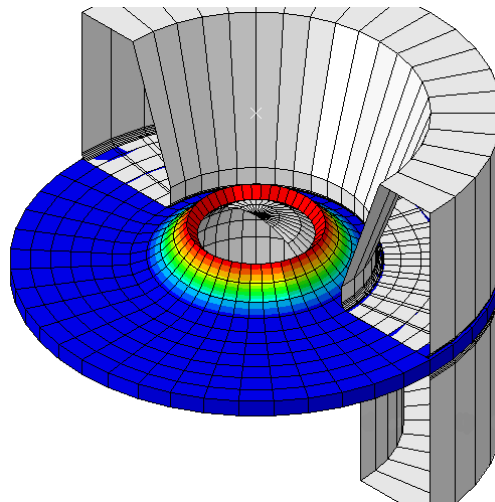


Departamento de Engenharia Mecânica
Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica
SIMULAÇÃO DE PROCESSOS TECNOLÓGICOS

Modelação e Simulação Numérica de um Ensaio de Expansão de Furo



André Duarte Barros Lopes Ferreira
Bruno Alexandre de Oliveira Ferreira
Pedro Carvalho
Sérgio Freitas

Docente: Abel Dias dos Santos

Junho 2014



Abstract

In this report we will simulate an adaption of the Erichsen test for an hole expansion test. The analysis of the results will be done by comparing the results obtained for different thicknesses of the blank and for different types of elements used in Abaqus. This will be the software that we'll use to build the different models, in which we'll use of two different steels that will be described by the Hollomon and Swift equations. The comparison of the results will be based on force vs displacement curves, the hole expansion ratio and the measure of the thickness of the blank in the flank of the hole.

Resumo

Neste trabalho é simulada uma adaptação do ensaio Erichssen para um ensaio de expansão de furo. A análise dos resultados passará pela comparação dos resultados obtidos para diferentes espessuras de chapa e tipos de elementos utilizados no Abaqus. Este será o software utilizado para a construção dos modelos e para tal, serão utilizados dois aços que serão caracterizados plasticamente através de equações de caracterização do material. A comparação dos resultados terá por base as curvas força vs deslocamento, o rácio de expansão do furo e a medição da espessura da chapa no bordo do furo.



Índice

1 INTRODUÇÃO	8
1.1 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA	8
1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO	8
1.3 METODOLOGIA	8
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	10
2.1 ENSAIO ERICHSEN	10
2.2 ENSAIOS DE EXPANSÃO DE FURO	12
2.3 EQUAÇÕES DE EXTRAPOLAÇÃO DA CURVA REAL DO ENSAIO DE TRAÇÃO	13
2.3.0 INTRODUÇÃO	13
2.3.1 LEI DE HOLLLOMON	13
2.3.2 LEI DE SWIFT	14
3 CARATERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	15
3.1 GENERALIDADES E COMPOSIÇÃO QUÍMICA	15
3.2 PROPRIEDADES MECÂNICAS	15
3.3 OBTENÇÃO DOS PARÂMETROS DA LEI DE HOLLLOMON E SWIFT	16
3.3.1 HOLLLOMON	16
3.3.2 SWIFT	17
3.3.3 ESCOLHA DOS PONTOS PARA A DETERMINAÇÃO NUMÉRICA DAS EXTRAPOLAÇÕES	18
3.4 TRAÇADO DAS CURVAS $\sigma t - \epsilon t$	21
4 PROCEDIMENTOS	23
5 RESULTADOS	26
5.1 MODELO 2D AXI-SIMÉTRICO	26
5.2 MODELO 3D DISCRETO	27
5.3 MODELO 3D ANALÍTICO	27
5.4 OUTROS RESULTADOS	28
6 ANÁLISE DOS RESULTADOS	30
6.1 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DOS DIFERENTES MODELOS	30
6.2 ANÁLISE DO MODELO 2D AXI-SIMÉTRICO	31
6.3 ANÁLISE DO MODELO 3D ANALÍTICO	31



6.4 ANÁLISE DO MODELO 3D DISCRETO	31
6.5 ANÁLISE DA ENERGIA CINÉTICA E INTERNA	32
7 CONCLUSÕES	34
8 TRABALHOS FUTUROS	35
7 BIBLIOGRAFIA	36



Índice de Figuras

Figura 1 - Dimensões da chapa a utilizar nas simulações.	8
Figura 2 - Esq.: punções; Meio: anéis de fixação; 3: aparelho completo de ensaio Erichsen. ^[6]	10
Figura 3 - Esq.: Dimensões usuais utilizadas na realização do ensaio Erichsen. ^[14] D ^a : Variação da altura h em função das dimensões da chapa. ^[6]	11
Figura 4 - Esquemas representativo de um teste de expansão de furos ^{[9],[11]}	12
Figura 5 - Esquema representativo do ensaio de expansão de furo a modelar e simular em Abaqus.	12
Figura 6 - Esq.: Curva de engenharia resultante do ensaio de tração para um provete de cobre recozido policristalino ^[13] ; D ^a : Representação do fenómeno de estricção que ocorre nos ensaios de tração.	13
Figura 7 - Curva Tensão-deformação obtida a partir dos dados obtidos dos respetivos ensaios de tração realizados para os dois materiais. ^[16]	16
Figura 8 - Comparação das curvas obtidas utilizando P1 e P2 (n=0.13) e P6 e P1 (n=0.089).	19
Figura 9 - Curva de tração dos materiais para a zona plástica. Utilizaram-se mais pontos nas fases iniciais onde a variação é maior, e menos nas fases finais, onde a variação é menor, da curva para se obter uma aproximação mais realista	22
Figura 10 - Curva de tração dos materiais completas até deformação real total de 1.	22
Figura 11 - Vista isométrica e frontal do modelo axi-simétrico 2D.	25
Figura 12 - Vista com <i>sweep</i> a 180°C do modelo axi-Simétrico 2D.	25
Figura 13 - Vistas do modelo 3D analítico (esq) e discreto (d ^a).	25
Figura 14 - Conjunto para os ensaios simulados das curvas Força vs Deslocamento do punção. A traço pontilhado curvas com o material caracterizado pela eq. de Hollomon, e traço contínuo com a de Swift.	28
Figura 15 - Estudo do efeito da variação da espessura da chapa, com o modelo 2D.	29
Figura 16 - Curvas relativas à energia cinética e interna da chapa ao longo da simulação. Do ensaio 2D-axi simétrico, chapa de 2mm. esq. 1000 DP, d ^a 300 RP e no centro 1000 DP chapa de 1mm de espessura.	29
Figura 17 - O aumento do tamanho dos elementos de 0.3 (esq.) para 1.3 (d ^a) em <i>global size</i> permitiu obter resultados mais realistas no bordo do furo.	31
Figura 18 - Pormenor do bordo do furo da chapa a mostrar a não homogeneidade dos valores do PEEQ ao longo da mesma.	32



Índice de Tabelas

Tabela 1 - Composição química dos dois aços em estudo. ^{[3],[4]}	15
Tabela 2 - Propriedades mecânicas dos dois aços em estudo. ^{[3],[4]}	15
Tabela 3 - Tabela obtida para os pontos 6 e 2 da tabela seguinte, para o 1000 DP.	18
Tabela 4 - Tabela final obtida para todos os pontos para os quais foi calculado o erro médio absoluto.	19
Tabela 5 - Pontos escolhidos, respetivas deformações e tensões reais, bem como ϵ_0 adotado para os dois materiais.	20
Tabela 6 - Valores para a curva $\sigma t - \epsilon t$ a colocar no Abaqus.	21
Tabela 7 - Tabela resumo dos procedimentos aplicados em Abaqus	24
Tabela 8 - Tabela resumo para todas as simulações realizadas, para os valores de PEEQ, Von Mises, Espessura no bordo do furo da chapa e rácio de expansão do furo.	28
Tabela 9 - Diferenças relativas à simulação com modelo 2D, para chapa de espessura de 2mm.	30



Lista de Símbolos

ε_t	deformação real (true)
ε_0	parâmetro da lei de encruamento de Swift
ε_e	deformação convencional / de engenharia
σ_t	Tensão real
σ_e	tensão convencional / de engenharia
$\sigma_{0.2}$	tensão limite de elasticidade a 0.2%
σ_{ult}	tensão convencional de rotura à tração, UTS
L	comprimento de medida do provete no ensaio de tração
A	área da secção reta do provete no ensaio de tração
A_{80}	alongamento percentual do comprimento de medida original do provete de 80mm.
n	índice de encruamento
K	constante plástica de resistência



1 Introdução

1.1 Descrição do Problema

Pretende-se realizar uma simulação numérica que permita obter mais informações sobre o comportamento de dois materiais, aço 980 DP e o aço 300 RP, a respeito da sua formabilidade.

É necessário usar o ensaio Erichsen adaptado como ensaio de expansão de furo, e as dimensões da chapa deverão estar de acordo com a figura 1.

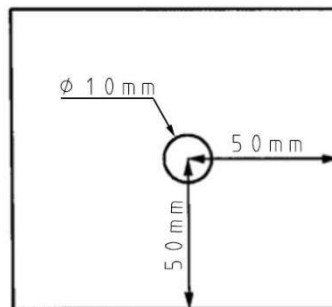


Figura 1 - Dimensões da chapa a utilizar nas simulações.

A simulação deverá ser realizada em Abaqus, versão 6.11 de estudante, e com modelação 2D e 3D.

1.2 Objetivos do Trabalho

1. Caracterizar os materiais com as equações de encruamento apropriadas ;
2. Obter um modelo 2D axi-simétrico e 3D para o ensaio de formabilidade descrito em 1.1 ;
3. Obter curvas força vs deslocamento para cada um dos ensaios realizados, e relacioná-los com o início de rotura ;
4. Obter o rácio de expansão do furo para as diferentes simulações realizadas e analisar os resultados ;
5. Obter valores para a espessura da chapa no bordo do furo, aquando do momento em que está a ser aplicada a força máxima à mesma.

1.3 Metodologia

O plano foi, em primeiro lugar, realizar uma revisão bibliográfica relativamente ao ensaio a realizar para saber exatamente o objetivo do ensaio, como é que ele é feito em condições reais, quais as normas aplicáveis que devamos ter em atenção, bem como outros detalhes que sejam necessários aquando da execução do modelo e da simulação.



De seguida, caracterizar os materiais em estudo. Para isso ir ao catálogo do fornecedor e obter os dados disponíveis sobre os mesmos. Fazer uma pequena revisão bibliográfica sobre as leis a aplicar, o seu funcionamento, e outros detalhes necessários à sua correta aplicação, bem como a procura da confirmação dos resultados obtidos, feitos os cálculos

Ao mesmo tempo, ou depois, modelar em Abaqus o ensaio de acordo com 1.2, isto é, pelo menos um modelo 2D e outro 3D. Tal foi feito sem grandes necessidades fora do que já foi aprendido no decorrer nas aulas. Nas propriedades dos materiais serão inseridos os valores obtidos na sua caracterização, realizada anteriormente.

A seguir, pretendeu-se obter resultados, e iterativamente ir analisando-os criticamente, isto é, caso os resultados não estejam de acordo com o esperado, ou não estejam de acordo entre os modelos, refazer o modelo, ou corrigir os eventuais erros que possam ter passado despercebidos na abordagem efetuada.

Tendo resultados satisfatórios proceder finalmente a uma análise dos parâmetros presentes nos objetivos bem como outros que o grupo ache relevantes, e acabar o trabalho concluindo e sugerindo possíveis trabalhos futuros relevantes ou que deem continuidade ao presente.

Segue-se então o primeiro dos passos na realização deste trabalho, a revisão bibliográfica.



2 Revisão Bibliográfica

2.1 Ensaio Erichsen

A formabilidade de um material traduz-se pela sua capacidade de se deformar plasticamente quando solicitado e de manter essa forma preservando a integridade estrutural da peça e sem apresentar defeitos ^[9] Cada tipo de chapa pode suportar um determinado limite de deformação, que é usualmente associado ao início da estricção localizada, que eventualmente leva à fratura dúctil da chapa conformada. ^[11]

Deste modo, o ensaio mais usado para uma primeira abordagem na determinação das propriedades mecânicas das chapas é o ensaio de tração, pois permite obter as tensões de rotura e de limite elástico, o coeficiente de encruamento e de anisotropia do material. No entanto, tem como desvantagem o facto de o material ser sujeito a um estado de tensão uniaxial, que não representa realisticamente o estado de tensão complexo a que a chapa está sujeita num processo de conformação plástica.

Com efeito, apenas com base nos mesmos, é muito difícil evitar o aparecimento de defeitos como a casca de laranja, linhas de Lüder, enrugamento e distorção nos processos de estampagem. Por este motivo, foram concebidos alguns ensaios para avaliar a estampabilidade das chapas metálicas. Estes ensaios permitem deformar o material quase nas mesmas condições obtidas na operação de produção mas de maneira controlada, minimizando assim as variações e variáveis dos resultados.

Existem inúmeros ensaios para a avaliação da estampabilidade diferindo principalmente nas formas de punções e corpos de prova. No entanto, destacam-se os ensaios Erichsen (mais usado na Europa e Japão) e o Olsen (mais usado nos EUA). As variantes entre os diversos métodos são basicamente as diferenças entre formas de punções e corpos de prova. Os primeiros podem assumir por exemplo a forma esférica ou de bala enquanto os segundos podem ser utilizados com forma quadrada, elíptica, circular ou retangular.



Figura 2 - Esq.: punções; Meio: anéis de fixação; 3: aparelho completo de ensaio Erichsen. ^[6]

O ensaio consiste em fixar a chapa entre a matriz e o anel com carga de 1.000 kgf. A cabeça do punção lubrificada (normalmente com um óleo termo-resistente) é então empurrada contra a



chapa a velocidade constante entre 0,08 e 0,4 mm/s. O teste termina assim que a máquina deteta uma diminuição da força aplicada, que corresponde ao início da estrição do material. Caso o aparelho não possua um medidor da força, o teste acaba pela visualização do aparecimento da estrição ou pela fratura da chapa. A altura, h , obtida denomina-se Índice de Erichsen.

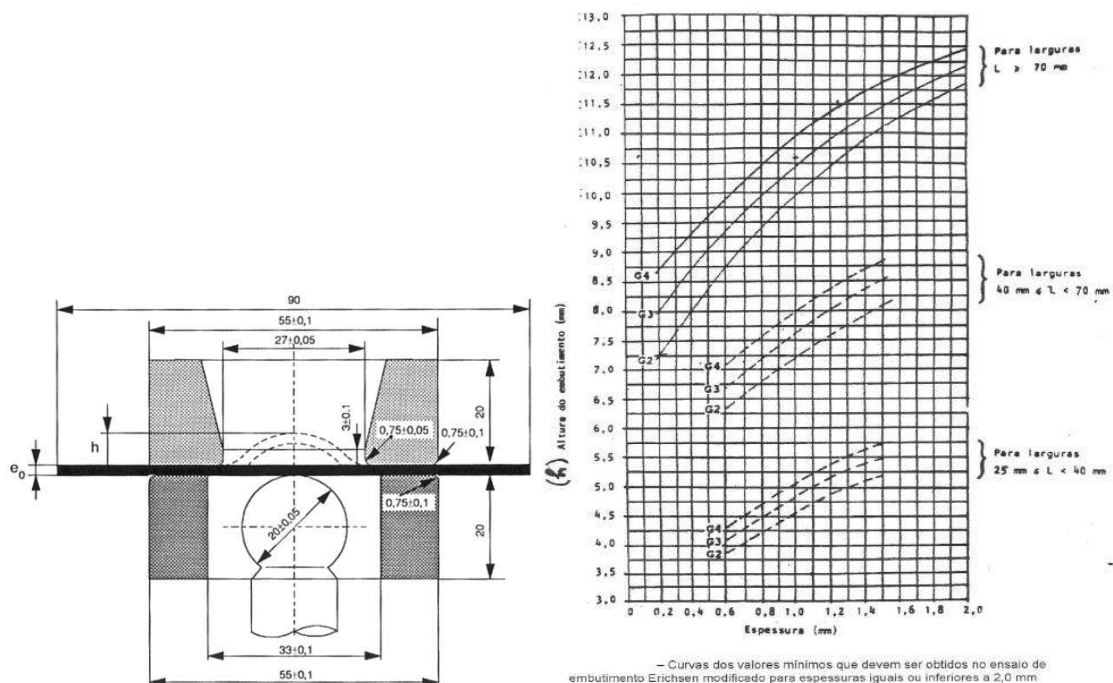


Figura 3 - Esq.: Dimensões usuais utilizadas na realização do ensaio Erichsen.^[14] D^a: Variação da altura h em função das dimensões da chapa.^[6]

A espessura nominal da chapa para o teste pode variar entre 0,2 mm e 2 mm para as dimensões apresentadas na figura . Existem, contudo, aparelhos capazes de ensaiar chapas com espessura nominal até 5mm.^[8] Este ensaio é normalizado pela normas

– **ASTM**

ASTM E643-84(2000) Standard Test Method for Ball Punch Deformation of Metallic Sheet Material – Aplicável a chapas de espessuras entre 0,008” e 0,80” (0,2mm e 2,0 mm). Em anexo encontra-se a descrição do ensaio segundo esta norma.

– **ISO**

ISO 20482(2003) - Metallic materials - Sheet and strip - Erichsen cupping test - aplica-se a chapas de espessuras entre 0,1 e 2,0 mm.^[6]

Para este trabalho, contudo, ir-se-á, conforme pedido no enunciado, usar uma chapa com furo circular, à semelhança dos testes de expansão de furo.



2.2 Ensaio de expansão de furo

A expansibilidade de furos é um parâmetro de formabilidade de chapas que são submetidas ao processo de estampagem.^[11] Um teste de expansão de furo basicamente consiste numa operação de embutadura realizada numa chapa pré furada com o propósito de aumentar o diâmetro do furo.

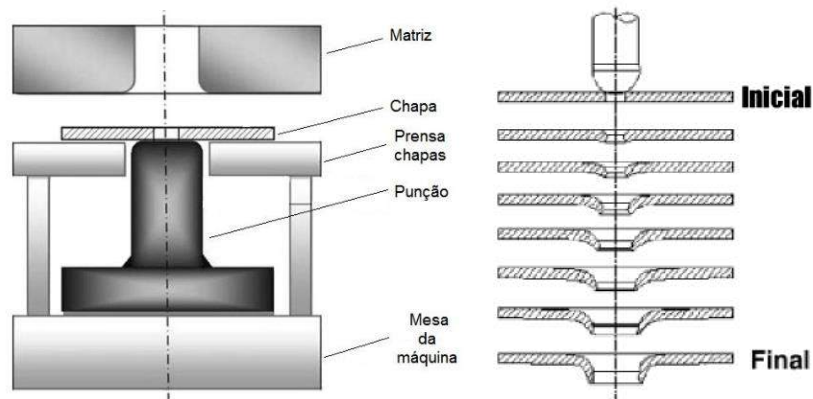


Figura 4 - Esquemas representativo de um teste de expansão de furos ^{[9],[11]}

Pode-se então obter o rácio entre diâmetro final e inicial, eq. 2.1, bem como a altura do embutido, e a espessura no bordo do furo da chapa. Estes valores dão uma ideia aos engenheiros da formabilidade da chapa de um dado material, muito para além daquilo que se poderia supor com apenas os dados do ensaio de tração do mesmo material.

$$r\acute{a}c\acute{i}o = \frac{D_f - D_i}{D_i} \quad (2.1)$$

Assim, a geometria a usar em Abaqus para o ensaio de expansão de furo com ferramenta Erichsen será a representada

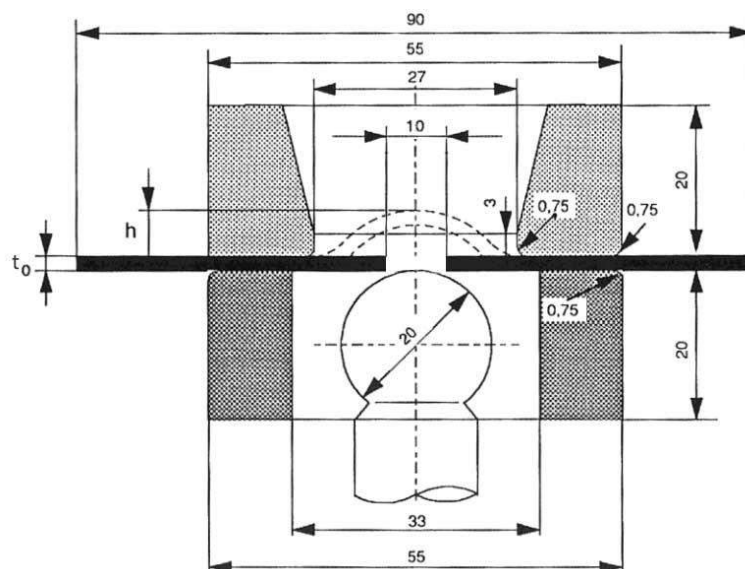


Figura 5 - Esquema representativo do ensaio de expansão de furo a modelar e simular em Abaqus.



2.3 Equações de extrapolação da curva real do ensaio de tração

2.3.0 Introdução

Para a caracterização dos materiais no ABAQUS é necessário introduzir os valores reais da tensão e da deformação. Usar estes valores em vez das tensões de deformações convencionais pode dar uma medida mais direta da resposta do material na fase de escoamento plástico. No entanto, tendo apenas o ensaio de tração não é possível obter os valores reais para toda a extensão do ensaio, visto que a partir do momento em que se dá o fenómeno da estricção as variações de comprimento localizam-se no pescoço, pelo que a deformação de engenharia, que usa o comprimento total do provete, não pode ser usado para calcular a deformação real.

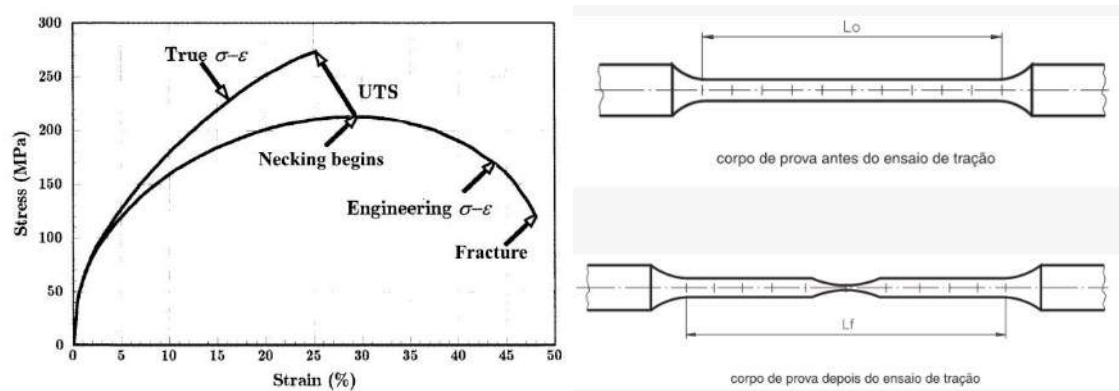


Figura 6 - Esq.: Curva de engenharia resultante do ensaio de tração para um provete de cobre recozido policristalino^[13]; D^a: Representação do fenómeno de estricção que ocorre nos ensaios de tração.

Nas simulações a serem realizadas é bastante provável que ocorra deformação para além desse ponto. É preciso então obter os pontos $\sigma_t - \varepsilon_t$ para os momentos depois da estricção do ensaio de tração por outros métodos. Surgem então as chamadas leis do encruamento isotrópico. Em 1909 Ludwik propôs uma das primeiras leis do encruamento:

$$\sigma_t = \sigma_0 + K\varepsilon_t^n \quad (2.2)$$

Onde σ_0 representa a tensão limite de elasticidade inicial.

2.3.1 Lei de Hollomon

Em 1945, Hollomon simplifica a equação de encruamento, desprezando a primeira parcela ficando a equação resultante conhecida pela lei de Hollomon que descreve o encruamento como uma função de lei de potência da tensão e deformação após o limite elástico.

$$\sigma_t = K\varepsilon_t^n \quad (2.3)$$

É mais usada para materiais macios e para deformações acima de aproximadamente 1%.



2.3.2 Lei de Swift

Em 1952 Swift propôs uma lei, baseado-se na de Hollomon, para descrever a evolução do encruamento do material na região plástica

$$\sigma_t = K \varepsilon_0 + \varepsilon_t^n \quad (2.4)$$

Onde ε_0 representa a deformação inicial. Esta lei é utilizada, portanto, para os casos de materiais pré-deformados ou deformados a frio (laminados).

3 Caracterização dos materiais

3.1 Generalidades e composição química

A chapa terá como materiais os aços 1000 DP e 300 RP da fornecedora Docol. O enunciado sugeria o 980DP, no entanto as informações disponíveis são escassas, pelo que foi sugerido ser usado o 1000 DP.

O 1000 DP é um *High Strength Steel* (HSS), bifásico (*Dual Phase*), laminado, e é o aço com maior resistência mecânica dos produzidos pelo fornecedor. Uma das fases é ferrítica, que segundo o fornecedor confere as boas propriedades de conformação plástica e a outra martensítica que confere a sua elevada resistência mecânica. Têm assim, um bom rácio entre formabilidade e resistência mecânica. É fornecido em espessuras entre 0.5-2.1mm e larguras entre 800-1500mm e aconselhado para aplicações tubulares e de componentes de segurança em automóveis.

O 300 RP é um HSS fosforoso, segundo a Docol, aconselhado para operações de prensagem. Possui excelente formabilidade bem como boa resistência, a qual advém sobretudo do encruamento aquando da deformação plástica em operações de prensagem. É fornecido em espessuras entre 0.5-3mm e larguras entre 600-1000mm.

Tabela 1 - Composição química dos dois aços em estudo.^{[3],[4]}

Material	%C	%Si	%Mn	%P	%S
Docol 1000 DP	0.15	0.5	1.50	0.01	0.002
Docol 300 RP	0.05	0.2	0.6	0.11	0.01

3.2 Propriedades mecânicas

Na tabela 2 apresentam-se as propriedades mecânicas dos dois aços disponíveis.

Tabela 2 - Propriedades mecânicas dos dois aços em estudo.^{[3],[4]}

Material	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	σ_{ult} (MPa)	A_{80} (%) min
Docol 1000 DP	846	1049	7
Docol 300 RP	309	441	31



Com os dados obtidos a partir da base de dados da SSAB foi possível obter os seguintes gráficos do ensaio de tração relativos aos 2 aços

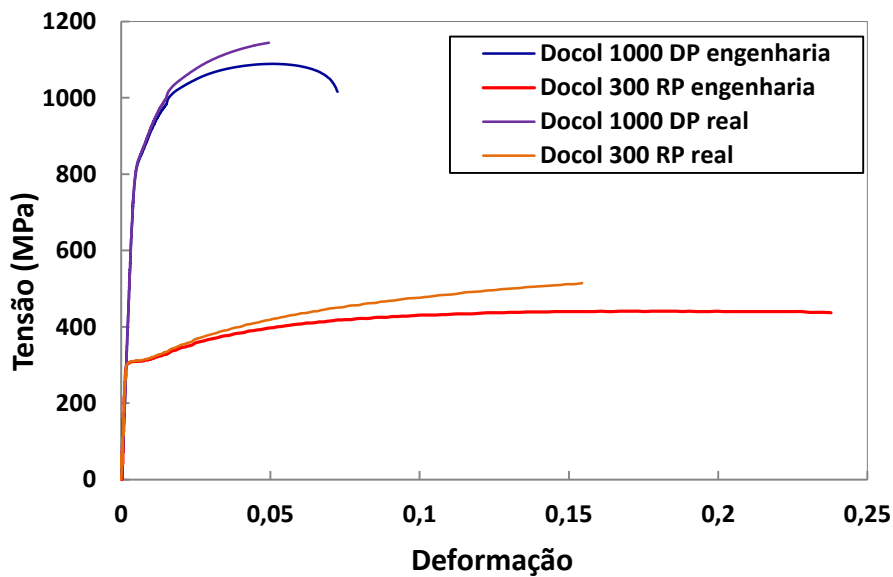


Figura 7 - Curva Tensão-deformação obtida a partir dos dados obtidos dos respetivos ensaios de tração realizados para os dois materiais. ^[16]

O ensaio do Docol 1000 DP foi testado a 90° relativamente ao sentido da laminagem enquanto o do Docol 300 RP a 0°. Idealmente deveriam ter sido os dois a 0°, apesar de a curva de tração ser muito semelhante.

A tensão real foi obtida, segundo as informações que constam na página da SSAB[13], da de engenharia por

$$\sigma_t = (1 + \varepsilon_e) \quad (3.1)$$

E a deformação real por

$$\varepsilon_t = \ln(1 + \varepsilon_e) \quad (3.2)$$

Como referido anteriormente é necessário obter valores para $\sigma_t - \varepsilon_t$ a partir do momento de estrição para poderem ser inseridos nas propriedades dos materiais no ABAQUS. Tais valores serão obtidas a partir das 2 leis mencionadas anteriormente, a de Hollomon e a de Swift, que permitem extrapolar a curva real para além do ponto em que ocorre estrição.

3.3 Obtenção dos parâmetros da lei de Hollomon e Swift

3.3.1 Hollomon



Relembrando, a lei de Hollomon é dada pela eq. (2.3) onde os parâmetros K e n devem ser determinados a partir de valores da curva $\sigma_t - \varepsilon_t$ no domínio elástico.

Como o parâmetro K é constante pode-se fazer

$$\frac{\sigma_1}{\varepsilon_1^n} = K = \frac{\sigma_2}{\varepsilon_2^n} \quad (3.3)$$

Que pode ser reescrita como

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_2} = \left(\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \right)^n \quad (3.4)$$

De onde se pode determinar n fazendo

$$n = \frac{\log\left(\frac{\sigma_1}{\sigma_2}\right)}{\log\left(\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}\right)} \quad (3.5)$$

Obtido n , determina-se K por substituição simples na (2.3).

3.3.2 Swift

A lei de Swift é dada pela eq. (2.4). A determinação dos parâmetros segue uma lógica semelhante.

Como o parâmetro K é constante pode-se fazer

$$\frac{\sigma_1}{\varepsilon_1^n + \varepsilon_0} = K = \frac{\sigma_2}{\varepsilon_2^n + \varepsilon_0} \quad (3.6)$$

Que pode ser reescrita sob a forma

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_2} = \left(\frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_0}{\varepsilon_2 + \varepsilon_0} \right)^n \quad (3.7)$$

De onde se determina n fazendo

$$n = \frac{\log\left(\frac{\sigma_1}{\sigma_2}\right)}{\log\left(\frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_0}{\varepsilon_2 + \varepsilon_0}\right)} \quad (3.8)$$

Mais uma vez K obtém-se por substituição simples na (2.4).

É preciso então escolher 2 pontos da curva de tração $\sigma_t - \varepsilon_t$ para a determinação numérica das constantes n e K para ambas as leis. A escolha dos pontos irá certamente influenciar os valores de n e K obtidos, pelo se fez uma análise *a priori* da dita influência.



3.3.3 Escolha dos pontos para a determinação numérica das extrapolações

Na escolha dos pontos teve-se os seguintes factos em atenção:

1. A lei de Hollomon requiere pontos escolhidos a partir de deformação convencional de 1% e ambas as leis para o domínio plástico.
2. O último ponto do curva real do ensaio terá de ser necessariamente escolhido caso contrário não haveria continuidade da curva.
3. Se os parâmetros escolhidos forem tais que a lei se aproxime da curva real obtida, poderá ser uma indicação de que é uma boa aproximação aos valores seguintes.

Analizou-se, então, quais os pontos a escolher que minimizassem o erro da extrapolação relativamente à curva real obtida do ensaio de tração.

Definindo \bar{H} como erro absoluto médio, este pode ser calculado por

$$\bar{H} \% = \left(\sum_{i=1}^{10} \frac{|\sigma_{t,E,i} - \sigma_{t,T,i}|}{\sigma_{t,T,i}} \cdot 100 \right) \cdot \frac{1}{10} \quad (3.9)$$

$$\forall E = \{Hollomon, Swift\}$$

- Cada ponto i corresponde a uma deformação real
- $\sigma_{t,T,i}$ é a tensão real obtida a partir do ensaio de tração
- $\sigma_{t,E,i}$ é a tensão real obtida por extrapolação

Tabela 3 - Tabela obtida para os pontos 6 e 2 da tabela seguinte, para o 1000 DP.

1000 DP					
	Experimental	Hollomon	Swift	Erro, \bar{H}	
$\epsilon_{p,t}$	σ_t (MPa)	σ_t (MPa)	σ_t (MPa)	Hollomon	Swift
0	851,5	958,9	963,7	12,6%	13,2%
0,0015625	882,1	977,1	980,5	10,8%	11,1%
0,0031250	914,9	992,3	994,7	8,5%	8,7%
0,0046875	943,9	1005,3	1007,2	6,5%	6,7%
0,006250	969,2	1016,8	1018,2	4,9%	5,1%
0,009375	1016,7	1036,4	1037,2	1,9%	2,0%
0,01250	1040,1	1052,8	1053,2	1,2%	1,3%
0,01875	1077,2	1079,2	1079,2	0,2%	0,2%
0,0250	1103,6	1100,2	1100,1	0,3%	0,3%
0,0375	1136,0	1132,7	1132,6	0,3%	0,3%
			Média, \bar{H}	4,7%	4,9%



Tabela 4 - Tabela final obtida para todos os pontos para os quais foi calculado o erro médio absoluto.

Pontos	1000 DP		$\bar{H}(\%)$		300 RP		$\bar{H}(\%)$	
	$\epsilon_{i,t}$	$\sigma_{i,t}$	Hollomon	Swift	$\epsilon_{i,t}$	$\sigma_{i,t}$	Hollomon	Swift
1	0,011	940,8	1,9	2	0,0114	323,7	1,8	1,6
2	0,0495	1144,35			0,1509	511,7		
3	0,0125	941,96	2,1	2,2	0,0509	337,3	2,1	1,8
2	0,0495	1144,35			0,1509	511,7		
4	0,0147	994,02	2,5	2,6	0,0509	420,9	1,8	2,6
2	0,0495	1144,35			0,1509	511,7		
5	0,0201	1048,79	3,7	3,7	0,0576	431,1	1,8	3,1
2	0,0495	1144,35			0,1509	511,7		
6	0,027	1085,51	4,7	4,9	0,1003	476,5	2	4,5
2	0,0495	1144,35			0,1509	511,7		

Daqui se pode observar que para ambos os materiais o erro é menor, isto é, as leis se aproximam mais ao ensaio obtido, quanto mais perto da tensão de limite elástico for o primeiro ponto. Decidiu-se por sob a forma gráfica, usando-se os pontos com menor erro médio, os pontos 1 e 2, observando-se efetivamente uma boa aproximação da curva à curva do ensaio de tração. Contudo, notou-se uma variação brusca da inclinação na zona de passagem da curva real para a curva por extrapolação. Adicionando ao mesmo gráfico a curva obtida para os pontos 6 e 2, no caso do aço 1000 DP, notou-se, tal como esperado, uma maior discrepância relativamente à curva real, mas uma transição mais suave, dir-se-ia, mais natural.

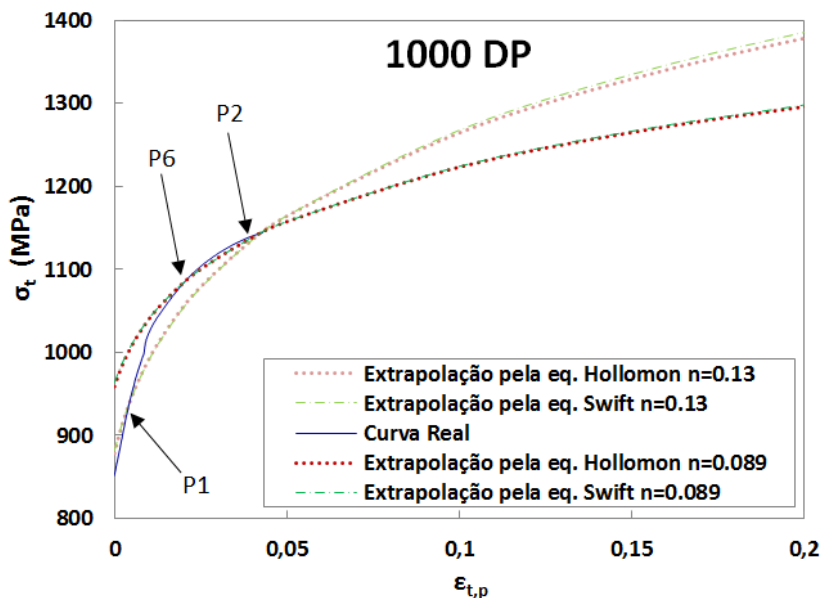


Figura 8 - Comparação das curvas obtidas utilizando P1 e P2 (n=0.13) e P6 e P1 (n=0.089).

Além disso, pela observação gráfica facilmente se nota que a maioria do erro é devida à discrepância inicial, sendo que no final é uma melhor aproximação da curva real. Como só há interesse em utilizar valores para as tensões e deformações obtidos das equações de



extrapolações para valores depois de não existirem os valores do ensaio de tração, concluiu-se que apesar de um maior afastamento à parte conhecida do ensaio de tração, a utilização de um relativamente afastado da tensão de limite elástico, tal como o é o ponto 6, permitirá obter uma curva de extrapolação mais próxima do que será a curva real. Além disso, faz sentido utilizar na extrapolação os pontos mais recentes da curva de tração.

Como a curva do 300 RP é mais suave, não se colocou tanto este problema da transição abrupta, sendo que os pontos 4 e 2 pareceram constituir uma boa aproximação tanto em termos de afastamento em relação à curva real obtida, como em termos de ter uma transição suave.

Os pontos escolhidos e os seus respetivos valores reais foram os presentes na tabela 5. Relativamente à deformação inicial, ϵ_0 , usou-se para o 1000 DP um valor encontrado^[1] para o 980 DP (aço muito semelhante) e para o 300 RP um valor genérico de 0,01 visto não ter sido encontrada nenhuma informação a respeito do valor da deformação inicial do aço.

Tabela 5 - Pontos escolhidos, respetivas deformações e tensões reais, bem como ϵ_0 adotado para os dois materiais.

Pontos escolhidos	6	2	Deformação inicial
1000 DP			
$\epsilon_i =$	0,027	0,0495	$\epsilon_0 = 0.008$
$\sigma_i =$	1085,51	1144,35	
	4	2	
300 RP			
$\epsilon_i =$	0,0509	0,1509	$\epsilon_0 = 0.01$
$\sigma_i =$	420,9	511,7	

Para a lei de Hollomon obteve-se então

	1000 DP	300 RP
$n =$	0,087088	0,17975
$K =$	1486,766	718,86

A qual fica, para o 1000 DP, então dada pela eq.

$$\sigma_t = 1486,8 \cdot \epsilon_t^{0,087088} \tag{3.10}$$

E para o 300 RP pela eq.

$$\sigma_t = 718,9 \cdot \epsilon_t^{0,17975} \tag{3.11}$$

Relativamente à lei de Swift

	1000 DP	300 RP
$n =$	0,089021	0,201063521
$K =$	1493,3	738,8360076



A qual, para o 1000 DP, fica dada por

$$\sigma_t = 1493,3 \cdot 0,008 + \varepsilon_t^{0,089021} \tag{3.12}$$

E para o 300 RP

$$\sigma_t = 738,8 \cdot 0,01 + \varepsilon_t^{0,201063} \tag{3.13}$$

De notar que estes valores do coeficiente de encruamento aparentam ser muito baixos, mas estão muito próximos do valor encontrado na página de um fornecedor de aços para automóveis para o 1000 DP.^[15]

3.4 Traçado das curvas $\sigma_t - \varepsilon_t$

Tendo os parâmetros das duas leis torna-se então possível completar as curvas anteriormente obtidas, Fig. 7, para os momentos do ensaio de tração após a estricção ocorrer. Tal foi feito utilizando as equações (3.6), (3.7), (3.11), (3.12) introduzindo deformações entre 0 e 1 e espaçadas de 0,05 e retirando a respetiva tensão real. Obteve-se assim o seguinte quadro a partir do qual se traçaram as curvas completas e que foi usado para introduzir as propriedades plásticas dos materiais no Abaqus.

Tabela 6 - Valores para a curva $\sigma_t - \varepsilon_t$ a colocar no Abaqus.

Ponto	1000 DP				Swift			
	Hollomon		Swift		Hollomon		Swift	
	$\varepsilon_{p,t}$	σ_t (MPa)	$\varepsilon_{p,t}$	σ_t (MPa)	$\varepsilon_{p,t}$	σ_t (MPa)	$\varepsilon_{p,t}$	σ_t (MPa)
1	0	851,5	0	851,5	0	310,7	0	310,7
2	0,0015625	882,1	0,0015625	882,1	0,003125	315,7	0,003125	315,7
3	0,0031250	914,9	0,0031250	914,9	0,00625	324,7	0,00625	324,7
4	0,0046875	943,9	0,0046875	943,9	0,009375	333,7	0,009375	333,7
5	0,006250	969,2	0,006250	969,2	0,0125	344,9	0,0125	344,9
6	0,009375	1016,7	0,009375	1016,7	0,01875	364,2	0,01875	364,2
7	0,01250	1040,1	0,01250	1040,1	0,025	381,2	0,025	381,2
8	0,01875	1077,2	0,01875	1077,2	0,0375	407,0	0,0375	407,0
9	0,0250	1103,6	0,0250	1103,6	0,05	426,9	0,05	426,9
10	0,0375	1136,0	0,0375	1136,0	0,075	458,4	0,075	458,4
11	0,05	1157,6	0,05	1157,7	0,1	479,7	0,1	478,6
12	0,10	1223,3	0,10	1224,2	0,135	505,1	0,135	504,8
13	0,15	1265,0	0,15	1266,6	0,2	531,0	0,2	532,1
14	0,20	1295,9	0,20	1298,1	0,25	554,3	0,25	557,0
15	0,25	1320,6	0,25	1323,3	0,3	573,8	0,3	578,2
16	0,30	1341,3	0,30	1344,4	0,35	590,7	0,35	596,7
17	0,35	1359,0	0,35	1362,6	0,4	611,2	0,4	619,2
18	0,45	1388,6	0,45	1392,8	0,5	635,9	0,5	646,7
19	0,7	1442,5	0,7	1448,0	0,7	675,2	0,7	690,7
20	1	1487,6	1	1494,3	1	719,6	1	741,1

Valores obtidos a partir do ensaio de tração

Valores obtidos pelas leis de Swift e Holloman

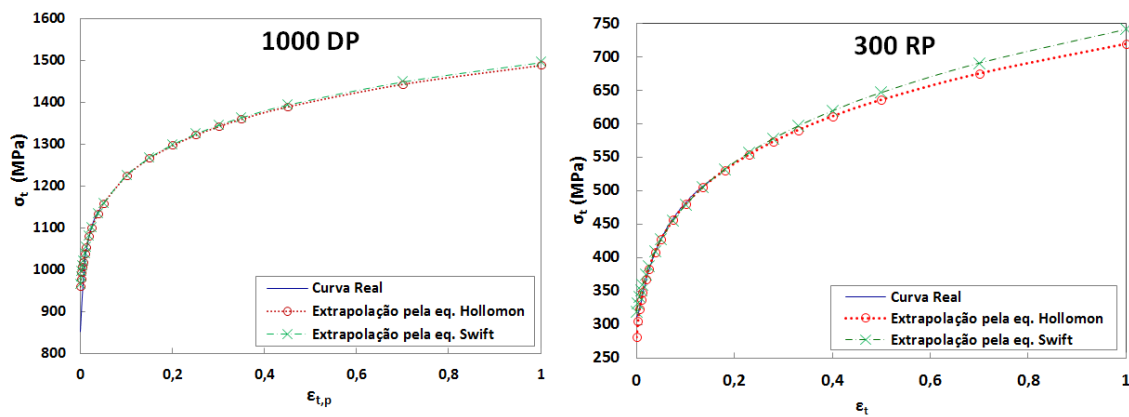


Figura 9 - Curva de tração dos materiais para a zona plástica. Utilizaram-se mais pontos nas fases iniciais onde a variação é maior, e menos nas fases finais, onde a variação é menor, da curva para se obter uma aproximação mais realista

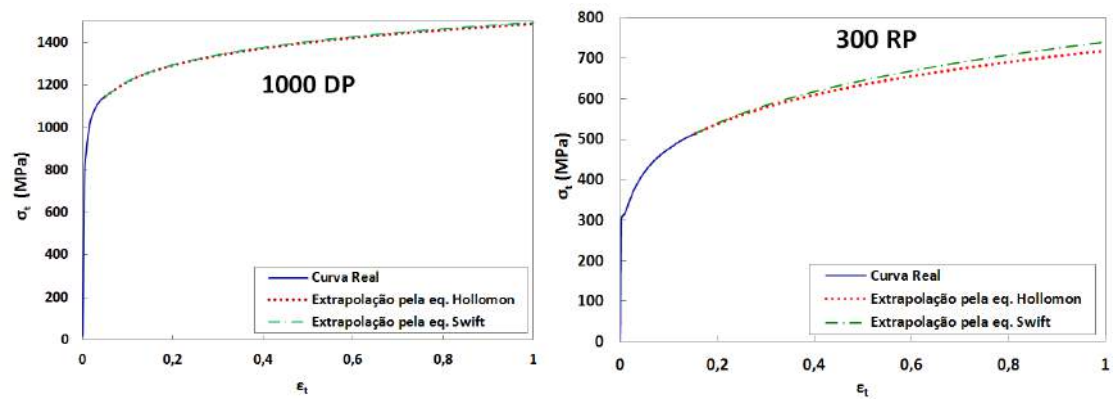


Figura 10 - Curva de tração dos materiais completas até deformação real total de 1.



4 Procedimentos

Para uma comparação das diferentes opções oferecidas pelo Abaqus, decidiu-se simular o ensaio com um modelo 2D axi-simétrico, um 3D rígido analítico e um 3D rígido discreto.

Para estudar os efeitos da variação da espessura na formabilidade da chapa, utilizaram-se, para ambos os materiais e apenas para o ensaio 2D para não aumentar em demasia o número de ensaios a realizar, duas espessuras da chapa, sendo uma de 1 mm e outra de 2 mm, não foi possível escolher 3mm em vez de 2mm, porque o fornecedor não dispõe de chapas com espessuras acima de 2.1mm (ver cap. 3.1).

Na construção dos modelos foi necessário utilizar algumas considerações que permitiram simplificar a obtenção de resultados e também permitiram que se representasse corretamente o problema considerado.

Em primeiro lugar, nos modelos foram usados pontos de referência associados às ferramentas, o que permitiu uma aplicação de condições de fronteira mais simples e também a obtenção do valor da força do punção sem a necessidade de fazer o somatório de todas as forças presentes nos elementos do punção.

Para além disso foi necessário ter em conta as condições de simetria para o modelo 2D e para o modelo 3D rígido discreto. No primeiro utilizou-se uma condição de simetria no eixo dos xx para o punção, enquanto que no modelo 3D rígido discreto utilizou-se condições de simetria na chapa, visto apenas ter sido representado $\frac{1}{4}$ do modelo. Estas condições foram essenciais a uma representação correta do modelo e à obtenção de resultados satisfatórios.

Foi necessário ter em conta que para o modelo 3D rígido discreto o valor da força exercida pelo punção foi multiplicado por um fator de 4 para a obtenção da força total visto só estar representado $\frac{1}{4}$ do modelo como referido anteriormente.

Também foi necessário escolher um *step time* que permitisse simular o ensaio de Erichsen corretamente, sendo que se utilizou um valor, 0.0185, que permitisse a penetração total do punção no furo da chapa. Este valor de *step time* também foi influenciado pelo facto de se ter pretendido a obtenção de uma deformação plástica equivalente (PEEQ) máxima de 0.6, sendo que a escolha deste valor se relacionou com o facto de normalmente os materiais apresentarem rotura por volta deste valor. Caso se pretendesse conhecer o valor exato para deformação correspondente à rotura, seria necessário efetuar ensaios aos materiais, como por exemplo o ensaio de fadiga, tração bi-axial, etc. ensaios esses que não foram encontrados nas pesquisas bibliográficas, pelo que teve de se recorrer ao uso do valor 0.6 de referência.

Relativamente ao punção, este foi usado um com forma de projétil ao invés de um punção esférico, o que teria influenciado os resultados caso se considerasse o retorno elástico final da chapa depois de o punção a ter atravessado.

Quando se conduz uma análise explícita como é o caso que está a ser estudado é necessário ter em conta a influência dos efeitos dinâmicos na análise, isto é, o ensaio deve ser quase-estático, pelo que os efeitos dinâmicos devem ser minimizados. Tal consegue-se, para este



caso, utilizando uma velocidade baixa para o punção (1m/s) e usando um *smooth step*. Ainda assim, para verificar que efetivamente os efeitos dinâmicos têm pouca influência na simulação foram obtidos os dados relativos à energia cinética e interna da chapa.

Para simplificar essa comparação foi elaborada a seguinte tabela:

Tabela 7 - Tabela resumo dos procedimentos aplicados em Abaqus

Tabela Comparativa de Procedimentos					
		Axi2D	3D Analítico	3D Discreto	
Part	Blank	Axisimetric	3D	3D	
		Deformable/Solid	Deformable/Solid	Deformable/Solid/Shell	
	BlankHolder	Axisimetric	3D	3D	
	Die	Analytical Rigid		Discrete Rigid	
Property	1000 DP Hollomon	Tabela 6			
	300 RP Hollomon				
	1000 DP Swift				
	300 RP Swift				
Step	Create	Dynamic Explicit			
	Time Period/Interval	0,0185 / 10			
	Volume/thickness/Coordinates	EVF, COORD			
Interaction	Friction	BlankHolder-Blank	Surface to surface		
	Coeff	Die-Blank			
	0,15	Punch-Blank			
Load	Initial	Blank	BC Encastre	BC Encastre	BC Encastre
		Die	BC Encastre	BC Encastre	BC Encastre
		Punch	XSymm	-	XSymm/ZSymm
	Velocity	Blank	Propagated	Propagated	Propagated
		Die	Propagated	Propagated	Propagated
		Punch XSymm	Propagated	-	Propagated
		Punch Velocity	V2 = 1000 (mm/s)		
Mesh	Blank	Explicit/Aximetric Stress Linear/CAX4R - Quad/Structured	Explicit/3D Stress Linear/C3D8R - Hex/Structured	Explicit/3D Stress Linear/C3D8R/S4R - Hex/Structured	
Job	CPU Time				

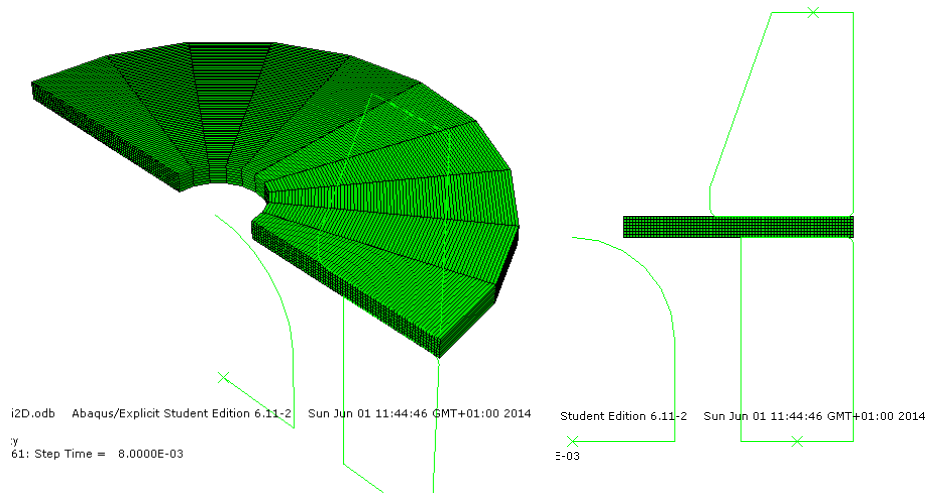


Figura 11 - Vista isométrica e frontal do modelo axi-simétrico 2D.

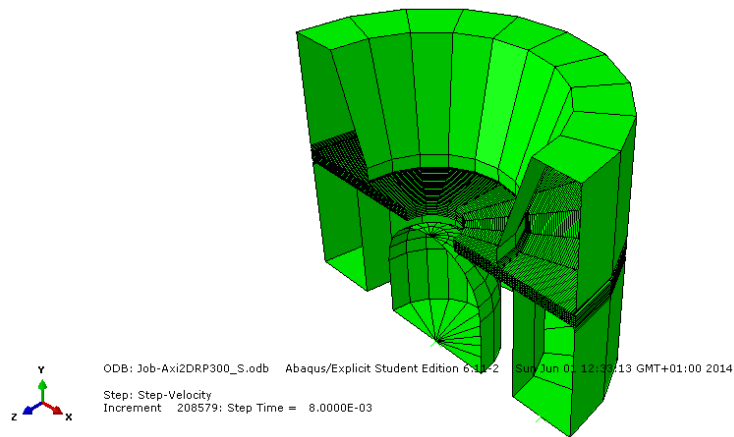


Figura 12 - Vista com *sweep* a 180°C do modelo axi-Simétrico 2D.

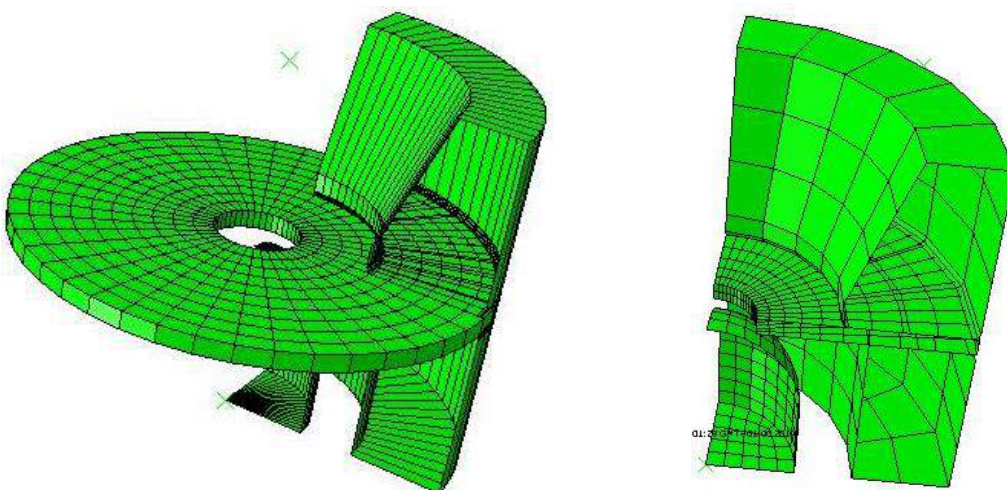
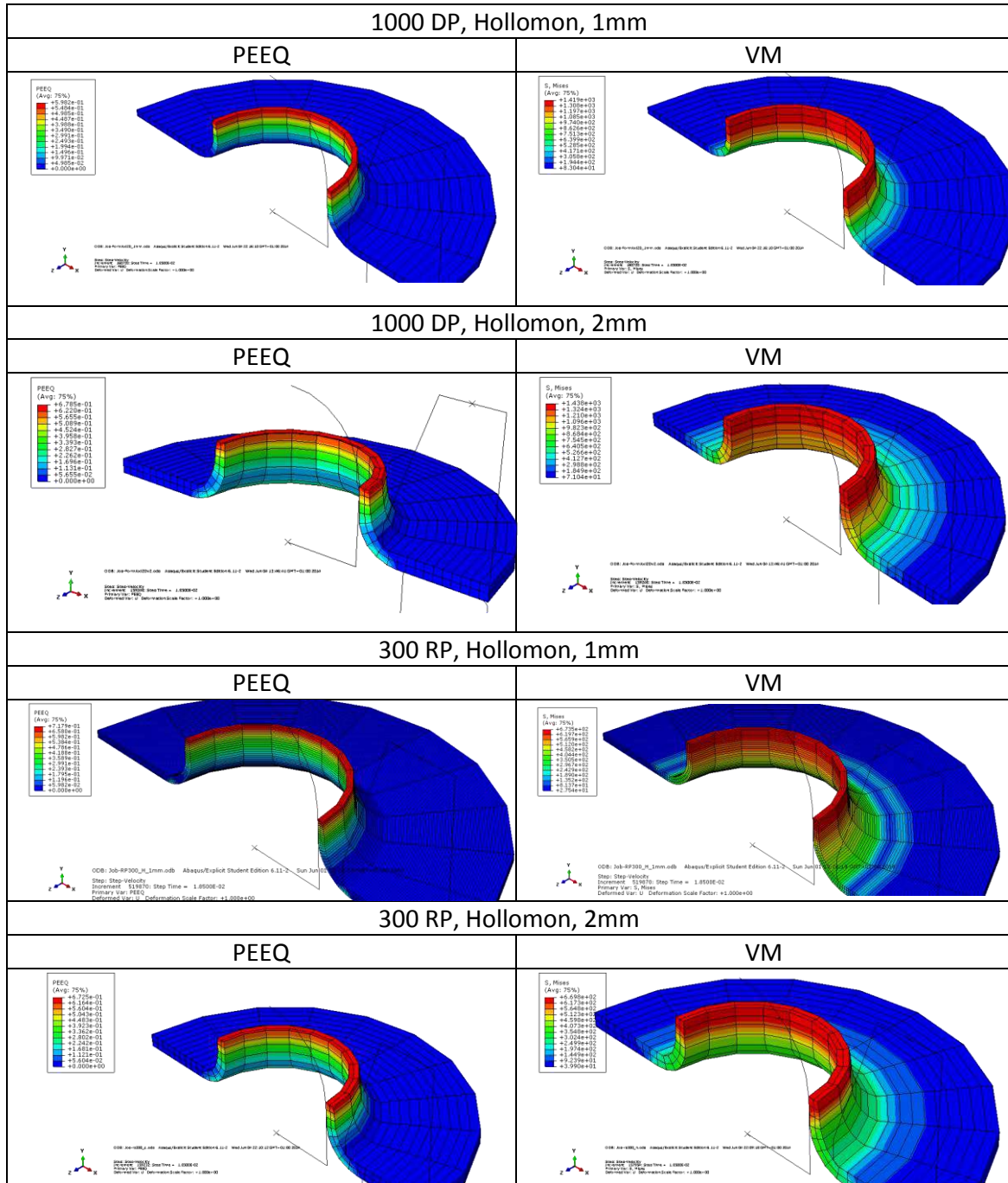


Figura 13 - Vistas do modelo 3D analítico (esq) e discreto (dº).



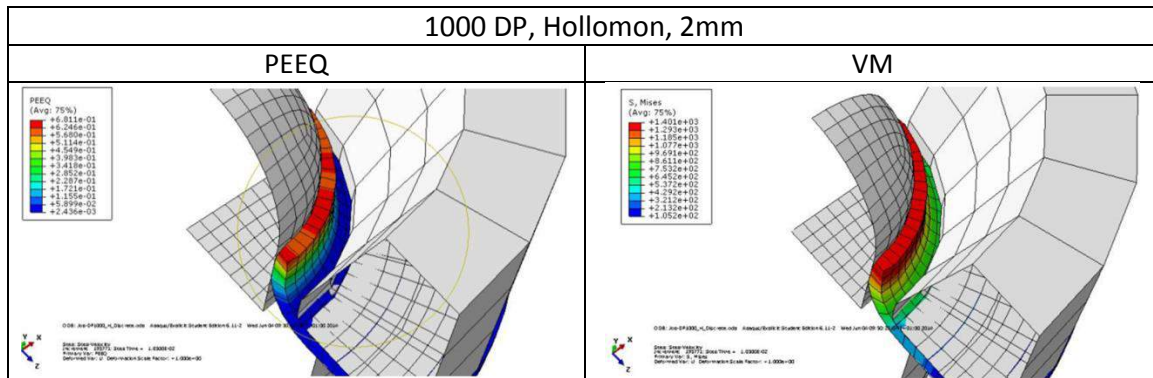
5 Resultados

5.1 Modelo 2D Axi-Simétrico

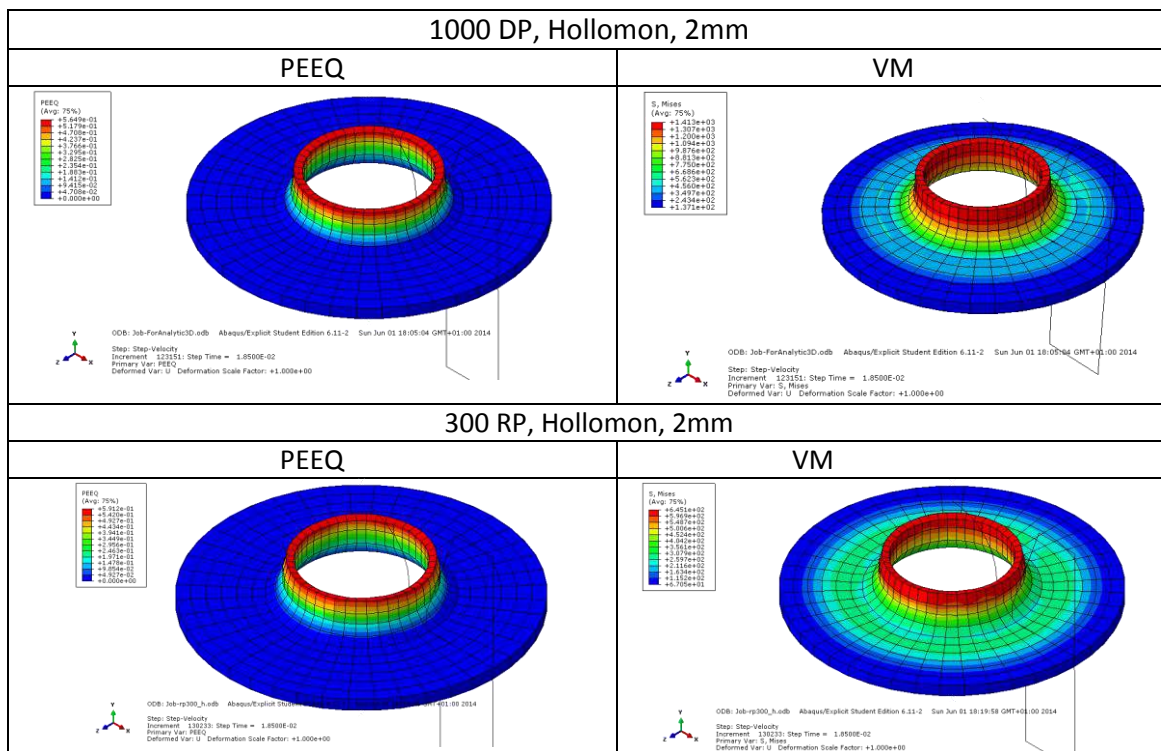




5.2 Modelo 3D Discreto



5.3 Modelo 3D Analítico





5.4 Outros Resultados

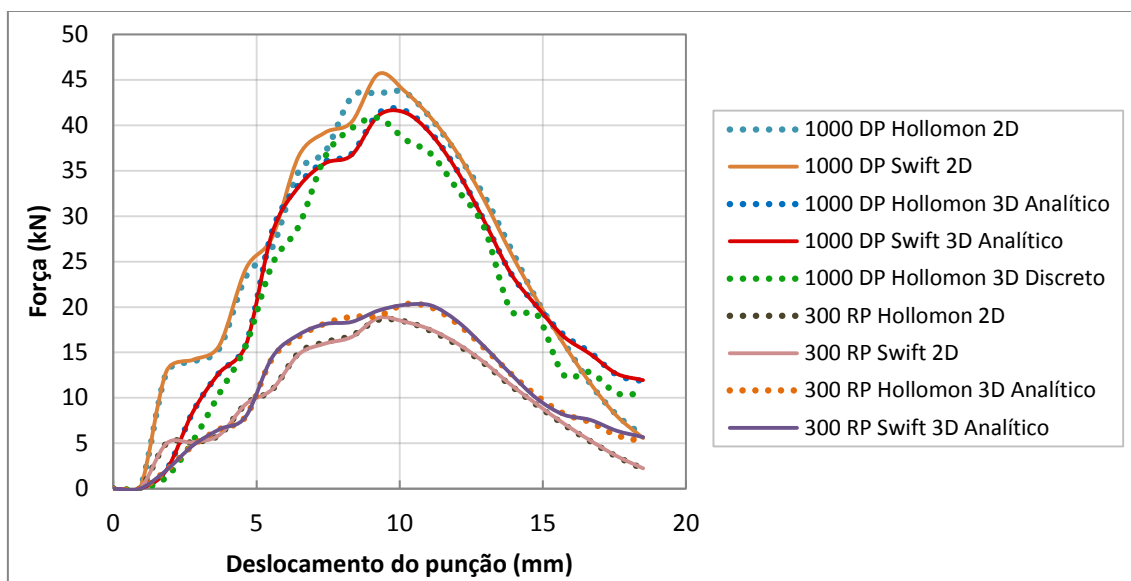


Figura 14 - Conjunto para os ensaios simulados das curvas Força vs Deslocamento do punção. A traço pontilhado curvas com o material caracterizado pela eq. de Hollomon, e traço contínuo com a de Swift.

Tabela 8 - Tabela resumo para todas as simulações realizadas, para os valores de PEEQ, Von Mises, Espessura no bordo do furo da chapa e rácio de expansão do furo.

				Step = 0,0185		Para a posição de Fmáx (H)			Para PEEQ aprox 0,6 (H)	
				PEEQ	VM (MPa)	Força Máx (kN)	PEEQ	Espessura no bordo (EB) (mm)	Rácio expansão furo	PEEQ
1000 DP	2D Axi	1 mm	H	0,598	1419	14,95	0,359	0,771	1	0,598
			S	0,598	1425	-	-	-	-	-
		2 mm	H	0,670	1436	45,66	0,31	1,63	0,83	0,6029
			S	0,667	1441	-	-	-	-	-
	3D Analítico	2mm	H	0,565	1413	41,61	0,364	1,64	1	0,5649
			S	0,563	1417	-	-	-	-	-
	3D Discreto	2mm	H	0,681	1401	40,8	0,357	1,2	0,843	0,592
			S	-	-	-	-	-	-	-
300 RP	2D Axi	1 mm	H	0,603	655	6,51	0,361	0,792	1	0,603
			S	0,603	668,2	-	-	-	-	-
		2 mm	H	0,673	669,8	18,6	0,316	1,64	0,82	0,604
			S	0,673	684,6	-	-	-	-	-
	3D Analítico	2mm	H	0,591	645,1	20,31	0,401	1,44	1	0,5921
			S	0,596	662,9	-	-	-	-	-
	3D Discreto	2mm	H	-	-	-	-	-	-	-
			S	-	-	-	-	-	-	-

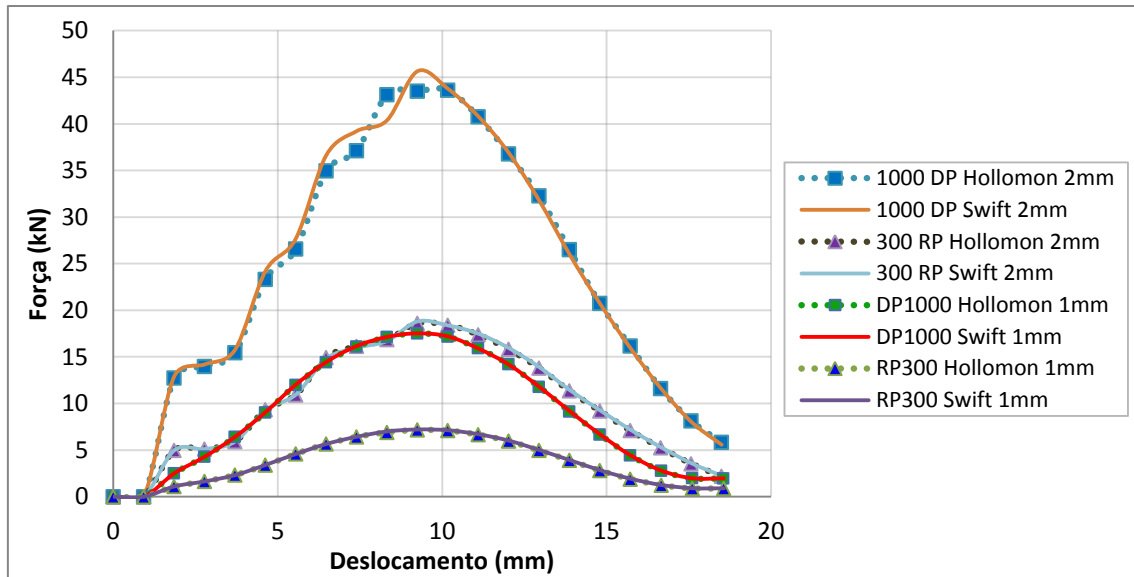


Figura 15 - Estudo do efeito da variação da espessura da chapa, com o modelo 2D.

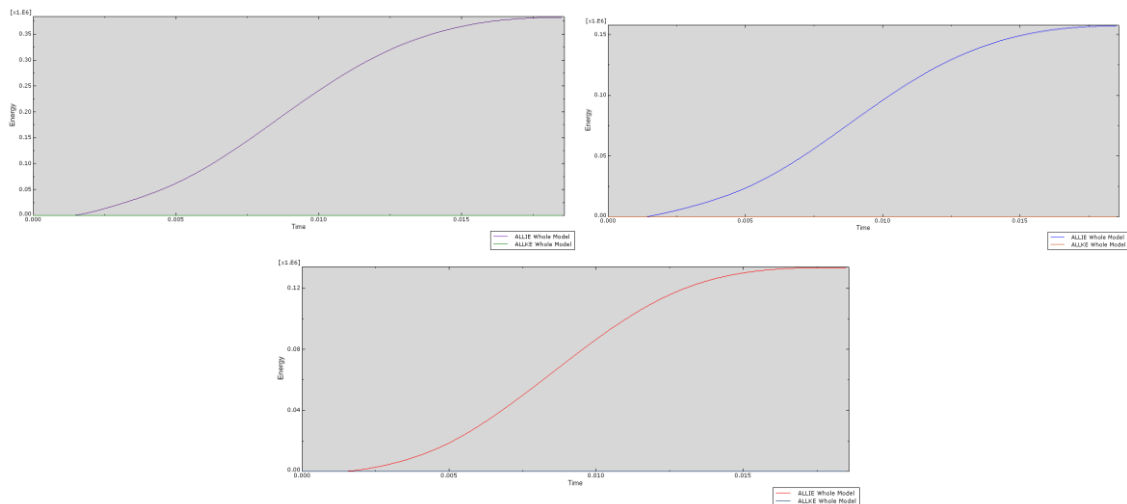


Figura 16 - Curvas relativas à energia cinética e interna da chapa ao longo da simulação. Do ensaio 2D-axi simétrico, chapa de 2mm. esq. 1000 DP, d^a 300 RP e no centro 1000 DP chapa de 1mm de espessura.

Tabela 9 - Tempo médio de utilização do CPU no processamento de cada uma das simulações.

		Average CPU Time (s)
2D axi	2mm	17,3
	1mm	16,5
3D Analítico		78,3
3D Discreto		130,5



6 Análise dos Resultados

6.1 Comparação dos resultados dos diferentes modelos

Optou-se por iniciar a análise determinando a semelhança entre as simulações para os 3 modelos. Para uma comparação exata, calculou-se a diferença dos valores PEEQ e tensões de Von Mises relativa a um dos modelos. Escolheu-se o modelo analítico como termo de comparação. Estas diferenças foram então calculadas fazendo o módulo das diferenças dos valores obtidos entre o 2D e o 3D a considerar dividindo pelo 2D em percentagem.

$$\delta(\%) = \frac{|V_{2D} - V_{3D}|}{V_{2D}} \cdot 100 \tag{5.1}$$

Os resultados entre os diferentes modelos foram bastante semelhantes, como se poder ver na tabela 8.

Tabela 10 - Diferenças relativas à simulação com modelo 2D, para chapa de espessura de 2mm.

			PEEQ	VM
1000 DP	3D Analítico	H	16%	1,6%
		S	16%	1,7%
	3D Discreto	H	2%	2,4%
		S	-	-
300 RP	3D Analítico	H	12%	4%
		S	11%	3%

Intuitivamente esta semelhança de resultados também pode ser observada pelos gráficos força vs deslocamento obtidos, figura 14.

Relativamente à influência da variação de espessura, testada com o modelo 2D, como era de esperar foi necessária menos força por parte do punção para deformar a chapa com menor espessura. Com efeito, para uma redução de 50% da espessura observou-se uma redução

Os rácios de expansão de furo foram obtidos fazendo

O motivo de dar valores perto de 1, significa que os materiais têm excelente formabilidade, uma vez que o punção atravessou parcial (rácio diferente de 1) ou totalmente (rácio =1) o furo da chapa até atingir 0.6 de PEEQ, o valor de referência indicativo de rotura do material.

Relativamente à espessura no bordo da chapa, em todos os casos ocorreu uma diminuição da mesma. Tal se deve ao facto de a chapa ter de aumentar de tamanho em comprimento para acompanhar o punção e portanto ter de diminuir uma outra das dimensões, que não estivessem restringidas, a espessura.



6.2 Análise do modelo 2D Axi-simétrico

O modelo axi-simétrico 2D foi o modelo que permitiu reproduzir mais facilmente o problema devido aos tutoriais realizados anteriormente. Inicialmente este modelo revelou resultados aparentemente realistas relativamente aos parâmetros força-deslocamento, devido ao bom refinamento da malha, contudo apresentou valores de deformação equivalente demasiado elevados, o que suscitou dúvidas em relação à fiabilidade dos resultados. Mais tarde percebeu-se que este refinamento associado ao uso de velocidade instantânea do punção levou a que o primeiro elemento a ter contacto com este tivesse um valor de deformação muito elevado. Observar na figura 17 o conjunto de elementos interiores do furo a vermelho, com valores de PEEQ muito mais elevados que os restantes adjacentes. Algumas soluções para a resolução deste problema passavam pela introdução de um *smooth-step* ou então por um refinamento mais grosseiro da malha que a tornasse equivalente à dos modelos 3D. Visto se ter conseguido aplicar o *smooth-step* optou-se então pela alternativa de aumentar o tamanho dos elementos da malha. Foi, assim, para esta segunda discretização que os resultados foram obtidos.

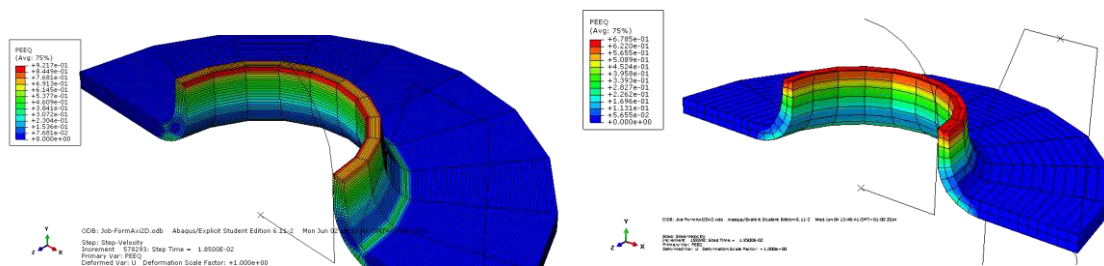


Figura 17 - O aumento do tamanho dos elementos de 0.3 (esq.) para 1.3 (d^ª) em *global size* permitiu obter resultados mais realistas no bordo do furo.

6.3 Análise do modelo 3D Analítico

A representação deste modelo envolveu o uso de ferramentas rígidas e de uma chapa em elementos deformáveis sólidos. Este tipo de análise tem a vantagem das ferramentas serem rígidas, não sendo necessário discretizá-las, permitindo focar a discretização na chapa. O uso deste tipo de ferramentas permite também que o contacto entre estas e chapa seja realizada com maior rigor, não havendo influência dos contornos da malha no caso de serem usadas ferramentas discretizadas. Contudo, a limitação de nós da versão *Student* do Abaqus limitou também essa mesma discretização. É de referir que este modelo teve influência na deteção do problema ocorrido no modelo 2D, pois inicialmente os resultados dos dois modelos tinham valores similares excepto na deformação equivalente, ajudando a perceber que existia uma anomalia com o outro modelo.

6.4 Análise do modelo 3D Discreto

Os resultados obtidos na análise do modelo 3D com elementos rígidos discretos permitiu concluir que a discretização destes tem uma grande influência nos resultados obtidos. Foi possível verificar que com uma discretização grosseira do punção os valores obtidos eram



erróneos, e ao experimentar uma melhor refinação obtiveram-se resultados mais satisfatórios, isto é, mais próximos dos valores obtidos para os outros 2 modelos. Os resultados erróneos observados prenderam-se essencialmente com os valores do PEEQ muito elevados, bem como bastante heterogéneos ao longo da espessura do bordo do furo da chapa. Alguma dessa heterogeneidade ainda pode ser observada, mas que não foi suscetível de ser corrigida, figura 18.

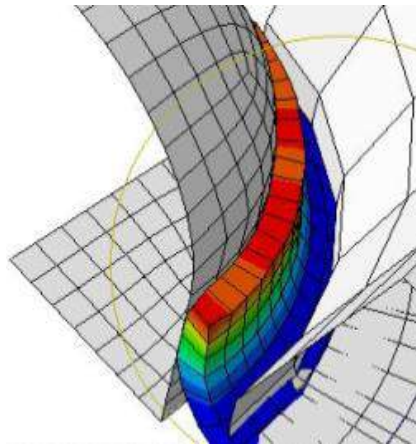


Figura 18 - Pormenor do bordo do furo da chapa a mostrar a não homogeneidade dos valores do PEEQ ao longo da mesma.

Uma nota a referir é a existência, na versão estudante, da limitação ao uso de 1000 nós, tal como foi referido anteriormente, que levou a que fosse necessário uma malha grosseira em todas as partes deste modelo. Com uma malha mais refinada seriam de esperar resultados mais realistas.

No entanto, com uma malha mais refinada, seria também, de longe, a simulação que mais tempo demoraria. Apenas com cerca de 1000 elementos demorou 7,5 vezes mais tempo que a simulação 2D e 1,5 vezes mais que o 3D analítico. É portanto um caso de ganhos de realismo cada vez menores para investimentos de tempo cada vez maiores.

6.6 Análise da Energia cinética e interna

Tal como esperado, a quantidade de movimento e portanto as energias cinéticas em jogo, foram muito inferiores à energia interna da chapa. Isto verificou-se em todas as análises efetuadas verificou-se que a energia cinética é muito inferior à energia interna, confirmando que os efeitos dinâmicos não influenciam os resultados. A título exemplificativo na figura 15, para um dos ensaios para os dois materiais, observe-se a curva da energia cinética muito perto do zero comparativamente à da energia interna. Note-se também, que a curva da energia interna do aço 1000 DP atingiu valores maiores que o do 300 RP, 350kJ vs 150kJ. Lembre-se que

$$W = F \times d \quad (5.2)$$

e a 1ª lei da termodinâmica

$$W + Q = \Delta U + \Delta E_p + \Delta E_c + \dots \quad (5.3)$$



Como as únicas energias em jogo no presente trabalho são a cinética, a interna, e como não é considerada transferência de calor, o aumento da energia interna da chapa só poder ter vindo do trabalho nela efetuado pelo punção.

Por outro lado, como em ambos os casos o punção se deslocou a mesma distância é de esperar que uma variação do trabalho só possa ser devido à variação da força. Com isso em mente, compare-se os resultados obtidos do ensaio 2D, chapa de 2mm e 1mm.

Um aumento da força máxima de 3.05 vezes (de 14.95kN para 45.66 kN), pelo que o aumento das forças nos restantes momentos serão da mesma ordem de grandeza, refletiu-se num aumento da energia interna de aproximadamente 3 vezes (de aprox. 130 kJ para aprox. 380 kJ).



7 Conclusões

Começou-se por estudar o problema em causa nomeadamente o significado e utilidade dos ensaios de Erichsen e de expansão de furo, tendo-se notado que o seu objetivo primário era o de determinar a conformabilidade do material a ser ensaiado. Seguidamente completou-se a caracterização dos materiais obtidas pelo ensaio de tração com as leis de Hollomon e Swift para se obter uma curva $\sigma_t - \varepsilon_t$ até uma deformação verdadeira de 1. Modelou-se e simulou-se o ensaio em Abaqus de três maneiras distintas, com o intuito de estudar as suas diferenças a nível de resultados bem como a sua aplicabilidade ao ensaio em causa. Obtidos os resultados das simulações analisaram-se os resultados tendo-se observado que os modelos revelaram resultados próximos apesar de algumas dificuldades iniciais. Para o problema estudado, conclui-se que o modelo 2D é o que possui mais vantagens devido ao menor tempo de processamento e porque apresenta resultados bastante satisfatórios.

Encontraram-se algumas dificuldades que se deveram em grande parte à limitação da versão do Abaqus *Student* relativamente ao número de nós que pode ser usado, assim como problemas relativos ao modelo 2D devido ao uso de velocidade instantânea o que levou a que fosse necessário o uso de uma malha mais grosseira piorando os resultados.

No entanto este trabalho revelou-se bastante interessante e permitiu a aquisição de novos conhecimentos na área das características dos materiais e da simulação pelo método dos elementos finitos para um processo de conformação plástica.



8 Trabalhos futuros

Como possíveis trabalhos futuros pode-se apontar:

- Utilização de materiais para a simulação com determinados parâmetros conhecidos *a priori* para uma melhor comparação da simulação com a realidade, nomeadamente, cujo valor de PEEQ (deformação real) correspondente à rotura bem como ε_0 sejam conhecidos;
- Ainda com o intuito de verificar a proximidade ou o afastamento à realidade, simular ensaios com maior disponibilidade bibliográfica ou que sejam passíveis de serem realizados na faculdade a fim de se compararem os resultados obtidos por simulação com os reais;
- No seguimento deste trabalho, efetuar ainda simulações com elementos de casca, e para diferentes velocidades do punção, bem como sem a limitação de 1000 nós, limitação essa que teve maior peso no modelo 3D discreto ;
- Outro trabalho futuro bastante relevante diz respeito à realização da simulação de processo de conformação plástica propriamente dito, para os materiais estudados neste trabalho, utilizando as informações obtidas aqui relativamente à formabilidade dos mesmos.



7 Bibliografia

- [1] Yi-Kai Lin, Kang-Ming Hsu, Ping-Kun Le (2010). "The Application of Flow Stress Model to Sheet Metal Forming Simulation" China Steel Technical Report, No.23, pp 31-35.
- [2] Santos, A. D. dos (2014) "Ensaio de Materiais e Caracterização Mecânica". [Apresentação Powerpoint].
- [3] Docol. "Cold reduced dual phase steels" [Folheto informativo]. Acedido a 27 Maio de 2014.
http://www.ssab.com/Global/DOCOL/datasheets_docol/en/201_Docol%20DP%20DL.pdf
- [4] Docol. "Cold reduced dual phase steels" [Folheto informativo.] Acedido a 27 de Maio de 2014.
http://www.ssab.com/Global/Docol/datasheets_docol/en/219_Docol%20RP%20BH.pdf
- [5] Erichsen.de "Deep Drawing Test." [Folheto informativo.] Acedido a 27 de Maio de 2014. <http://www.erichsen.de/sheet-metal-testing/deep-drawing-test>
- [6] Novais, C. T. (2009) "Ensaio de Embutimento". Escola Senai Roberto Simonsen. São Paulo.
- [7] Adriano, R. (2012) "Ensaio de Embutimento." Acedido a 28 de Maio de 2014. <http://www.slideshare.net/RenaldoSilva/aula-09-ensaio-de-embutimento>
- [8] "Tipos Principais de Ensaio de Estampabilidade". Acedido a 28 de Maio de 2014. http://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/6607-tipos-principais-de-ensaios-de-estampabilidade#.U4C7aPldUrV
- [9] Malheiro L., (2012). "Caracterização Mecânica de Materiais em Chapa Metálica e Problemas de Formabilidade em Componentes para Automóveis". Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto.
- [10] Ozturk, F. & Lee, D. (2005). "Experimental and numerical analysis of out-of-plane formability test". Journal of Materials Processing Technology, 170, pp. 247-253.
- [11] R. Narayanasamy, R., Narayanan, C. S., Padmanabhan, P., Venugopalan, T. "Effect of mechanical and fractographic properties on hole expandability of various automobile steels during hole expansion test." International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Volume 47, pp. 365-380, 2010.
- [12] SSab.com. "Method for Tensile Test". Acedido a 28 de Maio de 2014. <http://www.ssab.com/en/Products--Services/Service--support/Technical-Tools/Steelfacts/Test-methods/Method-for-tensile-test/>
- [13] D. ROYLANCE (2001) "Stress Strain Curves", Department of Materials Science and Engineering, Massachusetts Institute of Technology.
- [14] Santos, A. D. dos. (2014). Enunciado do trabalho de formabilidade.
- [15] WorldAutoSteel. "Steel Mechanical Properties" Acedido a 4 de Junho de 2014. <http://www.worldautosteel.org/steel-basics/properties/>
- [16] Motor de Busca dos materiais fornecidos pela SSAB. Acedido a 28 de Maio de 2014. <http://www.ssab.com/en/Products--Services/Service--Support/Technical-Tools/Steelfacts/Steelfacts/>

Isto já não faz parte do trabalho

Melhorias / críticas:

1. A equação de Swift por ter em conta a deformação prévia do material é sempre uma melhor aproximação do que a de Hollomon, pelo que quando escolhemos apenas uma das leis para simular teria sido um pouco mais correto usar a de Swift. No entanto esta diferença é mais relevante quando as deformações plásticas em jogo são baixas ($PEEQ < 0.1$), pelo que neste caso não terá tido grande influência ;
2. Se pudéssemos ter encontrado ensaios reais feitos com isto, podíamos ter verificado quão perto andámos da realidade, e qual das duas leis apresentou melhores resultados, mas foi muito difícil porque este ensaio nem é normalizado ;
3. Faltou referir a razão do porquê da curva força deslocamento apresentar a forma que apresenta. Para nós era tão óbvio que não falámos, e pensámos que não era relevante. A razão principal prende-se com a geometria, quanto mais aberto está o furo mais fácil se torna de o continuar a abrir e o punção atravessá-lo.
4. Também podia ter sido falado no porquê da espessura da chapa se reduzir (relacionado com o volume se manter aproximadamente constante, foi dado em PF2)

André Duarte B.L. Ferreira, 5 Junho 2014.