42	37,04	18,61	18,61	15,86	0,4065	16,2665	20,7735	148,16	0,43916	13117,88	2,214209	4500	7500	18,5463308	0,2	25	52621
194,42	37,04	18,61	18,61	15,86	2,295	18,155	18,885	148,16	0,490146	10841,22	2,581171	4125	7500	21,62002308	0,1	25	65630
194,42	37,04	18,61	18,61	15,86	5,069	20,929	16,111	148,16	0,565038	7890,222	3,31315	3410	6200	22,94092402	0,1	25	84559

Tração		
σys [MPa]	σts [MPa]	σy [MPa]
377,83	590,2	484,015

dados para o ensaio															
L [mm]	W [mm]	B [mm]	BN [mm]	ae [mm]	aff [mm]	a0 [mm]	b0	S [mm]	a/w	Pm [N]	f(a/w)	0,01b0	0,005b0	0,01b0 [%]	0,05b0 [%]
194,42	37,04	18,61	18,61	15,86	5,069	20,929	16,111	148,16	0,565038	7890,222	3,31315	0,16111	0,080555	1,6111	0,80555
												0,005b0/0,6			
												0,134258333			

Planeamento_217_7																					
L [mm]	W [mm]	B [mm]	BN[mm]	ae [mm]	aff[mm]	a0[mm]	b0	S [mm]	a/w	Pm [N]	f(a/w)	Kmax_1[Mpa.m^(1/2)]	K_Imposto [MPam^(1/2)]	Força resultante [N]	Força imposta [N]	K resultante [MPam^(1/2)]	Fmin [N]	ΔF [N]	Fmédio [N]	kmin [Mpa.m^(0,5)]	ΔK [Mpa.m^(0,5)]
193,7	37,09	18,63	18,63	15,889	0	15,889	21,201	148,36	0,42839	13659,59	2,146558	23,8	23	9610,955356	7500	17,94826774	750	6750	4125	1,794826774	16,15344097
193,7	37,09	18,63	18,63	15,889	0,5	16,389	20,701	148,36	0,441871	13022,89	2,231723	23,8	23	9244,187278	7500	18,66037487	750	6750	4125	1,866037487	16,79433739
193,7	37,09	18,63	18,63	15,889	1	16,889	20,201	148,36	0,455352	12401,4	2,321903	23,8	23	8885,155523	7500	19,41440412	750	6750	4125	1,941440412	17,47296371
193,7	37,09	18,63	18,63	15,889	1,5	17,389	19,701	148,36	0,468833	11795,09	2,417549	23,8	23	8533,629766	7500	20,21414155	750	6750	4125	2,021414155	18,19272739
193,7	37,09	18,63	18,63	15,889	2	17,889	19,201	148,36	0,482313	11203,99	2,519167	23,8	23	8189,402576	7500	21,06380757	750	6750	4125	2,106380757	18,95742682
193,7	37,09	18,63	18,63	15,889	2,5	18,389	18,701	148,36	0,495794	10628,07	2,62732	23,8	23	7852,285821	6300	18,45322538	630	5670	3465	1,845322538	16,60790284
193,7	37,09	18,63	18,63	15,889	3	18,889	18,201	148,36	0,509275	10067,35	2,742645	23,8	23	7522,107932	6300	19,26321735	630	5670	3465	1,926321735	17,33689561
193,7	37,09	18,63	18,63	15,889	3,5	19,389	17,701	148,36	0,522755	9521,831	2,865856	23,8	23	7198,711867	6300	20,12860115	630	5670	3465	2,012860115	18,11574104
193,7	37,09	18,63	18,63	15,889	4	19,889	17,201	148,36	0,536236	8991,502	2,997764	23,8	23	6881,953646	6300	21,05506771	630	5670	3465	2,105506771	18,94956094
193,7	37,09	18,63	18,63	15,889	4,5	20,389	16,701	148,36	0,549717	8476,368	3,139289	23,8	23	6571,701344	6300	22,04908477	630	5670	3465	2,204908477	19,84417629
193,7	37,09	18,63	18,63	15,889	5	20,889	16,201	148,36	0,563198	7976,429	3,291483	23,8	23	6267,83446	6300	23,11803238	630	5670	3465	2,311803238	20,80622914

alinh	19,9
0,45w	16,6905
0,7W	25,963
1p	17,889
2p	20,889
1-s/2	22,67

Controlo																	
L [mm]	W [mm]	B [mm]	BN[mm]	ae [mm]	aff[mm]	a0[mm]	b0	S [mm]	a/w	Pm [N]	f(a/w)	Fmédio[N]	Fmáximo[N]	K máximo [Mpa.m^(0,5)]	R (fmin/fmax)	frequencia	ciclos
193,7	37,09	18,63	18,63	15,889	0,5515	16,4405	20,6495	148,36	0,44326	12958,18	2,240773	4500	7500	18,73604218	0,2	25	60423
193,7	37,09	18,63	18,63	15,889	2,004	17,893	19,197	148,36	0,482421	11199,32	2,520005	4125	7500	21,07081859	0,1	25	47918
193,7	37,09	18,63	18,63	15,889	5,217	21,106	15,984	148,36	0,569048	7764,184	3,361153	3465	6300	23,6073642	0,1	25	101253

Tração		
σys [MPa]	σts [MPa]	σy [MPa]
377,83	590,2	484,015

dados para o ensaio												
L [mm]	W [mm]	B [mm]	BN[mm]	ae [mm]	aff[mm]	a0[mm]	b0	S [mm]	a/w	Pm [N]	f(a/w)	
193,7	37,09	18,63	18,63	15,889	5,217	21,106	15,984	148,36	0,569048	7764,184	3,361153	0,01b0
									0,005b0	0,01b0 [%]	0,05b0[%]	
									0,07992	1,5984	0,7992	
									0,005b0/0,6			
									0,1332			

Planeamento 217_8																						
L [mm]	W [mm]	B [mm]	BN[mm]	ae [mm]	aff[mm]	a0[mm]	b0	S [mm]	a/w	Pm [N]	f(a/w)	Kmax_1[Mpa.m^(1/2)]	K_Imposto [MPam^(1/2)]	Força resultante [N]	Força imposta [N]	K resultante [MPam^(1/2)]	Fmin [N]	Δf [N]	Fmédio [N]	kmin [Mpa.m^(0,5)]	ΔK [Mpa.m^(0,5)]	
193,31	37,12	18,61	18,61	15,941	0	15,941	21,179	148,48	0,429445	13605,61	2,153049	23,8	23	9575,560777	7500	18,01461074	750	6750	4125	1,801461074	16,21314966	
193,31	37,12	18,61	18,61	15,941	0,5	16,441	20,679	148,48	0,442915	12970,79	2,238521	23,8	23	9209,94461	7500	18,72975434	750	6750	4125	1,872975434	16,8567789	
193,31	37,12	18,61	18,61	15,941	1	16,941	20,179	148,48	0,456385	12351,13	2,329032	23,8	23	8852,028385	7500	19,48705907	750	6750	4125	1,948705907	17,53835316	
193,31	37,12	18,61	18,61	15,941	1,5	17,441	19,679	148,48	0,469855	11746,63	2,425037	23,8	23	8501,584394	7500	20,29033554	750	6750	4125	2,029033554	18,26130199	
193,31	37,12	18,61	18,61	15,941	2	17,941	19,179	148,48	0,483324	11157,3	2,527044	23,8	23	8158,407432	7500	21,14383247	750	6750	4125	2,114383247	19,02944923	
193,31	37,12	18,61	18,61	15,941	2,5	18,441	18,679	148,48	0,496794	10583,14	2,635622	23,8	23	7822,311278	7500	22,05230575	750	6750	4125	2,205230575	19,84707518	
193,31	37,12	18,61	18,61	15,941	3	18,941	18,179	148,48	0,510264	10024,14	2,751409	23,8	23	7493,126035	5000	15,34739966	500	4500	2750	1,534739966	13,8126597	
193,31	37,12	18,61	18,61	15,941	3,5	19,441	17,679	148,48	0,523734	9480,312	2,875126	23,8	23	7170,696154	5000	16,03749448	500	4500	2750	1,603749448	14,43374503	
193,31	37,12	18,61	18,61	15,941	4	19,941	17,179	148,48	0,537204	8951,648	3,007588	23,8	23	6854,879004	5000	16,77637197	500	4500	2750	1,677637197	15,09873478	
193,31	37,12	18,61	18,61	15,941	4,5	20,441	16,679	148,48	0,550673	8438,15	3,149724	23,8	23	6545,543908	5000	17,56920458	500	4500	2750	1,756920458	15,81228412	
193,31	37,12	18,61	18,61	15,941	5	20,941	16,179	148,48	0,564143	7939,819	3,30259	23,8	23	6242,571534	5000	18,42189543	500	4500	2750	1,842189543	16,57970589	
193,31	37,12	18,61	18,61	15,941	5,6	21,541	15,579	148,48	0,580307	7361,84	3,501915	23,8	23	5887,25178	5000	19,53373226	500	4500	2750	1,953373226	17,58035903	
193,31	37,12	18,61	18,61	15,941	7	22,941	14,179	148,48	0,618023	6098,155	4,048587	23,8	23	5092,309269	5000	22,58307458	500	4500	2750	2,258307458	20,32476712	

alinh	19,91
0,45w	16,704
0,7w	25,984
1p	18,441
2p	22,941
1-s/2	22,415

Controlo																	
L [mm]	W [mm]	B [mm]	BN[mm]	ae [mm]	aff[mm]	a0[mm]	b0	S [mm]	a/w	Pm [N]	f(a/w)	Fmédio[N]	Fmáximo[N]	K máximo [Mpa.m^(0,5)]	R (Fmin/Fmax)	Frequência [Hz]	ciclos
193,31	37,12	18,61	18,61	15,941	0,2385	16,1795	20,9405	148,48	0,43587	13300,91	2,193218	4500	7500	18,35070077	0,2	25	40238
193,31	37,12	18,61	18,61	15,941	2,3235	18,2645	18,8555	148,48	0,492039	10784,09	2,596505	4125	7500	21,72501507	0,1	25	72916
193,31	37,12	18,61	18,61	15,941	7,1935	23,1345	13,9855	148,48	0,623235	5932,848	4,134803	2750	5000	23,06399018	0,1	25	246150

Tração		
oys[MPa]	ots [MPa]	oy[MPa]
377,83	590,2	484,015

359304

dados para o ensaio															
L [mm]	W [mm]	B [mm]	BN[mm]	ae [mm]	aff[mm]	a0[mm]	b0	S [mm]	a/w	f(a/w)	0,01b0	0,005b0	0,01b0 [%]	0,05b0 [%]	
193,31	37,12	18,61	18,61	15,941	7,1935	23,1345	13,9855	148,48	0,623235	5932,848	4,134803	0,139855	0,0699275	1,39855	0,699275
												0,005b0			
												0,116545833			

Planeamento 217_9																					
L [mm]	W [mm]	B [mm]	BN[mm]	ae [mm]	aff[mm]	a0[mm]	b0	S [mm]	a/w	Pm [N]	f(a/w)	Kmax_1[Mpa.m^(1/2)]	K_Imposto [MPam^1/2]	Força resultante [N]	Força imposta [N]	K resultante [MPam^1/2]	Fmin [N]	ΔF[N]	Fmédio [N]	kmin [Mpa.m^0,5]	ΔK [Mpa.m^0,5]
193,25	37,03	18,5	18,5	16,018	0	16,018	21,012	148,12	0,432568	13345,09	2,17244	23,8	23	9422,551952	7500	18,30714236	750	6750	4125	1,830714236	16,47642813
193,25	37,03	18,5	18,5	16,018	0,5	16,518	20,512	148,12	0,446071	12717,53	2,259259	23,8	23	9060,463237	7500	19,03876165	750	6750	4125	1,903876165	17,13488548
193,25	37,03	18,5	18,5	16,018	1	17,018	20,012	148,12	0,459573	12105,08	2,351244	23,8	23	8706,00142	7500	19,8139182	750	6750	4125	1,98139182	17,83252638
193,25	37,03	18,5	18,5	16,018	1,5	17,518	19,512	148,12	0,473076	11507,75	2,448866	23,8	23	8358,94443	7500	20,63657696	750	6750	4125	2,063657696	18,57291926
193,25	37,03	18,5	18,5	16,018	2	18,018	19,012	148,12	0,486578	10925,53	2,55265	23,8	23	8019,091829	7500	21,51116407	750	6750	4125	2,151116407	19,36004766
193,25	37,03	18,5	18,5	16,018	2,5	18,518	18,512	148,12	0,500081	10358,42	2,663185	23,8	23	7686,261509	6500	19,450288	650	5850	3575	1,9450288	17,5052592
193,25	37,03	18,5	18,5	16,018	3	19,018	18,012	148,12	0,513584	9806,425	2,781132	23,8	23	7360,287192	6500	20,31170743	650	5850	3575	2,031170743	18,28053668
193,25	37,03	18,5	18,5	16,018	3,5	19,518	17,512	148,12	0,527086	9269,544	2,907241	23,8	23	7041,016585	6500	21,23272942	650	5850	3575	2,123272942	19,10945648
193,25	37,03	18,5	18,5	16,018	4	20,018	17,012	148,12	0,540589	8747,775	3,042359	23,8	23	6728,310075	6500	22,21954671	650	5850	3575	2,221954671	19,99759204

0,45w	16,6635
0,7W	25,921
1p	18,018
2p	20,018
1-s/2	22,565

Controlo																	
L [mm]	W [mm]	B [mm]	BN[mm]	ae [mm]	aff[mm]	a0[mm]	b0	S [mm]	a/w	Pm [N]	f(a/w)	Fmédio[N]	Fmáximo[N]	K máximo [Mpa.m^0,5]	R (Fmin/Fmax)	Frequência [Hz]	tempo [s]
193,25	37,03	18,5	18,5	16,018	0	16,018	21,012	148,12	0,432568	13345,09	2,17244	4125	7500	18,30714236	0,1		

Tração		
oys [MPa]	ots [MPa]	oy [MPa]
377,83	590,2	484,015

dados para o ensaio															
L [mm]	W [mm]	B [mm]	BN[mm]	ae [mm]	aff[mm]	a0[mm]	b0	S [mm]	a/w	Pm [N]	f(a/w)	0,01b0	0,005b0	0,01b0 [%]	0,05b0 [%]
193,25	37,03	18,5	18,5	16,018	0	16,018	21,012	148,12	0,432568	13345,09	2,17244	0,21012	0,10506	2,1012	0,010506

8.4 Anexo D – Exemplo do cálculo da curva de resistência.

```

> restart
> with(LinearAlgebra) : with(plots) :
>
> #Dados geométricos e Mecânicos do provete
> EE := 191.995·103 :  $\sigma_{ys}$  := 585.35·106 :  $\sigma_{uts}$  := 695.25·106 : B := 18.4 : Bn := B : W
    := 37.12 : Be := B -  $\frac{(B - Bn)^2}{B}$  : S := 148.68 :  $\nu$  := 0.3 : L := 196.31 :  $\sigma_y$ 
    :=  $\frac{\sigma_{ys} + \sigma_{uts}}{2}$  :
>
> #importação dos dados recolhidos no diagrama de força vs deslocamento
>
> dados:=ImportMatrix
    ("C:\\Users\\Adriano Balhana\\Dropbox\\tese
    mestrado\\Ensaio\\Ensaio provetes
    pequenos\\217_cbl_1\\217_cbl_1_dados.txt", source = delimited, delimiter
    = "", datatype = float[8], skiplines = 1);
    dados :=  $\left[ \begin{array}{l} 51 \times 3 \text{ Matrix} \\ \text{Data Type: float}_8 \\ \text{Storage: rectangular} \\ \text{Order: Fortran\_order} \end{array} \right]$  (1)
>
> n := 51 :
> F := Vector[column](n) : V := Vector[column](n) : C := Vector[column](n) : N
    := Vector[column](n) :
>
> #Extração dos dados do diagrama para vectores
>
> for i from 1 to n do
    Fi := dadosi, 2;
    Vi := dadosi, 1;
    Ci := dadosi, 3;
    Ni := i;
end do:
> u := Vector[column](n) : aw := Vector[column](n) : a := Vector[column](n) :
>
> #Calculo do u e do comprimento de fenda
>
    for i from 1 to n do
        ui := evalf  $\left( \frac{1}{\left( \left( \frac{Be \cdot W \cdot EE \cdot C_i}{S} \right)^{\frac{1}{2}} + 1 \right)} \right)$  :
    end do:

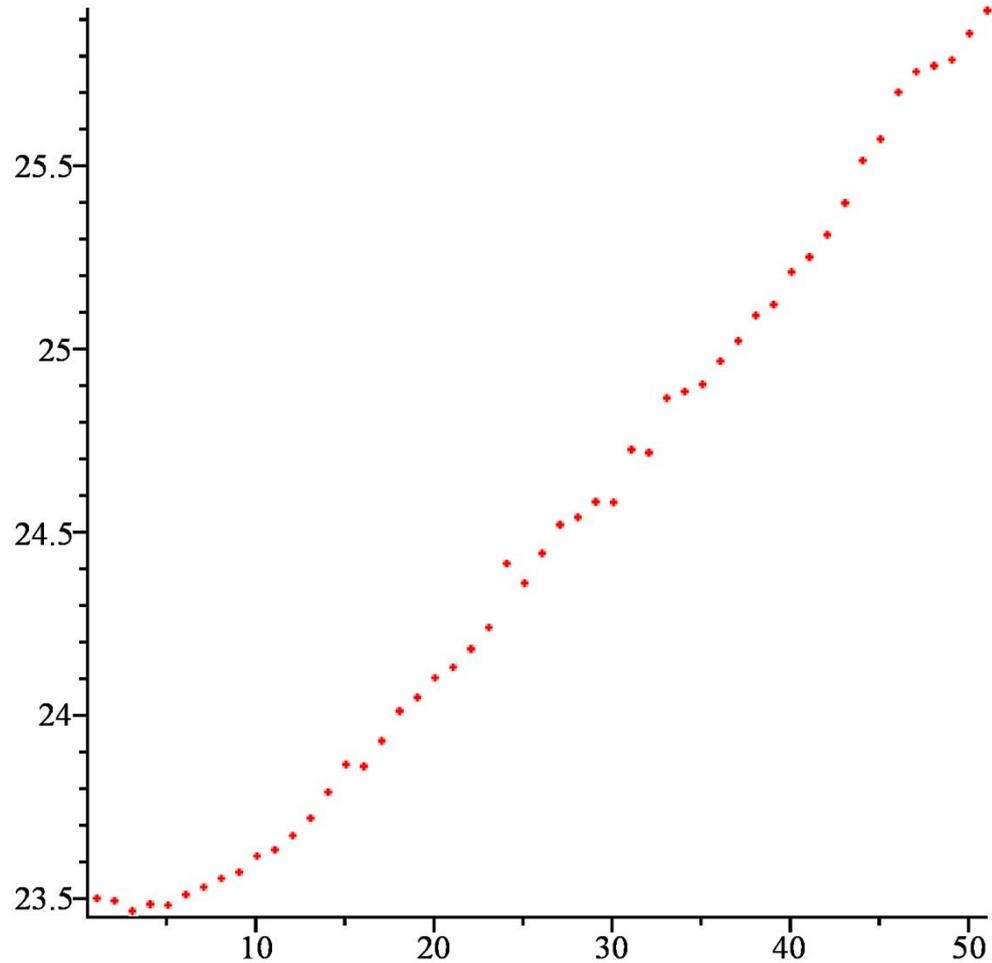
```

```

awi := 0.999748 - 3.9504 · ui + 2.9821 · ui2 - 3.21408 · ui3 + 51.51564 · ui4 - 113.031 · ui5;
ai := (awi · W);
bi := (W - ai);
# print(i, ai)
end do:

```

```
> plot(N, a, style=point)
```



```
> #Calculo do j elástico
```

```
>
```

```
> #factor de forma do provete de flexão (Senb)
```

```
>
```

```
> f := 
$$\frac{3 \cdot \left(\frac{af}{W}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot \left(1.99 - \left(\frac{af}{W}\right) \cdot \left(1 - \frac{af}{W}\right) \cdot \left(2.15 - 3.93 \cdot \left(\frac{af}{W}\right) + 2.7 \cdot \left(\frac{af}{W}\right)^2\right)\right)}{2 \cdot \left(1 + 2 \cdot \frac{af}{W}\right) \cdot \left(1 - \frac{af}{W}\right)^{\frac{3}{2}}}$$

```

```
>
```

```
>
```

```

> #Factor de intensidade de tensões
> K :=  $\left( \left( \frac{P \cdot S}{(B \cdot Bn)^2 \cdot W^2} \right) \cdot f \right) \cdot \sqrt{0.001} \cdot \#MPa\sqrt{m}$ 
> # J elástico
> Jelastico :=  $\frac{KI^2 \cdot (1 - \nu^2)}{EE \cdot 10^6} \cdot \# \frac{J}{m^2}$ 
> KI := Vector[column](n) : Jel := Vector[column](n) :
> #calculo do K e J
> for i from 1 to n do
  KI_i := evalf(subs(af=a_p, P=F_p, K)) \cdot 10^6; #Pa\sqrt{m}
  Jel_i := evalf(subs(Ki=KI_p, Jelastico) \cdot (10^{-3})); # \frac{kJ}{m^2}
end do:
>
> #Calculo do J plástico
> \eta pl := Vector[column](n) : \rho pl := Vector[column](n) : Apl := Vector[column](n) : Vpl
  := Vector[column](n) :
> \eta pl_1 := 3.667 - 2.199 \cdot (aw_1) + 0.437 \cdot (aw_1)^2;
\rho pl_1 := 0.131 + 2.131 \cdot (aw_1) - 1.465 \cdot (aw_1)^2;
Apl_1 := 0;
Vpl_1 := 0;
Jpl_1 := 0;

\eta pl_1 := 2.44982259331379
\rho pl_1 := 0.892965863520761
Apl_1 := 0
Vpl_1 := 0
Jpl_1 := 0
(2)
>
> for i from 2 to n do
  Vpl_i := V_i - (F_i \cdot C_i);
  Apl_i := Apl_{i-1} + \left( (F_i + F_{i-1}) \cdot \frac{(Vpl_i - Vpl_{i-1})}{2} \right);
  \eta pl_i := 3.667 - 2.199 \cdot (aw_i) + 0.437 \cdot (aw_i)^2;
  \rho pl_i := 0.131 + 2.131 \cdot (aw_i) - 1.465 \cdot (aw_i)^2;
  Jpl_i := \left( Jpl_{i-1} + \left( \frac{\eta pl_i}{b_{i-1}} \right) \cdot \left( \frac{Apl_i - Apl_{i-1}}{Bn} \right) \right) \cdot \left( 1 - \rho pl_{i-1} \cdot \left( \frac{a_i - a_{i-1}}{b_{i-1}} \right) \right); # \frac{kJ}{m^2}
end do:
>

```

```
> #valores de Jpl
  #for i from 1 to n do
  # print(i, Jelp, Jplp, Apli) :
  # end do:
```

```
> J := Vector[column](n) :
  for i from 1 to n do
    Ji := (Jeli + Jpli)# $\frac{kJ}{m^2}$ 
  end do:
```

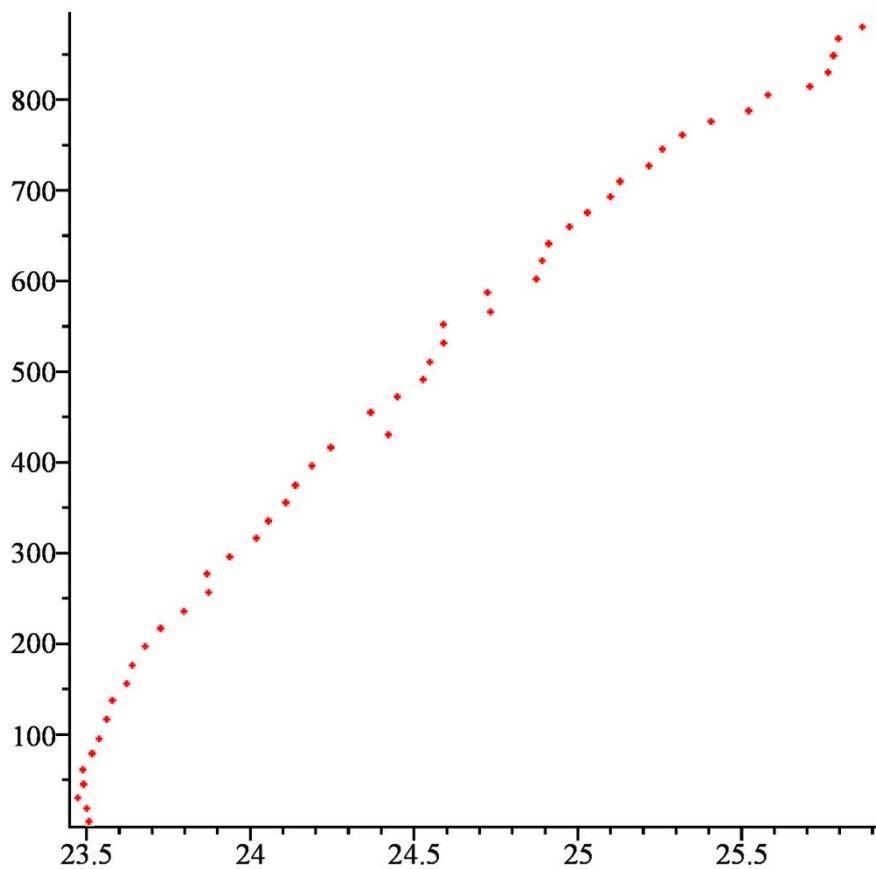
```
> Jmax :=  $\frac{b_1 \cdot (\sigma_y \cdot 10^{-6})}{10}$ ;  $\Delta a_{max} := 0.25 \cdot b_1$ ;
```

Jmax := 871.833362653799

$\Delta a_{max} := 3.40400344625097$

(3)

```
> #Curva de resistência
> plot(a, J, style=point)
```



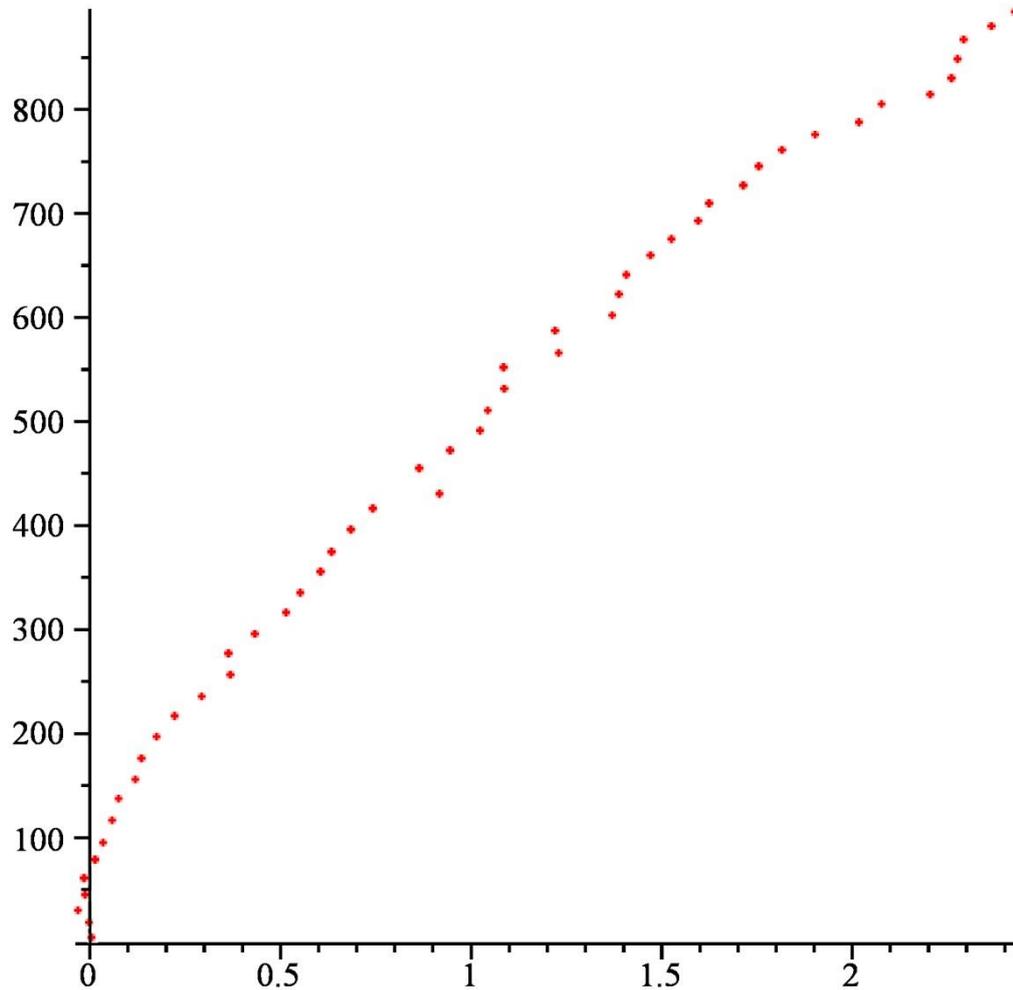
```
>  $\hat{a}_i := Vector[column](n)$  :#verificar se o a0 é o medido ou o calculado
```

```
> for i from 1 to n do
```

```

 $\delta a_i := a_i - a_1 :$ 
end do :
> plot(  $\delta a$ , J, style=point)

```



```

> #Valores da curva de resistência

```

```

> for i from 1 to n do
  print(i,  $a_p$ ,  $\delta a_p$ , J_i) :
end do:

```

```

      1, 23.5039862149961, 0., 5.38004762338661
      2, 23.4972281818814, -0.00675803311467504, 19.5823851163115
      3, 23.4692754013939, -0.0347108136022385, 31.2790400352292
      4, 23.4878816535080, -0.0161045614880742, 46.2855091788264
      5, 23.4850073750569, -0.0189788399391553, 62.2395103193748
      6, 23.5136151549042, 0.00962893990813996, 80.2488065221764
      7, 23.5346793107334, 0.0306930957372558, 96.3165058503121
      8, 23.5582986268421, 0.0543124118460057, 117.842976993404
      9, 23.5752000753081, 0.0712138603120458, 138.760433292222
     10, 23.6191285551541, 0.115142340158009, 157.221675742936

```

11, 23.6357674085348, 0.131781193538711, 177.502667933909
12, 23.6751314053481, 0.171145190351950, 198.287893432034
13, 23.7223930312645, 0.218406816268363, 218.203413448263
14, 23.7935888780849, 0.289602663088800, 236.984082600441
15, 23.8690579165432, 0.365071701547055, 257.858996874106
16, 23.8641840650550, 0.360197850058885, 278.308675197756
17, 23.9335418919362, 0.429555676940051, 297.260641439440
18, 24.0148320813967, 0.510845866400572, 317.715864487887
19, 24.0520954678647, 0.548109252868564, 336.798892368394
20, 24.1054486966333, 0.601462481637238, 357.086542724103
21, 24.1345007754475, 0.630514560451392, 376.036857769316
22, 24.1850547560066, 0.681068541010543, 397.572141982138
23, 24.2427902290884, 0.738804014092285, 417.875405749804
24, 24.4179491107521, 0.913962895755954, 431.760365018142
25, 24.3646820742885, 0.860695859292374, 456.375720745617
26, 24.4455978211947, 0.941611606198599, 473.487160717110
27, 24.5236895790401, 1.01970336404404, 492.704000301135
28, 24.5440607842498, 1.04007456925365, 511.973904115276
29, 24.5866581320156, 1.08267191701950, 532.930360143207
30, 24.5852273535983, 1.08124113860219, 553.536156397074
31, 24.7293439942356, 1.22535777923950, 567.051071936405
32, 24.7201835780460, 1.21619736304994, 588.831602028223
33, 24.8697399120682, 1.36575369707207, 603.536408444401
34, 24.8875795374694, 1.38359332247332, 623.682514380152
35, 24.9071937651364, 1.40320755014026, 642.429594640079
36, 24.9706880391003, 1.46670182410420, 661.095430032996
37, 25.0256585386701, 1.52167232367400, 676.776819964461
38, 25.0957883478550, 1.59180213285894, 694.208750656407
39, 25.1248735313055, 1.62088731630937, 711.266416677910
40, 25.2139074069108, 1.70992119191472, 728.466225798380
41, 25.2549518246973, 1.75096560970117, 746.586638632143
42, 25.3156756750437, 1.81168946004761, 762.228094153312
43, 25.4027171552475, 1.89873094025143, 777.030070456590
44, 25.5182443455830, 2.01425813058686, 789.090892840480
45, 25.5771709864636, 2.07318477146746, 806.457109117966
46, 25.7049363523569, 2.20095013736082, 815.777411104054
47, 25.7607530900150, 2.25676687501893, 831.415845253454
48, 25.7768147377205, 2.27282852272443, 849.972198557242
49, 25.7928599252901, 2.28887371029397, 868.697146696141
50, 25.8655450948416, 2.36155887984552, 881.559517459137
51, 25.9282959207210, 2.42430970572488, 895.352676446785

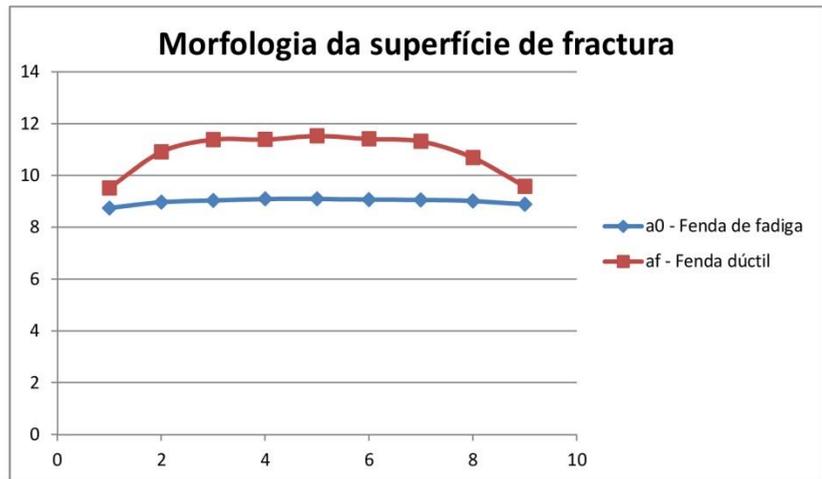
(4)

8.5 Anexo E – Registo da medição do comprimento de fenda na superfície de fractura.

213_1										
Medição do optica do tamanho de fenda						Verificação				
W [mm]	B [mm]	ae [mm]	0,005W	ΔH [mm]	l	ai [mm]	afi [mm]	a0-ai < 0,05B	a0-afi < 0,05B	afi-ai > 0,5* Δa
37,24	18,44	15,701	0,1862	1,80676	1	8,743	9,521	Cumpre	Não Cumpre	Não Cumpre
					2	8,975	10,911	Cumpre	Cumpre	Cumpre
					3	9,036	11,387	Cumpre	Cumpre	Cumpre
					4	9,096	11,391	Cumpre	Cumpre	Cumpre
					5	9,099	11,528	Cumpre	Cumpre	Cumpre
					6	9,071	11,412	Cumpre	Cumpre	Cumpre
					7	9,061	11,317	Cumpre	Cumpre	Cumpre
					8	9,017	10,692	Cumpre	Cumpre	Cumpre
					9	8,89	9,579	Cumpre	Não Cumpre	Não Cumpre
					ai/af	9,021438	11,0235	9.1.4.1	9.1.4.2	9.1.5.1
					Δa	2,0020625		SIM	NÃO	
								<4mm	<15% b0	



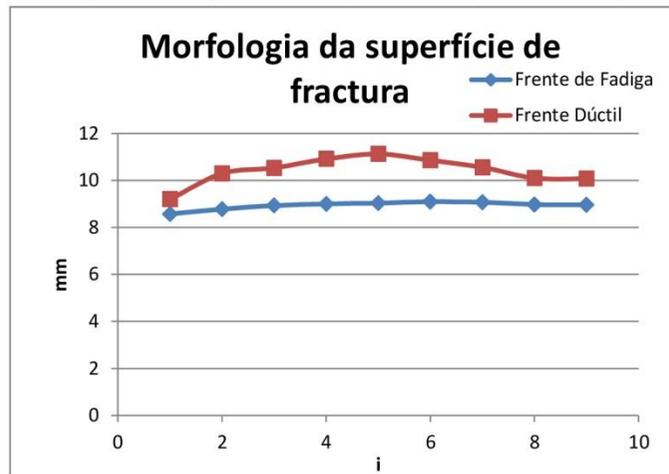
Comparação com a previsão										verificação	
a0 [mm]	a0 (estimado) [mm]	erro [%]	aF [mm]	aF (estimado)	erro [%]	Δa [mm]	Δa (estimado) [mm]	erro [%]	$\Delta a < 0,2b0$	$\Delta a > 0,2b0$	
24,72244	-----	#VALOR!	26,7245	-----	#VALOR!	2,002063	-----	#VALOR!	#VALOR!	#VALOR!	



213_3										
Medição do optica do tamanho de fenda						Verificação				
W [mm]	B [mm]	ae[mm]	0,005W	ΔH [mm]	i	ai [mm]	afi [mm]	a0-ai < 0,05B	a0-afi < 0,05B	af-ai > 0,5* Δa
37,13	18,45	16,256	0,18565	1,80787	1	8,577	9,204	Cumpre	Não Cumpre	Não Cumpre
					2	8,786	10,301	Cumpre	Cumpre	Cumpre
					3	8,936	10,539	Cumpre	Cumpre	Cumpre
					4	9,007	10,92	Cumpre	Cumpre	Cumpre
					5	9,041	11,131	Cumpre	Cumpre	Cumpre
					6	9,099	10,864	Cumpre	Cumpre	Cumpre
					7	9,077	10,564	Cumpre	Cumpre	Cumpre
					8	8,981	10,103	Cumpre	Cumpre	Cumpre
					9	8,969	10,079	Cumpre	Cumpre	Cumpre
					ai/af	8,9625	10,50794	9.1.4.1	9.1.4.2	9.1.5.1
					Δa	1,5454375				

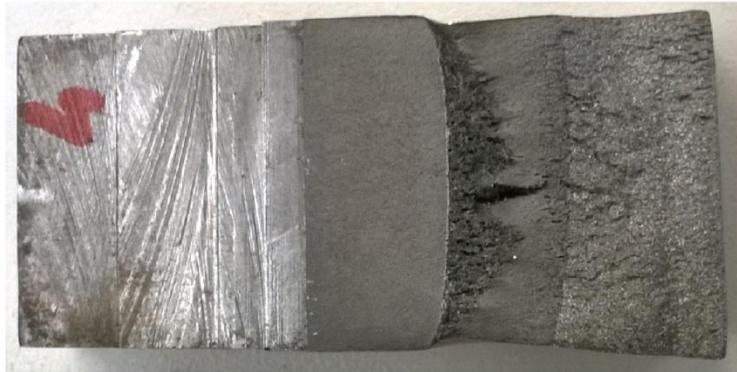


Comparação com a previsão										verificação	
a0 [mm]	a0 (estimado) [mm]	erro [%]	aF [mm]	aF (estimado) [mm]	erro [%]	Δa [mm]	Δa (estimado) [mm]	erro [%]	$\Delta a < 0,2b0$	$\Delta a > 0,2b0$	
25,2185	24,30481682	3,623067	26,763938	25,16846075	5,96129306	1,545438	0,863643933	44,11654092	Não cumpre	Cumpre	

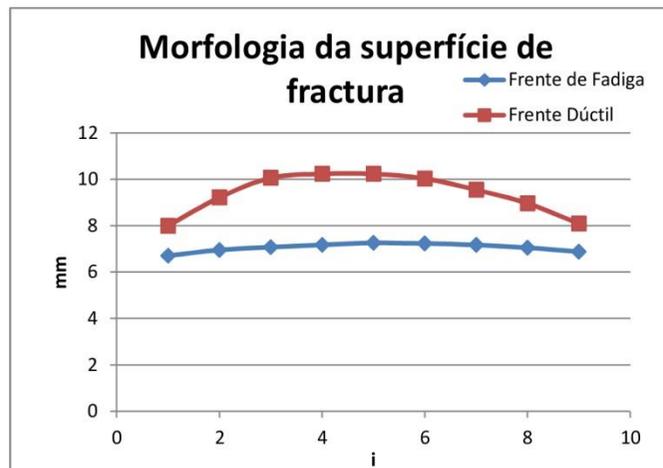


213_4

Medição do optica do tamanho de fenda						Verificação				
W [mm]	B [mm]	ae[mm]	0,005W	ΔH [mm]	i	ai [mm]	afi [mm]	a0-ai < 0,05B	a0-afi < 0,05B	af-ai > 0,5 * Δa
37,15	18,33	16,076	0,18575	1,79585	1	6,709	8,0012	Cumpre	Não Cumpre	Cumpre
					2	6,96	9,22	Cumpre	Cumpre	Cumpre
					3	7,079	10,066	Cumpre	Cumpre	Cumpre
					4	7,175	10,235	Cumpre	Cumpre	Cumpre
					5	7,261	10,235	Cumpre	Cumpre	Cumpre
					6	7,237	10,036	Cumpre	Cumpre	Cumpre
					7	7,176	9,55	Cumpre	Cumpre	Cumpre
					8	7,058	8,967	Cumpre	Cumpre	Cumpre
					9	6,886	8,094	Cumpre	Não Cumpre	Não Cumpre
					ai/af	7,0929375	9,544575	9.1.4.1	9.1.4.2	9.1.5.1
					Δa	2,4516375				



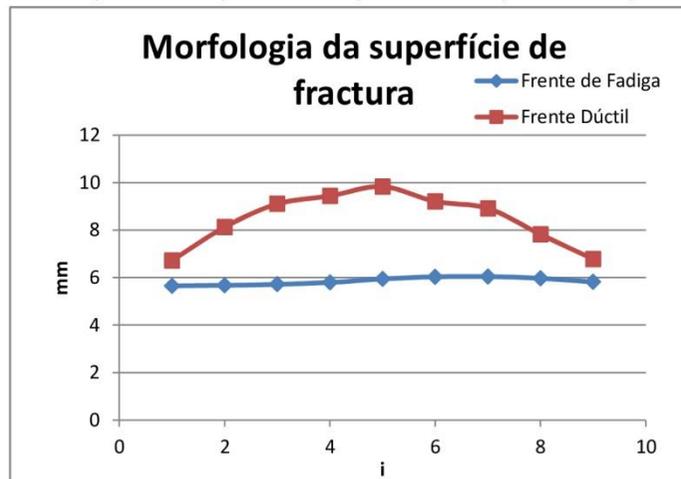
Comparação com a previsão									verificação	
a0 [mm]	a0 (estimado) [mm]	erro [%]	aF [mm]	aF (estimado)	erro [%]	Δa [mm]	Δa (estimado) [mm]	erro [%]	$\Delta a < 0,2b0$	$\Delta a > 0,2b0$
23,16894	22,29858432	3,756552	25,620575	23,64248078	7,72072532	2,451638	1,343896462	45,1837206	Não cumpre	Não cumpre



213_5										
Medição do optica do tamanho de fenda						Verificação				
W [mm]	B [mm]	ae[mm]	0,005W	ΔH [mm]	i	ai [mm]	afi [mm]	a0-ai < 0,05B	a0-afi < 0,05B	af-ai>0,5* Δa
37,06	18,41	15,864	0,1853	1,80394	1	5,655	6,726	Cumpre	Não Cumpre	Não Cumpre
					2	5,681	8,134	Cumpre	Cumpre	Cumpre
					3	5,725	9,108	Cumpre	Cumpre	Cumpre
					4	5,803	9,446	Cumpre	Cumpre	Cumpre
					5	5,951	9,837	Cumpre	Cumpre	Cumpre
					6	6,04	9,213	Cumpre	Cumpre	Cumpre
					7	6,052	8,92	Cumpre	Cumpre	Cumpre
					8	5,979	7,828	Cumpre	Cumpre	Cumpre
					9	5,824	6,787	Cumpre	Não Cumpre	Não Cumpre
					ai/af	5,8713125	8,655313	9.1.4.1	9.1.4.2	9.1.5.1
					Δa	2,784				



Comparação com a previsão										verificação	
a0 [mm]	a0 (estimado) [mm]	erro [%]	aF [mm]	aF (estimado)	erro [%]	Δa [mm]	Δa (estimado) [mm]	erro [%]	$\Delta a < 0,2b0$	$\Delta a > 0,2b0$	
21,73531	20,61704505	5,144934	24,519313	22,27167629	9,16679946	2,784	1,654631246	40,56640641	Não cumpre	Não cumpre	

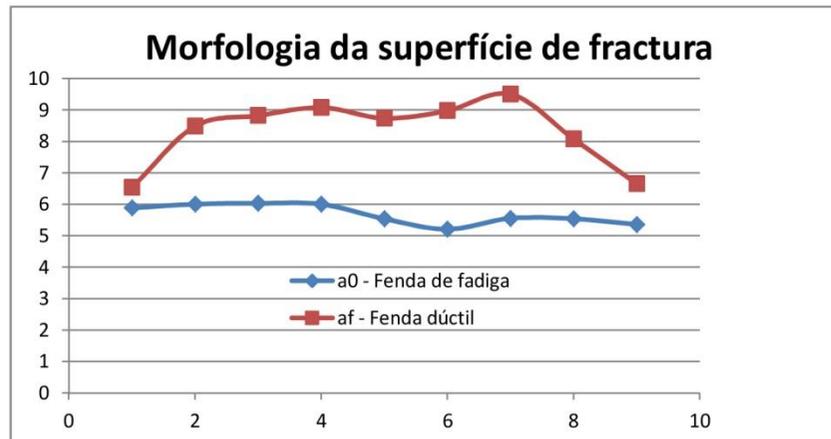


213_6

Medição do optica do tamanho de fenda					Verificação					
W [mm]	B [mm]	ae [mm]	0,005W	ΔH [mm]	i	ai [mm]	afi [mm]	a0-ai < 0,05B	a0-afi < 0,05B	afi-ai>0,5* Δa
37,05	18,39	16,011	0,18525	1,80195	1	5,89	6,539	Cumpre	Não Cumpre	Não Cumpre
					2	6,006	8,487	Cumpre	Cumpre	Cumpre
					3	6,036	8,824	Cumpre	Cumpre	Cumpre
					4	6,006	9,082	Cumpre	Cumpre	Cumpre
					5	5,542	8,741	Cumpre	Cumpre	Cumpre
					6	5,212	8,979	Cumpre	Cumpre	Cumpre
					7	5,557	9,508	Cumpre	Cumpre	Cumpre
					8	5,545	8,081	Cumpre	Cumpre	Cumpre
					9	5,364	6,661	Cumpre	Não Cumpre	Não Cumpre
					ai/af	5,691375	8,53775	9.1.4.1	9.1.4.2	9.1.5.1
					Δa	2,846375		SIM	NÃO	
								<4mm	<15% b0	



Comparação com a previsão									verificação	
a0 [mm]	a0 (estimado) [mm]	erro [%]	aF [mm]	aF (estimado)	erro [%]	Δa [mm]	Δa (estimado) [mm]	erro [%]	$\Delta a < 0,2b0$	$\Delta a > 0,2b0$
21,70238	----	#VALOR!	24,54875	----	#VALOR!	2,846375		100	Não cumpre	Não cumpre

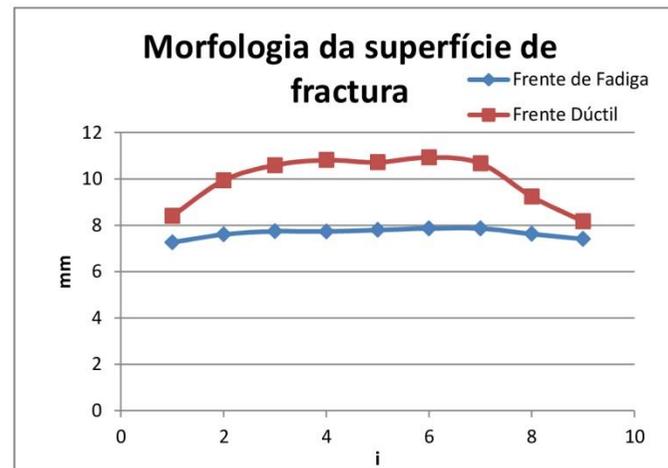


213_7

Medição do optica do tamanho de fenda					Verificação					
W [mm]	B [mm]	ae[mm]	0,005W	ΔH [mm]	i	ai [mm]	afi [mm]	a0-ai < 0,05B	a0-afi < 0,05B	af-ai > 0,5 * Δa
37,05	18,37	15,917	0,18525	1,79995	1	7,267	8,408	Cumpre	Não Cumpre	Não Cumpre
					2	7,606	9,935	Cumpre	Cumpre	Cumpre
					3	7,741	10,596	Cumpre	Cumpre	Cumpre
					4	7,736	10,818	Cumpre	Cumpre	Cumpre
					5	7,801	10,72	Cumpre	Cumpre	Cumpre
					6	7,866	10,934	Cumpre	Cumpre	Cumpre
					7	7,866	10,672	Cumpre	Cumpre	Cumpre
					8	7,629	9,2422	Cumpre	Cumpre	Cumpre
					9	7,412	8,174	Cumpre	Não Cumpre	Não Cumpre
					ai/af	7,6980625	10,15103	9.1.4.1	9.1.4.2	9.1.5.1
					Δa	2,4529625				



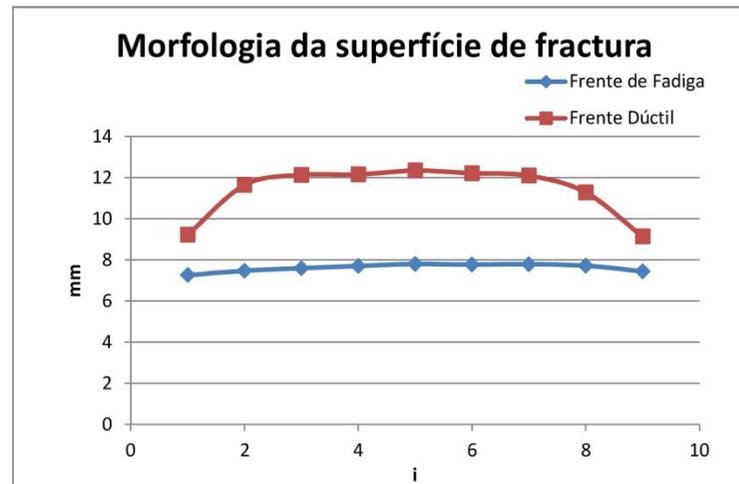
Comparação com a previsão									verificação	
a0 [mm]	a0 (estimado) [mm]	erro [%]	aF [mm]	aF (estimado)	erro [%]	Δa [mm]	Δa (estimado) [mm]	erro [%]	$\Delta a < 0,2b0$	$\Delta a > 0,2b0$
23,61506	22,64314061	4,115686	26,068025	24,16205823	7,31151198	2,452963	1,51891762	38,07823723	Não cumpre	Não cumpre



217_1										
Medição do optica do tamanho de fenda						Verificação				
W [mm]	B [mm]	ae[mm]	0,005W	ΔH [mm]	i	ai [mm]	afi [mm]	a0-ai < 0,05B	af-afi < 0,05B	af-ai>0,5* Δa
37,12	18,4	15,999	0,1856	1,80288	1	7,267	9,224	Cumpre	Não Cumpre	Não Cumpre
					2	7,477	11,647	Cumpre	Cumpre	Cumpre
					3	7,601	12,134	Cumpre	Cumpre	Cumpre
					4	7,711	12,156	Cumpre	Cumpre	Cumpre
					5	7,805	12,347	Cumpre	Cumpre	Cumpre
					6	7,791	12,216	Cumpre	Cumpre	Cumpre
					7	7,796	12,1	Cumpre	Cumpre	Cumpre
					8	7,723	11,289	Cumpre	Cumpre	Cumpre
					9	7,453	9,14	Cumpre	Não Cumpre	Não Cumpre
					ai/af	7,6565125	11,63388	9.1.4.1	9.1.4.2	9.1.5.1
					Δa	3,9773625				



Comparação com a previsão								verificação		
a0 [mm]	a0 (estimado) [mm]	erro [%]	aF [mm]	aF (estimado) [mm]	erro [%]	Δa [mm]	Δa (estimado) [mm]	erro [%]	$\Delta a < 0,2b0$	$\Delta a > 0,2b0$
23,65551	23,50398621	0,640554	27,632875	25,92829592	6,16866352	3,977363	2,424309706	39,04730319	Não cumpre	Não cumpre

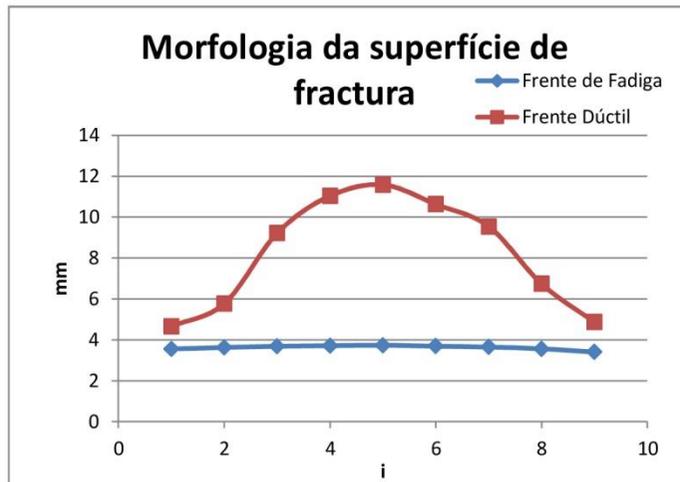


217_2

Medição do optica do tamanho de fenda					Verificação					
W [mm]	B [mm]	ae[mm]	0,005W	ΔH [mm]	i	ai [mm]	afi [mm]	a0-ai < 0,05B	a0-afi < 0,05B	af-ai>0,5* Δa
37,19	18,55	16,023	0,18595	1,81781	1	3,556	4,656	Cumpre	Não Cumpre	Não Cumpre
					2	3,63	5,773	Cumpre	Não Cumpre	Não Cumpre
					3	3,685	9,217	Cumpre	Cumpre	Cumpre
					4	3,712	11,04	Cumpre	Cumpre	Cumpre
					5	3,733	11,583	Cumpre	Cumpre	Cumpre
					6	3,692	10,632	Cumpre	Cumpre	Cumpre
					7	3,651	9,544	Cumpre	Cumpre	Cumpre
					8	3,561	6,744	Cumpre	Não Cumpre	Cumpre
					9	3,41	4,866	Cumpre	Não Cumpre	Não Cumpre
					ai/af	3,643375	8,66175	9.1.4.1	9.1.4.2	9.1.5.1
					Δa	5,018375				



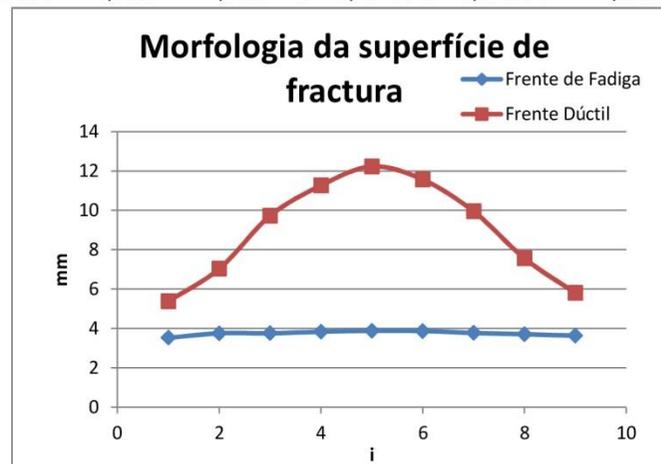
Comparação com a previsão										verificação	
a0 [mm]	a0 (estimado) [mm]	erro [%]	aF [mm]	aF (estimado)	erro [%]	Δa [mm]	Δa (estimado) [mm]	erro [%]		$\Delta a < 0,2b0$	$\Delta a > 0,2b0$
19,66638	19,86511852	-1,01058	24,68475	22,90111268	7,22566492	5,018375	3,035994163	39,50244525		Não cumpre	Não cumpre



217_3										
Medição do optica do tamanho de fenda								Verificação		
W [mm]	B [mm]	ae[mm]	0,005W	ΔH [mm]	i	ai [mm]	afi [mm]	a0-ai < 0,05B	a0-afi < 0,05B	af-ai>0,5* Δa
37,19	18,53	15,96	0,18595	1,81581	1	3,532	5,387	Cumpre	Não Cumpre	Não Cumpre
					2	3,755	7,041	Cumpre	Não Cumpre	Cumpre
					3	3,762	9,727	Cumpre	Cumpre	Cumpre
					4	3,839	11,27	Cumpre	Cumpre	Cumpre
					5	3,881	12,239	Cumpre	Cumpre	Cumpre
					6	3,873	11,57	Cumpre	Cumpre	Cumpre
					7	3,778	9,953	Cumpre	Cumpre	Cumpre
					8	3,716	7,568	Cumpre	Não Cumpre	Cumpre
					9	3,637	5,805	Cumpre	Não Cumpre	Não Cumpre
					ai/af	3,7735625	9,3705	9.1.4.1	9.1.4.2	9.1.5.1
					Δa	5,5969375				



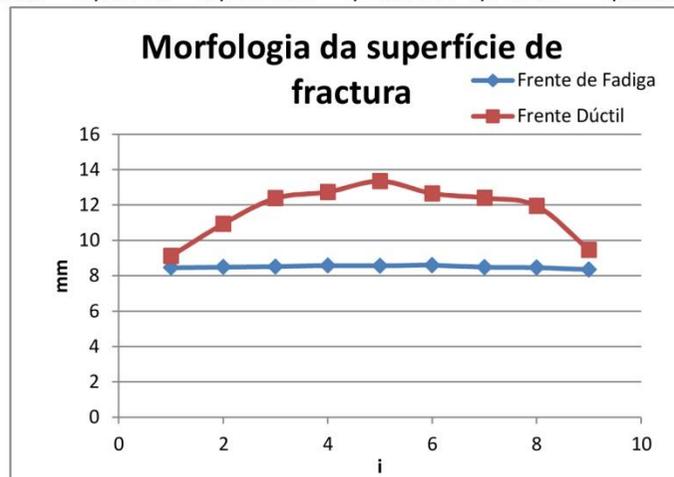
Comparação com a previsão									verificação	
a0 [mm]	a0 (estimado) [mm]	erro [%]	aF [mm]	aF (estimado) [mm]	erro [%]	Δa [mm]	Δa (estimado) [mm]	erro [%]	$\Delta a < 0,2b0$	$\Delta a > 0,2b0$
19,73356	19,932	-1,00558	25,3305	22,98691137	9,25204251	5,596938	3,054911372	45,41816178	Não cumpre	Não cumpre



217_4										
Medição do optica do tamanho de fenda						Verificação				
W [mm]	B [mm]	ae[mm]	0,005W	ΔH [mm]	i	ai [mm]	afi [mm]	a0-ai < 0,05B	af-afi < 0,05B	af-ai>0,5* Δa
37,18	18,55	16,065	0,1859	1,81782	1	8,468	9,129	Cumpre	Não Cumpre	Não Cumpre
					2	8,498	10,94	Cumpre	Não Cumpre	Cumpre
					3	8,525	12,39	Cumpre	Cumpre	Cumpre
					4	8,58	12,741	Cumpre	Cumpre	Cumpre
					5	8,57	13,353	Cumpre	Cumpre	Cumpre
					6	8,6	12,661	Cumpre	Cumpre	Cumpre
					7	8,494	12,406	Cumpre	Cumpre	Cumpre
					8	8,465	11,953	Cumpre	Cumpre	Cumpre
					9	8,358	9,468	Cumpre	Não Cumpre	Não Cumpre
					ai/af	8,518125	11,96781	9.1.4.1	9.1.4.2	9.1.5.1
					Δa	3,4496875				



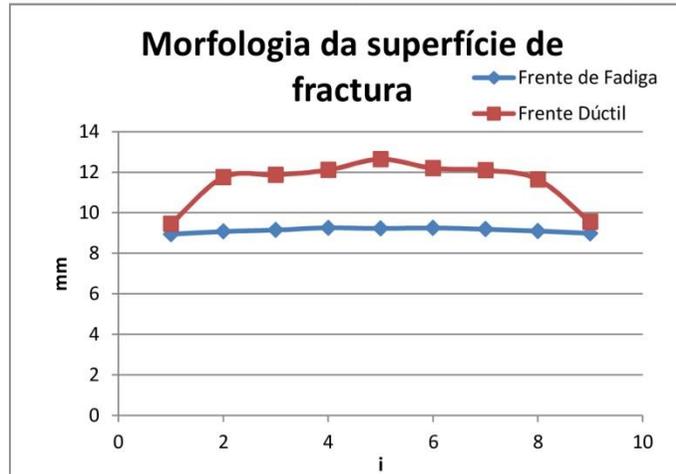
Comparação com a previsão										verificação	
a0 [mm]	a0 (estimado) [mm]	erro [%]	aF [mm]	aF (estimado) [mm]	erro [%]	Δa [mm]	Δa (estimado) [mm]	erro [%]	$\Delta a < 0,2b0$	$\Delta a > 0,2b0$	
24,58313	24,64966447	-0,27067	28,032813	26,70947506	4,72067311	3,449688	2,05981058823	40,28993675	Não cumpre	Não cumpre	



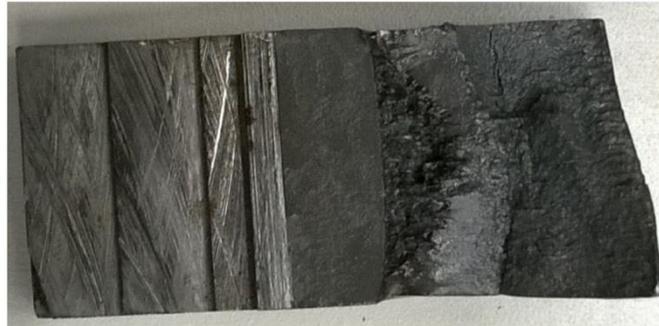
217_5										
Medição do optica do tamanho de fenda							Verificação			
W [mm]	B [mm]	ae[mm]	0,005W	ΔH [mm]	i	ai [mm]	afi [mm]	a0-ai < 0,05B	a0-afi < 0,05B	af-ai>0,5* Δa
37,08	18,62	15,974	0,1854	1,82492	1	8,948	9,457	Cumpre	Não Cumpre	Não Cumpre
					2	9,083	11,753	Cumpre	Cumpre	Cumpre
					3	9,157	11,88	Cumpre	Cumpre	Cumpre
					4	9,26	12,114	Cumpre	Cumpre	Cumpre
					5	9,231	12,652	Cumpre	Cumpre	Cumpre
					6	9,255	12,202	Cumpre	Cumpre	Cumpre
					7	9,194	12,104	Cumpre	Cumpre	Cumpre
					8	9,1	11,65	Cumpre	Cumpre	Cumpre
					9	8,989	9,552	Cumpre	Não Cumpre	Não Cumpre
					ai/af	9,1560625	11,73244	9.1.4.1	9.1.4.2	9.1.5.1
					Δa	2,576375				



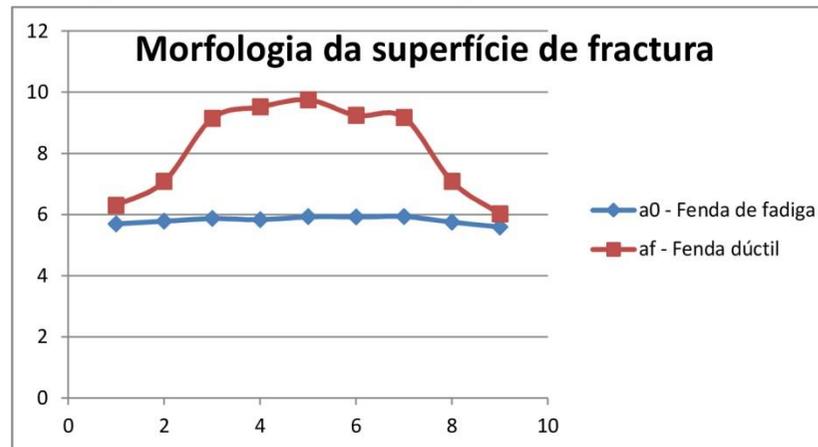
Comparação com a previsão										verificação	
a0 [mm]	a0 (estimado) [mm]	erro [%]	aF [mm]	aF (estimado)	erro [%]	Δa [mm]	Δa (estimado) [mm]	erro [%]	$\Delta a < 0,2b0$	$\Delta a > 0,2b0$	
25,13006	25,15233059	-0,08861	27,706438	26,65482079	3,79556812	2,576375	1,502490202	41,68200662	Não cumpre	Não cumpre	



217_6										
Medição do optica do tamanho de fenda						Verificação				
W [mm]	B [mm]	ae [mm]	0,005W	ΔH [mm]	i	ai [mm]	afi [mm]	a0-ai < 0,05B	a0-afi < 0,05B	afi-ai > 0,5* Δa
37,09	18,5	15,86	0,18545	1,81291	1	5,698	6,305	Cumpre	Não Cumpre	Não Cumpre
					2	5,782	7,086	Cumpre	Não Cumpre	Cumpre
					3	5,874	9,146	Cumpre	Cumpre	Cumpre
					4	5,837	9,521	Cumpre	Cumpre	Cumpre
					5	5,928	9,755	Cumpre	Cumpre	Cumpre
					6	5,924	9,248	Cumpre	Cumpre	Cumpre
					7	5,935	9,177	Cumpre	Cumpre	Cumpre
					8	5,753	7,083	Cumpre	Não Cumpre	Cumpre
					9	5,595	6,019	Cumpre	Não Cumpre	Não Cumpre
					ai/af	5,834938	8,39725	9.1.4.1	9.1.4.2	9.1.5.1
					Δa	2,5623125		SIM	NÃO	
								<4mm	<15% b0	

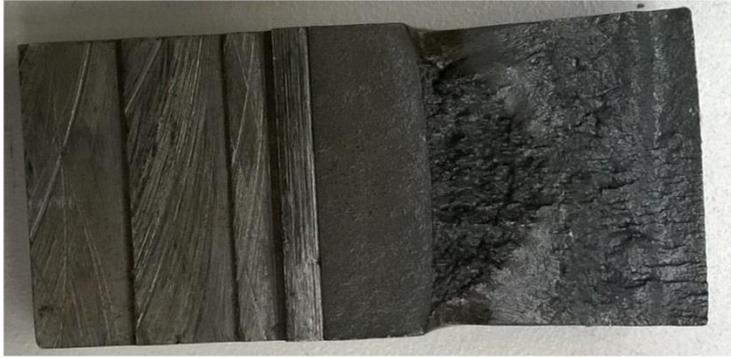


Comparação com a previsão									verificação	
a0 [mm]	a0 (estimado) [mm]	erro [%]	aF [mm]	aF (estimado) [mm]	erro [%]	Δa [mm]	Δa (estimado) [mm]	erro [%]	$\Delta a < 0,2b0$	$\Delta a > 0,2b0$
21,69494	-----	#VALORI	24,25725	-----	#VALORI	2,562313	-----	#VALORI	#VALORI	#VALORI

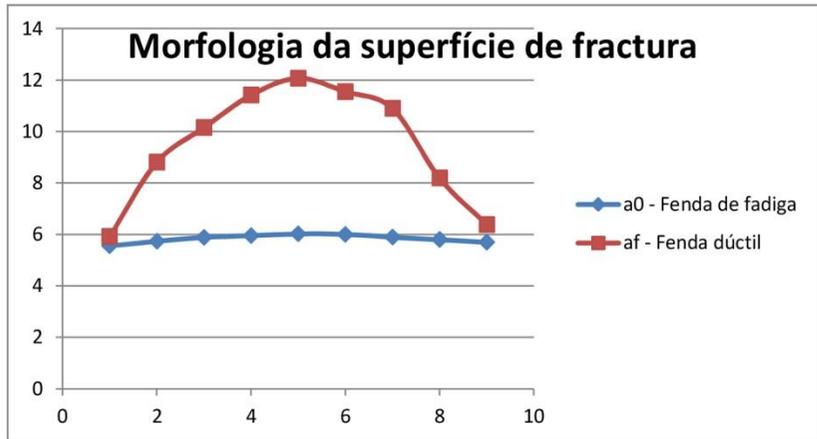


217_7

Medição do optica do tamanho de fenda					Verificação					
W [mm]	B [mm]	ae [mm]	0,005W	ΔH [mm]	i	ai [mm]	afi [mm]	a0-ai < 0,05B	a0-afi < 0,05B	afi-ai>0,5* Δa
37,11	18,59	15,88	0,18555	1,82189	1	5,562	5,918	Cumpre	Não Cumpre	Não Cumpre
					2	5,741	8,811	Cumpre	Não Cumpre	Cumpre
					3	5,888	10,155	Cumpre	Cumpre	Cumpre
					4	5,959	11,423	Cumpre	Cumpre	Cumpre
					5	6,022	12,074	Cumpre	Cumpre	Cumpre
					6	6,008	11,553	Cumpre	Cumpre	Cumpre
					7	5,895	10,901	Cumpre	Cumpre	Cumpre
					8	5,805	8,193	Cumpre	Não Cumpre	Cumpre
					9	5,697	6,386	Cumpre	Não Cumpre	Não Cumpre
					ai/af	5,868438	9,90775	9.1.4.1	9.1.4.2	9.1.5.1
					Δa	4,0393125		NÃO	NÃO	
								<4mm	<15% b0	



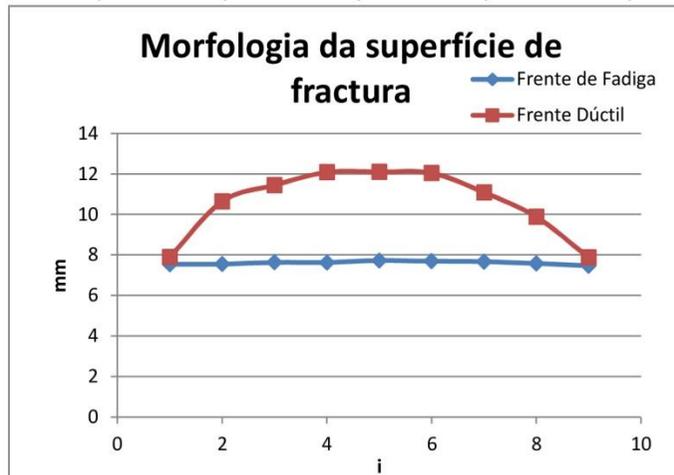
Comparação com a previsão									verificação	
a0 [mm]	a0 (estimado) [mm]	erro [%]	aF [mm]	aF (estimado) [mm]	erro [%]	Δa [mm]	Δa (estimado) [mm]	erro [%]	$\Delta a < 0,2b0$	$\Delta a > 0,2b0$
21,74844	-----	#VALORI	25,78775	-----	#VALORI	4,039313	-----	#VALORI	#VALORI	#VALORI



217_8										
Medição do optica do tamanho de fenda						Verificação				
W [mm]	B [mm]	ae[mm]	0,005W	ΔH [mm]	i	ai [mm]	afi [mm]	a0-ai < 0,05B	af-afi < 0,05B	af-ai>0,5* Δa
37,07	18,53	16,072	0,18535	1,81593	1	7,543	7,906	Cumpre	Não Cumpre	Não Cumpre
					2	7,552	10,646	Cumpre	Cumpre	Cumpre
					3	7,639	11,45	Cumpre	Cumpre	Cumpre
					4	7,634	12,083	Cumpre	Cumpre	Cumpre
					5	7,731	12,102	Cumpre	Cumpre	Cumpre
					6	7,698	12,047	Cumpre	Cumpre	Cumpre
					7	7,675	11,091	Cumpre	Cumpre	Cumpre
					8	7,586	9,881	Cumpre	Não Cumpre	Cumpre
					9	7,475	7,881	Cumpre	Não Cumpre	Não Cumpre
					ai/af	7,628	10,89919	9.1.4.1	9.1.4.2	9.1.5.1
					Δa	3,2711875				



Comparação com a previsão										verificação	
a0 [mm]	a0 (estimado) [mm]	erro [%]	aF [mm]	aF (estimado) [mm]	erro [%]	Δa [mm]	Δa (estimado) [mm]	erro [%]	$\Delta a < 0,2b0$	$\Delta a > 0,2b0$	
23,7	23,6730707	0,113626	26,971188	25,58099966	5,15434421	3,271188	1,880999658	42,49795652	Não cumpre	Não cumpre	



8.6 Anexo F – Método de normalização

Cálculo do J para a normalização do diagrama de força vs deslocamento

```

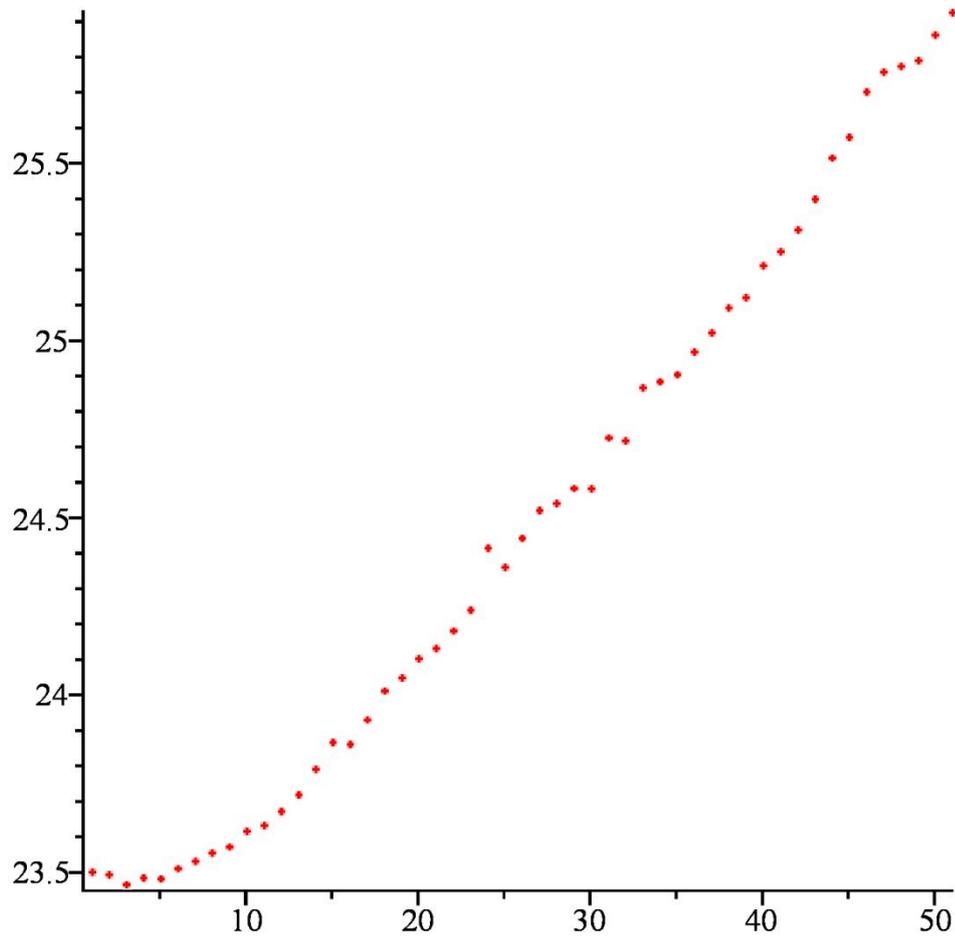
> restart
> with(LinearAlgebra) : with(plots) :
>
> #Dados geométricos e Mecânicos do provete
> EE := 191.995·103 :  $\sigma_{ys}$  := 585.35·106 :  $\sigma_{uts}$  := 695.25·106 : B := 18.4 : Bn := B : W
    := 37.12 : Be :=  $B - \frac{(B - Bn)^2}{B}$  : S := 148.68 :  $\nu$  := 0.3 : L := 196.31 :  $\sigma_y$ 
    :=  $\frac{\sigma_{ys} + \sigma_{uts}}{2}$  :
>
> #importação dos dados recolhidos no diagrama de força vs deslocamento
>
> dados:=ImportMatrix
    ("C:\\Users\\Adriano Balhana\\Dropbox\\tese
    mestrado\\Ensaios\\Ensaios provetes
    pequenos\\217_cbl_1\\217_cbl_1_dados.txt", source=delimited, delimiter
    = "", datatype=float[8], skiplines=1);
    dados :=  $\left[ \begin{array}{l} 51 \times 3 \text{ Matrix} \\ \text{Data Type: float}_8 \\ \text{Storage: rectangular} \\ \text{Order: Fortran\_order} \end{array} \right]$  (1)
>
> n := 51 :
> F := Vector[column](n) : V := Vector[column](n) : C := Vector[column](n) : N
    := Vector[column](n) :
>
> #Extração dos dados do diagrama para vectores
>
> for i from 1 to n do
    Fi := dadosi, 2;
    Vi := dadosi, 1;
    Ci := dadosi, 3;
    Ni := i;
end do:
> u := Vector[column](n) : aw := Vector[column](n) : a := Vector[column](n) :
>
> #Calculo do u e do comprimento de fenda
>
    for i from 1 to n do
        ui := evalf  $\left( \frac{1}{\left( \left( \frac{Be \cdot W \cdot EE \cdot C_i}{S} \right)^{\frac{1}{2}} + 1 \right)} \right)$  :
    end do:

```

```

aw_i := 0.999748 - 3.9504·u_i + 2.9821·u_i^2 - 3.21408·u_i^3 + 51.51564·u_i^4 - 113.031·u_i^5;
a_i := (aw_i·W);
b_i := (W - a_i);
# print(i, a_i)
end do:
> plot(N, a, style = point)

```



```

> #Calculo do j elástico
>
> #factor de forma do provete de flexão (Senb)
>

```

$$f := \frac{3 \cdot \left(\frac{af}{W}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot \left(1.99 - \left(\frac{af}{W}\right) \cdot \left(1 - \frac{af}{W}\right) \cdot \left(2.15 - 3.93 \cdot \left(\frac{af}{W}\right) + 2.7 \cdot \left(\frac{af}{W}\right)^2\right)\right)}{2 \cdot \left(1 + 2 \cdot \frac{af}{W}\right) \cdot \left(1 - \frac{af}{W}\right)^{\frac{3}{2}}}$$

```

>
>

```

```

> #Factor de intensidade de tensões
> K :=  $\left( \left( \frac{P \cdot S}{(B \cdot Bn)^{\frac{1}{2}} \cdot W^{\frac{3}{2}}} \right) \cdot f \right) \cdot \sqrt{0.001} \text{ :#MPa}\sqrt{m}$ 
> # J elástico
> Jelastico :=  $\frac{KI^2 \cdot (1 - \nu^2)}{EE \cdot 10^6} \text{ :# } \frac{J}{m^2}$ 
> KI := Vector[column](n) : Jel := Vector[column](n) :
> #calculo do K e J
> for i from 1 to n do
  KI_i := evalf(subs(af=a_p, P=F_p, K)) \cdot 10^6; #Pa\sqrt{m}
  Jel_i := evalf(subs(Ki=KI_p, Jelastico) \cdot (10^{-3})); # \frac{kJ}{m^2}
end do:
>
> #Calculo do J plástico
> \eta pl := Vector[column](n) : \wp l := Vector[column](n) : Apl := Vector[column](n) : Vpl
  := Vector[column](n) :
> \eta pl_1 := 3.667 - 2.199 \cdot (aw_1) + 0.437 \cdot (aw_1)^2;
  \wp l_1 := 0.131 + 2.131 \cdot (aw_1) - 1.465 \cdot (aw_1)^2;
  Apl_1 := 0;
  Vpl_1 := 0;
  Jpl_1 := 0;

  \eta pl_1 := 2.44982259331379
  \wp l_1 := 0.892965863520761
  Apl_1 := 0
  Vpl_1 := 0
  Jpl_1 := 0
(2)
>
> for i from 2 to n do
  Vpl_i := V_i - (F_i \cdot C_i);
  Apl_i := Apl_{i-1} +  $\left( (F_i + F_{i-1}) \cdot \frac{(Vpl_i - Vpl_{i-1})}{2} \right)$ ;
  \eta pl_i := 3.667 - 2.199 \cdot (aw_i) + 0.437 \cdot (aw_i)^2;
  \wp l_i := 0.131 + 2.131 \cdot (aw_i) - 1.465 \cdot (aw_i)^2;
  Jpl_i :=  $\left( Jpl_{i-1} + \left( \frac{\eta pl_i}{b_{i-1}} \right) \cdot \left( \frac{Apl_i - Apl_{i-1}}{Bn} \right) \right) \cdot \left( 1 - \wp l_{i-1} \cdot \left( \frac{a_i - a_{i-1}}{b_{i-1}} \right) \right)$ ; # \frac{kJ}{m^2}
end do:
>

```

```
> #valores de Jpl
  #for i from 1 to n do
  # print(i, Jelp, Jplp, Apli) :
  # end do:
```

```
> J := Vector[column](n) :
  for i from 1 to n do
    Ji := (Jeli + Jpli) #  $\frac{kJ}{m^2}$ 
  end do:
```

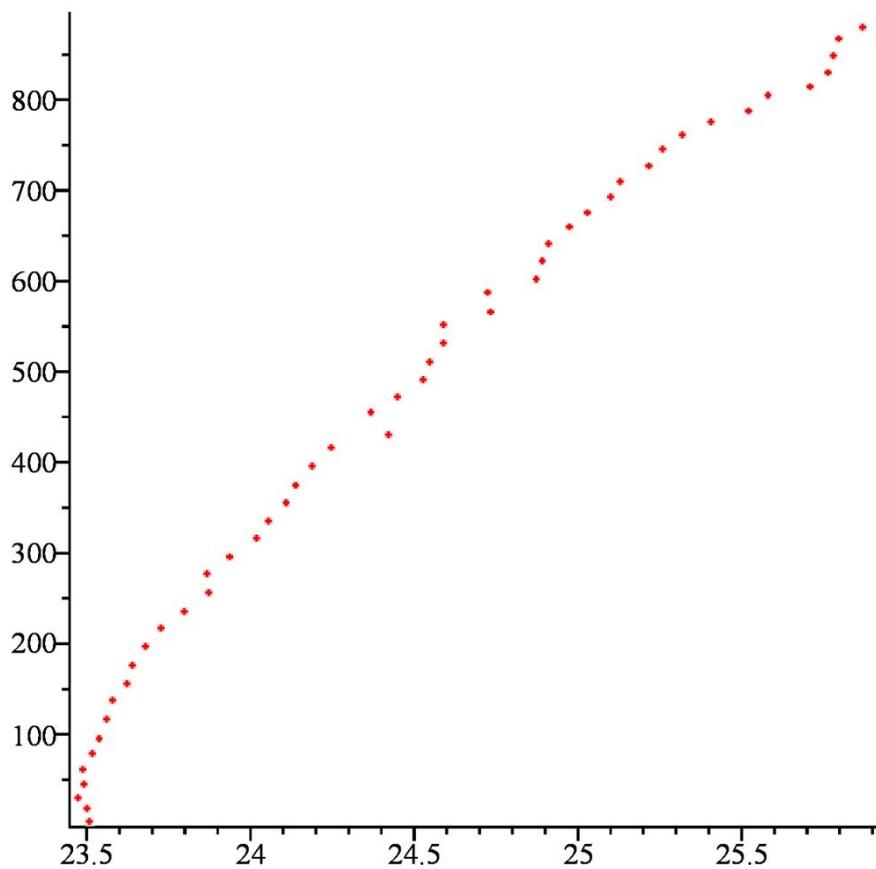
```
> Jmax :=  $\frac{b_1 \cdot (\sigma_y \cdot 10^{-6})}{10}$ ; Δamax := 0.25 · b1;
```

Jmax := 871.833362653799

Δamax := 3.40400344625097

(3)

```
> #Curva de resistência
> plot(a, J, style=point)
```



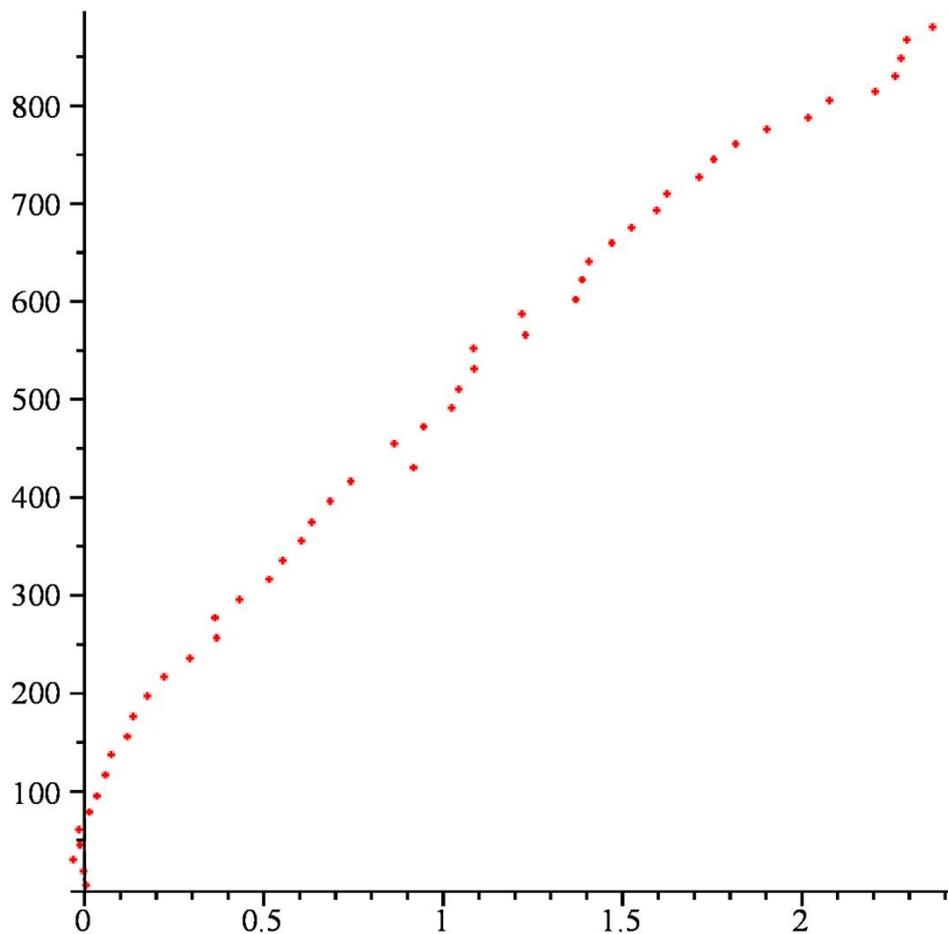
```
> Δa := Vector[column](n) :#verificar se o a0 é o medido ou o calculado
```

```
> for i from 1 to n do
```

```
 $\delta a_i := a_i - a_1 :$ 
```

```
end do :
```

```
> plot(  $\delta a$ , J, style=point)
```



```
> #Valores da curva de resistência
```

```
> for i from 1 to n do
```

```
  print( $i, a_p, \delta a_p, J_i$ ) :
```

```
end do:
```

```
1, 23.5039862149961, 0., 5.38004762338661  
2, 23.4972281818814, -0.00675803311467504, 19.5823851163115  
3, 23.4692754013939, -0.0347108136022385, 31.2790400352292  
4, 23.4878816535080, -0.0161045614880742, 46.2855091788264  
5, 23.4850073750569, -0.0189788399391553, 62.2395103193748  
6, 23.5136151549042, 0.00962893990813996, 80.2488065221764  
7, 23.5346793107334, 0.0306930957372558, 96.3165058503121  
8, 23.5582986268421, 0.0543124118460057, 117.842976993404  
9, 23.5752000753081, 0.0712138603120458, 138.760433292222  
10, 23.6191285551541, 0.115142340158009, 157.221675742936
```

11, 23.6357674085348, 0.131781193538711, 177.502667933909
12, 23.6751314053481, 0.171145190351950, 198.287893432034
13, 23.7223930312645, 0.218406816268363, 218.203413448263
14, 23.7935888780849, 0.289602663088800, 236.984082600441
15, 23.8690579165432, 0.365071701547055, 257.858996874106
16, 23.8641840650550, 0.360197850058885, 278.308675197756
17, 23.9335418919362, 0.429555676940051, 297.260641439440
18, 24.0148320813967, 0.510845866400572, 317.715864487887
19, 24.0520954678647, 0.548109252868564, 336.798892368394
20, 24.1054486966333, 0.601462481637238, 357.086542724103
21, 24.1345007754475, 0.630514560451392, 376.036857769316
22, 24.1850547560066, 0.681068541010543, 397.572141982138
23, 24.2427902290884, 0.738804014092285, 417.875405749804
24, 24.4179491107521, 0.913962895755954, 431.760365018142
25, 24.3646820742885, 0.860695859292374, 456.375720745617
26, 24.4455978211947, 0.941611606198599, 473.487160717110
27, 24.5236895790401, 1.01970336404404, 492.704000301135
28, 24.5440607842498, 1.04007456925365, 511.973904115276
29, 24.5866581320156, 1.08267191701950, 532.930360143207
30, 24.5852273535983, 1.08124113860219, 553.536156397074
31, 24.7293439942356, 1.22535777923950, 567.051071936405
32, 24.7201835780460, 1.21619736304994, 588.831602028223
33, 24.8697399120682, 1.36575369707207, 603.536408444401
34, 24.8875795374694, 1.38359332247332, 623.682514380152
35, 24.9071937651364, 1.40320755014026, 642.429594640079
36, 24.9706880391003, 1.46670182410420, 661.095430032996
37, 25.0256585386701, 1.52167232367400, 676.776819964461
38, 25.0957883478550, 1.59180213285894, 694.208750656407
39, 25.1248735313055, 1.62088731630937, 711.266416677910
40, 25.2139074069108, 1.70992119191472, 728.466225798380
41, 25.2549518246973, 1.75096560970117, 746.586638632143
42, 25.3156756750437, 1.81168946004761, 762.228094153312
43, 25.4027171552475, 1.89873094025143, 777.030070456590
44, 25.5182443455830, 2.01425813058686, 789.090892840480
45, 25.5771709864636, 2.07318477146746, 806.457109117966
46, 25.7049363523569, 2.20095013736082, 815.777411104054
47, 25.7607530900150, 2.25676687501893, 831.415845253454
48, 25.7768147377205, 2.27282852272443, 849.972198557242
49, 25.7928599252901, 2.28887371029397, 868.697146696141
50, 25.8655450948416, 2.36155887984552, 881.559517459137
51, 25.9282959207210, 2.42430970572488, 895.352676446785

(4)

Cálculo do diagrama de força vs deslocamento normalizado

Processo
iterativo para a
obtenção dos
comprimentos
de fenda
intermédios

8.7 Anexo G – Obtenção do J_{IC}

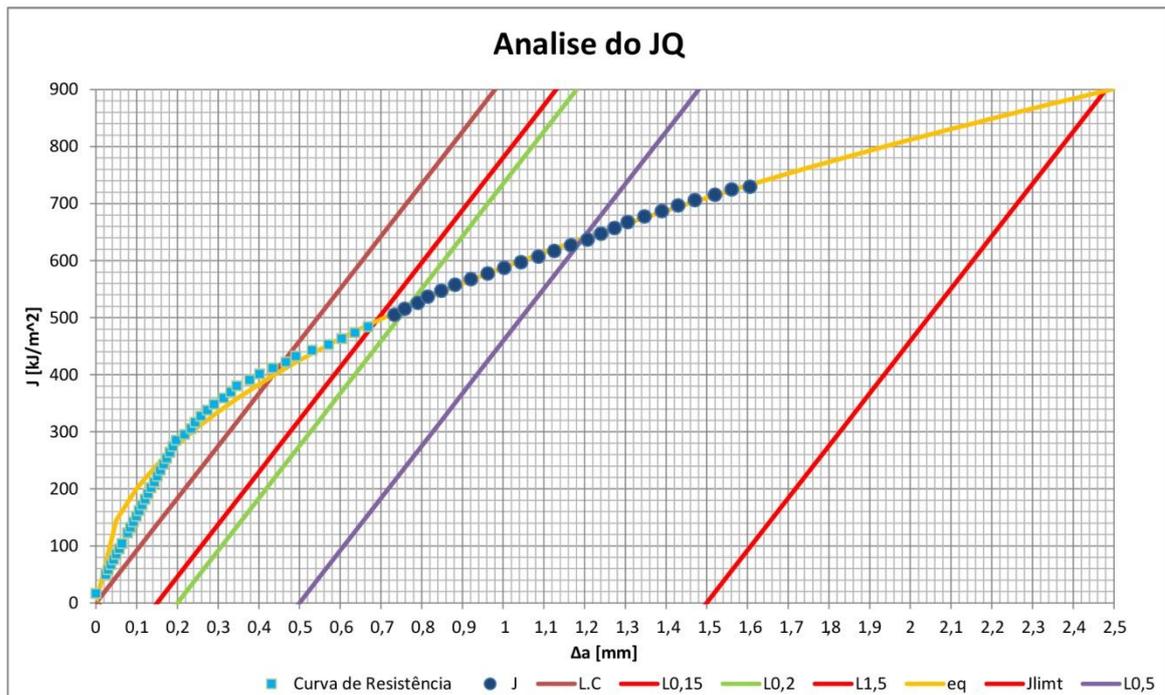
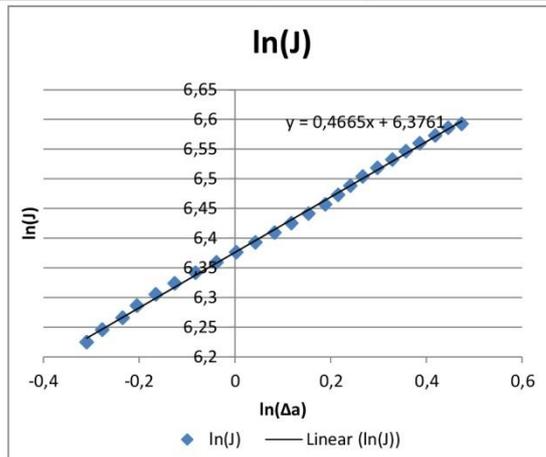
Propriedades e dimensões	
B [mm]	18,44
W [mm]	37,24
b0 [mm]	12,518
2σy [MPa]	917,94

213_1

Verificações a0q		a0q-a0	a0q+0,01W	0,5mm	Ponto da norma
a0 [mm]	24,722	#VALOR!	#VALOR!	#VALOR!	9.7.2.1
a0Q [mm]	-				
R ²	-	ok			9.7.2.2
Nº de pontos utilizados	-	ok			
Nº de pontos de qualificação do a0q entre 0,4 Jq e Jq	-	ok			

JQ	C1	C2	ΔaQ [mm]	JQ [kJ/m ²]	0,4*JQ
	587,63147	0,4665	0,76494118	518,582106	207,4328425

Verificações e qualificação JQ				Ponto da norma
nº de pontos entre L0,2 e L0,5	13		ok	9.6.4
C2	0,4665		ok	9.7.1
Nº de pontos na região de dados qualificados	24		ok	9.6.6.6
B> 10 (JQ/σY)	11,298824		ok	9.8.1
b0> 10 (JQ/σY)	11,298824		ok	9.8.2



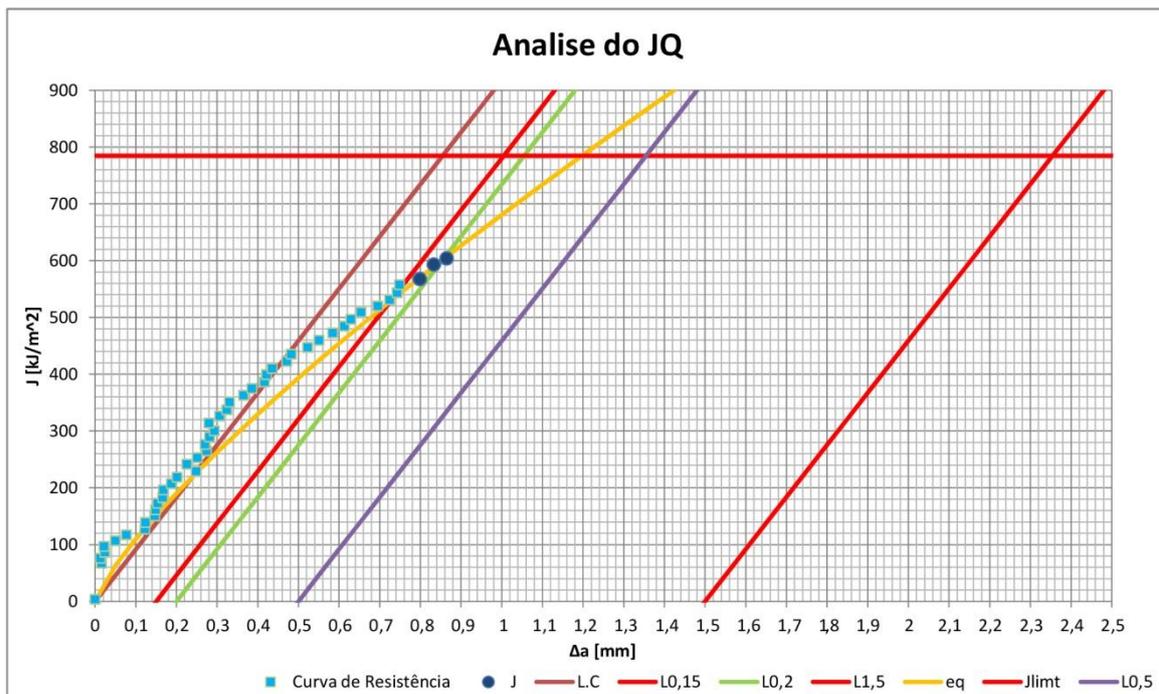
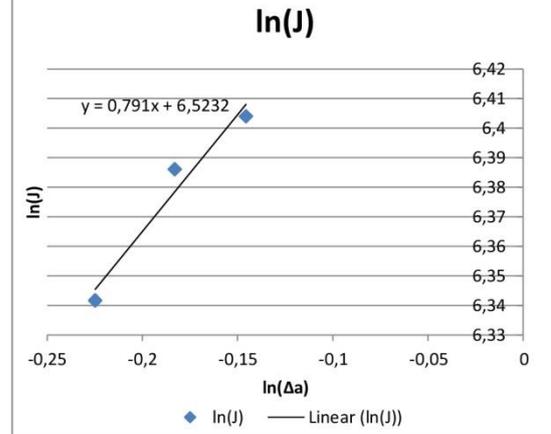
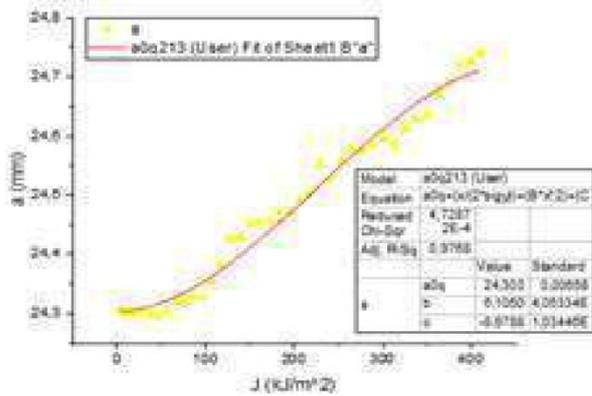
Propriedades e dimensões	
B [mm]	18,45
W [mm]	37,13
b0 [mm]	11,9115
2σy [MPa]	917,94

213_3

Verificações a0q		a0q-a0	a0q+-0,01W	0,5mm	Ponto da norma
a0 [mm]	25,2185	0,9155	Não ok	não ok	9.7.2.1
a0Q [mm]	24,303				
R^2	0,978	ok			9.7.2.2
Nº de pontos utilizados	38	ok			
Nº de pontos de qualificação do a0q entre 0,4 Jq e Jq	14	ok			

JQ	C1	C2	ΔaQ [mm]	JQ [kJ/m²]	0,4*JQ
	680,61718	0,791	0,85512395	601,364656	240,5458623

Verificações e qualificação JQ				Ponto da norma
nº de pontos entre L0,2 e L0,5	3	ok		9.6.4
C2	0,791	ok		9.7.1
Nº de pontos na região de dados qualificados	3	Não ok		9.6.6.6
B> 10 (JQ/σY)	13,102483	ok		9.8.1
b0> 10 (JQ/σY)	13,102483	Não ok		9.8.2



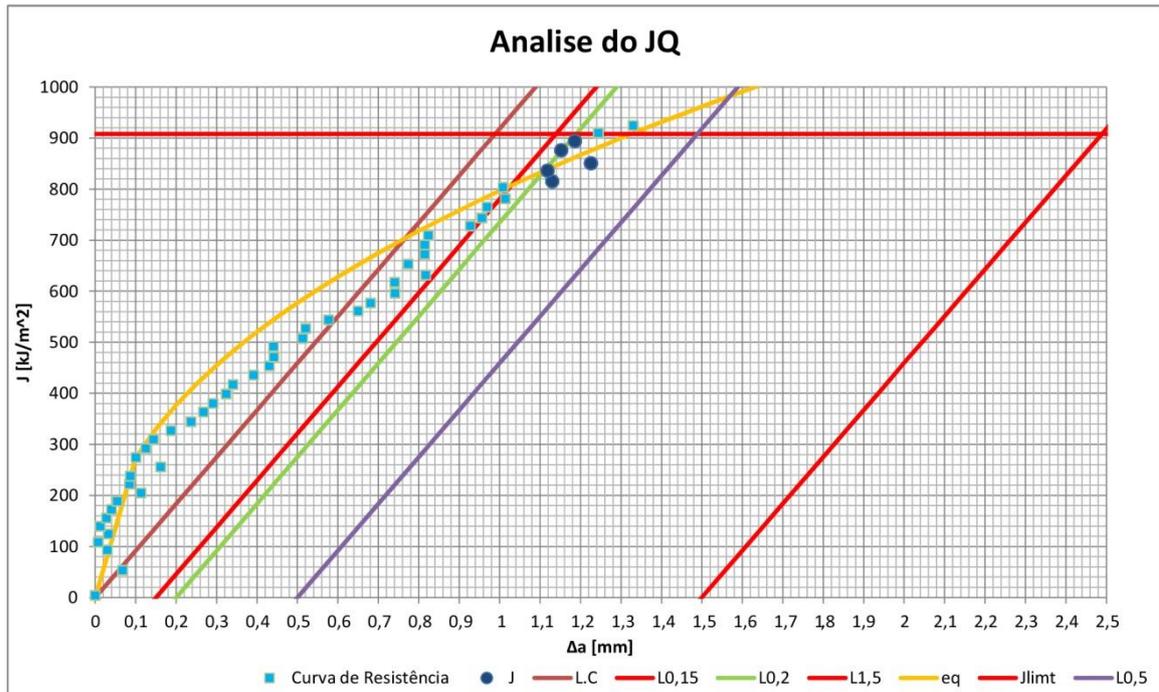
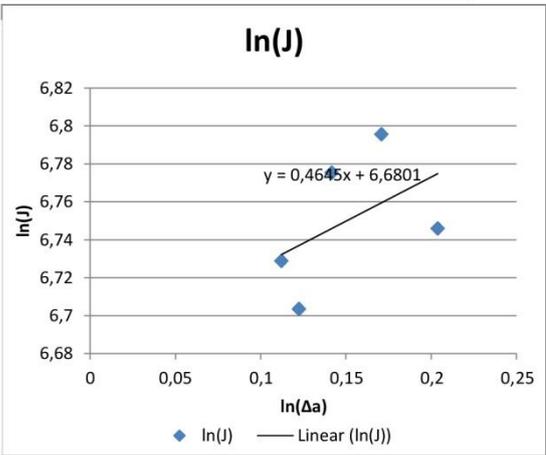
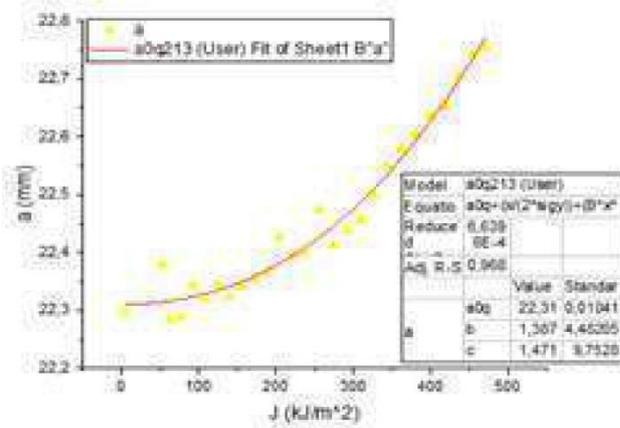
Propriedades e dimensões	
B [mm]	18,33
W [mm]	37,15
b0 [mm]	13,99
2σy [MPa]	917,95

213_4

Verificações a0q		a0q-a0	a0q+-0,01W	0,5mm	Ponto da norma
a0 [mm]	23,16	0,85	Não ok	não ok	9.7.2.1
a0Q [mm]	22,31				
R^2	97,06	ok			9.7.2.2
Nº de pontos utilizados	27	ok			
Nº de pontos de qualificação do a0q entre 0,4 Jq e Jq	8	ok			

JQ	C1	C2	ΔaQ [mm]	JQ [kJ/m²]	0,4*JQ
	796,39875	0,4645	1,111	836,337	334,5348

Verificações e qualificação JQ				Ponto da norma
nº de pontos entre L0,2 e L0,5	1	não ok		9.6.4
C2	0,4645	ok		9.7.1
Nº de pontos na região de dados qualificados	5	Não ok		9.6.6.6
B> 10 (JQ/σY)	18,221842	ok		9.8.1
b0> 10 (JQ/σY)	18,221842	Não ok		9.8.2



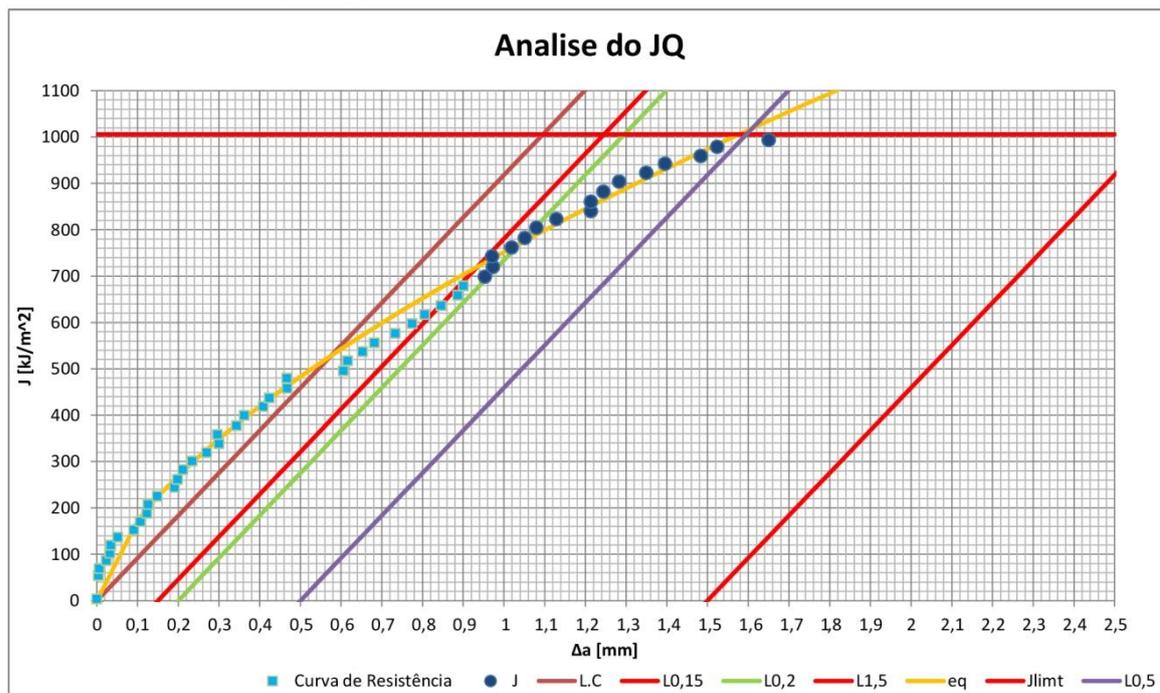
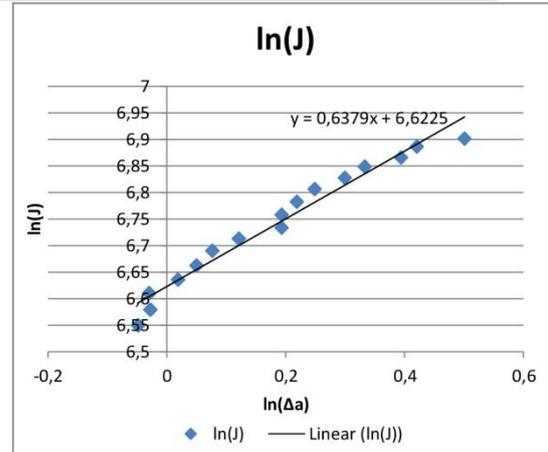
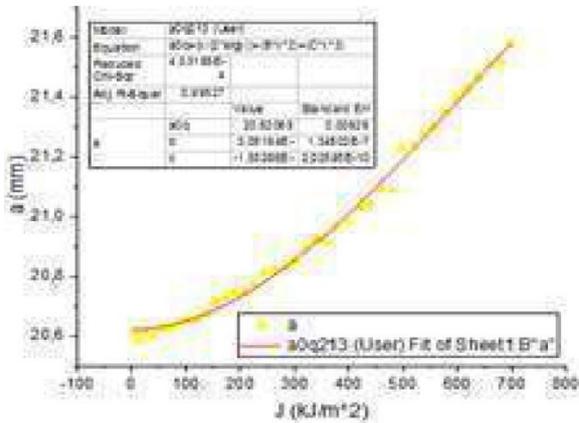
Propriedades e dimensões	
B [mm]	18,41
W [mm]	37,06
b0 [mm]	15,33
2σy [MPa]	917,94

213_5

Verificações a0q		a0q-a0	a0q+-0,01W	0,5mm	Ponto da norma
a0 [mm]	21,73	1,11	Não ok	não ok	9.7.2.1
a0Q [mm]	20,62				
R^2	0,995	ok			9.7.2.2
Nº de pontos utilizados	39	ok			
Nº de pontos de qualificação do a0q entre 0,4 Jq e Jq	20	ok			

JQ	C1	C2	ΔaQ [mm]	JQ [kJ/m²]	0,4*JQ
	751,82231	0,6379	1,0395498	770,656459	308,2625837

Verificações e qualificação JQ				Ponto da norma
nº de pontos entre L0,2 e L0,5	10	ok		9.6.4
C2	0,6379	ok		9.7.1
Nº de pontos na região de dados qualificados	16	ok		9.6.6.6
B> 10 (JQ/σY)	16,790999	ok		9.8.1
b0> 10 (JQ/σY)	16,790999	Não ok		9.8.2



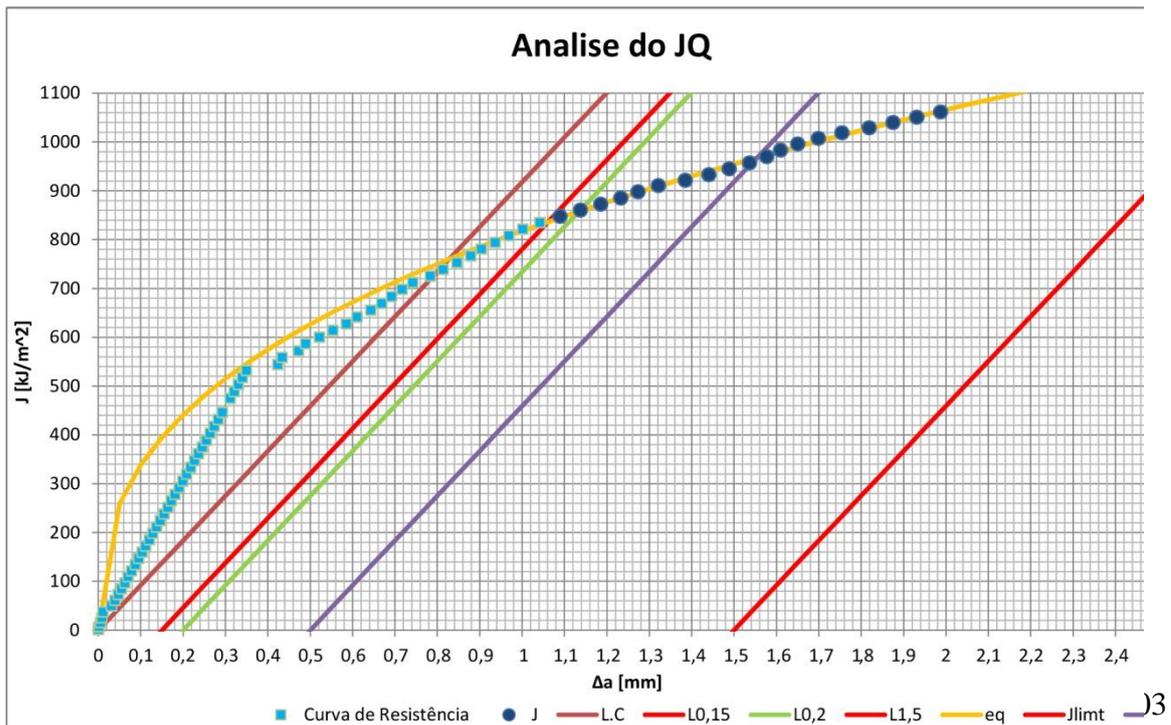
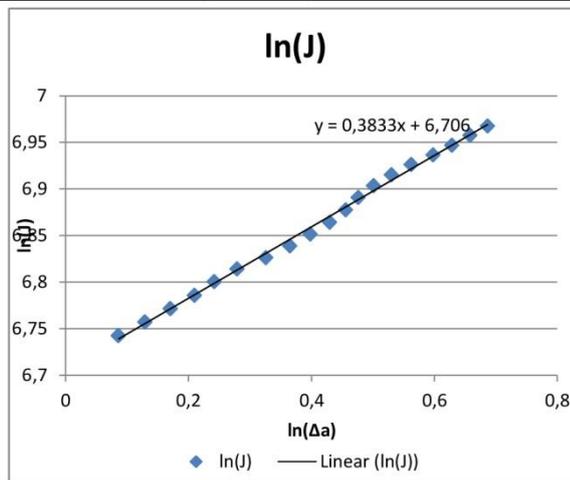
Propriedades e dimensões	
B [mm]	18,39
W [mm]	37,05
b0 [mm]	15,34762
2σy [MPa]	917,94

213_6

Verificações a0q		a0q-a0	a0q+-0,01W	0,5mm	Ponto da norma
a0 [mm]	21,70238	#VALOR!	#VALOR!	#VALOR!	9.7.2.1
a0Q [mm]	-				
R^2	-	ok			9.7.2.2
Nº de pontos utilizados	-	ok			
Nº de pontos de qualificação do a0q entre 0,4 Jq e Jq	-	ok			

JQ	C1	C2	ΔaQ [mm]	JQ [kJ/m ²]	0,4*JQ
	817,29491	0,3833	1,13447409	857,791145	343,1164579

Verificações e qualificação JQ				Ponto da norma
nº de pontos entre L0,2 e L0,5	10	ok		9.6.4
C2	0,3833	ok		9.7.1
Nº de pontos na região de dados qualificados	19	ok		9.6.6.6
B> 10 (JQ/σY)	18,689482	Não ok		9.8.1
b0> 10 (JQ/σY)	18,689482	Não ok		9.8.2



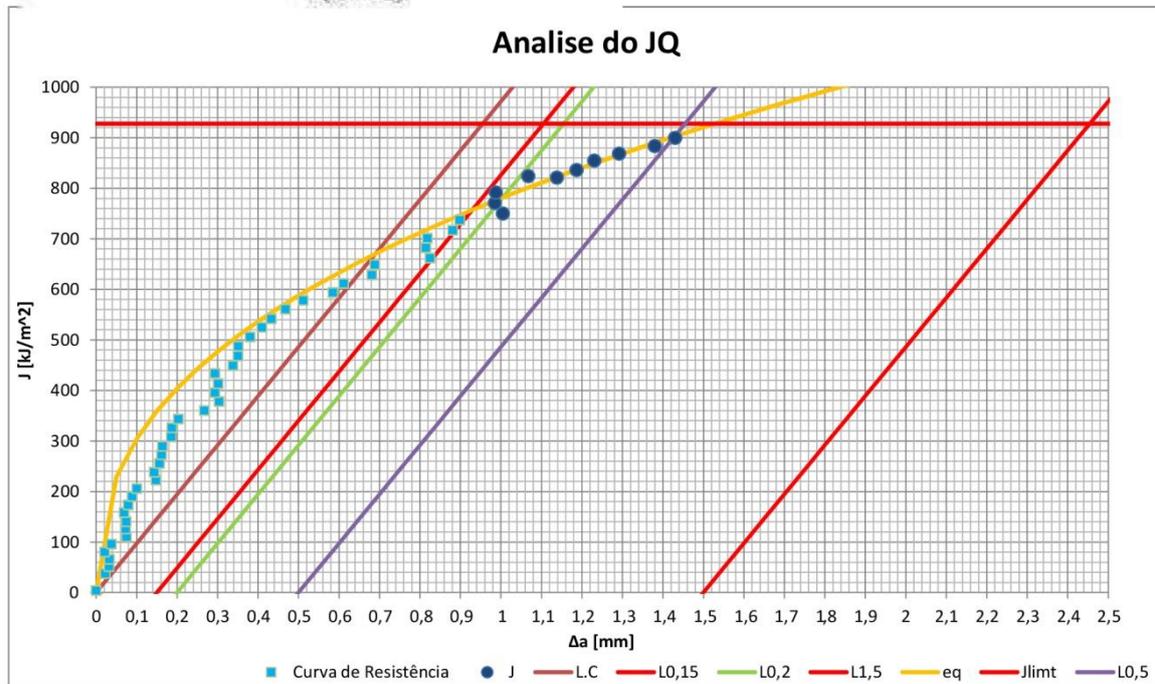
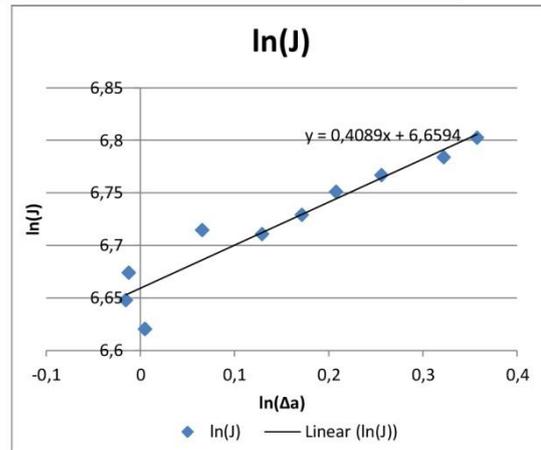
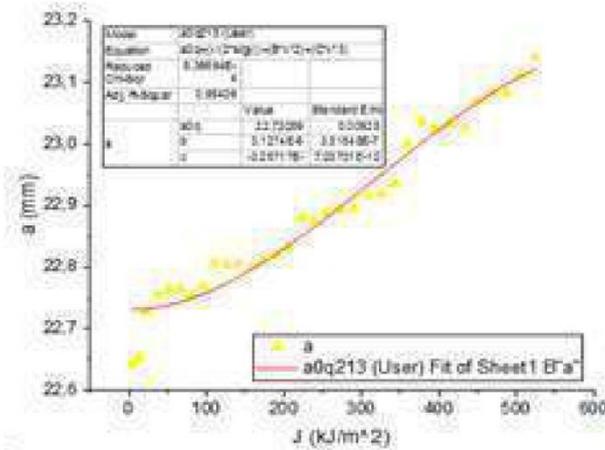
Propriedades e dimensões	
B [mm]	18,37
W [mm]	37,05
b0 [mm]	13,435
2σy [MPa]	971,94

213_7

Verificações a0q		a0q-a0	a0q+0,01W	0,5mm	Ponto da norma
a0 [mm]	23,615	0,885	Não ok	não ok	9.7.2.1
a0Q [mm]	22,73				
R^2	0,956	Não ok			9.7.2.2
Nº de pontos utilizados	33	ok			
Nº de pontos de qualificação do a0q entre 0,4 Jq e Jq	12	ok			

JQ	C1	C2	ΔaQ [mm]	JQ [kJ/m²]	0,4*JQ
	780,08275	0,4089	1,00387362	781,316927	312,5267707

Verificações e qualificação JQ				Ponto da norma
nº de pontos entre L0,2 e L0,5	9	ok		9.6.4
C2	0,4089	ok		9.7.1
Nº de pontos na região de dados qualificados	10	ok		9.6.6.6
B> 10 (JQ/σy)	16,077472	ok		9.8.1
b0> 10 (JQ/σy)	16,077472	Não ok		9.8.2



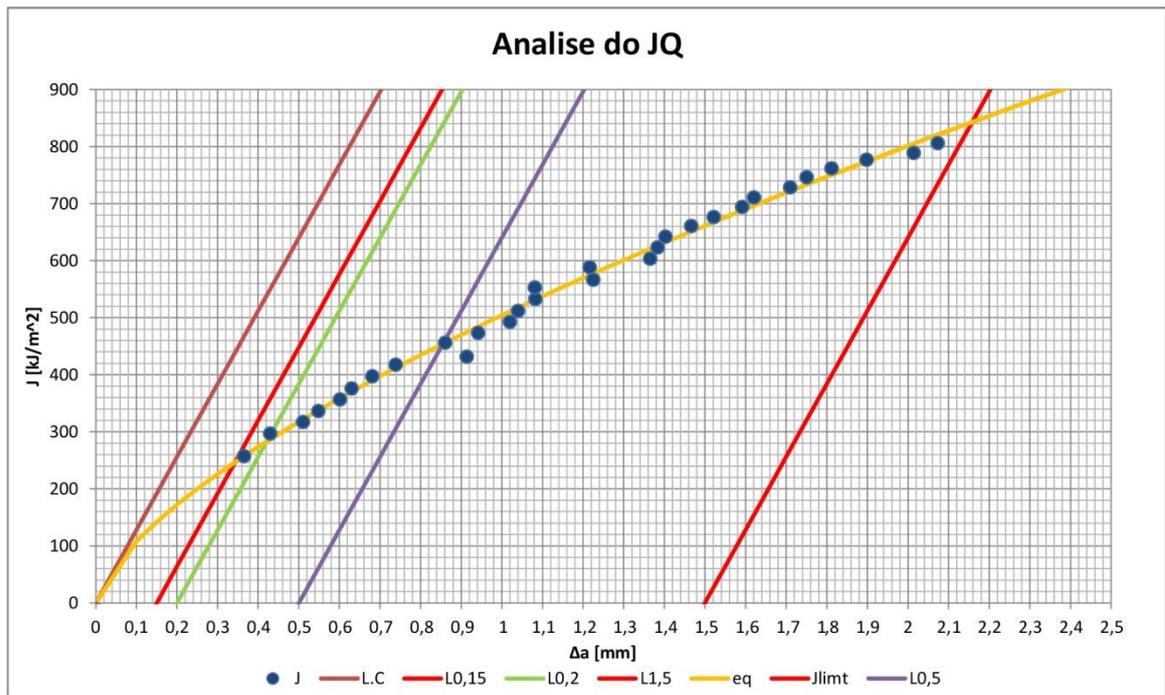
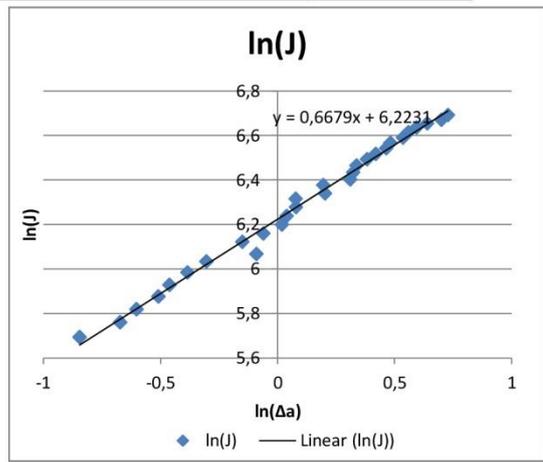
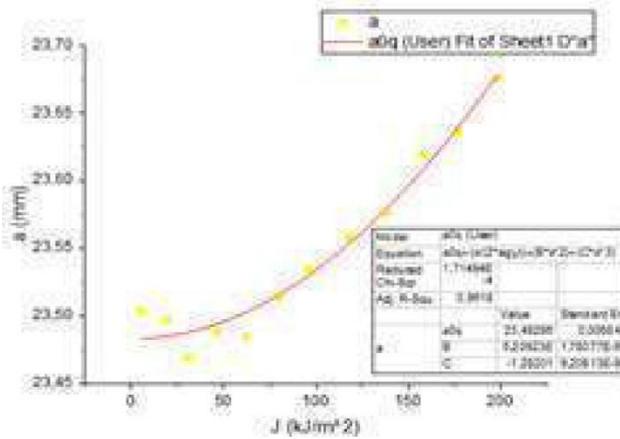
Propriedades e dimensões	
B [mm]	18,4
W [mm]	37,12
b0 [mm]	13,465
2σy [MPa]	1280,6

217_1

Verificações a0q		a0q-a0	a0q+0,01W	0,5mm	Ponto da norma
a0 [mm]	23,655	0,227	ok	ok	9.7.2.1
a0Q [mm]	23,428				
R ²	0,9687	ok			9.7.2.2
Nº de pontos utilizados	12	ok			
Nº de pontos de qualificação do a0q entre 0,4 Jq e Jq	4	ok			

JQ	C1	C2	ΔaQ [mm]	JQ [kJ/m ²]	0,4*JQ
	504,21361	0,668	0,42	282,84	113,136

Verificações e qualificação JQ			Ponto da norma
nº de pontos entre L0,2 e L0,5	6	ok	9.6.4
C2	0,7278	ok	9.7.1
Nº de pontos na região de dados qualificados	30	ok	9.6.6.6
B > 10 (JQ/σY)	4,4173044	ok	9.8.1
b0 > 10 (JQ/σY)	4,4173044	ok	9.8.2



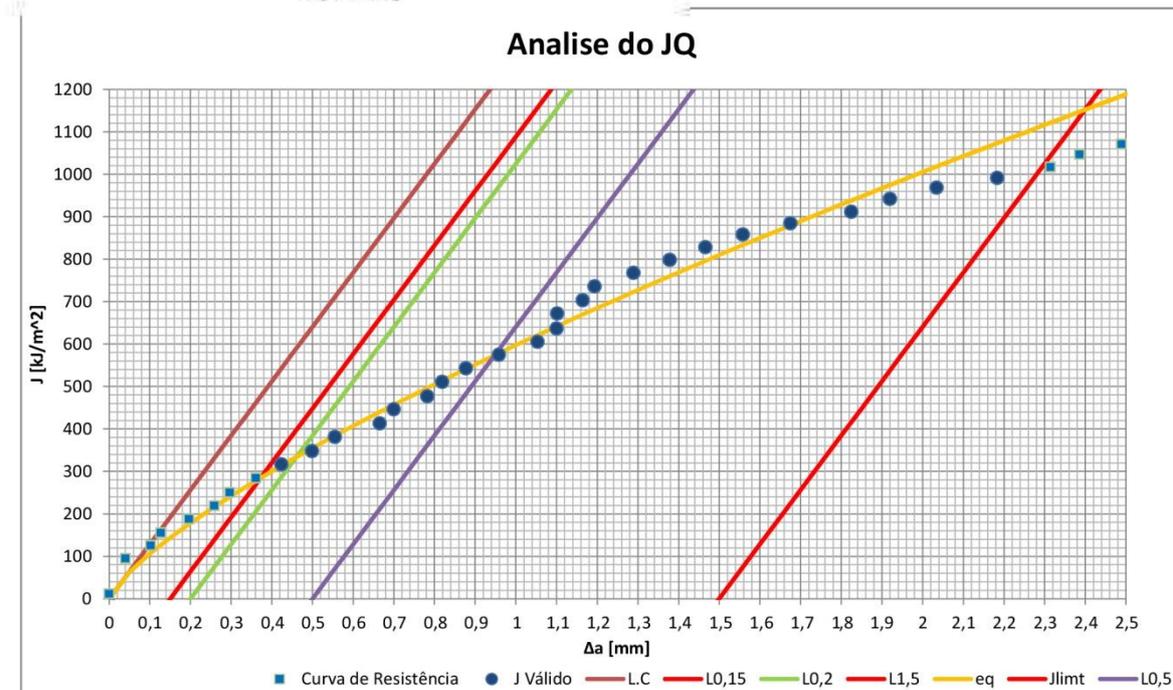
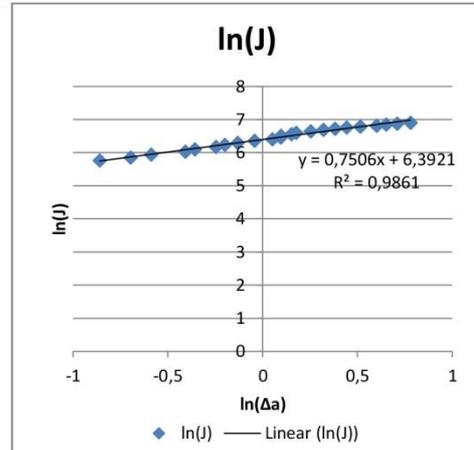
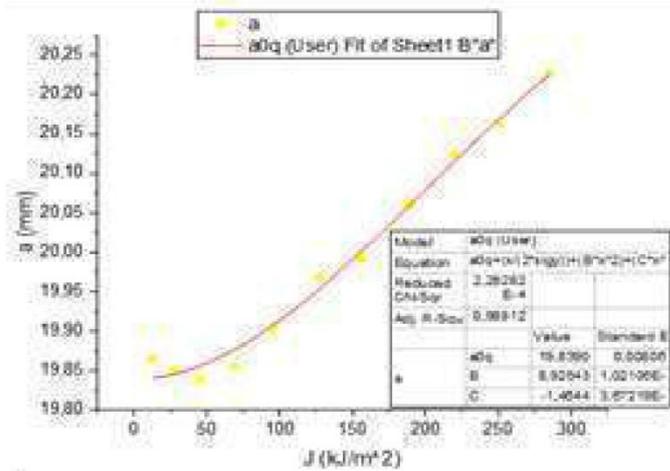
Propriedades e dimensões	
B [mm]	18,55
W [mm]	37,19
b0 [mm]	17,53
2σy [MPa]	1280,6

217_2

Verificações a0q		a0q-a0	+0,01W'	0,5mm	Ponto da norma
a0 [mm]	19,66	0,179	ok	ok	9.7.2.1
a0Q [mm]	19,839				
R^2	0,9904	ok			9.7.2.2
Nº de pontos utilizados	11	ok			
Nº de pontos de qualificação do a0q entre 0,4 Jq e Jq	5	ok			

JQ	C1	C2	ΔaQ [mm]	JQ [kJ/m²]	0,4*JQ
	597,10919	0,7506	0,46	333,666	133,4664

Verificações e qualificação JQ				Ponto da norma
nº de pontos entre L0,2 e L0,5	7	ok		9.6.4
C2	0,7506	ok		9.7.1
Nº de pontos na região de dados qualificados	23	ok		9.6.6.6
B > 10 (JQ/σY)	5,2110886	ok		9.8.1
b0 > 10 (JQ/σY)	5,2110886	ok		9.8.2



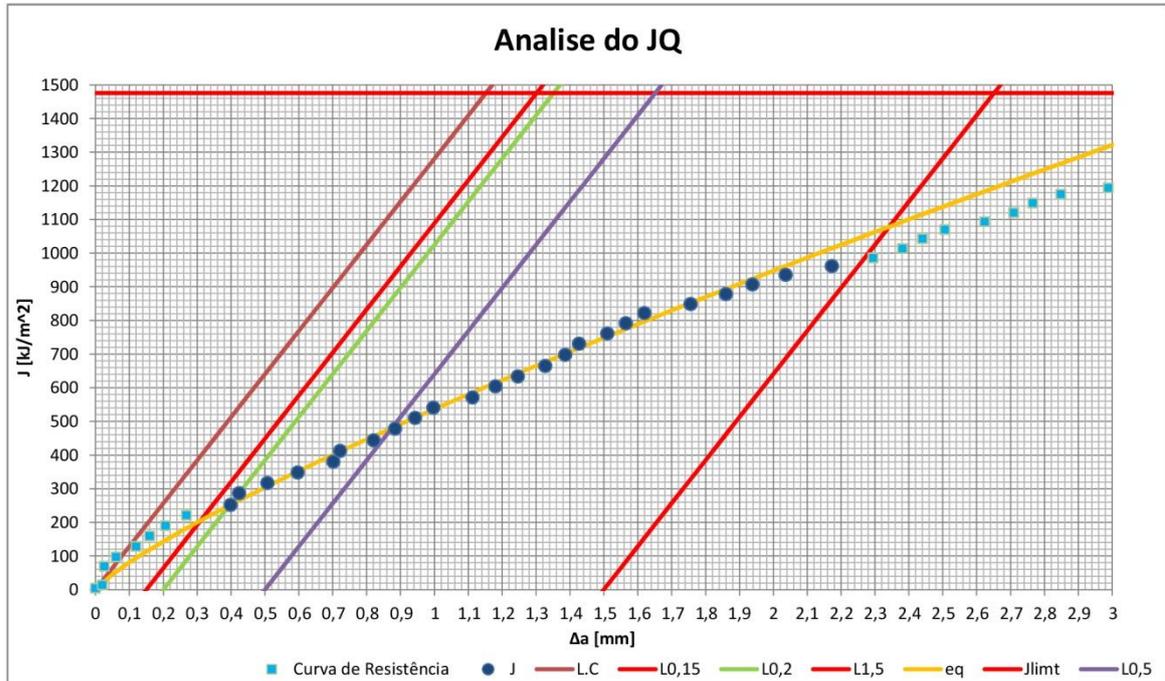
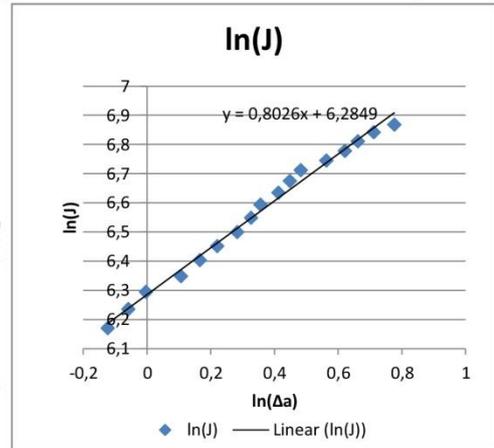
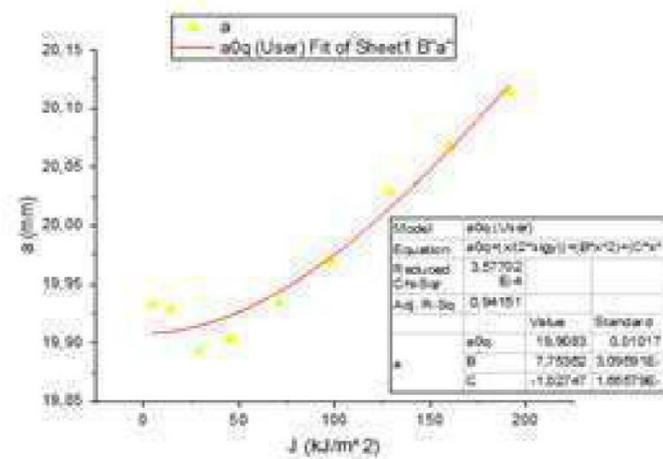
Propriedades e dimensões	
B [mm]	18,53
W [mm]	37,19
b0 [mm]	17,457
2σy [MPa]	1280,6

217_3

Verificações a0q		a0q-a0	+0,01W'	0,5mm	Ponto da norma
a0 [mm]	19,733	0,175	ok	ok	9.7.2.1
a0Q [mm]	19,908				
R^2	0,956	Não ok			9.7.2.2
Nº de pontos utilizados	9	ok			
Nº de pontos de qualificação do a0q entre 0,4 Jq e Jq	4	ok			

JQ	C1	C2	ΔaQ [mm]	JQ [kJ/m^2]	0,4*JQ
	536,41065	0,82026	0,39587338	250,835455	100,3341819

Verificações e qualificação JQ				Ponto da norma
nº de pontos entre L0,2 e L0,5	7	ok		9.6.4
C2	0,82026	ok		9.7.1
Nº de pontos na região de dados qualificados	24	ok		9.6.6.6
B > 10 (JQ/σy)	3,9174677	ok		9.8.1
b0 > 10 (JQ/σy)	3,9174677	ok		9.8.2



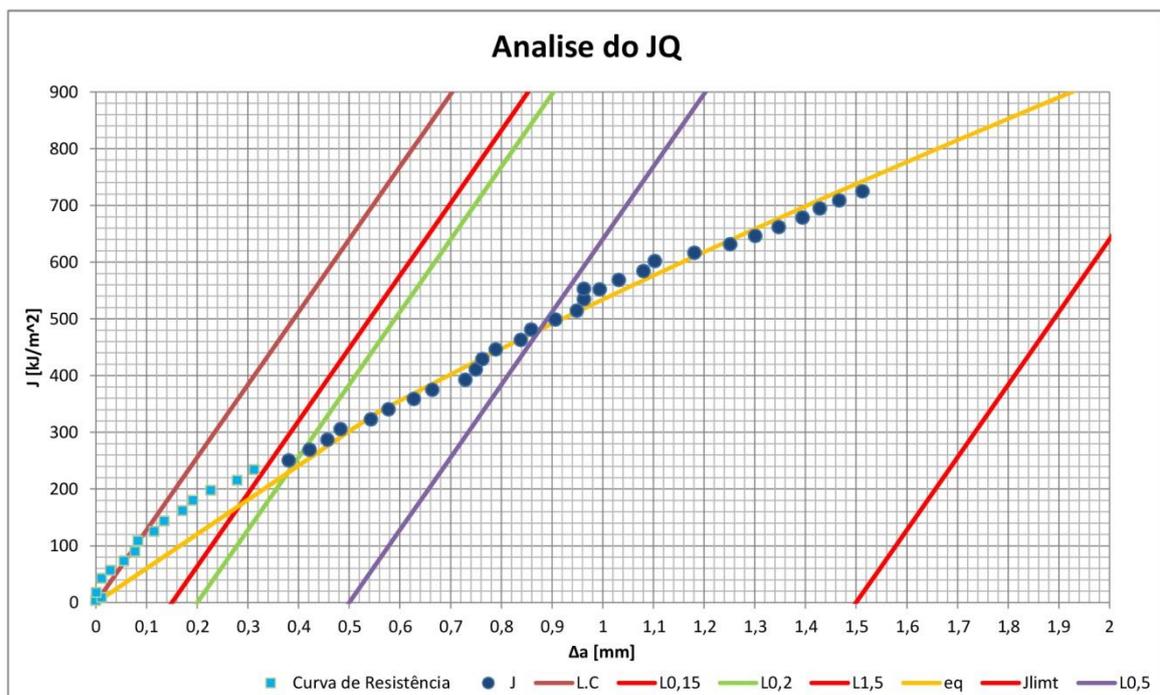
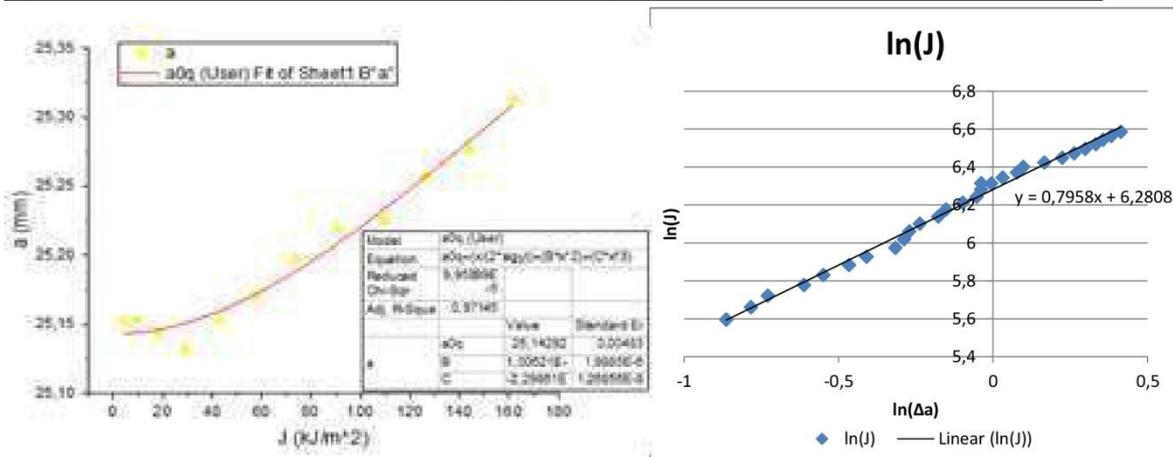
Propriedades e dimensões	
B [mm]	18,62
W [mm]	37,08
b0 [mm]	11,95
2σy [MPa]	1280,6

217_5

Verificações a0q		a0q-a0	a0q+-0,01W	0,5mm	Ponto da norma
a0 [mm]	25,13	0,012	ok	ok	9.7.2.1
a0Q [mm]	25,142				
R ²	0,9766	ok			9.7.2.2
Nº de pontos utilizados	12	ok			
Nº de pontos de qualificação do a0q entre 0,4 Jq e Jq	4	ok			

JQ	C1	C2	ΔaQ [mm]	JQ [kJ/m ²]	0,4*JQ
	534,21587	0,7958	0,40199612	258,67624	103,4704962

Verificações e qualificação JQ				Ponto da norma
nº de pontos entre L0,2 e L0,5	14	ok		9.6.4
C2	0,7958	ok		9.7.1
Nº de pontos na região de dados qualificados	30	ok		9.6.6.6
B> 10 (JQ/σY)	4,0399225	ok		9.8.1
b0> 10 (JQ/σY)		ok		9.8.2



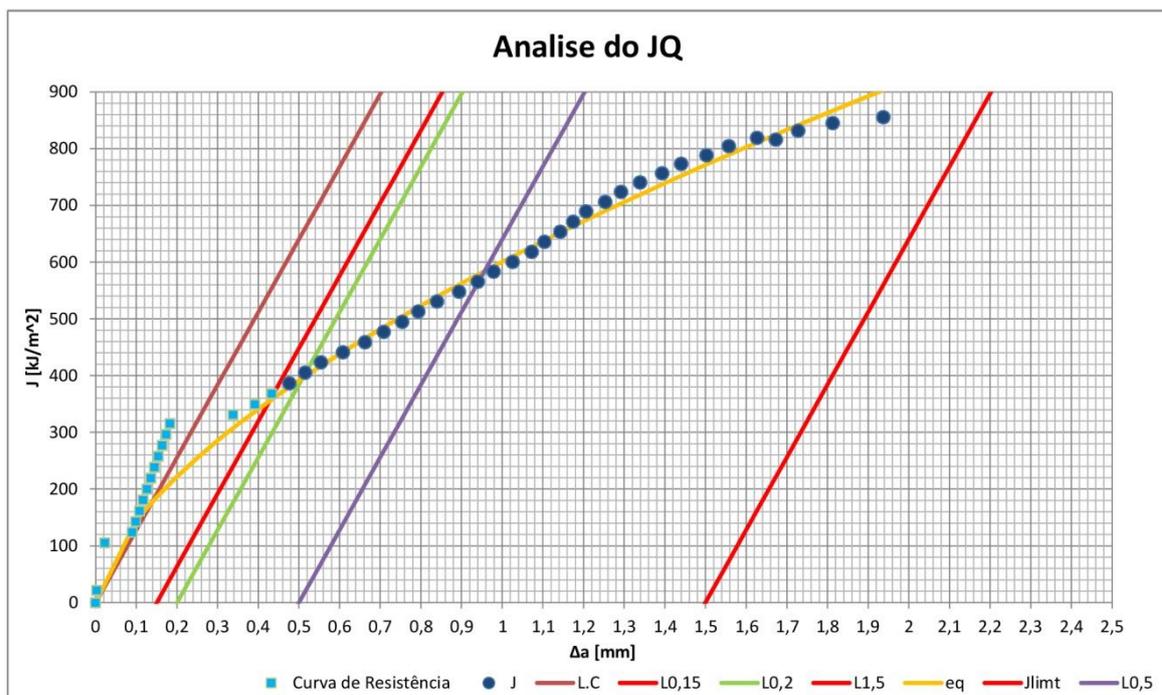
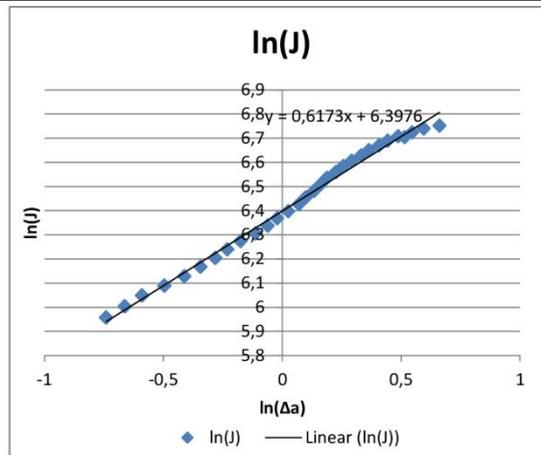
Propriedades e dimensões	
B [mm]	18,5
W [mm]	37,09
b0 [mm]	15,396
2σy [MPa]	1280,6

217_6

Verificações a0q		a0q-a0	a0q+0,01W	0,5mm	Ponto da norma
a0 [mm]	21,694	#VALOR!	#VALOR!	#VALOR!	9.7.2.1
a0Q [mm]	-				
R ²	-	ok			9.7.2.2
Nº de pontos utilizados	-	ok			
Nº de pontos de qualificação do a0q entre 0,4 Jq e Jq	-	ok			

JQ	C1	C2	ΔaQ [mm]	JQ [kJ/m ²]	0,4*JQ
	600,40234	0,6173	0,50903105	395,745167	158,2980669

Verificações e qualificação JQ				Ponto da norma
nº de pontos entre L0,2 e L0,5	10		ok	9.6.4
C2	0,6173		ok	9.7.1
Nº de pontos na região de dados qualificados	30		ok	9.6.6.6
B > 10 (JQ/σY)	6,1806211		ok	9.8.1
b0 > 10 (JQ/σY)	6,1806211		ok	9.8.2



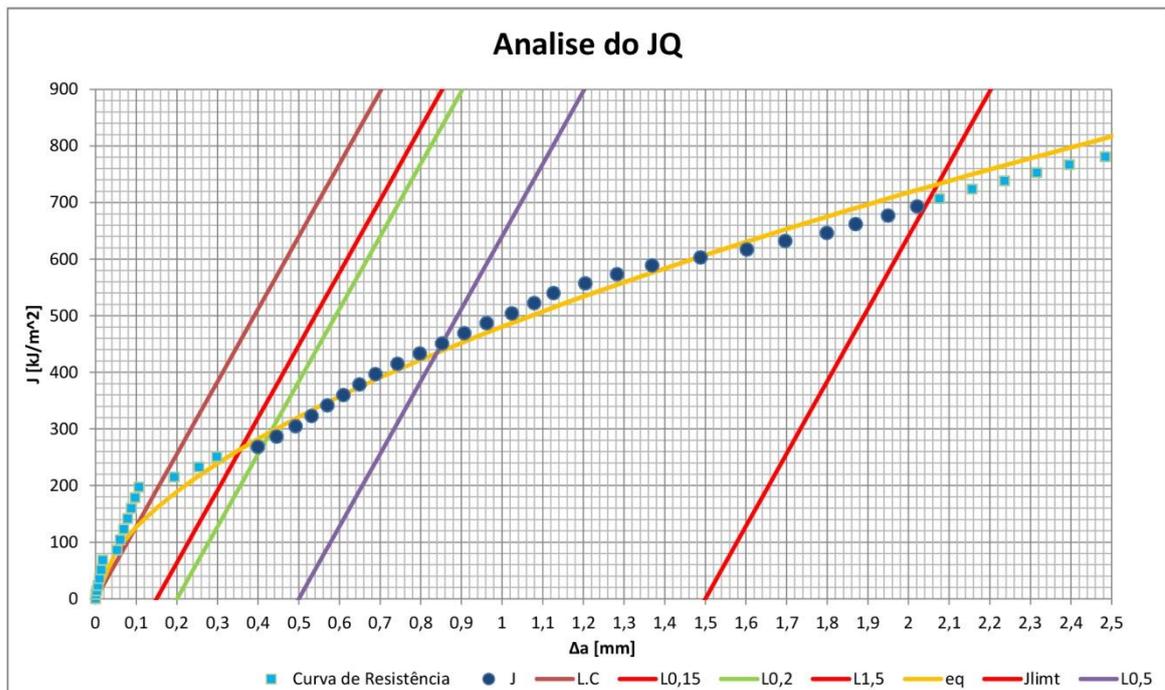
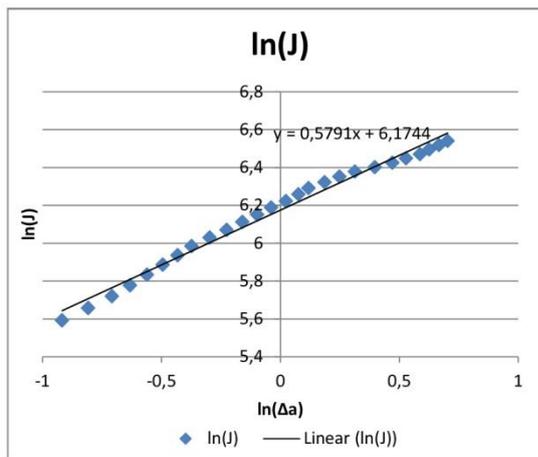
Propriedades e dimensões	
B [mm]	18,59
W [mm]	37,11
b0 [mm]	15,36156
2σy [MPa]	1280,6

217_7

Verificações a0q		a0q-a0	a0q+0,01W	0,5mm	Ponto da norma
a0 [mm]	21,74844	#VALOR!	#VALOR!	#VALOR!	9.7.2.1
a0Q [mm]	-				
R^2	-		ok		
Nº de pontos utilizados	-		ok		9.7.2.2
Nº de pontos de qualificação do a0q entre 0,4 Jq e Jq	-		ok		

JQ	C1	C2	ΔaQ [mm]	JQ [kJ/m²]	0,4*JQ
	480,29476	0,5791	0,43	294,644	117,8576

Verificações e qualificação JQ				Ponto da norma
nº de pontos entre L0,2 e L0,5	10		ok	9.6.4
C2	0,5791		ok	9.7.1
Nº de pontos na região de dados qualificados	26		ok	9.6.6.6
B > 10 (JQ/σY)	4,6016555		ok	9.8.1
b0 > 10 (JQ/σY)	4,6016555		ok	9.8.2



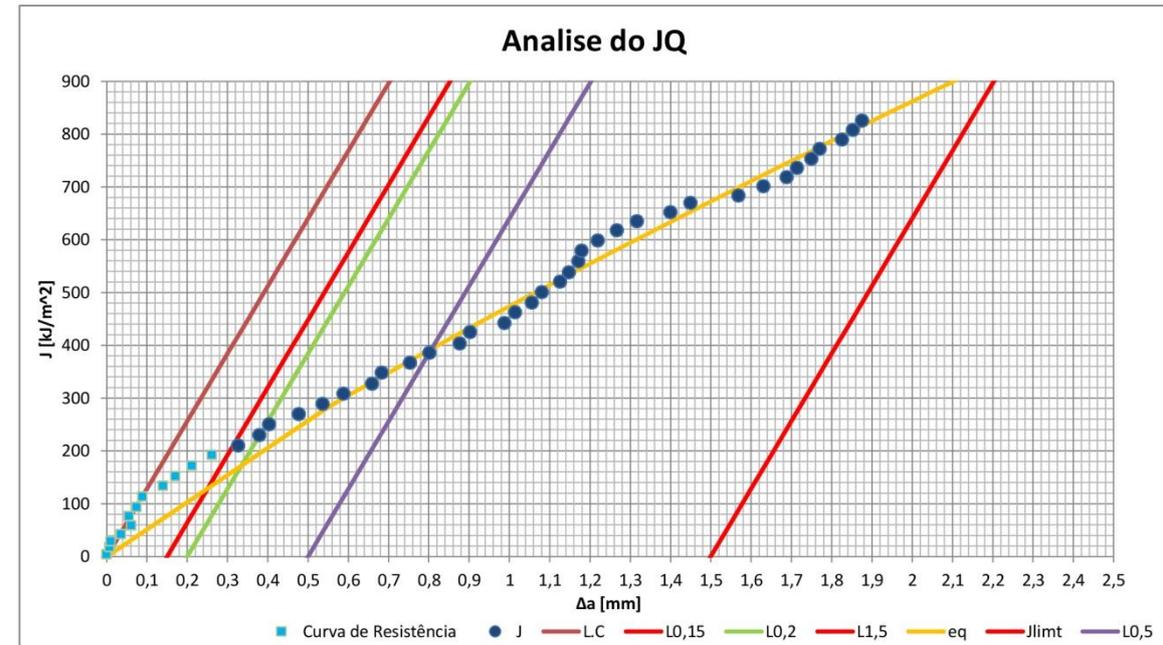
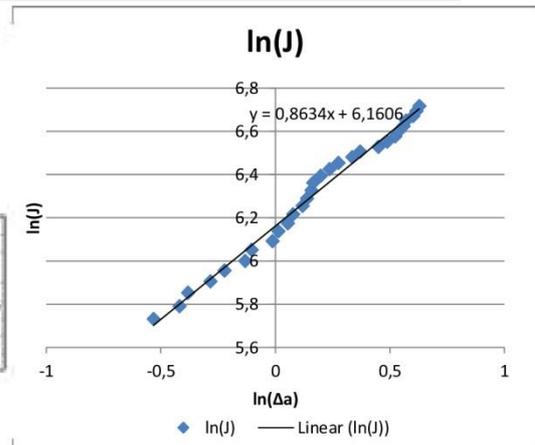
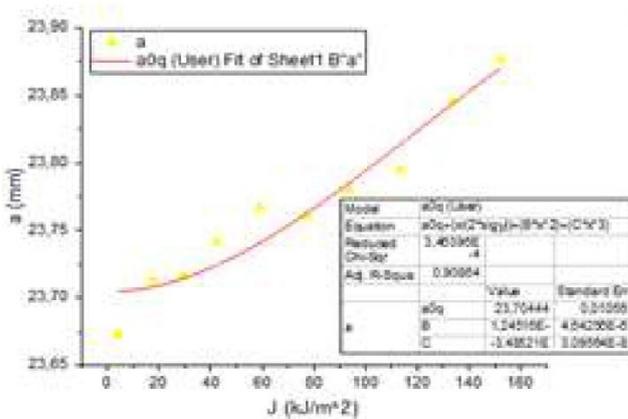
Propriedades e dimensões	
B [mm]	18,53
W [mm]	37,07
b0 [mm]	13,37
2σy [MPa]	1280,6

217_8

Verificações a0q		a0q-a0	a0q+0,01W	0,5mm	Ponto da norma
a0 [mm]	23,7	0,004	ok	ok	9.7.2.1
a0Q [mm]	23,704				
R^2	0,928	Não ok			9.7.2.2
Nº de pontos utilizados	10	ok			
Nº de pontos de qualificação do a0q entre 0,4 Jq e Jq	3	Não ok			

JQ	C1	C2	ΔaQ [mm]	JQ [kJ/m²]	0,4*JQ
	473,71222	0,8634	0,378	230,167	92,0668

Verificações e qualificação JQ				Ponto da norma
nº de pontos entre L0,2 e L0,5	9		ok	9.6.4
C2	0,8634		ok	9.7.1
Nº de pontos na região de dados qualificados	34		ok	9.6.6.6
B> 10 (JQ/σY)	1,4378697		ok	9.8.1
b0> 10 (JQ/σY)	1,4378697		ok	9.8.2



Notas

A estimativa da regressão era demasiado conservadora como tal foi usada a interseção do ponto da curva com a recta 0,2