



**Revisão do processo de embutidura para melhoria da
calibração de componentes no processo de
soldadura Laser Amtrol-Alfa**

Bárbara Rita Teixeira Rodrigues

Relatório do Projeto Final / Dissertação do MIEM

Orientador na FEUP: Professor Doutor José Ferreira Duarte
Orientador no INEGI: Professora Doutora Ana Rosanete Reis

Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
Departamento de Engenharia Mecânica

Fevereiro de 2015

"Look up at the stars and not down at your feet."

Stephen Hawking

À minha família

Agradecimentos

Ao Professor Doutor José Ferreira Duarte, orientador deste trabalho na FEUP, fica desde já o agradecimento pelo seu precioso auxílio, transmissão de conhecimentos e pelas sugestões sobre estratégias a tomar no decorrer deste trabalho.

À Professora Doutora Ana Reis, orientadora deste trabalho no INEGI, agradeço a disponibilidade, apoio, sugestões de melhoria e disponibilização de informação proporcionada ao longo de todo trabalho.

Ao INEGI desejo agradecer a disponibilidade de meios concedidos durante a realização deste trabalho. Agradeço ainda a todos os elementos da equipa do CETECOP - Unidade das Tecnologias de Conformação Plástica, deixando uma palavra de apreço à Inês Oliveira, Diogo Fula, João Duarte, José Oliveira e Ricardo Cardoso por facilitarem a minha integração na unidade e por toda a disponibilidade e paciência para me ajudarem ao longo da realização desta tese. Não posso deixar de agradecer também à Joana todo o apoio e companheirismo quer ao longo deste trabalho quer ao longo de todo o percurso académico.

À AMTROL-ALFA agradeço o apoio e a disponibilidade que sempre demonstraram permitindo assim concluir esta dissertação atempadamente.

Aos meus amigos, que tiveram paciência para mim ao longo deste tempo todo e que sempre me ajudaram no que pudera. Eles sabem quem são.

À minha família, em especial aos meus pais e irmão, e amigos agradeço por todo o apoio incondicional e encorajamento prestados, sem os quais teria sido difícil concluir a presente dissertação.

Finalmente, fica também uma palavra de agradecimento a todos os que direta ou indiretamente contribuíram com o seu esforço e apoio na realização deste trabalho, a todos o meu muito obrigado!

Resumo

A conceção das garrafas de gás passa por vários processos de fabrico até ser obtido o produto final, entre os quais se encontram embutidura e soldadura a laser. A embutidura profunda é um dos processos mais utilizados em ambiente industrial contudo, com este processo, nem sempre se conseguem obter peças livres de defeitos onde se inclui a variação do diâmetro das peças. A obtenção de peças com diâmetros irregulares irá afetar a operação de soldadura a laser pois esta operação requer que a diferença entre os raios das peças respeite certas tolerâncias.

Ao longo deste trabalho serão analisados os defeitos de embutidura. Nesse sentido será efetuada a caracterização mecânica do material utilizado em embutidura onde se obterão os coeficientes de anisotropia. Posteriormente serão estudadas as coquilhas de uma garrafa de gás que foram embutidas e para isso foi realizada uma análise à variação da espessura ao longo do perímetro das peças e à variação do diâmetro. Foram também utilizados dois programas de simulação numérica diferentes, o *AutoForm*[®] e o *ABAQUS*[®], de modo a tentar reproduzir virtualmente o processo e assim prever a influência da caracterização mecânica na geometria final obtida.

Em suma, a presente dissertação pretende relacionar a caracterização mecânica do material com possíveis defeitos que ocorrem durante o processo de embutidura e desse modo tentar minimiza-los.

Palavras-Chave: Embutidura, soldadura a laser, caracterização mecânica, anisotropia, simulação numérica

Abstract

The production of gas cylinders passes through multiple manufacturing process until the final product is obtained, among which are deep drawing and laser welding. The deep drawing process is one of the most widely used in industrial environment. However, this process, is not always capable to produce parts without defects, which includes the variation of the workpieces' diameter. The obtained byproducts with irregular diameters will affect the laser welding operation, as this requires that the difference between the workpieces' radius complies with the imposed tolerances.

The present dissertation intends to analyse the deep drawing defects. An experimental investigation was carried out, in order to understand the effects that mechanical characterization has in the irregularities of the obtained parts. Tensile and anisotropy tests were performed and, additionally, thickness variation along the perimeter of the pieces as well as diameter changes were measured. Two different numerical simulation softwares were also applied namely, *AutoForm®* and *ABAQUS®*, these allow to reproduce virtually the process and thereby predict the influence of the anisotropy on the final geometry.

In short, this thesis aims to relate the mechanical characterization of the material with possible defects that may occur during the process of deep drawing and consequently try to minimize them.

Keywords: Deep drawing, laser welding, mechanical characterization, anisotropy, numerical simulation

Conteúdo

Agradecimentos	iii
Resumo	v
Resumo	vii
Abstract	vii
Conteúdo	ix
Lista de Figuras	xi
Lista de Tabelas	xv
Nomenclatura	xviii
1 Introdução	1
1.1 Contextualização	1
1.2 Motivação	3
1.3 Organização e temas abordados no presente relatório	4
2 Revisão Bibliográfica	5
2.1 Chapas de aço laminadas a quente	5
2.1.1 Comportamento mecânico do material	7
2.2 Fundamentos de Embutidura	14
2.2.1 Defeitos de embutidura	19
2.3 Fundamentos de soldadura a laser	22
2.3.1 Parâmetros na soldadura	24
2.3.2 Juntas	25
3 Análise experimental	27
3.1 Caracterização Mecânica	27
3.1.1 Ensaio de tração	27
3.1.2 Ensaio de anisotropia	31
3.2 Análise dos desvios	33
3.2.1 Variação da espessura	34
3.2.2 Variação do diâmetro	38

3.3	Conclusões	42
4	Simulação e modelação numérica	43
4.1	<i>AutoForm</i> ®	43
4.1.1	Modelação do material	43
4.1.2	Definição do processo	45
4.1.3	Resultados das simulações	46
4.2	<i>ABAQUS</i> ®	50
4.2.1	Discretização da ferramenta e do esboço	50
4.2.2	Modelação do material	52
4.2.3	Condições do processo	53
4.2.4	Resultados das simulações	54
4.3	Conclusões	57
5	Considerações finais	59
5.1	Síntese e conclusões do trabalho realizado	59
5.2	Desenvolvimentos futuros	60
	Bibliografia	63
A	Curvas de tração	71
B	Curvas reais	73
C	Curvas anisotropia	75
D	Variação do Diâmetro	77

Lista de Figuras

1.1	Principais componentes de uma garrafa de gás CoMet (adaptado de [2]).	2
1.2	Coquilha.	2
1.3	Garrafa CoMet após o enrolamento filamentar.	3
1.4	Garrafas CoMet com o revestimento exterior.	3
1.5	Problema de soldadura.	4
2.1	Processo de laminagem [12].	6
2.2	Diferentes tipos de tensão: tração, compressão, corte e torção [21].	7
2.3	Curva de tensão - deformação [19].	8
2.4	Comparação entre um diagrama convencional e um diagrama real de um ensaio de tração [28].	9
2.5	Geometria de um provete (a) antes e (b) depois de deformação [33].	11
2.6	Superfície de cedência do critério de Hill 1948 [29].	13
2.7	Esquema básico de uma ferramenta de embutidura [39].	15
2.8	Representação esquemática de um processo de embutidura profunda (adaptado de [29]).	15
2.9	Curva limite de embutidura [48].	17
2.10	Diagrama limite de embutidura (adaptado de [45]).	18
2.11	Aparecimento de orelhas nas peças [26].	19
2.12	Influência do valor de \bar{r} na formação de orelhas de embutidura [26].	20
2.13	Retorno elástico	21
2.14	Formação de rugas no bordo numa operação de embutidura sem cerra - chapas [57, 58].	21
2.15	Gama de embutidura para um copo cônico [37].	22
2.16	Esquema de um processo de soldadura a laser [61].	23
2.17	Principais parâmetros do processo de soldadura a laser [68].	24
2.18	Juntas mais comuns em soldadura [69].	25
2.19	Tolerâncias admissíveis nas juntas topo a topo [66].	25
3.1	Máquina de ensaios de tração uniaxial INSTRON Modelo 4507 presente no laboratório de ensaios mecânicos do INEGI.	28
3.2	Forma e dimensões do provete para o ensaio de tração	28
3.3	Direção dos provetes [72].	29
3.4	Curva de tensão-deformação para a direção de laminagem.	29
3.5	Aproximações da curva real para a direção de laminagem.	31
3.6	Provete para determinação do coeficiente de anisotropia.	31
3.7	Prensa utilizada para embutir as coquilhas das garrafas de 20L presente na AMTROL-ALFA.	33

3.8	Micrômetro de pontas esféricas da Mitutoyo presente no laboratório de ensaios mecânicos do INEGI.	34
3.9	Identificação dos pontos onde foi feito o levantamento da espessura.	35
3.10	Variação da espessura (em mm) em função do ângulo.	35
3.11	Distribuição da espessura (em mm) nas peças embutidas com a DL paralela à frente da prensa em função do ângulo.	36
3.12	Distribuição da espessura (em mm) nas peças embutidas com a DL perpendicular à frente da prensa em função do ângulo.	37
3.13	Distribuição da espessura nas peças embutidas com a DL orientada a 45° da frente da prensa em função do ângulo.	37
3.14	Comparação entre a distribuição média da espessura em função do ângulo, das peças embutidas com as diferentes orientações.	38
3.15	Variação do diâmetro obtida com o comparador de interiores das peças embutidas com a) DL perpendicular à frente da prensa b) DL a 45° da frente da prensa c) DL paralela à frente da prensa.	39
3.16	40
3.17	Tendência da variação do diâmetro obtida com a máquina de medir coordenadas das peças embutidas com a a) DL perpendicular à frente da prensa b) DL a 45° da frente da prensa c) DL paralela à frente da prensa.	40
3.18	União de duas peças geometricamente iguais, com a maior ovalização encontrada e com as direções de laminagem perpendiculares.	41
3.19	União da coquilha que apresenta maior ovalização e da coquilha que apresenta menor ovalização com as direções de laminagem alinhadas.	41
4.1	Caraterização da curva tensão-deformação, da superfície de cedência e da curva limite de embutidura.	44
4.2	Ferramentas da operação de embutidura.	45
4.3	Definição do esboço.	46
4.4	Malha base de elementos finitos utilizada nas simulações de embutidura.	46
4.5	Distribuição da espessura em mm, do lote 1.	47
4.6	Variação da curvatura por mm, do lote 1.	47
4.7	Distribuição da espessura em mm, do lote 2.	48
4.8	Variação da curvatura por mm, do lote 2.	49
4.9	Distribuição da espessura, em mm, para um material isotrópico.	49
4.10	Variação da curvatura por mm, para um material isotrópico.	50
4.11	Geometria das ferramentas.	51
4.12	Malha das ferramentas.	52
4.13	Malha da chapa.	52
4.14	Distribuição da espessura, em mm.	54
4.15	Distribuição da espessura em mm para as peças com o comportamento mecânico do lote 1.	55
4.16	Distribuição da espessura em mm para as peças com o comportamento mecânico do lote 2.	56
A.1	Curva tensão-deformação para o provete orientado a 45° da direção de laminagem.	71
A.2	Curva tensão-deformação para o provete da direção transversal.	72

B.1	Aproximações da curva real para o provete orientado a 45° da direção de laminagem.	73
B.2	Aproximações da curva real para a direção transversal.	74
C.1	Distribuição do coeficiente de anisotropia em função do ângulo relativamente à direção de laminagem, para o lote 1	75
C.2	Distribuição do coeficiente de anisotropia em função do ângulo relativamente à direção de laminagem, para o lote 2	76
D.1	Geometria obtida a partir dos pontos identificados nas peças embutidas com a direção de laminagem paralela à frente da prensa	78
D.2	Geometria obtida a partir dos pontos identificados nas peças embutidas com a direção de laminagem paralela à frente da prensa	79
D.3	Geometria obtida a partir dos pontos identificados nas peças embutidas com a direção de laminagem paralela à frente da prensa	80

Lista de Tabelas

2.1	Alguns das aproximações existentes da curva de tensão-deformação[30].	10
3.1	Composição química do aço P310Nb[18].	27
3.2	Coefficientes da lei de Hollomon.	30
3.3	Coefficientes da lei de Ludwick.	30
3.4	Coefficientes da lei de Voce.	30
3.5	Coefficientes de anisotropia do lote 1.	32
3.6	Coefficientes de anisotropia do lote 2.	32
3.7	Caraterísticas da prensa utilizada.	33
4.1	Propriedades mecânicas do aço P310Nb para dois lotes diferentes, utilizadas no <i>AutoForm</i> ®.	44
4.2	Número de elementos finitos das ferramentas da simulação numérica.	51
4.3	Propriedades mecânicas do aço P310Nb para dois lotes diferentes, utilizadas no <i>ABAQUS</i> ®.	53
4.4	Condições de fronteira.	54

Nomenclature

F, G, H, L, M, N	parâmetros de anisotropia do critério de Hill48
M	tensor de anisotropia do critério de Hill 48
β	relação de embutidura ou relação de diâmetros
β_{max}	relação de embutidura máxima
Δr	coeficiente de anisotropia planar
\bar{r}	coeficiente de anisotropia médio
σ	tensão real
σ_E	tensão limite de elasticidade
ε	deformação plástica
$\varepsilon_{11}, \varepsilon_{22}, \varepsilon_{33}$	deformações logarítmicas principais
D	diâmetro exterior do disco ou esboço
d	diâmetro do punção
e	extensão
F	força
F_E	força de embutidura
F_{CC}	força do cerra-chapas
h	altura total de um embutido
l	comprimento entre referências
l_0	comprimento inicial entre referências
p_{CC}	pressão do cerra-chapas
r, r_0, r_{45}, r_{90}	coeficiente(s) de anisotropia na direção de laminagem (0°), a 45° , e a 90° da direção de laminagem
S	tensão unitária
S	área da secção instantânea

s	espessura da chapa
S_0	secção inicial do provete
S_{CC}	área de contacto entre a chapa e o cerra-chapas
W_E	energia de embutidura
x	fator de correção

Capítulo 1

Introdução

O INEGI - Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial - é uma Instituição de interface entre a Universidade do Porto e a Indústria vocacionada para a realização de Atividade de Inovação e Transferência de Tecnologia orientada para o tecido industrial. Nasceu em 1986 no seio do Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial (DEMEGI) da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP). Durante os seus 20 anos de existência desenvolveu e consolidou a sua posição em projetos de I&D sendo que atualmente os projetos com empresas correspondem a mais de 50% do volume de negócios do Instituto. Sendo uma associação privada sem fins lucrativos e reconhecida como de utilidade pública, o INEGI é atualmente considerado como um agente ativo a desempenhar um papel significativo no desenvolvimento da indústria portuguesa e na transformação do seu modelo competitivo. O INEGI tem como objetivo contribuir para o aumento da competitividade da indústria nacional nas áreas de design de engenharia, materiais, tecnologia de produção, energia e meio ambiente e gestão industrial e de ser reconhecido como um Nacional Instituição de referência em tecnologia no domínio da inovação e transferência de tecnologia área e como tal tornou-se uma referência relevante no Sistema Tecnológico Científico Europeu [1].

Com mais de 50 anos de existência, a AMTROL-ALFA é uma empresa que fornece indústrias de gases técnicos e refrigerantes trazendo qualidade e inovação aos seus parceiros em todo o mundo. Liderando a inovação na indústria por muitos anos, a AMTROL-ALFA estuda continuamente a implementação de novos materiais e tecnologias com o objetivo de alcançar o melhor desempenho dos cilindros. Atualmente a AMTROL-ALFA é a maior fabricante de cilindros portáteis pressurizados na Europa e exporta para mais de 100 países sendo considerado o maior exportador a nível mundial [2, 3].

1.1 Contextualização

As botijas de gás são recipientes fechados com a função de armazenar gases ou líquidos a uma pressão substancialmente maior do que a pressão atmosférica. Como tal, na sua conceção é necessário ter em conta o preço, a processabilidade, as condições de serviço (corrosão, operação de serviço) e os requerimentos de resistência. De modo a dar resposta a estes requisitos, as botijas de gás são tipicamente fabricadas de aço ao carbono ou aço inoxidável e montadas por soldadura [4].

Com o objetivo de obter uma redução de peso relativamente às garrafas de gás tradicionais, que são feitas em aço na sua totalidade, a AMTROL desenvolveu a garrafa CoMet que consiste num núcleo de aço reforçado com uma camada compósita. Os compósitos modernos, que usam fibras contínuas numa matriz de resina, são materiais competitivos em engenharia pois, em muitas aplicações são mais leves, mais

resistentes e economicamente mais viáveis quando comparados com materiais tradicionais, nomeadamente o aço. Muitos produtos feitos com compósitos de alta resistência são obtidos a partir de enrolamento filamental. Neste processo, filamentos contínuos de fibras pré-impregnadas com resina são enrolados em volta de um mandril em várias camadas com diferentes orientações sendo controladas pelo mecanismo alimentador da fibra. As estruturas tubulares obtidas por enrolamento filamental oferecem uma significativa redução de peso relativamente às metálicas, que chega aos 40% na indústria aeroespacial. Os principais componentes desta garrafa podem ser observados na Fig. 1.1 [2, 3, 5].



Figura 1.1: Principais componentes de uma garrafa de gás CoMet (adaptado de [2]).

O **reservatório interior de aço** é o local onde está armazenado o gás e tem como função garantir a impermeabilidade da garrafa e a prevenção de fugas tendo uma forma que facilita a montagem final. Este forro beneficia também a transferência térmica necessária à vaporização do propano líquido ou butano na fase de vapor, como é normalmente consumido, e quando tal acontece, a temperatura diminui drasticamente. O fabrico destas garrafas de gás começa com a obtenção de duas coquilhas em forma de cúpula, idênticas à que se pode observar na Fig. 1.2, que são embutidas a partir de chapas de aço laminado a quente usando uma prensa hidráulica de duplo montantes. Estas duas metades são então limpas e preparadas para a operação de soldadura topo a topo. A operação de soldadura é realizada numa máquina de soldadura a laser que respeita a norma ISO 13919-1996: Welding -Electron and laser beam welding joints - Guidance on quality levels for imperfections [2, 6].



Figura 1.2: Coquilha.

O **material compósito** usado nesta garrafa é composto por uma matriz termoplástica de polipropileno reforçada com fibra de vidro, que é aplicado com enrolamento filamental em volta do forro de aço. Com este material consegue-se triplicar a resistência do interior da garrafa, o que permite reduzir a espessura do metal utilizado [2, 6].



Figura 1.3: Garrafa CoMet após o enrolamento filamentar.

O **revestimento exterior** é feito com polietileno de alta-densidade (HDPE), material que oferece boa resistência ao impacto, à abrasão, resistência ultra-violeta e é bastante comum [2, 3, 6].



Figura 1.4: Garrafas CoMet com o revestimento exterior.

1.2 Motivação

A fiabilidade das garrafas de gás está ligada à qualidade do material, bem como dos procedimentos de conformação e de soldadura. Durante o processo de fabrico, as propriedades do material do esboço têm influência significativa na qualidade do produto obtido, assim como nos parâmetros do processo de conformação. No presente caso em estudo encontram-se dificuldades ao nível do processo de soldadura topo a topo: as duas coquilhas apresentam ligeiras variações geométricas resultantes do processo de embutidura, as quais ultrapassam as tolerâncias a cumprir [7, 8].



Figura 1.5: Problema de soldadura.

Este trabalho surge da necessidade de minimizar o desvio entre duas peças de duas garrafas diferentes (20L e 30L) aquando da sua soldadura, de modo a respeitar as tolerâncias impostas pela norma ISO 13919-1996 que prevê uma diferença máxima correspondente a 10% da espessura entre os raios da coquilha inferior e coquilha superior.

1.3 Organização e temas abordados no presente relatório

A presente dissertação foi dividida em 5 capítulos de modo a cumprir os objetivos propostos. Após a introdução, no capítulo 2 apresenta-se a revisão bibliográfica. Neste capítulo foram abordados conceitos necessários à compreensão do trabalho desenvolvido incluindo o material utilizado na operação de embutidura dando particular importância às suas propriedades mecânicas, à operação de embutidura e os principais defeitos e o processo de soldadura a laser.

No capítulo 3 encontram-se os resultados da análise experimental. Neste capítulo apresentam-se as operações realizadas e a discussão dos resultados obtidos na análise de dois lotes diferentes de coquilhas para as garrafas de 20 L, ou seja, a caracterização mecânica do material, a análise dos desvios da coquilha onde se incluem a variação de geometria e a variação da espessura e a relação existente entre a caracterização mecânica e estes desvios.

O capítulo 4 aborda a simulação e modelação numérica do processo de embutidura em estudo onde foram utilizados os programas *AutoForm*[®] e *ABAQUS*[®] com o objetivo de analisar as condições do processo e analisar o impacto das mesmas. A botija de 20 L (1 etapa) serviu para validar o modelo utilizado permitindo assim modificar virtualmente as condições do processo da botija de 30 L (2 etapas) de modo a minimizar os defeitos.

Por último, o capítulo 5 contém as principais conclusões relativas a este estudo, propostas de melhoria e perspetivas de trabalhos futuros.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

O material utilizado no fabrico das garrafas de gás tem que satisfazer uma série de propriedades mecânicas e também requisitos de processabilidade. Há uma série de metais que são utilizados em operações de embutidura entre os quais se encontram ligas de alumínio, aços laminados, aços inoxidáveis, entre outros. Contudo nem todos oferecem boa soldabilidade. Para a obtenção das coquilhas em estudo são utilizadas chapas de aço laminado a quente, uma vez que estes respeitam os requisitos mecânicos e são adequadas para os processos de fabrico em questão.

2.1 Chapas de aço laminadas a quente

As chapas de aço podem ser fornecidas em duas categorias: aços de baixa resistência ou aços macios, onde o principal requisito é a formabilidade; e os aços de alta resistência com um mínimo de força que têm que aguentar. Os produtos obtidos a partir de chapas metálicas incluem uma grande variedade de formas e tamanhos, desde curvas simples a curvaturas duplas com reentrâncias rasas ou profundas. Exemplos típicos são secretárias metálicas, corpos de eletrodomésticos, painéis para a indústria aeronáutica, carrocerias de automóveis, utensílios de cozinha entre outros [9, 10].

As chapas metálicas caracterizam-se por apresentarem uma grande área de superfície em relação à espessura e são um dos produtos semi-acabados mais importantes da indústria metalomecânica. As chapas metálicas estão disponíveis sobre a forma de folhas e normalmente são obtidas por laminagem. A laminagem é um processo de conformação que consiste na diminuição da espessura com recurso a forças compressivas de dois rolos girando em sentidos opostos. Os rolos rodam, como se pode observar na Fig. 2.1, de modo a puxar e a apertar o metal entre eles. A laminagem pode ser feita a quente ou a frio [11].

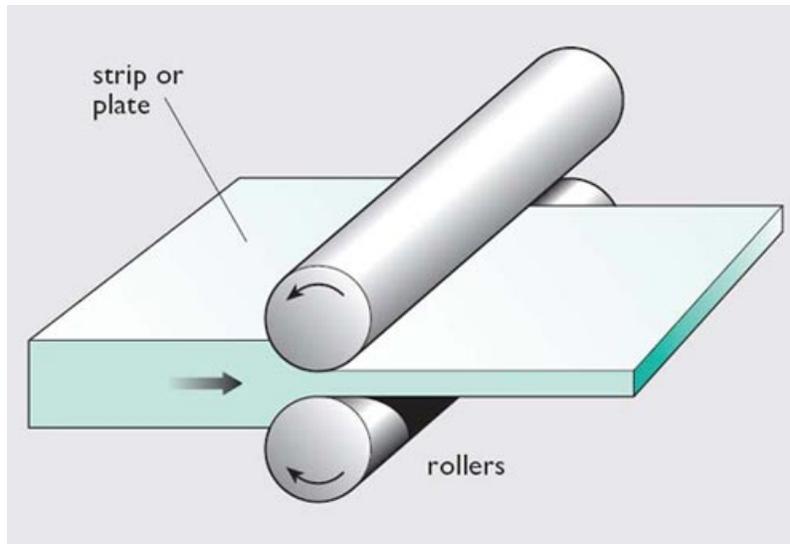


Figura 2.1: Processo de laminagem [12].

A maioria das chapas de metal são feitas a partir de lingotes fundidas com uma espessura que pode variar entre 200 e 250 mm. Depois destes lingotes arrefecerem são reaquentadas até atingirem temperaturas na ordem do 1250° para a laminagem a quente. Na primeira fase da laminagem a quente, denominada desbaste, a espessura é reduzida até atingir os 30 – 45 mm e na segunda fase, denominada acabamento, a espessura é diminuída até atingir a espessura final desejada, normalmente no intervalo 1 – 2 mm até 5 – 12 mm. O aço termina então o processo a uma temperatura determinada por exigências metalúrgicas e posteriormente é arrefecido com recurso a água de modo a atingir a temperatura ideal para poder ser enrolado [10, 13].

A laminagem a frio é utilizada na obtenção de espessuras na gama de 0.4 a 3 mm ocorrendo reduções na ordem dos 50–80%. Durante a laminagem a frio, a dureza do aço aumenta e este perde a sua ductilidade. Por conseguinte utiliza-se um processo de recozimento de modo a restaurar a ductilidade e a obter as propriedades finais. Após o recozimento, os aços laminados a frio podem ter uma pequena redução a frio, chamada temperamento de laminagem, principalmente para remover a tensão de cedência mas também para melhorar o nivelamento e desenvolver a rugosidade e textura necessária da superfície [10, 13].

As propriedades e a microestrutura dos aços laminados a quente não dependem exclusivamente da sua composição química e dos elementos de liga que a constituem. O processamento destes aços tem um papel preponderante no seu desempenho, sendo que os aços laminados a quente são processados a uma temperatura superior à temperatura de recristalização, enquanto que o laminado a frio é processado abaixo desta temperatura. As principais diferenças entre os aços laminados a quente e os aços laminados a frio prendem-se com a qualidade superficial, o controlo da espessura e forma e as propriedades mecânicas. A qualidade superficial é dos maiores problemas dos aços laminados a quente. A superfície dos aços laminados a quente apresenta as imperfeições superficiais dos cilindros que pioram devido a condições severas relacionadas com altas temperaturas e tensões. Pelo contrário, com a laminagem a frio consegue-se obter boa qualidade superficial de acabamento, sendo esta obtida dando-se especial atenção às superfícies dos cilindros de trabalho [10, 13].

Com a laminagem a quente consegue-se normalmente materiais livres de tensões residuais e com propriedades isotrópicas, no entanto não se conseguem tolerâncias muito apertadas e a superfície apresenta uma camada de óxido. Por sua vez, com a laminagem a frio consegue-se um controle dimensional do produto final bastante rigoroso e o encruamento resultante da redução a frio pode ser aproveitado para dar maior resistência ao produto final. Os aços laminados a frio com recozimento apresentam melhor formabilidade, nivelamento

e acabamento superficial do que o aço laminado a quente, no entanto tem um custo mais elevado graças ao processamento adicional. Em suma, com a laminagem a quente obtêm-se materiais que apresentam menor anisotropia, excelentes para usar em operações de soldadura e mais económicos do que os aços laminados a frio [14–17].

Os aços laminados a quente de qualidade comercial são normalmente aços ao C-Mn com garantia do atendimento à composição química, porém sem adição de elementos microligantes ou garantia do atendimento a propriedades mecânicas. São largamente utilizados em construção civil e mecânica, peças para a indústria automóvel e de móveis, tubos, utensílios agrícolas, eletrodomésticos e peças com leve conformação ou dobramento. Os aços para usar em operações de conformação, para os quais há exigências de garantia das propriedades mecânicas, devido à necessidade de alta formabilidade, possuem composições químicas muito similares aos aços baixo carbono de qualidade comercial [17].

Este tipo de aço é utilizado no fabrico de garrafas de gás pois podem ser conformados por embutidura profunda, apresentam fácil soldabilidade e possuem propriedades de não envelhecimento. A resistência dos aços laminados a quente permanece inalterada mesmo após tratamentos constantes de calor garantindo assim a segurança do recipiente de gás [18].

2.1.1 Comportamento mecânico do material

A deformação do metal é uma parte integrante da produção industrial que determina o comportamento mecânico do material. É possível distinguir deformações reversíveis, que desaparecem após a descarga, e deformações irreversíveis que prevalecem mesmo após a descarga. Geralmente, as deformações reversíveis são denominadas deformações elásticas e as irreversíveis deformações plásticas [19, 20].

Força, dureza, resistência e rigidez são propriedades mecânicas usadas para caraterizar o metal quando este se encontra sob uma carga. Estas propriedades são descritas em termos de tipos de força que o metal tem de suportar. Os tipos mais comuns de carga são tração, compressão, corte, torção, apresentados na Fig. 2.2, ou uma combinação destas em fadiga, por exemplo [19].

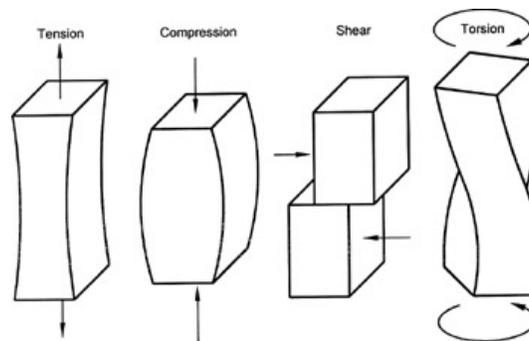


Figura 2.2: Diferentes tipos de tensão: tração, compressão, corte e torção [21].

Curva tensão - deformação

As propriedades mecânicas dos materiais são obtidas após a realização de ensaios. O ensaio de tração é um dos ensaios mecânicos mais comum. Estes ensaios são realizados com o objetivo de determinar as propriedades dos materiais e estabelecer os limites de carga operacionais de metais e ligas. Tem diversas finalidades entre as quais se incluem a seleção de materiais para aplicações em engenharia, para garantir a qualidade nas especificações do material, para comparar a influência de diferentes materiais e processos

durante o desenvolvimento e frequentemente utilizam-se os resultados para prever o comportamento do material sob formas de carregamento diferente de tensão uniaxial. Este ensaio consiste em submeter um provete a um esforço de tração, geralmente até à rotura, com o objetivo de determinar uma ou várias características mecânicas [20, 22–25].

O ensaio de tração mede a capacidade de um material suportar uma tensão (força por unidade de área). Os resultados deste ensaio podem ser descritos em termos de comportamento plástico e comportamento elástico. O diagrama de tração representa a evolução da tensão unitária $S = \frac{F}{S_0}$ em função da extensão (taxa de alongamento) $e = \frac{l-l_0}{l_0}$. Inicialmente a deformação é elástica e a força de tração é proporcional ao alongamento, obedecendo à lei de Hooke. Neste ponto, a deformação é elástica e recuperável, ou seja, desaparece quando a força de tração é removida. Com o aumento da força aplicada, o provete vai sofrer deformação permanente ou não recuperável - deformação plástica [20, 23, 26].

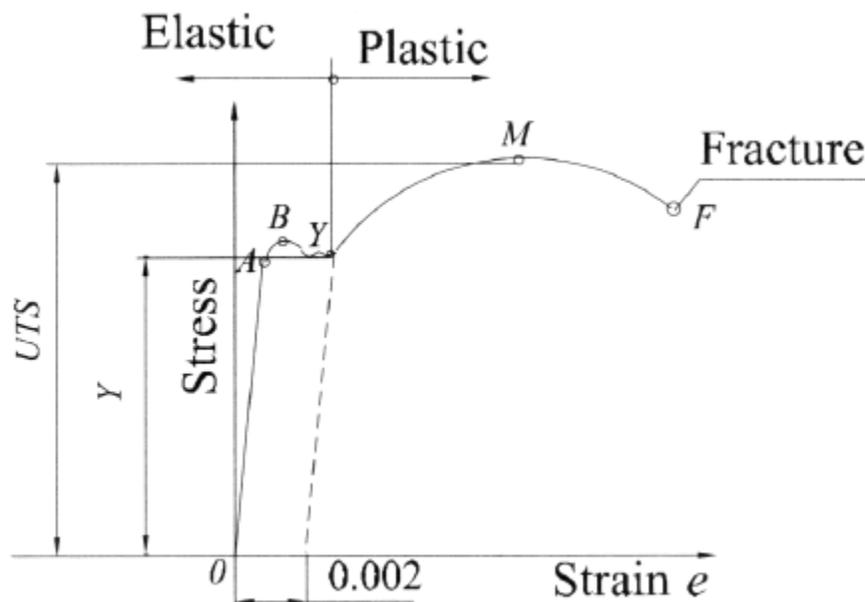


Figura 2.3: Curva de tensão - deformação [19].

A curva de tensão-deformação, que se pode observar na Fig. 2.3, é obtida pelo ensaio de tração e podem se identificar vários pontos que ajudam a compreender e prever o comportamento dos materiais entre os quais:

Ponto A que é conhecido como o limite de proporcionalidade. Até este ponto, a tensão e a extensão variam proporcionalmente segundo a lei de Hooke, ou seja, se a força for removida, o provete retorna ao seu comprimento e forma inicial [19, 20, 25, 27].

Ponto B é conhecido como limite elástico, após este ponto qualquer tensão continuada resulta em deformação permanente ou elástica [19, 20, 25, 27].

Ponto Y é também conhecido como o ponto de limite de elasticidade do material pois, a resistência à tensão do material diminui após o pico da curva. Na realidade, algumas curvas de tração apresentam patamar de cedência e não apresentam nitidamente o limite aparente de elasticidade. Assim, este ponto é geralmente definido como o ponto na curva de tensão-extensão, fixado a 0.2% de alongamento [19, 20, 25, 27].

Ponto M é o ponto de tensão máxima e onde se dá o início da estricção. Se o provete continuar a ser alongado após o ponto Y observa-se um domínio da curva onde o aumento do alongamento é mais rápido do que a tensão. Eventualmente atinge-se o ponto M a partir do qual a área da secção transversal da amostra não é uniforme ao longo do corpo útil do provete. É neste domínio onde se realizam as operações de conformação plástica de metais [19, 25, 27].

Ponto F é o ponto de rotura do provete. À medida que o teste progride após se ter atingido o ponto M o provete sofre uma deformação plástica localizada provocando o alongamento até à fratura [19, 20, 23, 25, 27].

Curva real

Na solução de problemas técnicos nos processos de conformação de chapas metálicas a tensão e deformação convencional não tem uma importância crucial como tem a tensão e deformação real. A tensão real tem em conta a variação da secção durante o ensaio e é igual à força dividida pela secção instantânea [19, 25, 27]

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad (2.1)$$

A deformação real é calculada com base no integral do comprimento do provete

$$\varepsilon = \ln \frac{l}{l_0} = \int_{l_0}^l \frac{dl}{l} \quad (2.2)$$

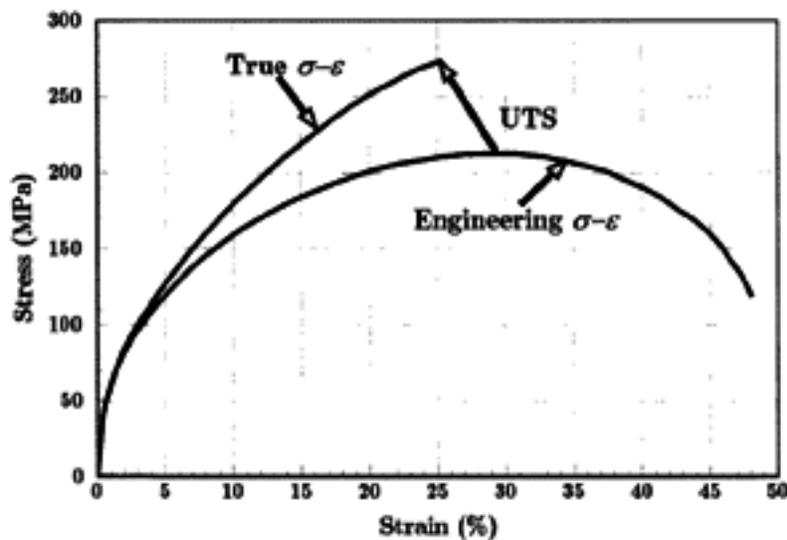


Figura 2.4: Comparação entre um diagrama convencional e um diagrama real de um ensaio de tração [28].

Observando a Fig. 2.4 constata-se que não há diferença entre o diagrama real e o diagrama convencional para a parte elástica porque as deformações são muito pequenas. Os valores da tensão são maiores no domínio plástico porque a área seccional instantânea do provete, que foi continuamente reduzida durante a alongação, é agora usada no cálculo [15, 23].

A deformação real pode-se relacionar com a deformação convencional por:

$$\varepsilon = \ln(1 + e) \quad (2.3)$$

Do mesmo modo, a tensão real relaciona-se com a tensão convencional pela seguinte expressão:

$$\sigma = S(1 + e) \quad (2.4)$$

A forma desta curva dá uma boa ideia relativamente à formabilidade do material: quanto menor for a tensão limite de cedência e mais acentuada for a curva, melhor a formabilidade do material [29].

Leis de comportamento

A curva de tensão - deformação de materiais metálicos é frequentemente descrita por uma expressão matemática simples. Esta abordagem permite a obtenção de um conjunto de parâmetros que permite a caracterização do material após a tensão de cedência. [15, 30, 31].

O encruamento ou endurecimento por deformação é um fator importante em certos processos de fabrico em particular na conformação de metais. Quanto maior for o coeficiente de encruamento da chapa, melhor será o seu desempenho em processos onde há considerável alongamento pois o esforço será distribuído mais uniformemente e a chapa não irá rasgar [32].

Na Tab. 2.1 encontram-se algumas das leis de comportamento mais frequentemente utilizadas.

Tabela 2.1: Alguns das aproximações existentes da curva de tensão-deformação[30].

Autor (ano)	Modelo matemático
Hollomon (1945)	$\sigma = K\varepsilon^n$
Ludwik (1909)	$\sigma = \sigma_0 + K\varepsilon^n$
Voce (1948)	$\sigma = \sigma_\infty - (\sigma_\infty - \sigma_0)\exp(-K\varepsilon)$
Swift (1952)	$\sigma = K(\varepsilon + \varepsilon_0)^n$
Ludwigson (1971)	$\sigma = K_1\varepsilon^{n_1} + \exp(K_2 + n_2\varepsilon)$
Ramberg - Osgood (1943)	$e = \frac{s}{E} + p\left(\frac{S}{Sp}\right)^n$

Coefficiente de anisotropia, r

A estrutura cristalográfica e as características de laminagem das chapas de metal conduzem a uma significativa anisotropia das propriedades mecânicas. A variação do comportamento mecânico com a direção é avaliada por uma grandeza denominada por parâmetro de Lankford ou coeficiente de anisotropia. Este coeficiente é determinado recorrendo a um ensaio de tração e o coeficiente de anisotropia, r , é definido por:

$$r = \frac{\varepsilon_{22}}{\varepsilon_{33}} \quad (2.5)$$

Onde ε_{22} , ε_{33} , são as deformações nas direções da largura e espessura respetivamente. Se este coeficiente for maior do que um, as deformações na direção da largura serão as dominantes. Se pelo contrário, o material tiver um coeficiente menor que um as deformações dominantes são na direção da espessura. No caso de o coeficiente de anisotropia ser igual a um, $\varepsilon_{22} = \varepsilon_{33}$ e o material diz-se isotrópico [33].

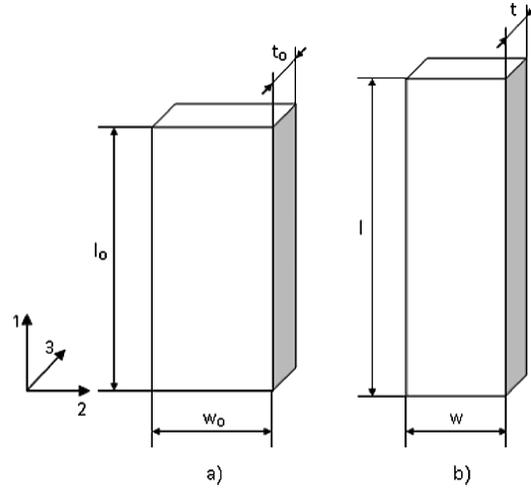


Figura 2.5: Geometria de um provete (a) antes e (b) depois de deformação [33].

Considere-se um provete de tração como o da Fig. 2.5. A direção principal 1 representa a direção de tração, a direção 2 é a direção perpendicular à direção de tração no plano da chapa e a direção perpendicular ao plano da chapa é a direção 3. O coeficiente de anisotropia pode ser escrito como:

$$r = \frac{\ln \frac{w}{w_0}}{\ln \frac{t}{t_0}} \quad (2.6)$$

onde w_0 e w corresponde à largura inicial e final, e t_0 e t corresponde à espessura inicial e final, respectivamente [33].

Uma vez que a medida da espessura é de difícil obtenção e tendo em consideração a equação de incompressibilidade da teoria da plasticidade:

$$\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33} = 0 \quad (2.7)$$

obtém-se a seguinte forma da Eq. 2.5:

$$r = -\frac{\varepsilon_{22}}{\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22}} \quad (2.8)$$

e deste modo a Eq. 2.6 pode reescrever-se

$$r = \frac{-\ln \frac{w}{w_0}}{\ln \frac{l}{l_0} + \ln \frac{w}{w_0}} \quad (2.9)$$

onde l_0 e l corresponde ao comprimento inicial e final do provete. Esta relação é usada para determinar o coeficiente de anisotropia na prática [33].

O valor do r varia com a direção principal do estado plano de tensão. Assim, para determinar um valor médio do coeficiente de anisotropia r , é necessário ter em atenção a anisotropia plana da chapa [34]. Depois de determinados os valores de r para provetes cortados ao longo das três direções no plano da chapa de metal (0° , 45° , 90°), o coeficiente médio de anisotropia \bar{r} vem:

$$\bar{r} = \frac{r_0 + 2 \cdot r_{45} + r_{90}}{4} \quad (2.10)$$

O coeficiente de anisotropia normal \bar{r} permite avaliar a capacidade de uma chapa metálica resistir à estrição quando submetida a esforços de tração no plano da mesma. Em embutidura, um elevado valor de \bar{r} , permite a obtenção de peças com maior altura de embutido. Em peças rasas, um valor elevado de \bar{r} evita o aparecimento de rugas ou ondulações. Outros fatores tais como inclusões ou propriedades de fratura podem variar de acordo com a orientação e não com o \bar{r} , nestas propriedades o \bar{r} não tem grande influência uma vez que este valor é determinado a partir das propriedades plásticas [32, 35, 36].

O coeficiente de anisotropia planar Δr indica o comportamento mecânico que o material pode apresentar no plano da chapa e calcula-se a partir da seguinte equação:

$$\Delta r = \frac{r_0 - 2 \cdot r_{45} + r_{90}}{4} \quad (2.11)$$

Quando $\Delta r = 0$, o material apresenta características isotrópicas no plano da chapa. Se a magnitude do coeficiente da anisotropia planar for elevada, quer seja positiva ou negativa, a orientação da chapa quando colocada na matriz é um parâmetro importante e pode-se observar formação de orelhas e assimetria em peças circulares. Por esta razão são desejados valores de anisotropia planar próximos de zero [32, 35, 36].

Idealmente uma chapa com um elevado valor de \bar{r} e com Δr igual a zero é boa para embutir numa única passagem uma peça com grande altura no entanto é praticamente impossível obter uma chapa com tais características [35].

Superfície de cedência

As curvas tensão - deformação mostram as propriedades relevantes dos materiais mas tem pouca semelhança com estados multiaxiais de tensão e deformação. Para essa finalidade existem as superfícies de cedência, onde a taxa de deformação é perpendicular à superfície de cedência. A superfície de cedência é uma curva convexa que caracteriza a transição do comportamento elástico do material para o comportamento plástico permitindo observar o conjunto de tensões possíveis ou admissíveis dentro de um sólido deformável [37].

Em 1948, Hill propôs uma generalização do critério quadrático isotrópico de von Mises para os materiais anisotrópicos ortotrópicos. Quando os eixos do sistema de coordenadas coincide com os eixos de ortotropia, o critério de cedência é dado pela seguinte equação:

$$F(\sigma_y - \sigma_z)^2 + G(\sigma_z - \sigma_x)^2 + H(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 2(L\sigma_{yz}^2 + M\sigma_{zx}^2 + N\sigma_{xy}^2) = Y^2 \quad (2.12)$$

onde F , G , H , L , M e N são os parâmetros anisotrópicos do critério de Hill 1948 [38–40].

Este critério pode também ser escrito em notação indicial do seguinte modo:

$$M_{ijkl} \sigma_{ij} \sigma_{kl} = Y^2 \quad (2.13)$$

sendo que M é um tensor de 4ª ordem que possui os parâmetros de anisotropia de Hill com as restrições seguintes:

$$\begin{cases} M_{ijkl} = M_{jikl} = M_{klij} \\ M_{ijkl} = 0 \end{cases} \quad (2.14)$$

A última restrição garante a condição de independência da deformação plástica em relação à tensão hidrostática [38–40].

Por se tratar de um tensor simétrico, o tensor de 2ª ordem σ pode-se representar por um pseudo-vetor de 6 componentes:

$$\sigma = [\sigma_1 \ \sigma_2 \ \sigma_3 \ \sigma_4 \ \sigma_5 \ \sigma_6] = [\sigma_{xx} \ \sigma_{yy} \ \sigma_{zz} \ \sigma_{yz} \ \sigma_{xz} \ \sigma_{xy}] \quad (2.15)$$

Do mesmo modo, o tensor de 4ª ordem M dos parâmetros do critério de Hill 1948 pode ser representado por um tensor de 2ª ordem de dimensão 6×6 . Adotando uma representação pseudo-vetorial, este critério pode ser reescrito do seguinte modo:

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} : \begin{bmatrix} G+H & -H & -G & 0 & 0 & 0 \\ -H & F+H & -F & 0 & 0 & 0 \\ -G & -F & F+G & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2L & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2M & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2N \end{bmatrix} : \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} = \sigma_Y^2 \quad (2.16)$$

Os seis parâmetros anisotrópicos do critério de Hill 1948 podem ser determinados a partir de ensaios de tração uniaxial em três direções distintas: a 0° , 45° e 90° da direção de laminagem:

$$\begin{aligned} F &= \frac{H}{r_{90}} \\ G &= \frac{1}{r_{0+1}} \\ H &= r_0 \cdot G \\ L &= M = 1.5 \\ N &= \frac{1}{2} \cdot \frac{(r_0+r_{90}) \cdot (2r_{45}+1)}{r_{90} \cdot (r_0+1)} \end{aligned} \quad (2.17)$$

onde r_0 , r_{45} , r_{90} os coeficientes de anisotropia respetivos [38–40].

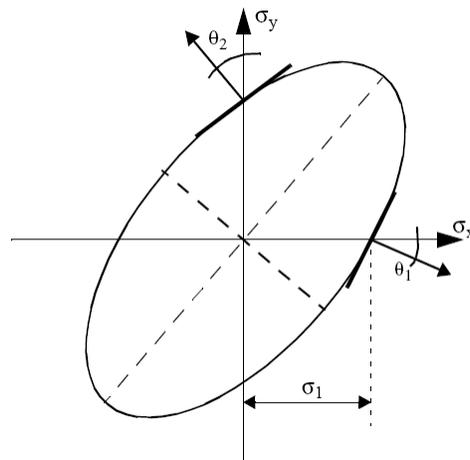


Figura 2.6: Superfície de cedência do critério de Hill 1948 [29].

A figura 2.6 representa a superfície de cedência do critério de Hill48, onde os ângulos θ_1 e θ_2 podem ser determinados a partir do r_0 e r_{90} através das seguintes equações [29]:

$$\tan(\theta_1) = \frac{r_0}{1 + r_0} \quad (2.18)$$

$$\tan(\theta_2) = \frac{r_{90}}{1 + r_{90}} \quad (2.19)$$

O critério de Hill 1948 é o critério que, do ponto de vista da simulação 3D do processo de conformação plástica de chapas, melhor se adequa à modelação dos materiais, uma vez que descreve adequadamente a anisotropia inicial das chapas, aplicando-se a um estado de tensão genérico e conduz a relações lineares entre as tensões e as deformações necessitando de um baixo número de parâmetros para estabelecer a função de cedência. Por esse motivo tem sido bastante utilizado na simulação de processos de conformação plástica de chapas pelo método dos elementos finitos. Uma vez que descreve adequadamente a anisotropia inicial das chapas, aplicando-se a um estado de tensão genérico e conduz a relações lineares entre as tensões e as deformações necessitando de um baixo número de parâmetros para estabelecer a função de cedência [39].

2.2 Fundamentos de Embutidura

Um dos grupos de processos de fabrico mais importantes na produção é a conformação plástica. A conformação plástica engloba um vasto leque de processos de fabrico entre os quais se inclui forjamento, laminagem, extrusão e todos os processos de conformação de chapas metálicas, e consiste em deformar plasticamente o metal para obter a geometria pretendida [15, 19, 41].

A embutidura é uma das principais técnicas de conformação dos metais por deformação plástica graças às elevadas cadências de produção, às características mecânicas finais das peças obtidas e à precisão dimensional conseguida. Este processo encontra-se largamente difundido na indústria automóvel (principal utilizadora deste processo), aeroespacial, naval, de utensílios alimentares, entre outras. Consiste na transformação de uma chapa plana num objeto tridimensional, através da imposição da deformação plástica. Utiliza-se na obtenção de peças ocas por deformação plástica, caracterizadas por possuírem “superfícies não geradas ou não planificáveis”, a partir de chapas metálicas finas cortadas previamente. A deformação plástica imposta à chapa é conseguida através de uma ferramenta específica, montada numa prensa hidráulica ou mecânica [34, 42, 43].

As ferramentas básicas de um processo de embutidura podem ser classificadas em dois tipos: ferramentas de simples efeito e ferramentas de duplo efeito. São constituídas normalmente pelo punção, que provoca a entrada de material do esboço (disco em chapa) na matriz; a matriz, que apoia o esboço (disco) a embutir; e pelo cerra chapas que comprime e planifica os bordos do esboço impedindo assim a formação de rugas, como se pode observar na Fig. 2.7. A principal diferença entre a ferramenta de simples efeito e duplo efeito reside na existência de cerra - chapas as ferramentas de duplo efeito são a configuração mais usual.

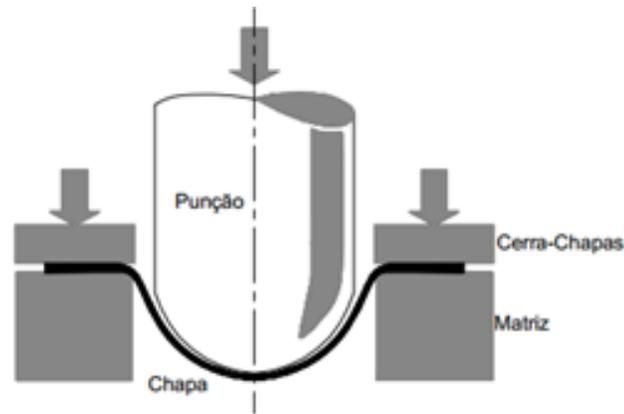


Figura 2.7: Esquema básico de uma ferramenta de embutidura [39].

As operações de embutidura são normalmente constituídas por 4 fases de execução (Fig. 2.8) . Inicia-se com a colocação de uma chapa metálica previamente cortada, designada por esboço, na matriz. De seguida efetua-se a descida do cerra - chapas e conseqüente bloqueio da chapa. É na fase seguinte que ocorre a descida do punção e conseqüente penetração na matriz deformando a chapa inicialmente plana até se atingir a forma pretendida. Por último dá-se a subida do punção e do cerra - chapas e extração da peça final. O cerra - chapas é importante neste processo pois transfere uma força externa à chapa, impedindo a formação de enrugamentos e permitindo o controlo do processo [29, 34].

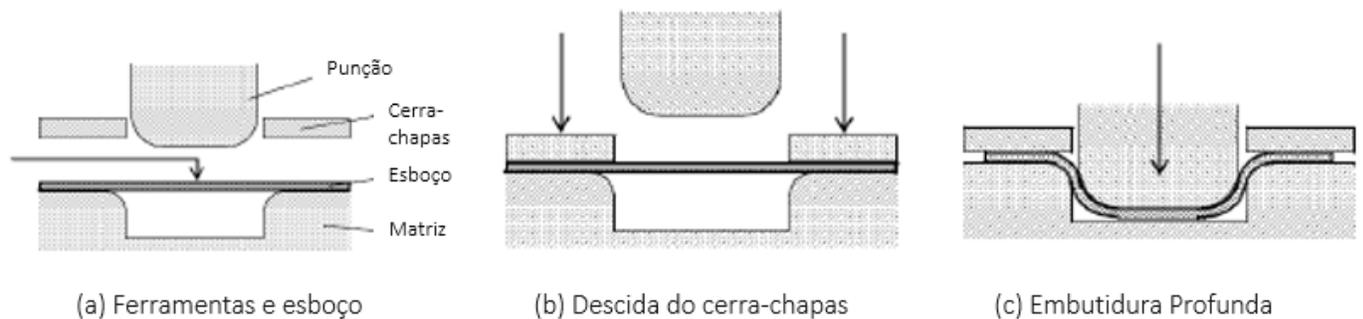


Figura 2.8: Representação esquemática de um processo de embutidura profunda (adaptado de [29]).

Existem dois tipos fundamentais de modos de deformação em embutidura: a embutidura por extensão e a embutidura por expansão. Na embutidura por extensão a chapa sofre um alongamento positivo (tração e aumento de comprimento) numa direção do plano da chapa e um alongamento negativo (compressão e diminuição de comprimento) na direção perpendicular à anterior. Por outro lado, na embutidura por expansão a deformação é positiva (tração e aumento de comprimento) em todas as direções do plano da chapa. Estes dois modos principais de deformação dependem diretamente da ação do cerra - chapas. Assim, se não existir cerra - chapas ou a pressão do cerra - chapas for insuficiente o modo de deformação é fundamentalmente por extensão. Se pelo contrário a pressão do cerra - chapas for suficiente de modo a impedir o deslizamento

da chapa entre a matriz e o cerra - chapas, o modo de deformação é fundamentalmente por expansão. Na embutidura de peças cónicas, parabólicas e semi-esféricas que não se conseguem realizar numa só etapa (peças embutidas profundas) a embutidura apresenta duas fases distintas [34] :

- A primeira fase, que consiste na produção de um esboço ou pré-forma embutida através de uma sequência de embutidos cilíndricos escalonados, ou em cascata;
- A segunda fase onde se dá a consolidação do embutido cónico, isto é, transforma-se o esboço ou pré-forma embutida na forma do embutido final.

Relação de embutidura

A deformação a que a chapa de metal pode ser sujeita numa operação de embutidura pode ser estimada pela relação de embutidura, β . A relação de embutidura β é um valor numérico importante na determinação do número de etapas necessárias quando se fala da embutidura de peças cilíndricas. Este valor é obtido da relação entre o diâmetro do esboço, D , e o diâmetro do punção, d , através de equação matemática seguinte [15, 35, 44]:

$$\beta = \frac{D}{d} \quad (2.20)$$

Para um determinado valor fixo do diâmetro do punção, d , o valor de β_{max} , para uma dada espessura de chapa corresponde ao maior disco que se consegue embutir sem roturas ou formação de pregas. Este parâmetro é sempre superior a 1 tendo como valor máximo teórico $\beta_{max} = 2$ e depende de diversas variáveis tais como a aptidão do material à deformação plástica, a lubrificação, o coeficiente de atrito entre a chapa/punção/matriz/cerra - chapas [15, 34, 44].

Força de embutidura

Para a embutidura de peças redondas com uma única passagem, a força máxima de embutidura F_E pode ser calculada pela seguinte equação:

$$F_E = \pi \cdot (d + s) \cdot s \cdot \sigma_E \cdot 1.2 \cdot \frac{\beta - 1}{\beta_{max} - 1} \quad (2.21)$$

Onde d é o diâmetro do punção, s é a espessura da chapa de metal, σ_E é a tensão limite de elasticidade, β é a relação de embutidura e β_{max} é a relação de embutidura máxima [44].

A força calculada é igual à força de deslize do esboço em prensas de duplo efeito. Nas prensas de simples efeito a força de deslize do esboço aumenta a quantidade de força aplicada ao cerra - chapas, uma vez que a força de suporte do cerra - chapas se opõe ao movimento da embutidura do esboço [44].

Força do cerra - chapas

A ação do cerra - chapas consiste em exercer uma pressão que evita a formação de pregas. O aumento da força do cerra - chapas, aumenta o efeito de fixação do material entre a matriz e o cerra - chapas, assim como as tensões superficiais [34, 44]. A força necessária do cerra - chapas F_{CC} pode ser calculada por:

$$F_{CC} = S_{CC} \cdot p_{CC} \quad (2.22)$$

onde S_{CC} é a área de contacto entre a chapa e o cerra - chapas e p_{CC} é a pressão do cerra - chapas. O valor da pressão do cerra - chapas depende do material, do diâmetro do punção bem como da espessura da

chapa de metal. O valor calculado pela Eq. 2.22 para a força do cerra - chapas deve ser considerado como um mínimo para evitar a formação de pregas, assim, é por vezes necessário utilizar forças superiores [34, 44].

Energia de embutidura

A energia de embutidura necessária, W_E , pode ser calculada pela expressão:

$$W_E = x \cdot F_E \cdot h \quad (2.23)$$

onde F_E representa a força de embutidura, h a altura do embutido (curso do punção) e x é uma constante de correção. A constante de correção x depende do material e da relação de embutidura β e varia entre 0.5 e 0.8. Os valores mais elevados de x aplicam-se a materiais mais dúcteis, aos que podem ser embutidos com uma relação de embutidura elevada e às peças que não são completamente embutidas (com abas) enquanto que os valores de x mais baixos se referem a relações de embutidura menores e materiais com elevadas tensões de rutura [34, 44].

Quando a embutidura é executada numa prensa de simples efeito, é necessário acrescentar a energia necessária ao deslocamento do cerra - chapas: [44]

$$W_E = (x \cdot F_E + F_{CC}) \cdot h \quad (2.24)$$

Curva limite de embutidura

A curva limite de embutidura foi inicialmente desenvolvida por Keeler e Goodwin com o objetivo de definir uma forma eficiente de avaliar a formabilidade dos aços. É utilizada para caracterizar a formabilidade das chapas finas, ou seja, a sua aptidão para a deformação plástica definindo-se no plano das deformações principais ε_1 e ε_2 uma curva separando o domínio das deformações admissíveis do domínio das deformações de rutura. Esta curva apresenta tipicamente uma forma em V, como se pode ver na Fig. 2.9 [34, 45–47].

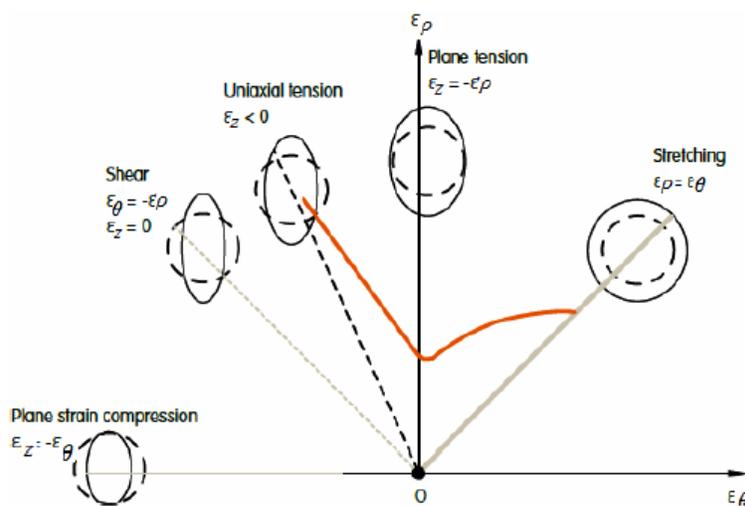


Figura 2.9: Curva limite de embutidura [48].

A curva limite de embutidura mostra a quantidade de deformação a que a chapa de metal consegue aguentar em função do modo de deformação e representa uma relação entre a deformação maior, ε_1 , e a menor, ε_2 . Este diagrama mostra os diferentes tipos de deformação que podem ocorrer durante a embutidura. Os modos de deformação estão visualmente representados pelos gráficos de deformação do círculo [48].

De modo a evitar a rotura, é necessário que os valores de deformação estejam abaixo da Curva Limite de Embutidura à Rotura, que representa os valores de ε_1 e ε_2 a partir dos quais a rotura acontece. Observar o início da fratura é bastante fácil, no entanto, determinar as deformações principais no início da rotura revela-se complicado. Normalmente é introduzida uma margem de segurança, a Curva Limite de Embutidura à Estricção que representa o local onde se inicia a estricção. Embora a medida exata das deformações principais no limite de estricção seja tão difícil de obter como as do início da rotura, estes valores são mais aceitáveis na obtenção de peças industriais reais uma vez que nesta fase ainda não há estricção local indesejável. No entanto não é suficiente considerar apenas a rotura quando se pensa num processo de embutidura, pois há uma série de outros defeitos que podem ocorrer. Utiliza-se então um diagrama limite de embutidura, como se vê na Fig. 2.10, onde se evidenciam as diferentes zonas de trabalho [34, 37, 45, 49].

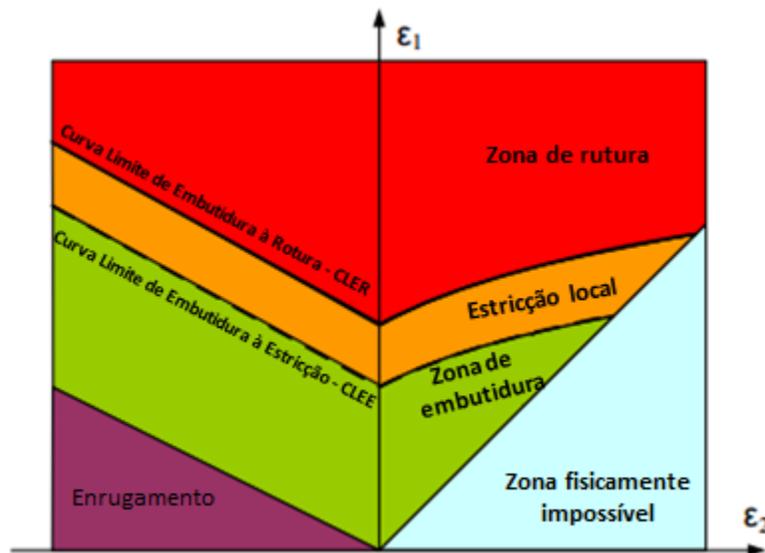


Figura 2.10: Diagrama limite de embutidura (adaptado de [45]).

A determinação da Curva Limite de Embutidura é um processo complicado onde se tem que considerar uma série de parâmetros influenciadores, entre os quais se encontram a espessura da chapa, a dimensão do motivo da grelha de referencia, as características mecânicas da chapa, a velocidade de deformação e as trajetórias de deformação [34, 37, 45, 47].

2.2.1 Defeitos de embutidura

A embutidura é um processo complexo ao qual podem estar associados defeitos. Os defeitos de embutidura podem ser classificados em três categorias: defeitos de forma ou dimensionamento, defeitos na peça ou na sua superfície e propriedades não satisfatórias. As principais causas para a ocorrência de defeitos na embutidura são um material de base defeituoso, um deficiente projeto da peça (desenho, escolha de material, etc.) ou procedimento incorreto (máquina, ferramentas, processo, etc.). Os defeitos mais comuns deste processo são o aparecimento de rugas e pregas (tanto na parede lateral como no bordo), conhecido como wrinkling, roturas, a formação de orelhas, conhecido como earring, aparecimento de riscos na superfície e o retorno elástico [34, 50].

Earing

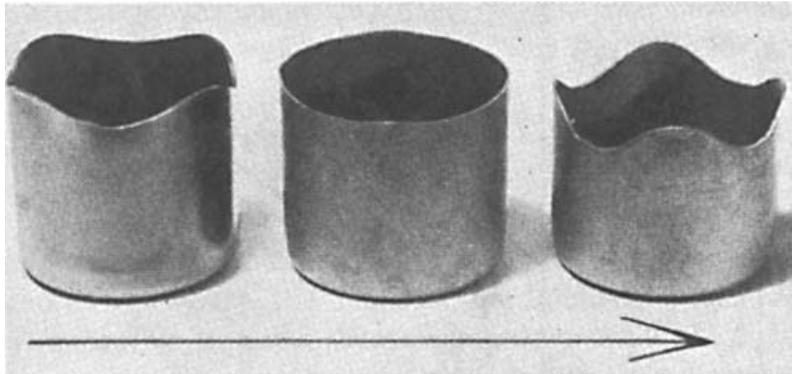


Figura 2.11: Aparecimento de orelhas nas peças [26].

Com este tipo de defeito, o topo das peças embutidas não fica totalmente plano. Em vez disso, aparecem elevações ou orelhas com vales entres elas. Geralmente aparecem quatro orelhas, mas também podem ser encontradas peças com duas, seis ou oito. O aparecimento de orelhas de embutidura é indesejável uma vez que aumenta a quantidade de metal que deve ser aparado resultando num elevado custo de produção. Este defeito deve-se à anisotropia planar do material e está relacionado com o parâmetro r : em posições angulares que apresentam um baixo valor de r , as paredes são mais espessas e baixas; em posições angulares com um r elevado as paredes são mais altas e finas. Assim, uma análise da formação de orelhas na embutidura é importante para avaliar as propriedades anisotrópicas do material e controlar o desenvolvimento de orelhas. Se o valor de Δr for positivo, as orelhas forma-se a 0 e a 90 da direção de laminagem e no caso de Δr ser negativo as orelhas aparecem a 45 [26, 51].

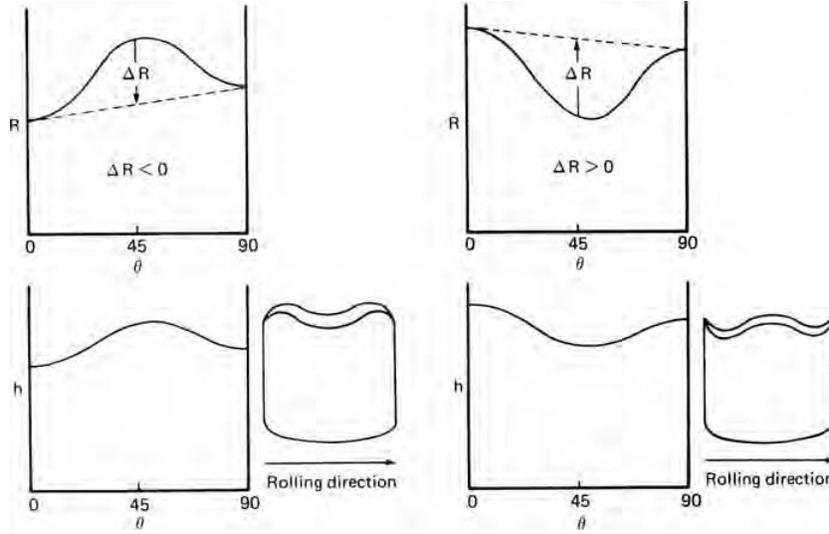


Figura 2.12: Influência do valor de \bar{r} na formação de orelhas de embutidura [26].

A dependência do ângulo na formação de orelhas pode ser estimada assumindo que o estado de tensão na borda externa da peça é de compressão uniaxial e que a resistência à compressão é a mesma ao longo de toda a parte superior do copo final. Assim, a deformação ao longo da espessura é $\varepsilon_{z\theta} = \frac{-\varepsilon_y}{r_{\theta+90}+1}$ onde $r_{\theta+90}$ é o valor de r medido num teste de tração normal a θ . A variação da espessura ao longo do topo do copo é descrita por:

$$t_\theta = t_0 \exp \varepsilon_{z\theta} = t_0 \exp\left(\frac{-\varepsilon_y}{r_{\theta+90}+1}\right) = t_0 \left(\frac{d_1}{d_0}\right)^{\frac{1}{r_{\theta+90}+1}} \quad (2.25)$$

Assume-se ainda que, apesar de o valor da espessura da parede variar linearmente com a altura, o valor de:

$$\frac{h_\theta(t_0 + t_\theta)}{2} = \frac{h_\theta t_0 \left[1 + \left(\frac{d_1}{d_0}\right)^{\frac{1}{r_{\theta+90}+1}}\right]}{2} \quad (2.26)$$

não varia ao longo do topo da parede. Portanto:

$$h_{45} \left[1 + \left(\frac{d_1}{d_0}\right)^{\frac{1}{r_{45}+1}}\right]^{-1} = h_0 \left[1 + \left(\frac{d_1}{d_0}\right)^{\frac{1}{r_{90}+1}}\right]^{-1} = h_{90} \left[1 + \left(\frac{d_1}{d_0}\right)^{\frac{1}{r_{90}+1}}\right]^{-1} \quad (2.27)$$

Para uma dada relação de embutidura β , pode-se estimar a altura relativa da orelha $\frac{2h_{45}}{h_0+h_{90}}$ partir da eq. 2.27 [26, 32].

Retorno elástico

Quando os componentes de metal são removidos das ferramentas de conformação, as tensões residuais internas irão relaxar e será atingido um novo equilíbrio estático. Deste modo, a forma final da peça embutida irá derivar da forma imposta pela ferramenta. Este fenómeno é conhecido como retorno elástico e é uma questão de qualidade importante pois a forma final é obtida pelo desvio do retorno elástico. Se o desvio da forma devido ao retorno elástico exceder a tolerância dada pode criar graves problemas em operações de

montagem seguintes [37, 52].

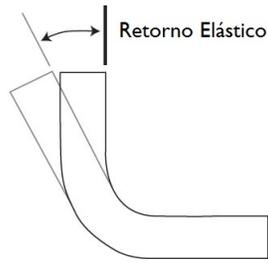


Figura 2.13: Retorno elástico .

O retorno elástico deve-se a uma distribuição desigual das tensões ao longo da secção transversal da peça durante a deformação plástica que ocorre na operação de conformação. Está dependente de variados fatores entre os quais se encontram as propriedades mecânicas do material, a geometria das ferramentas, os níveis e distribuição das tensões e deformações e dos parâmetros do processo (como por exemplo um raio apropriado da matriz permita um fluxo suave do material ou lubrificação apropriada) [53–55].

Tradicionalmente o problema do retorno elástico é resolvido através de métodos de tentativa erro, modificando as ferramentas e a matriz consumindo tempo e dinheiro. No entanto, recentemente surgiram as simulações de elementos finitos que são usadas para prever o retorno elástico após deformação [41, 56].

Wrinkling

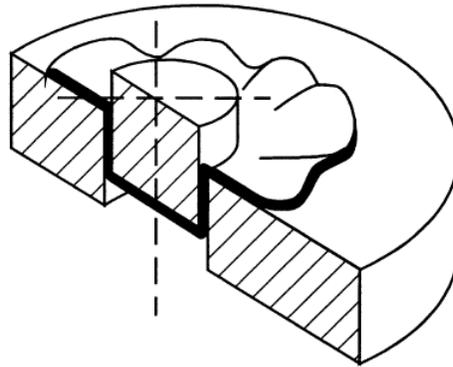


Figura 2.14: Formação de rugas no bordo numa operação de embutidura sem cerra - chapas [57, 58].

O enrugamento em embutidura tem sido considerado um dos principais obstáculos na obtenção de peças sem defeitos. Cerca de 80% dos defeitos que ocorrem em operações de prensagem na indústria automóvel são devidos ao enrugamento das flanges ou da parede embutida. Este fenómeno ocorre quando as forças compressivas ultrapassam um certo valor durante a operação de embutidura. Para chapas com uma espessura pequena este fenómeno irá ocorrer para baixos valores de tensão [57, 59].

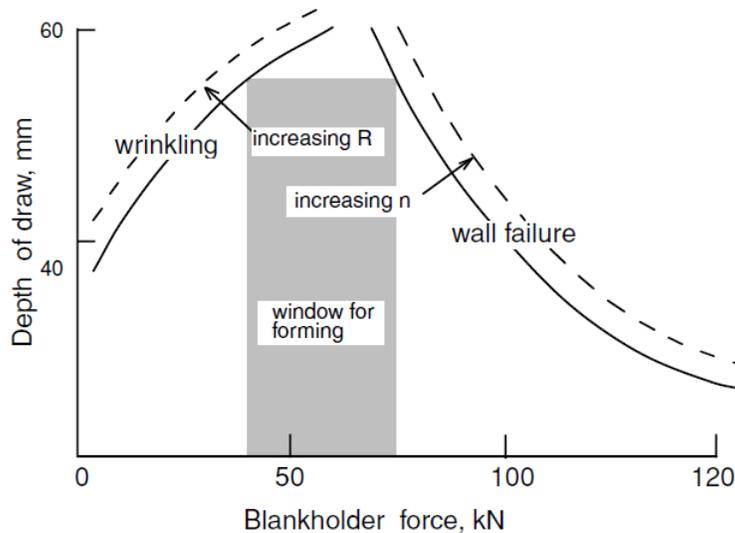


Figura 2.15: Gama de embutidura para um copo cônico [37].

Com a descida do punção a estrição da parede em tensão irá reduzir, no entanto se a parede não for esticada suficientemente irá enrugar. Se se aumentar a pressão do cerra - chapas, a estrição também aumenta. Contudo, uma pressão excessiva do cerra - chapas pode levar a uma rutura da parede, como tal essa pressão deverá ser controlada. Há uma gama de valores possíveis para a força do cerra - chapas: uma força demasiado baixa causa enrugamento, uma força elevada provoca rutura como se observa na Fig. 2.15. Uma vez que ocorre mais contração circunferencial quando o material com valores de r altos é estirado, há uma maior contração no plano da chapa por isso, elevados valores de r correspondem ao lado esquerdo do gráfico. Com o aumento do coeficiente de encruamento n , aumenta também a estrição que pode acontecer antes da rutura. De modo a evitar o aparecimento de rugas, aumentando a altura de embutidura consegue-se o mesmo efeito que o aumento da força do cerra chapas [26, 37].

2.3 Fundamentos de soldadura a laser

A soldadura é o processo de fabrico mais económico e eficiente de unir metais permanentemente desempenhando por isso um papel importante no fabrico e na reparação de componentes metálicos. Este processo ocupa um lugar de destaque entre os processos de fabrico e envolve mais princípios científicos e variáveis do que qualquer outro. Há uma gama diversificada de diferentes tipos de soldadura que podem ser usadas numa grande variedade de aplicações. A soldadura a laser é uma das técnicas de soldadura mais recentes. Nas últimas décadas, os lasers industriais passaram a ser uma realidade em muitos campos dos processos de fabrico. O corte por laser é aplicação mais comum, no entanto a soldadura a laser e a modificação da superfície por laser também se tem destacado na indústria [60, 61].

Na soldadura a laser, o feixe laser é focado de modo a apontar para a superfície da peça, com recurso a uma lente ou espelhos, apenas a algumas décimas de milímetros de modo a proporcionar uma elevada densidade energética. A radiação do feixe ao interagir com o material é parte absorvida, parte refletida. A parte absorvida é de tal ordem de grandeza que aquece o material, levando-o à fusão ou vaporização dependendo da densidade de energia. O metal vaporizado forma um plasma que, sendo um bom absorvedor da luz incidente, melhora ainda mais a absorção de energia e por isso a eficiência do processo. É usado um

gás de proteção com o objetivo de prevenir possíveis reações entre o ar e o material e para proteger a lente de salpicos de vapor. Depois de o raio laser passar e a fonte de calor ser interrompida o metal solidifica rapidamente uma vez que a zona aquecida é pequena. A zona afetada pelo calor também tem uma pequena área e a sua distorção é desprezável. A penetração do cordão de soldadura depende da potência do laser. Neste tipo de soldadura não é utilizado material de enchimento exceto se se tratar de soldadura híbrida [62, 63].

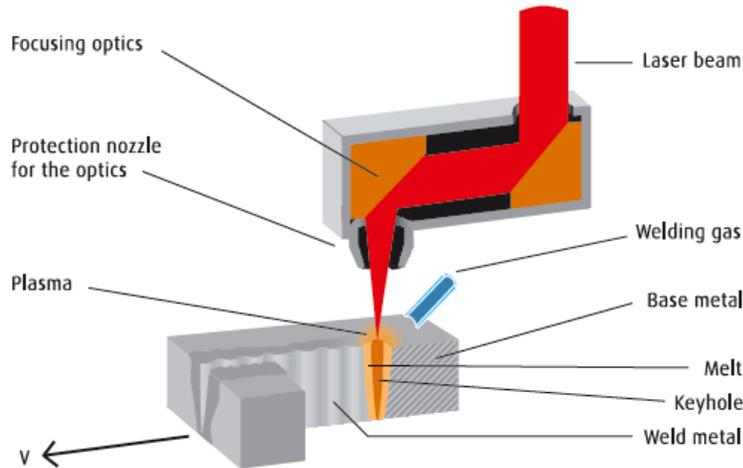


Figura 2.16: Esquema de um processo de soldadura a laser [61].

O fabrico com recurso à soldadura a laser é geralmente uma forma de reduzir efetivamente os custos de produção e fabricação. Isto acontece porque se conseguem elevadas taxas de produção devido ao facto de os lasers poderem ser mecanizados, controlados informaticamente e incorporados em linhas de montagem. Este processo apresenta ainda outras vantagens nomeadamente soldadura de zonas de difícil acesso com outra técnica, velocidades de soldadura elevadas, penetração profunda com baixa entrada de calor e um incremento da precisão e qualidade obtendo-se cordões de soldadura estreitos e com baixa taxa de distorção [60, 64–66].

No entanto, devido à grande precisão da soldadura a laser, são necessários meios precisos e eficientes para fazer o posicionamento das peças que devem respeitar tolerâncias muito estreitas. Deste modo, as principais desvantagens deste tipo de soldadura prendem-se com a preparação de juntas, sistemas de posicionamento e tolerâncias (“Joint Fit Up”) aliadas aos problemas de soldadura tais como porosidades, fissuras e salpicos [63, 67].

2.3.1 Parâmetros na soldadura

Neste tipo de soldadura tem que se ter em consideração os parâmetros do laser e do processo. Os principais parâmetros que é importante ter em consideração são os seguintes [63, 68]:

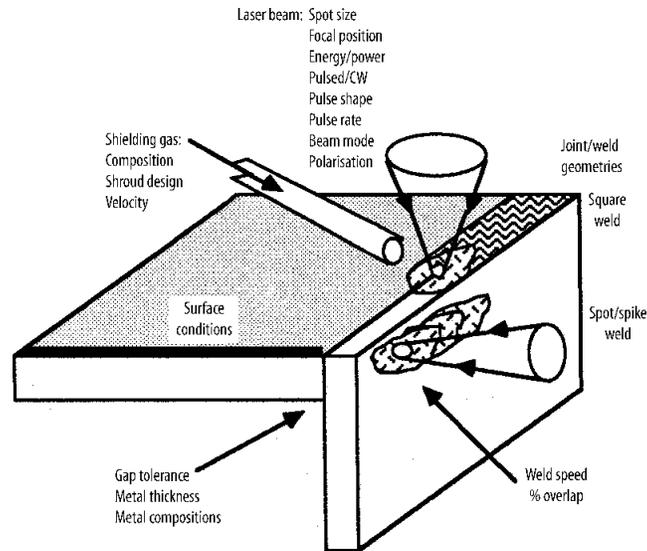


Figura 2.17: Principais parâmetros do processo de soldadura a laser [68].

Potência que deve ser ajustada consoante a espessura da peça. Quanto maior for a espessura da peça a soldar, maior a potência necessária.

Ângulo de divergência (caminho percorrido pelo feixe), que deve ser o mais pequeno possível.

Diâmetro de foco e distância focal, pois é necessário ter em atenção que quanto menor for o diâmetro de foco maior será a profundidade e é necessário procurar uma profundidade suficiente para evitar uma posição de foco crítica. Uma reduzida distância focal conduz a um pequeno diâmetro de foco, o que leva a uma reduzida definição da profundidade.

Posição de foco uma vez que o conhecimento exato do ponto focal é um requisito importante para obter uma soldadura com bons resultados, principalmente em soldaduras onde a profundidade e a penetração são elementos críticos.

Velocidade de soldadura que depende do material a soldar e da penetração desejada. Uma penetração maior consegue-se com uma velocidade baixa, como tal, quanto maior espessura tiver o material a soldar menor deve ser a velocidade de soldadura sendo ainda necessário ter em consideração a condutibilidade térmica do material em causa.

Gás que tem como função proteger a soldadura do ambiente atmosférico e evitar que o vapor do plasma seja demasiado denso. Normalmente utiliza-se o Hélio ou o Azoto e caso não seja necessária nenhuma proteção utiliza-se o Dióxido de Carbono por razões económicas.

Absorção que é o que determina a eficiência do feixe de luz incidente na peça. Assim, a condutividade térmica, o calor específico e a difusão térmica são propriedades físicas importantes dos materiais a ter em conta, pois são responsáveis por uma boa ou má absorção da energia térmica transferida ao material.

2.3.2 Juntas

A soldadura a laser permite soldar zonas de difícil acesso no entanto, sendo a soldadura um processo de junção sem contacto, há uma série de geometrias que pode ser soldada. Na Fig. 2.18 encontram-se representadas as juntas mais comuns usadas em soldadura. Há outros tipos de juntas de soldadura que são variações destes três [66, 69].

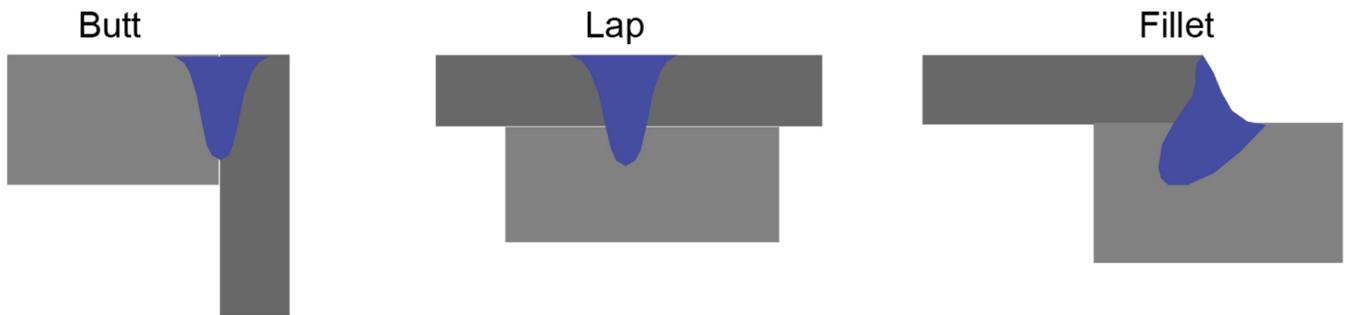


Figura 2.18: Juntas mais comuns em soldadura [69].

Um dos requisitos mais importantes da soldadura a laser são as tolerâncias nas interfaces das juntas. A soldadura a laser normalmente não utiliza material de adição portanto se as interfaces a soldar estiverem muito afastadas o material de soldadura será insuficiente ou a solda será rebaixada. Para se obterem melhores resultados as interfaces a soldar deveriam estar perfeitamente ajustadas não havendo qualquer intervalo entre elas. Efetuando a soldadura com as juntas topo a topo obtém-se maior resistência, maior eficiência de soldadura e diminui-se ao material necessário, por outro lado requer um maior cuidado no posicionamento. Na figura seguinte encontram-se as tolerâncias admissíveis neste tipo de juntas [66, 69].

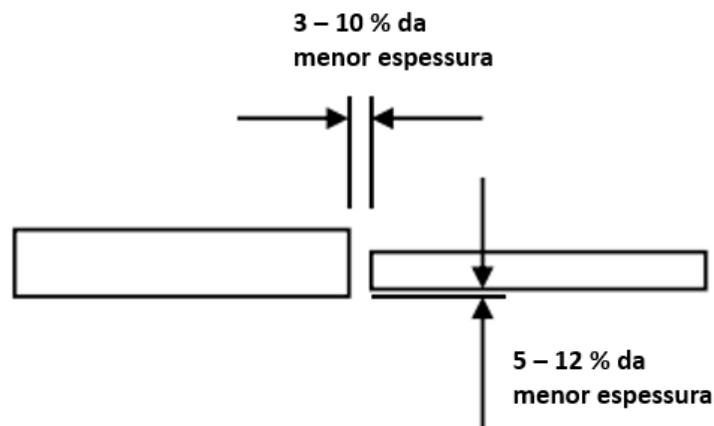


Figura 2.19: Tolerâncias admissíveis nas juntas topo a topo [66].

Capítulo 3

Análise experimental

O material no qual se baseou o trabalho desenvolvido nesta tese foi o aço laminado a quente P310Nb (EN 10120) que é o material usado na fabricação das coquilhas em estudo. A composição química é apresentada na Tab. 3.1 [18, 70].

Tabela 3.1: Composição química do aço P310Nb[18].

C (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Si (%)	Al (%)	Nb (%)	Ti (%)	N (%)
≤ 0.200	≥ 0.700	≤ 0.025	≤ 0.015	≤ 0.500	≥ 0.020	≤ 0.050	≤ 0.030	≤ 0.009

O presente capítulo tem como objetivo a análise das coquilhas embutidas na AMTROL-ALFA podendo dividir-se o trabalho experimental em duas partes:

- A primeira parte tem como objetivo a caracterização mecânica do aço P310Nb de modo a obter dados para os tentar relacionar com as variações de forma obtidas e para serem utilizados na posterior simulação numérica. Nesse sentido foram realizados ensaios de tração uniaxial e ensaios de anisotropia.
- A segunda parte consistiu em fazer uma análise dos desvios de forma e variação da espessura ao longo do perímetro das coquilhas de modo a averiguar a influência que a caracterização mecânica tem nestas imperfeições.

3.1 Caracterização Mecânica

3.1.1 Ensaios de tração

Sendo a embutidura um processo de conformação plástica e uma vez que o catálogo nos oferece uma gama larga de valores no que respeita à tensão limite de elasticidade e tensão limite de rutura, é conveniente analisar pormenorizadamente o comportamento do aço P310Nb no domínio plástico. Para tal é necessária a realização de um ensaio de tração [71].



Figura 3.1: Máquina de ensaios de tração uniaxial INSTRON Modelo 4507 presente no laboratório de ensaios mecânicos do INEGI.

Os ensaios de tração previstos no âmbito deste trabalho foram realizados numa máquina INSTRON Modelo 4507, existente no INEGI, com extensómetro automático biaxial e capacidade máxima de 30 Toneladas, sendo a máquina e o extensómetro controlados através de computador pelo software INSTRON. A velocidade de deformação praticada durante o ensaio foi de 5 mm/min e a taxa normal de aquisição de dados nos ensaios de tração foi de 5 pontos por segundo. Foram realizados nove ensaios de tração sobre provetes de P310Nb com as dimensões indicadas na Fig. 3.2 : três segundo a direção de laminagem, três segundo a direção transversa e três segundo a direção diagonal, a 45° da direção de laminagem (Fig. 3.3).

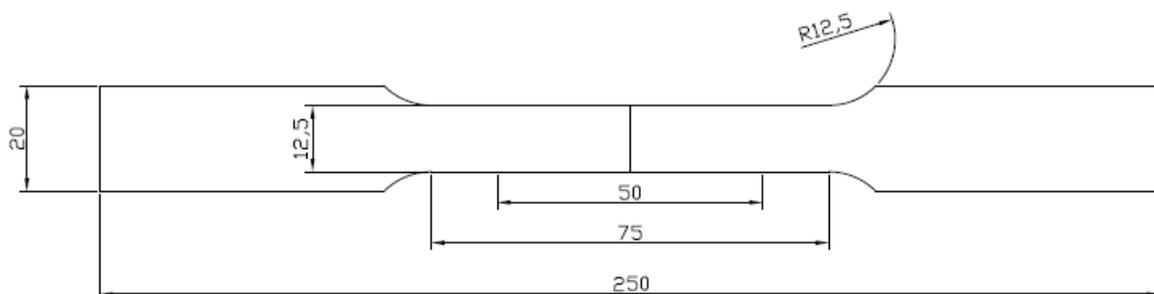


Figura 3.2: Forma e dimensões do provete para o ensaio de tração

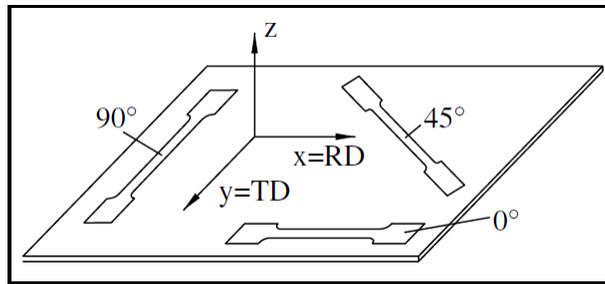


Figura 3.3: Direção dos provetes [72].

A máquina de ensaios permite registrar como parâmetro de saída a curva força-deslocamento. Obtém-se assim a evolução dos valores da força e correspondente deslocamento que o provete sofreu ao longo de cada ensaio e, a partir destes dados, calcularam-se as tensões e deformações reais recorrendo às expressões presentes na secção 2.1.1. Assim, foi possível obter-se os gráficos com as curvas tensão real-deformação real para cada uma das direções dos provetes. Na Fig. 3.4 pode-se observar a curva de tensão-deformação obtida para os provetes da direção de laminagem e as restantes podem se encontrar no Apêndice A.

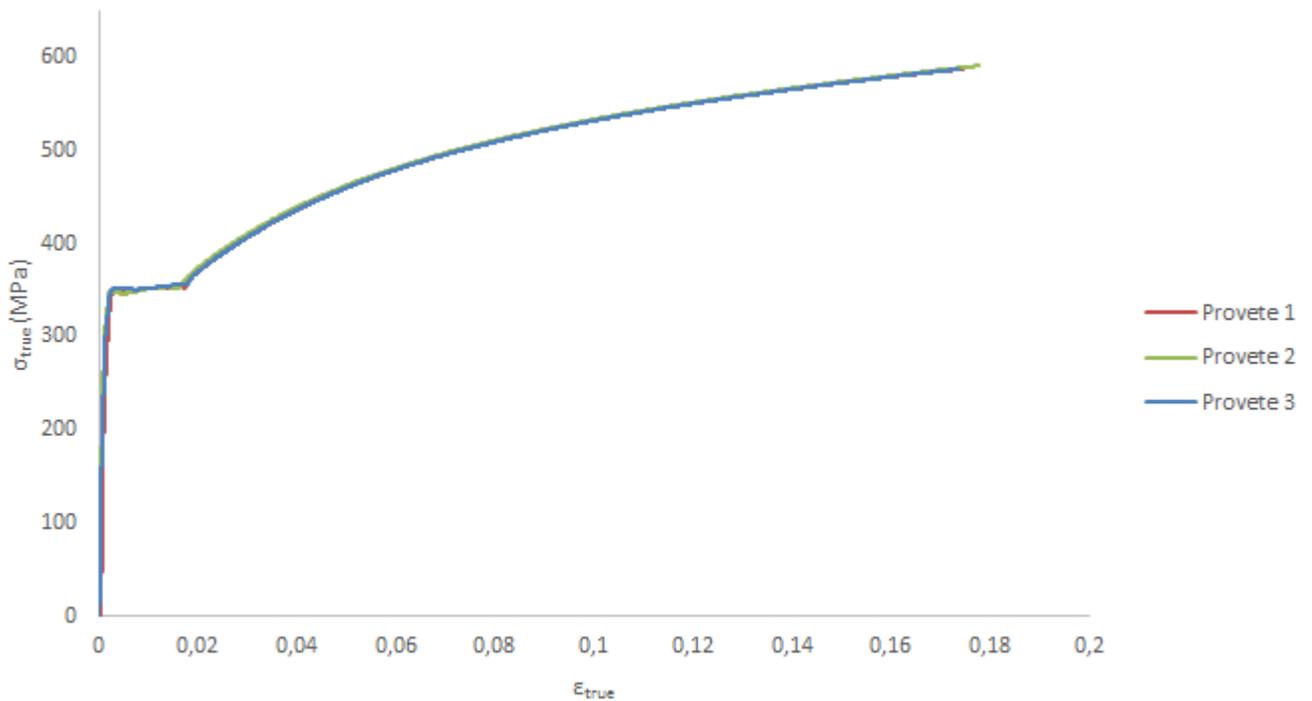


Figura 3.4: Curva de tensão-deformação para a direção de laminagem.

Pode-se observar que todas as amostras apresentam comportamento similar. Assim assumiu-se que os resultados estavam corretos.

Como foi referido anteriormente, a parte plástica da curva real de tensão-deformação pode ser descrita por um modelo matemático. Foram determinados os coeficientes da lei de encruamento de Hollomon, de Ludwick e de Voce e os resultados deste processo iterativo encontram-se nas tabelas seguintes.

Tabela 3.2: Coeficientes da lei de Hollomon.

	K (MPa)	n
Hollomon 0	854.04	0.2079
Hollomon 45	842.12	0.2084
Hollomon 90	845.34	0.2078

Tabela 3.3: Coeficientes da lei de Ludwick.

	σ_0	K	n
Ludwick 0	19.977	819.12	0.2069
Ludwick 45	19.973	815.51	0.2117
Ludwick 90	19.970	811.71	0.2075

Tabela 3.4: Coeficientes da lei de Voce.

	σ_∞	σ_0	K
Voce 0	596.23	299.45	15.640
Voce 45	587.26	298.57	15.592
Voce 90	595.19	295.60	15.209

A curva média dos resultados experimentais foi calculada bem como as curvas médias para as diferentes leis de encruamento. Na Fig. 3.5 encontram-se as curvas de encruamento obtidas para os provetes da direção de laminagem e as restantes podem se observar no Apêndice B.

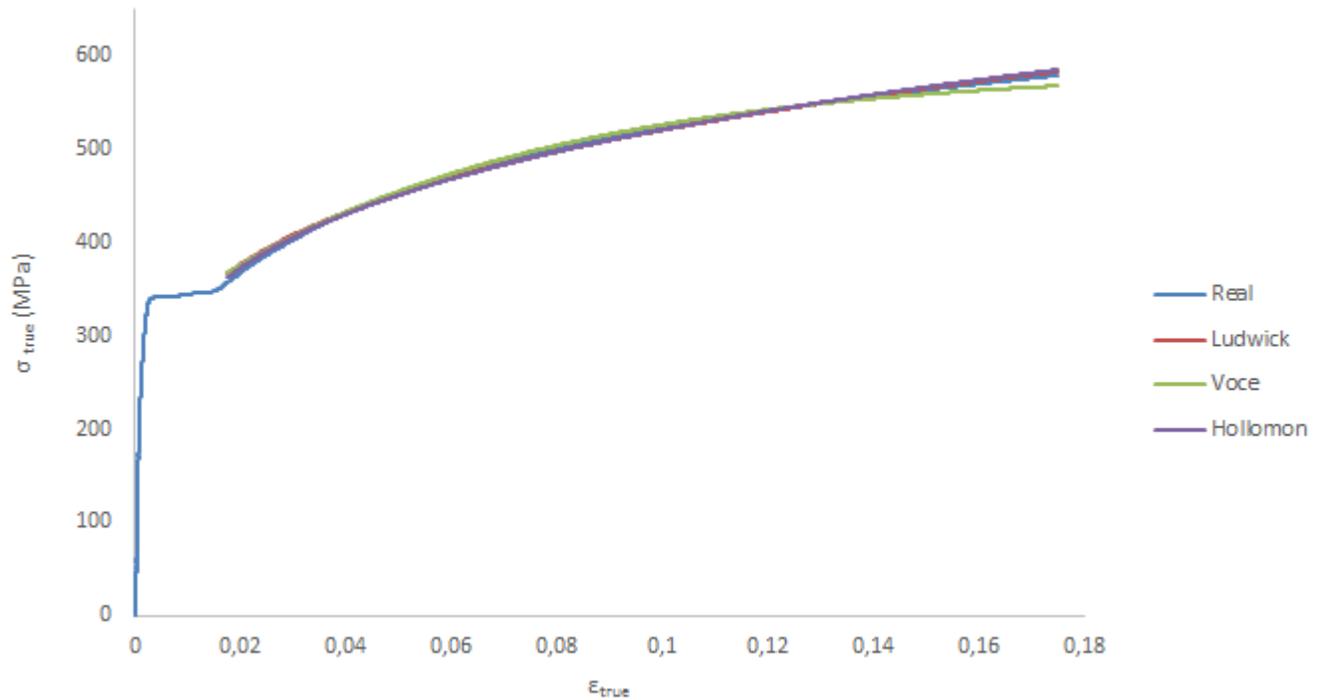


Figura 3.5: Aproximações da curva real para a direção de laminagem.

Uma vez que as curvas de encruamento seguem a curva experimental, pode concluir-se que as leis de encruamento são capazes de descrever o comportamento do material.

3.1.2 Ensaios de anisotropia

O coeficiente de anisotropia, r , tem influência na formação de orelhas (“earing”) e conseqüentemente na distribuição de espessura ao longo da borda das coquilhas. Por este motivo determinaram-se os coeficientes de anisotropia. Foram realizados seis ensaios de anisotropia, para dois lotes de material diferentes, segundo a norma internacional EN 517 - 9800 sobre provetes de P310Nb: dois segundo a direção de laminagem, dois segundo a direção transversa e dois segundo a direção diagonal (Fig. 3.3). Foi desenhado um retângulo na superfície da chapa com as dimensões que se podem observar na fig. 3.6 [73].

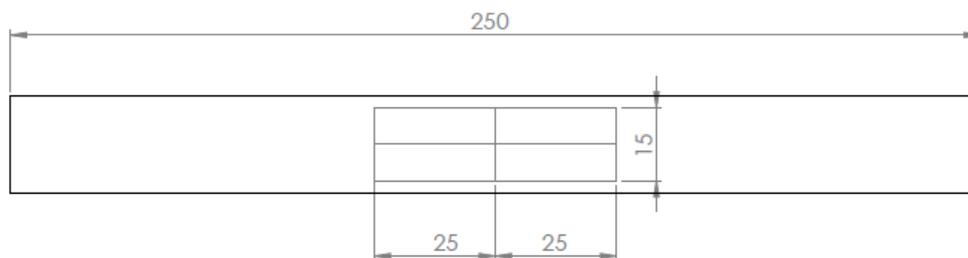


Figura 3.6: Proвете para determinação do coeficiente de anisotropia.

Mediram-se os comprimentos das linhas do retângulo utilizando o microscópio e foi efetuado um ensaio de tração utilizando a máquina INSTRON Modelo 4507 com velocidade de deformação de 5 mm/s até cerca de 12% de alongamento. Voltou a medir-se o comprimento das linhas do retângulo após a deformação e calcularam-se os coeficientes de anisotropia para as três direções. Os resultados para o primeiro lote encontram-se na Tab. 3.5.

Tabela 3.5: Coeficientes de anisotropia do lote 1.

r_0	0.85
r_{45}	0.90
r_{90}	0.77
\bar{r}	0.86
Δr	-0.09

Repetiu-se o procedimento para o segundo lote e os resultados que se obtiveram encontram-se na tabela seguinte.

Tabela 3.6: Coeficientes de anisotropia do lote 2.

r_0	0.87
r_{45}	0.89
r_{90}	0.85
\bar{r}	0.87
Δr	-0.03

Obteve-se em ambos os lotes um coeficiente de anisotropia médio $\bar{r} < 1$ o que significa que as tensões para este material serão dominantes na direção da espessura e um coeficiente de anisotropia planar Δr bastante baixo.

3.2 Análise dos desvios

Para fazer a análise dos desvios foram analisadas 21 coquilhas das garrafas de 20L: 3 numa fase inicial e 18 numa segunda fase.



Figura 3.7: Prensa utilizada para embutir as coquilhas das garrafas de 20L presente na AMTROL-ALFA.

As coquilhas em análise foram embutidas numa prensa da marca Adira, Modelo PHDM 200/120 que é uma prensa hidráulica de duplo montante Fig. 3.7 existente na fábrica da AMTROL-ALFA utilizando um esboço com um diâmetro de 520 mm e 3.30 mm de espessura e aparadas de seguida para obter as dimensões especificadas. As características da prensa utilizada encontram-se resumidas na tabela seguinte.

Tabela 3.7: Características da prensa utilizada.

Força máxima do embutidor	200 ton
Curso máximo do embutidor	1000 mm
Abertura máxima	1250 mm
Medida das mesas	1000x1000 mm
Força máxima do cerra - chapas	120 ton
Curso máximo do cerra - chapas	350 mm

3.2.1 Variação da espessura

Um dos critérios de qualidade na conformação de metais é a distribuição da espessura. A variação da espessura durante o processo de conformação plástica pode causar ou influenciar alguns efeitos negativos nas peças embutidas, tais como variação das tensões e concentração de tensões em zonas com variações de espessura, rachaduras e falhas que ocorrem nas zonas com espessura mínima e que são influenciadas por diferentes fatores: relação de embutidura imprópria, geometria do punção e da matriz, folgas da ferramenta desadequada, variação do diâmetro das peças, etc. É recomendável que a estricção máxima da peça não ultrapasse os 18 – 20% da espessura inicial, no entanto devido a condições severas de embutidura por vezes esse limite não é respeitado [55, 74, 75].

Para avaliar e caracterizar o comportamento deste material foi determinada a variação da espessura ao longo de vários pontos na peça. O levantamento da espessura ao longo do perímetro circunferencial da peça foi efetuada a 20 mm do topo nos pontos representados na Fig. 3.9 onde o ângulo 0° corresponde sempre à direção de laminagem e admitindo um erro de 10° na marcação dos mesmos. O levantamento da espessura ao longo do perímetro foi feito com a ajuda de um micrómetro de pontas esféricas da Mitutoyo com uma escala de 0 – 25 mm e uma precisão de 0.001 mm.



Figura 3.8: Micrómetro de pontas esféricas da Mitutoyo presente no laboratório de ensaios mecânicos do INEGI.

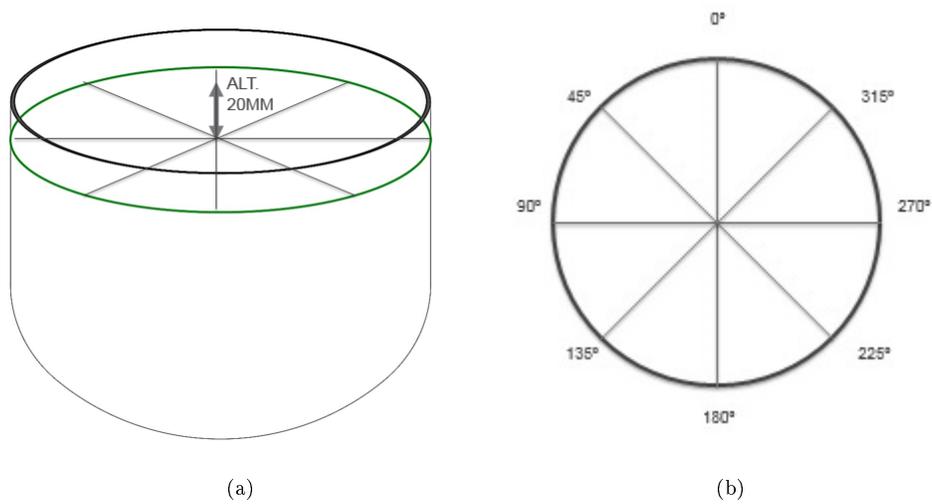


Figura 3.9: Identificação dos pontos onde foi feito o levantamento da espessura.

Lote 1

Inicialmente foram medidas três peças: uma embutida com a direção de laminagem perpendicular à frente da prensa (DL), uma embutida com a direção de laminagem a 45° da frente da frente (45DL) e outra embutida com a direção de laminagem alinhada com a frente da prensa (DT). Os resultados obtidos para a variação da espessura (em mm) em função da posição angular relativamente à direção de laminagem encontram-se na Fig. 3.10.

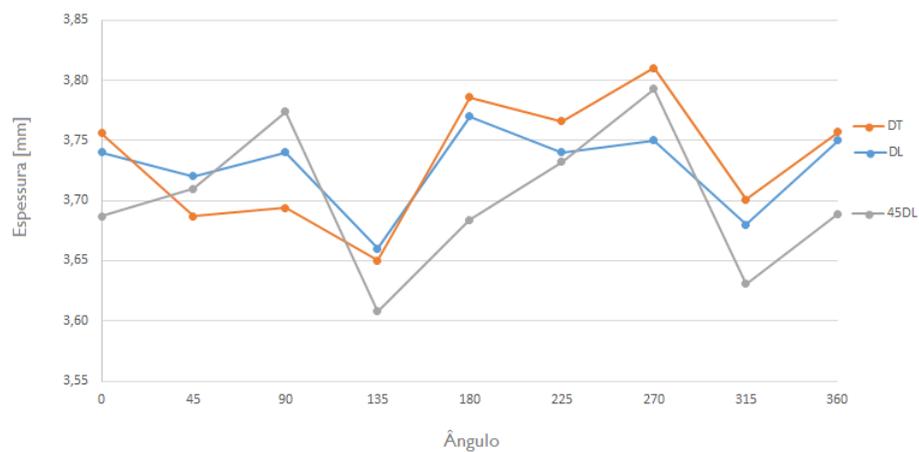


Figura 3.10: Variação da espessura (em mm) em função do ângulo.

Pode-se observar que a espessura tem uma ligeira variação com uma amplitude de 0.2 mm variando no intervalo [3.61, 3.81] mm. A maior espessura verifica-se no ângulo marcado a 270° e a menor a 135°. Tendencialmente verifica-se uma diminuição da espessura nos ângulos 45°, 135°, 225° e 315° e um aumento nos restantes. Esta tendência da variação da espessura sugere a existência de 4 orelhas formadas a 45° da direção de laminagem o que vai de encontro ao coeficiente de anisotropia determinado para este lote, uma vez que, como foi mencionado anteriormente na secção sobre os defeitos de embutidura, um $\Delta r < 0$ origina orelhas a 45° o que significa uma menor espessura para estes ângulos.

Uma vez que apenas foi analisada uma peça embutida em cada direção, a amostra é demasiado pequena e por isso não se podem tirar conclusões a partir destes dados.

Lote 2

Numa segunda fase, com um lote diferente, voltou-se a utilizar a mesma metodologia - medição da espessura em oito pontos a 20 mm da borda, como se pode observar na Fig. 3.9, com o micrómetro de pontas esféricas - com dezoito peças: seis embutidas com a direção de laminagem perpendicular à frente da prensa (DL), seis embutidas com a direção de laminagem orientada a 45° da frente da prensa (45DL) e seis embutidas com a direção de laminagem alinhada com a frente da prensa (DT). Os resultados obtidos encontram-se nas Fig. 3.11, 3.12 e 3.13

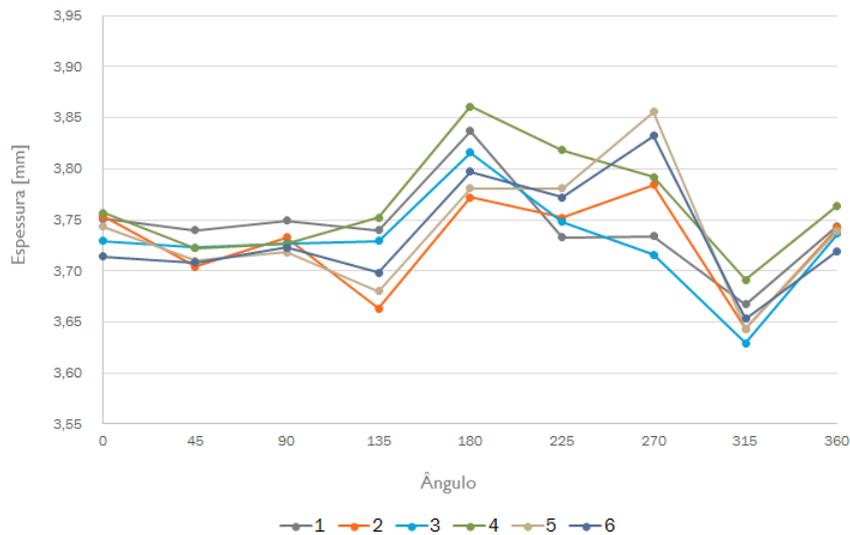


Figura 3.11: Distribuição da espessura (em mm) nas peças embutidas com a DL paralela à frente da prensa em função do ângulo.

No gráfico anterior observa-se que a espessura não é igual ao longo de todo o perímetro, variando no intervalo [3.63, 3.86] mm sendo que a amplitude é de 0.23 mm. Os picos de espessura verificam-se para 180° e a 270°, onde se observa a maior espessura, e a 135° e a 315° onde se encontra a menor espessura. A tendência é a espessura diminuir na diagonal da direção de laminagem e aumentar na direção da mesma.

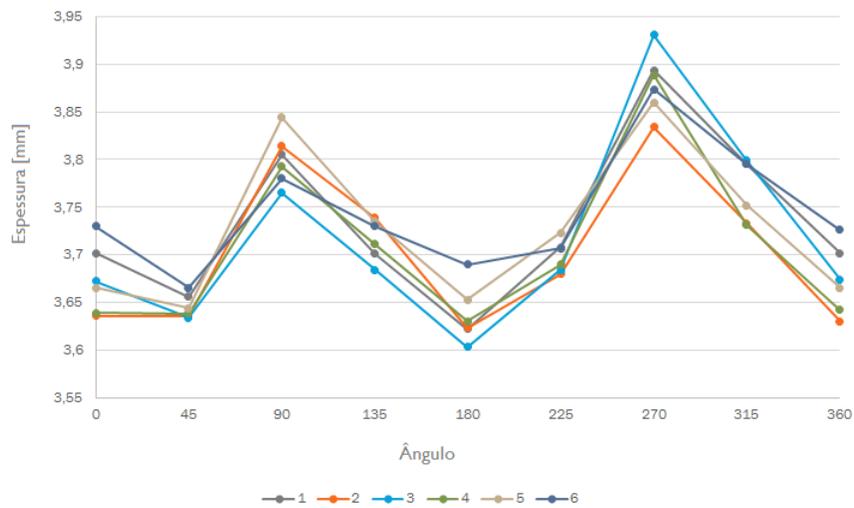


Figura 3.12: Distribuição da espessura (em mm) nas peças embutidas com a DL perpendicular à frente da prensa em função do ângulo.

A figura anterior é relativa à variação da espessura (em mm) na peça embutida com a direção de laminagem perpendicular à frente da prensa. Como se pode ver, a maior espessura encontra-se a 90° e a 270° enquanto que a menor se observa para 180° e a 45°. Neste grupo, a espessura varia entre [3.60, 3.93] mm havendo uma amplitude de 0.2 mm entre a espessura máxima e mínima.

Apesar de um dos picos de maior espessura se situar a 270°, estas peças apresentam uma tendência na variação de espessura ligeiramente diferente das peças do grupo anterior.

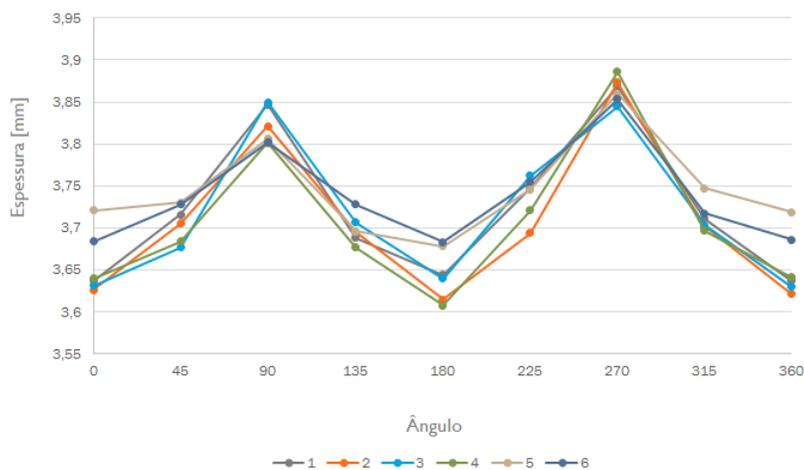


Figura 3.13: Distribuição da espessura nas peças embutidas com a DL orientada a 45° da frente da prensa em função do ângulo.

Nas peças embutidas com a direção de laminagem orientada a 45° da frente da prensa, a maior espessura encontra-se a 90° e a 270° enquanto que a menor se observa para 180° . A amplitude verificada na espessura destas peças é de 0.28 mm sendo que a espessura varia no intervalo [3.61, 3.89] mm. A tendência da variação de espessura neste grupo de peças é bastante similar com a tendência observada no grupo que foi embutido com a direção de laminagem perpendicular à frente da prensa.

Uma vez que os picos de espessura não se verificaram para os três lotes nos mesmos ângulos, calculou-se a curva média de cada um dos grupos com o objetivo de se avaliar as semelhanças da distribuição de espessuras dos três grupos e a comparação dos resultados é visível na Fig. 3.14.

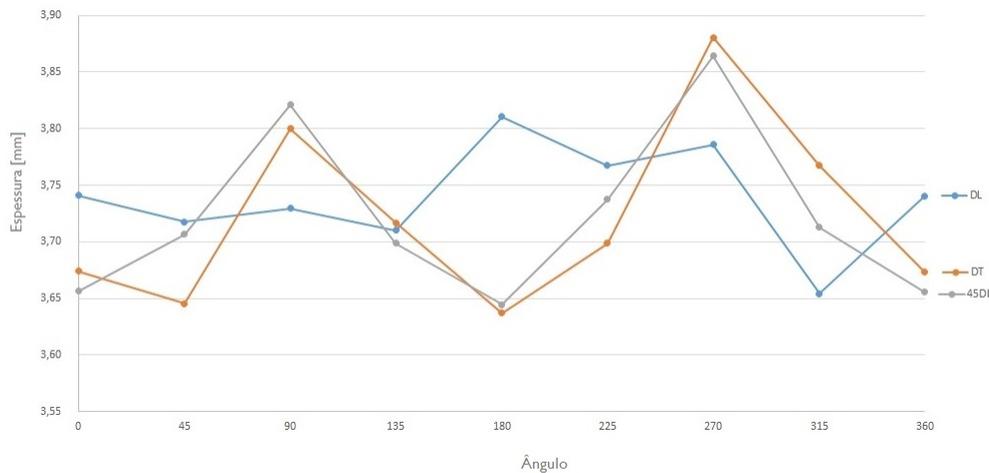


Figura 3.14: Comparação entre a distribuição média da espessura em função do ângulo, das peças embutidas com as diferentes orientações.

Na Fig. 3.14 encontra-se a comparação entre a distribuição média da espessura (em mm) em função do ângulo das peças embutidas com as diferentes orientações. Tendencialmente observam-se os picos de espessura máxima a 90° e a 270° . Para este lote de material, o menor valor de r encontrado foi para r_{90} . Assim, estes valores consideram-se coerentes uma vez que, tal como foi referido anteriormente, para baixos valores de r obtém-se uma menor altura de embutido e consequentemente nessas posições irá ser encontrada uma maior espessura, o que foi verificado.

3.2.2 Variação do diâmetro

Outro dos defeitos geométricos importantes verificado nas peças embutidas é manifestado sob a forma de variação do diâmetro que pode estar relacionado com a variação da espessura da chapa durante o processo de conformação, com o retorno elástico entre outros [74].

Lote 1

Com o objetivo de se verificar a variação do diâmetro, numa primeira fase, analisaram-se 3 peças: uma peça embutida com a direção de laminagem perpendicular à frente da prensa, uma com a direção de laminagem a

45° da frente da prensa e outra com a direção de laminagem paralela à frente da prensa. Recorreu-se a um comparador de interiores da Mitutoyo com uma ponta de 270 mm e uma resolução de 0.01 mm para se obter os diâmetros nos mesmos ângulos analisados na variação da espessura (Fig. 3.9).

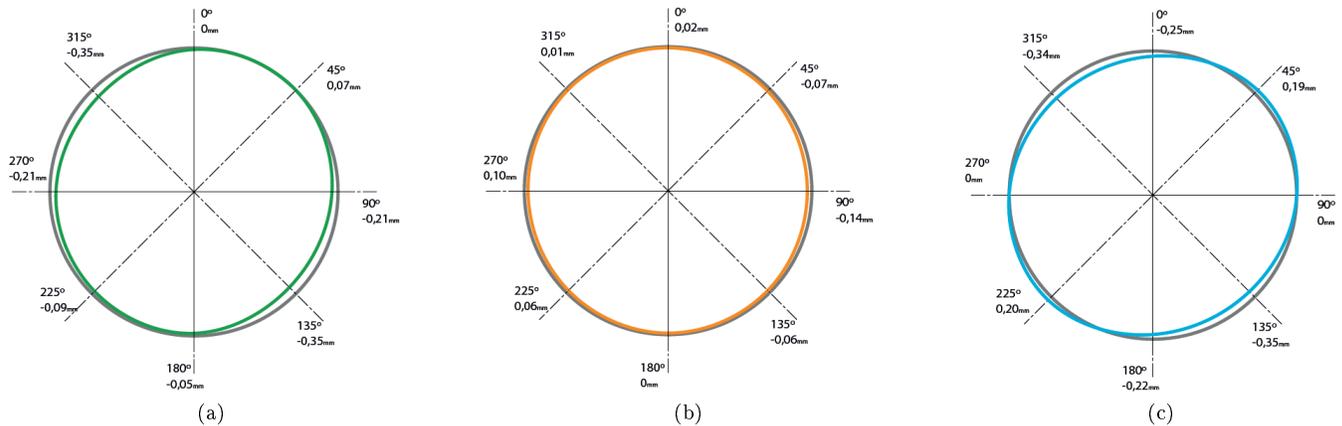


Figura 3.15: Variação do diâmetro obtida com o comparador de interiores das peças embutidas com a) DL perpendicular à frente da prensa b) DL a 45° da frente da prensa c) DL paralela à frente da prensa.

Na Fig. 3.15 pode-se observar que a maior diferença de diâmetro verificada é de 0.35 mm no diâmetro 45° - 225°. Pode-se ainda observar que a peça que apresenta menor ovalização é a que foi embutida com a direção de laminagem orientada a 45° que apresenta uma diferença máxima no diâmetro de 0.14 mm. Pode-se constatar que todas as peças apresentam uma ligeira ovalização, sendo o diâmetro maior verificado no diâmetro 45° - 225° e o menor 135° - 315°. Ao analisar a junção de peças com geometrias iguais às obtidas, qualquer combinação possível estaria dentro das tolerâncias impostas pelo norma de soldadura. No entanto, a dimensão da amostra foi demasiado pequena uma vez que apenas foi analisada uma peça embutida em cada direção e como tal não se devem tirar conclusões a partir destes dados.

Lote 2

Numa segunda fase, onde a metodologia anterior foi revista, utilizou-se a máquina de medir coordenadas 3D Dea Gamma 1102, que se pode observar na Fig. 3.16, com o software Metrolog XG onde foram medidas 18 peças: seis peças embutidas com a direção de laminagem perpendicular à frente da prensa, seis com a direção de laminagem a 45 da frente da prensa e seis com a direção de laminagem paralela à frente da prensa.

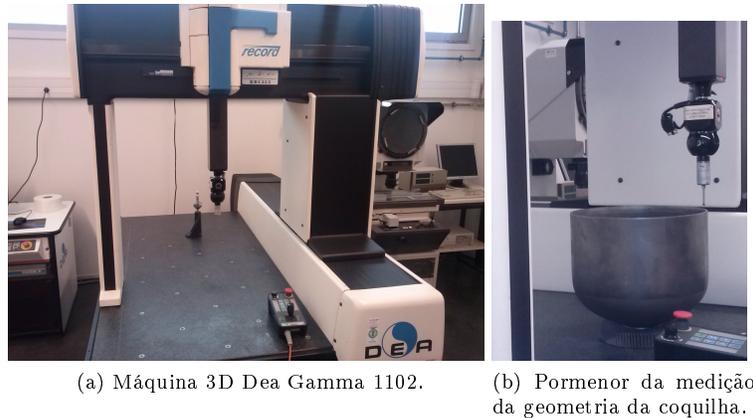


Figura 3.16

Com este procedimento obtiveram-se as coordenadas 3D de oito pontos em cada coquilha (os mesmos considerados na medição de espessura) o que possibilitou reproduzir a geometria aproximada no Solidworks (Apêndice D). Ficou claro que todas as peças medidas apresentaram ovalização e a tendência que se obteve encontra-se representada na Fig. 3.17.

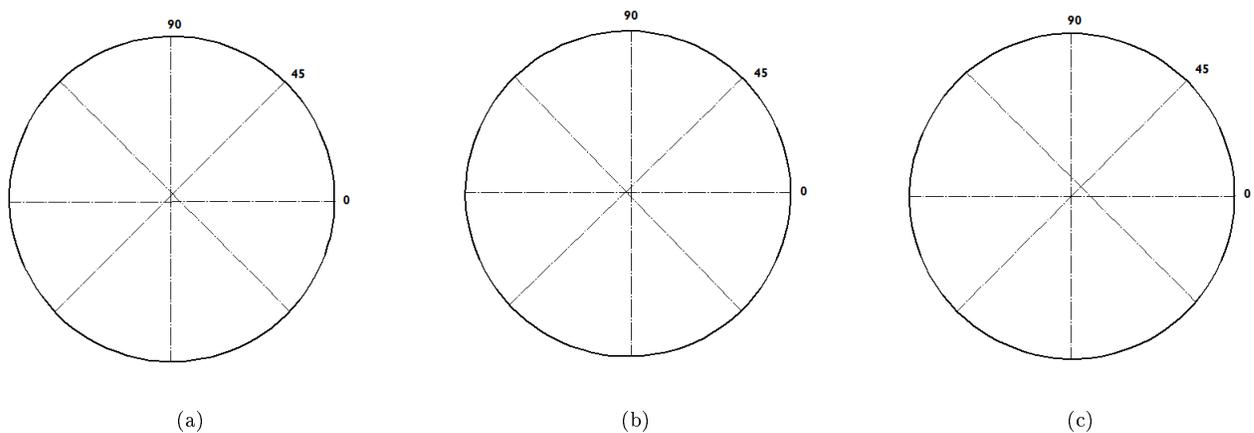


Figura 3.17: Tendência da variação do diâmetro obtida com a máquina de medir coordenadas das peças embutidas com a a) DL perpendicular à frente da prensa b) DL a 45° da frente da prensa c) DL paralela à frente da prensa.

O diâmetro das peças embutidas com a direção de laminagem paralela à frente da prensa varia no intervalo [269.61; 270.31] mm, o das peças embutidas com a direção de laminagem orientada a 45° da frente da prensa varia entre [269.84; 270.37] mm e o diâmetro das coquilhas embutidas com a direção de laminagem perpendicular à frente da prensa varia entre [269.79; 270.44] mm. O grupo que apresenta menor amplitude de diâmetros é o que foi embutido com a direção de laminagem orientada a 45° da frente da prensa tal como nas peças analisadas inicialmente. Na Fig. 3.17, pode-se observar que os três grupos apresentam a mesma tendência para uma ovalização segundo a direção 45° - 225°. Estes resultados vão de encontro aos resultados

obtidos inicialmente com o comparador de interiores onde se verificou que o maior diâmetro das peças era observado a 45° e o menor a 135° .

Uma vez que o problema em análise é a diferença entre os raios na união das coquilhas, analisaram-se dois casos desfavoráveis que possivelmente poderão ocorrer em produção.

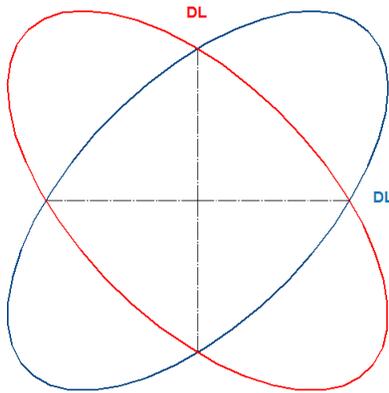


Figura 3.18: União de duas peças geometricamente iguais, com a maior ovalização encontrada e com as direções de laminagem perpendiculares.

Analisando a união de duas peças exatamente iguais com a ovalização correspondente à maior encontrada e com as direções de laminagem alinhadas perpendicularmente, o desnivelamento máximo entre superfícies é de 0.555 mm, valor esse que ultrapassa a tolerância aceite pelo laser. No entanto convém referir que estamos a falar do caso teórico mais desfavorável onde se obtêm duas peças geometricamente iguais e se alinha a direção de laminagem exatamente a 90° . Se a direção de laminagem estivesse alinhada deixaria de haver problema, uma vez que o problema em questão é desalinhamento entre superfícies e não a variação do raio.

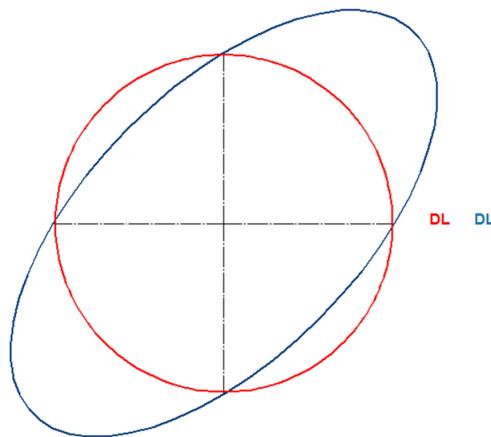


Figura 3.19: União da coquilha que apresenta maior ovalização e da coquilha que apresenta menor ovalização com as direções de laminagem alinhadas.

Outro caso bastante desfavorável é a união das duas peças com a maior diferença geométrica - a coquilha que apresenta maior ovalização e a coquilha que apresenta menor ovalização - alinhadas pela direção de laminagem. A maior diferença encontrada entre os raios destas peças é igual a 0.214 mm. Este valor encontra-se dentro dos níveis aceites pela norma de soldadura, não sendo por isso crítico nem considerado defeito.

3.3 Conclusões

Ao longo deste capítulo houve algumas questões inerentes aos ensaios experimentais que foram levantadas. A primeira está relacionada com a marcação dos pontos a analisar nas peças e como tal admite-se um erro de marcação do ângulo de 10° . Houve um ensaio de anisotropia cujos resultados foram desconsiderados uma vez que as deformações obtidas divergiam entre si. Este ensaio foi repetido dando particular atenção à deformação aplicada ao provete. Desta forma os resultados obtidos foram considerados coerentes na medida em que as deformações calculadas não apresentam discrepâncias entre elas.

A metodologia utilizada na medição da espessura foi a inicialmente prevista, não tendo havido necessidade de mudanças uma vez que foi um método simples onde se tinha que garantir a perpendicularidade do micrómetro para obter resultados precisos. Relativamente à metodologia utilizada na análise do diâmetro, a utilização do comparador de interiores revelou-se pouco precisa já que a perpendicularidade não foi garantida e como tal não se estava a medir o menor diâmetro no plano pretendido introduzindo-se erros de medição. Assim, aquando do segundo lote este método foi revisto e optou-se pela utilização da máquina de 3D onde se definiu um plano em zz e obteve-se as coordenadas dos pontos sempre à mesma cota.

Em todas as análises efetuadas, para as peças obtidas com as três direções de embutidura diferente apresentam a mesma tendência para as mesmas posições angulares em relação à direção de laminagem. Desde modo, pode-se afirmar que, o ângulo que a direção de laminagem faz com a frente da prensa quando as peças são embutidas, não interfere na tendência da variação de espessura, nem na tendência da variação do diâmetro. Uma vez que a tendência dos resultados é independente da direção com que o esboço é colocado na prensa, não se consegue identificar nenhuma interferência da ferramenta nos mesmos.

Com base nos resultados obtidos, observam-se diferenças na tendência da variação da espessura para os dois lotes que apresentam coeficientes de anisotropia diferentes. Deste modo, conclui-se que esta irregularidade pode ser influenciada pela caracterização mecânica. Relativamente à análise da variação do diâmetro, verifica-se que quando se sobrepõe duas geometrias com a direção de laminagem alinhada, o desalinhamento entre elas não causa problemas nas tolerâncias impostas pela norma de soldadura a laser.

Inicialmente, estava ainda prevista a análise de coquilhas da garrafa de 30L. Estas coquilhas são as que apresentam maiores problemas de variação do diâmetro e não são embutidas nas instalações da AMTROL-ALFA pois tem uma altura de embutido superior ao curso máximo das prensas existentes. Deste modo, a obtenção destas coquilhas estava dependente da disponibilidade da Silampos para a sua execução e tal não se veio a verificar possível em tempo útil.

Capítulo 4

Simulação e modelação numérica

A simulação de processos de conformação plástica de chapas utilizando o método dos elementos finitos tem assumido um papel fundamental em satisfazer as necessidades da indústria, uma vez que tem vindo a progredir substancialmente, em parte graças ao rápido desenvolvimento dos computadores. O interesse demonstrado pela indústria nesta ferramenta é evidente pois, permite obter uma previsão do comportamento de deformação e a formabilidade dos materiais, possibilitando assim a validação virtual de uma ferramenta reduzindo ou mesmo substituindo os testes experimentais em prensa e deste modo, reduzir o tempo de colocação no mercado de novos produtos e consequentemente diminuir os custos envolvidos no seu desenvolvimento. Assim, além da fase de desenvolvimento de projeto, a simulação pode ainda ser útil na identificação de causas, e obtenção de soluções, durante a produção. A precisão dos resultados da simulação depende do tipo e tamanho dos elementos, da descrição do comportamento mecânico do material e também da correta definição das condições de fronteira [72, 76, 77].

No trabalho desenvolvido nesta tese, a simulação é utilizada com o objetivo de prever a variação da espessura e ovalização com a caracterização mecânica do material tal como se verificou na análise experimental.

4.1 *AutoForm*®

A ferramenta de trabalho utilizada nos estudos que se apresentam foi o programa comercial *AutoForm*® na versão R5.1. O *AutoForm*® oferece soluções de software bastante completas para a conceção de ferramentas e análise de conformação de chapas, sendo por isso uma das ferramentas mais apropriadas para trabalhos de simulação numérica de elementos finitos de estampagem e embutidura. O algoritmo deste programa assenta numa formulação mecânica do tipo quasi-estática, na qual se desprezam os termos de inércia (aceleração). O esquema de integração temporal utilizado para resolver as equações características do problema é do tipo implícito e existem dois tipos de elemento finitos disponíveis para discretizar o corpo deformável (chapa): membrana ou casca com elementos triangulares [76, 78].

Os módulos de software oferecidos incluem simulação da conformação, planeamento de processo, conceção da matriz, definição da forma do esboço e da linha de corte, análise do retorno elástico e compensação da matriz, e uma análise de custo .

4.1.1 Modelação do material

O material que foi utilizado nas simulações foi o P310Nb, o mesmo material das peças analisadas na secção anterior. Os modelos dos materiais no *AutoForm*® consistem em três parâmetros diferentes: a curva

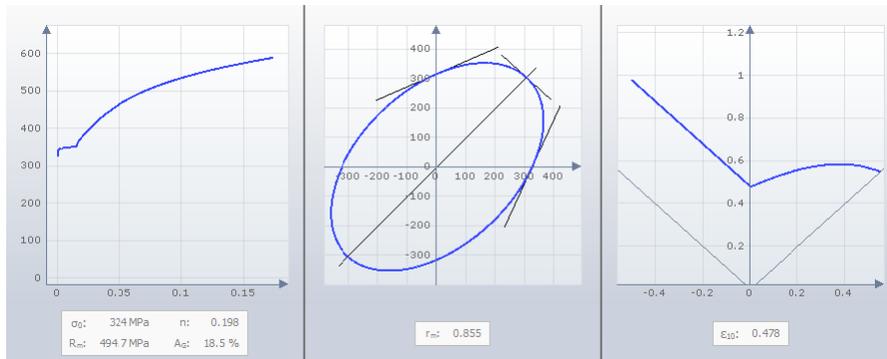
de aproximação à curva real, a superfície de cedência e a curva limite de embutidura. O critério de plasticidade considerado pelo programa é o critério de Hill 1948 (referido anteriormente na secção 2.1.1) e a curva limite de embutidura baseia-se no modelo de Keller (referido anteriormente na secção 2.2). A lei de encruamento que o programa utiliza é uma lei mista que contempla uma componente da Lei de Swift associada a uma componente da Lei de Voce [29, 54]

$$\sigma = (1 - \alpha) \{C \cdot (\varepsilon_{pl} + \varepsilon_0)^m\} + \alpha \left\{ \sigma_{Sat} - (\sigma_{Sat} - \sigma_i) e^{-a\varepsilon \frac{\sigma}{\sigma_i}} \right\} \quad (4.1)$$

As características do material utilizado encontram-se na figura seguinte.

Tabela 4.1: Propriedades mecânicas do aço P310Nb para dois lotes diferentes, utilizadas no *AutoForm®*.

Material	Densidade ρ [kg/m ³]	Módulo de Elasticidade E [GPa]	Coeficiente de Poisson ν	Parâmetros da curva de aproximação			Coeficiente de anisotropia		
				σ_0 [MPa]	R_m [MPa]	n	r_0	r_{45}	r_{90}
Lote 1	7850	210	0.3	324	494.7	0.198	0.85	0.90	0.77
Lote 2	7850	210	0.3	324	494.7	0.198	0.85	0.90	0.77



(a) Lote 1



(b) Lote 2

Figura 4.1: Caracterização da curva tensão-deformação, da superfície de cedência e da curva limite de embutidura.

4.1.2 Definição do processo

Para definir o processo, em primeiro lugar foi necessário fornecer ao software as ferramentas de referência. Como tal, foram importadas a geometria da matriz (denominado “die” no *AutoForm*®), do punção (denominado “punch” no *AutoForm*®) e do cerra - chapas (denominado “binder” no *AutoForm*®) em 3D (Fig. 4.2) e a curva com o contorno da chapa utilizada. A matriz e o punção são ferramentas rígidas enquanto que o cerra - chapas é controlado por uma força constante de 343.2 kN (aproximadamente 35 toneladas) e desloca-se de encontro à matriz.

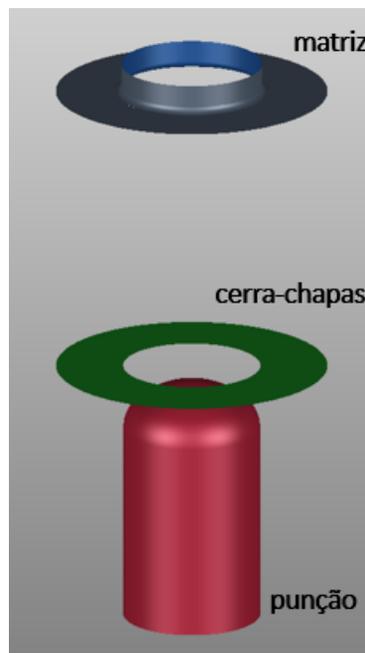


Figura 4.2: Ferramentas da operação de embutidura.

Depois de o material e as ferramentas estarem definidas a etapa que se segue é a definição do plano de operações do processo onde se estipulam as operações que o programa irá realizar. Como se está a estudar uma operação de embutidura simples será apenas necessário uma operação de *Drawing* (D-20), onde se deforma o esboço, seguida de uma operação de *Measurement* (M-30) onde é calculado o retorno elástico ao qual não foi imposto nenhuma condição de fronteira (*Springback free*).

Também é necessário caracterizar o esboço utilizado. Para isso delimita-se o contorno e as dimensões (utilizando o ficheiro importado anteriormente), marca-se a direção de laminagem (Fig. 4.3) e estabelece-se a posição inicial onde o esboço é colocado no início da operação. Nesta simulação, o esboço foi colocado no cerra-chapas.

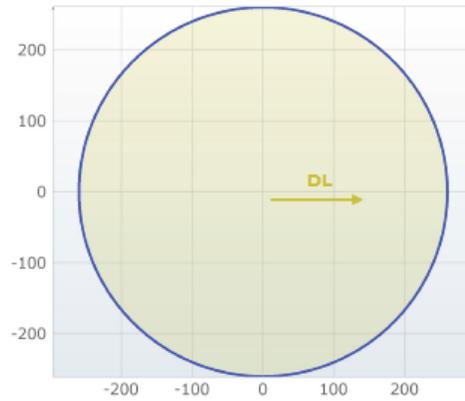


Figura 4.3: Definição do esboço.

No modelo numérico utilizado nas simulações de embutidura, foi sempre utilizada a mesma malha inicial. A malha em questão é composta por 1344 elementos triangulares e 757 nós com 11 pontos de integração de Gauss ao longo da espessura, que se pode visualizar na Fig. 4.4.

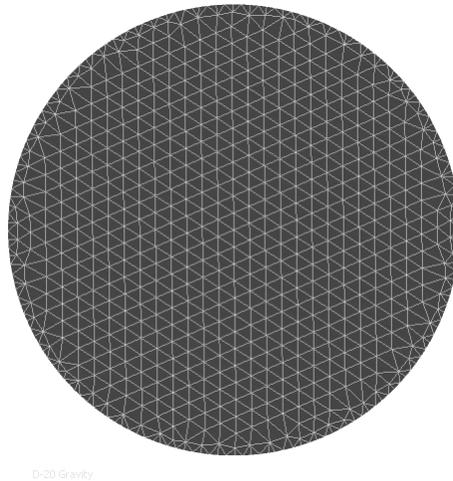


Figura 4.4: Malha base de elementos finitos utilizada nas simulações de embutidura.

4.1.3 Resultados das simulações

Com este programa conseguem-se obter resultados ao nível da distribuição de espessura, em mm, e do retorno elástico podendo prever assim a ovalização. Os resultados que se obtiveram encontram-se de seguida.

Lote 1

A primeira simulação efetuada foi para o material com os coeficientes de anisotropia do lote 1. A distribuição de espessura pode-se observar na Fig. 4.5 e a variação da curvatura na Fig. 4.6.

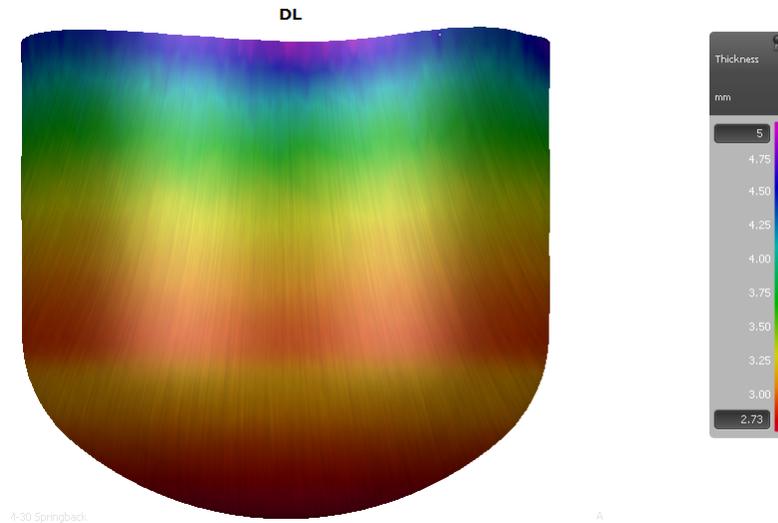


Figura 4.5: Distribuição da espessura em mm, do lote 1.

Se fizermos uma marcação análoga à feita experimentalmente, onde o ângulo 0° é coincidente com a a direção de laminagem (DL), pode-se observar que a coquilha apresenta 4 orelhas - a 45° , a 135° , a 225° e a 315° . Relativamente à distribuição da espessura, a maior verifica-se para os 90° . Tal acontece porque uma vez que as orelhas aparecem a 45° aí há maior deformação em espessura de modo a obter a parede mais alta. Estes resultados reproduzem os obtidos experimentalmente para este lote.

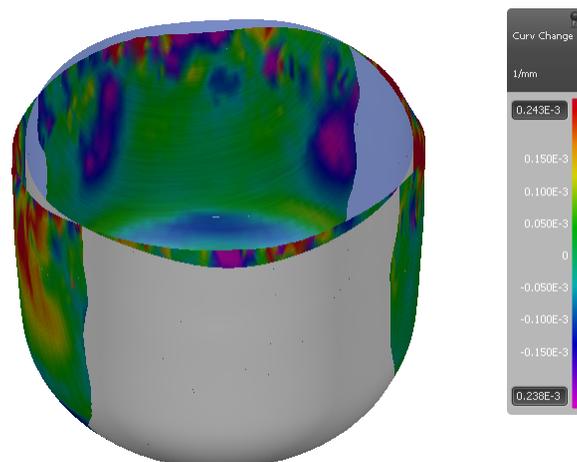


Figura 4.6: Variação da curvatura por mm, do lote 1.

Relativamente à variação da curvatura a figura mostra a geometria esperada e a geometria obtida multiplicando os defeitos por um fator de 20. O menor diâmetro verifica-se na direção de laminagem e o maior encontra-se na direção transversal. Este resultado difere da análise experimental, onde se identificou o menor diâmetro a $45^\circ - 225^\circ$ e o maior a $135^\circ - 315^\circ$.

Lote 2

Foi realizada uma segunda simulação para o material do lote 2. A única diferença entre esta simulação e a anterior são os coeficientes de anisotropia utilizados, que nesta foram os correspondentes aos obtidos para o segundo lote de material.

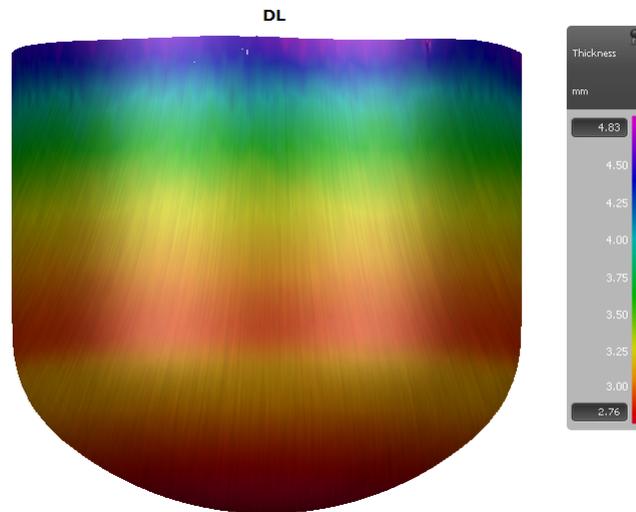


Figura 4.7: Distribuição da espessura em mm, do lote 2.

Na Fig. 4.7 pode-se observar que, para este lote, as orelhas são menos acentuadas no entanto continuam a verificar-se a 45° da direção de laminagem. Consecutivamente a maior espessura volta a verificar-se a 90° e a menor a 45° . Nos ensaios experimentais realizados, identificou-se a maior espessura como ocorrendo a 90° e a menor espessura a 180° , o que leva a concluir que, para estes coeficientes de anisotropia, os resultados obtidos experimentalmente diferem dos da simulação numérica.

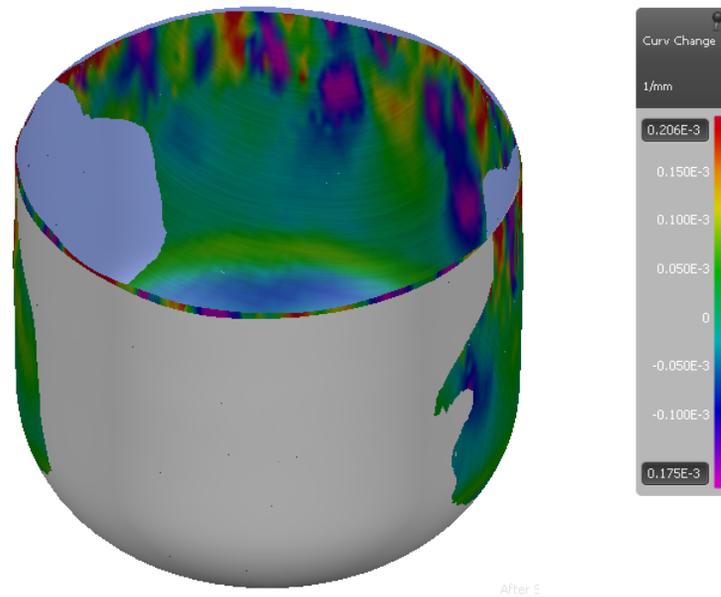


Figura 4.8: Variação da curvatura por mm, do lote 2.

Uma vez mais, o resultado da variação da curvatura encontra-se multiplicado por um fator de 20. O menor diâmetro verifica-se na direção de laminagem e o maior encontra-se na direção transversal. Este resultado apresenta um desfasamento de 45° do que se obteve experimentalmente.

Isotrópico

Uma vez que a simulação não replicou totalmente a realidade, procedeu-se a uma simulação de um material isotrópico de modo a poder avaliar a sensibilidade do programa e possíveis interferências nos resultados anteriores. Os resultados da variação da espessura e ovalização encontram-se nas Fig. 4.9 e 4.10, respetivamente.

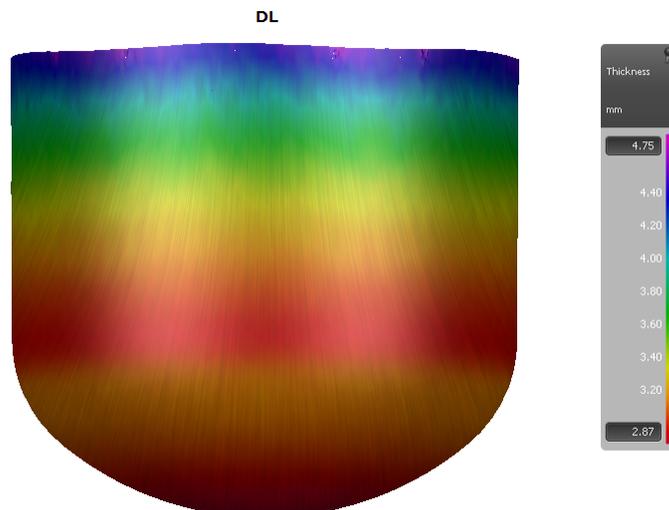


Figura 4.9: Distribuição da espessura, em mm, para um material isotrópico.

Um material isotrópico apresenta $r_0 = r_{45} = r_{90} = 1$ e $\Delta r = 0$ o que significa que, teoricamente, tem as mesmas propriedades em todas as direções ($\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3$). Deste modo seria de esperar obter uma peça com a distribuição de espessura e de tensões uniformes e consequentemente não existiriam orelhas. Tal não se verifica, podendo se observar orelhas nos resultados tal como nas simulações anteriores, apesar de menos evidentes.

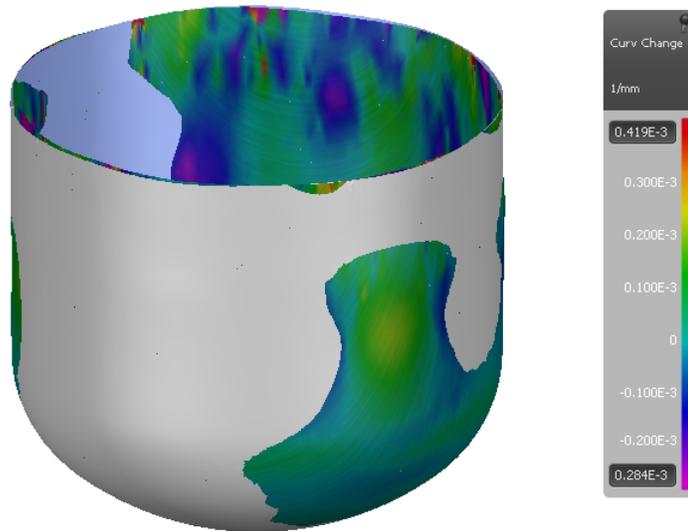


Figura 4.10: Variação da curvatura por mm, para um material isotrópico.

Na Fig. 4.10 observa-se a variação da curvatura após o retorno elástico multiplicada por um fator de 20. Uma vez que se está a analisar o material isotrópico esperaria-se observar uma variação homogênea, o que não se verifica. Podemos então concluir que o modelo utilizado do *AutoForm*[®] não reproduz os resultados verificados na prática. Assim, estes resultados foram desconsiderados e procedeu-se a nova análise utilizando outro Software.

4.2 ABAQUS[®]

Uma vez que os resultados obtidos com o *AutoForm*[®] não mostraram uma reprodutibilidade viável dos resultados obtidos experimentalmente, realizou-se uma segunda simulação de elementos finitos utilizando o programa ABAQUS\EXPLICIT que realiza as análises através de uma formulação explícita sendo por isso adequado a problemas de curta duração e de carregamentos dinâmicos onde se encontra o processo de conformação plástica (descida do punção) [79, 80].

4.2.1 Discretização da ferramenta e do esboço

Há três diferentes tipos de elementos que poderiam ter sido utilizados para modelar o esboço e as ferramentas: contínuos ou elementos sólidos, elementos de casca ou elementos de membrana. Para esta análise optou-se pelo uso de elementos de casca uma vez que tem em consideração a variação de espessura nos resultados [79].

Com base na simetria do processo e de modo a reduzir o tempo do CPU, foi apenas modelado um quarto do esboço e das ferramentas (Fig. 4.11) [72].

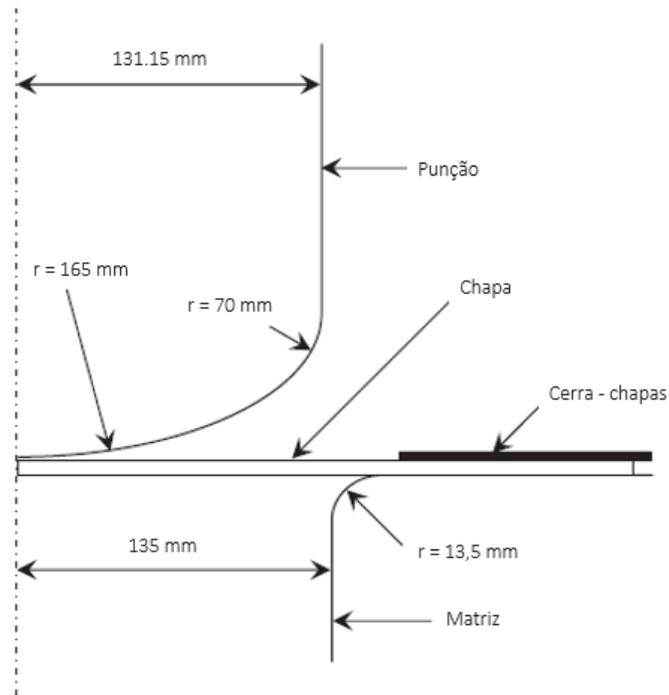


Figura 4.11: Geometria das ferramentas.

As ferramentas são consideradas rígidas como tal não é assumida deformação nestas partes durante o processo. Utilizaram-se elementos de 4 e 3 nós, tridimensionais bilineares (R3D4 na nomenclatura do ABAQUS®), uma vez que as ferramentas são tridimensionais em casca e rígidas. Na tabela seguinte encontra-se o número de elementos de cada ferramenta.

Tabela 4.2: Número de elementos finitos das ferramentas da simulação numérica.

Ferramenta	Número de elementos
Cerra - chapas	209
Matriz	400
Punção	539

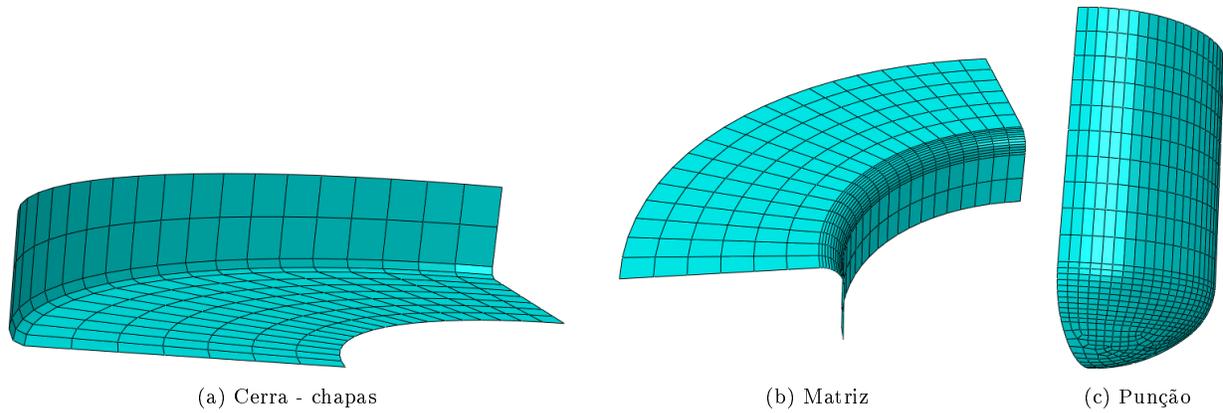


Figura 4.12: Malha das ferramentas.

A chapa foi modelada como uma casca deformável, composta por 3125 elementos de 4 nós com integração reduzida (S4R na nomenclatura do *ABAQUS*[®]). Considerou-se a malha estruturada como se pode observar na Fig. 4.13.

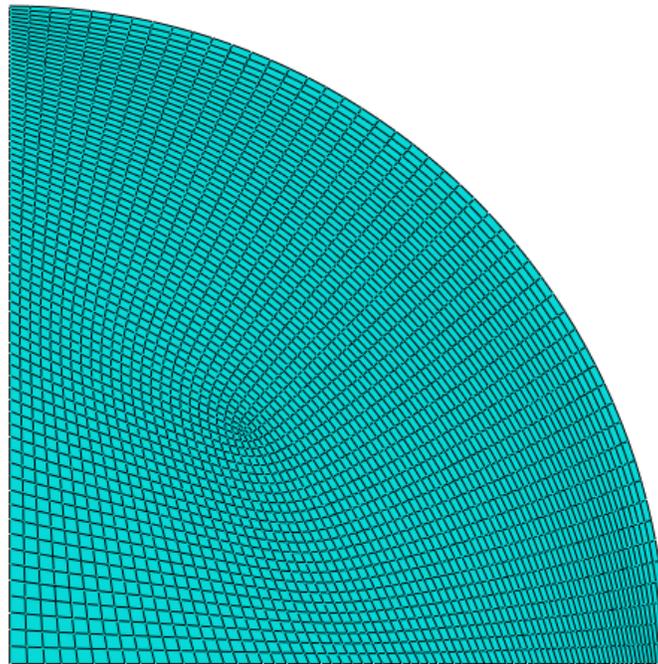


Figura 4.13: Malha da chapa.

4.2.2 Modelação do material

Uma vez mais, o material utilizado nas simulações foi o aço laminado a quente P310Nb. Este material foi tratado como um material elastoplástico e a curva tensão-deformação foi aproximada e extrapolada utilizando a lei de encruamento proposta por Ludwick com encruamento isotrópico. Os parâmetros que definem a anisotropia no *ABAQUS*[®] consistem numa razão entre a tensão de cedência em diferentes direções e a tensão de referência:

$$\begin{aligned}
R_{11} &= \frac{\sigma_{11}}{\sigma_0} \\
R_{22} &= \frac{\sigma_{22}}{\sigma_0} \\
R_{33} &= \frac{\sigma_{33}}{\sigma_0} \\
R_{12} &= \frac{\sigma_{12}}{\sigma_0} \\
R_{13} &= \frac{\sigma_{13}}{\sigma_0} \\
R_{23} &= \frac{\sigma_{23}}{\sigma_0}
\end{aligned} \tag{4.2}$$

Estes parâmetros podem ser relacionados com as constantes F, G, H, L, M e N do critério de Hill do seguinte modo:

$$\begin{aligned}
F &= \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_{22}^2} + \frac{1}{R_{33}^2} - \frac{1}{R_{11}^2} \right) \\
G &= \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_{11}^2} + \frac{1}{R_{33}^2} - \frac{1}{R_{22}^2} \right) \\
H &= \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_{11}^2} + \frac{1}{R_{22}^2} - \frac{1}{R_{33}^2} \right) \\
L &= \frac{3}{2R_{23}^2} \\
M &= \frac{3}{2R_{13}^2} \\
N &= \frac{3}{2R_{12}^2}
\end{aligned} \tag{4.3}$$

Estas constantes podem ser calculadas usando os resultados dos ensaios de anisotropia, como visto na secção 2.1.1.

Na tabela seguinte encontram-se as propriedades mecânicas do aço que foram utilizadas nesta análise.

Tabela 4.3: Propriedades mecânicas do aço P310Nb para dois lotes diferentes, utilizadas no ABAQUS®.

Material	Densidade ρ [kg/m ³]	Módulo de Elasticidade E [GPa]	Coeficiente de Poisson ν	Parâmetros da lei de Ludwick			Parâmetros do critério de Hill 48			
				σ_0	K	n	F	G	H	N
Lote 1	7.85	210	0.3	19.98	819.12	0.206	0.5956	0.5408	0.4591	1.5907
Lote 2	7.85	210	0.3	19.98	819.12	0.206	0.5510	0.5327	0.4673	1.5044

4.2.3 Condições do processo

As condições de contacto foram implementadas como sendo “surface to surface” e a função “penalty contac method” foi utilizada de modo a impor o contacto intermitente e a condição de deslizamento entre as ferramentas e a chapa de metal uma vez que é mais adequada do que os métodos cinemáticos para o contacto envolvendo corpos rígidos então apresenta problemas devido a conflitos com outros tipos de restrições [81]. O coeficiente de atrito definido para todos os pares ferramenta\esboço foi de 0.15.

As condições do processo durante a simulação devem ser análogas às condições experimentais. Para tal as condições de fronteira aplicadas são divididas em dois steps: no primeiro definem-se as restrições e no segundo é atribuída a força ao cerra - chapas e o deslocamento ao punção. A matriz considera-se encastrada. O punção tem todos os deslocamentos e rotações restringidos exceto no eixo dos zz onde tem aplicado um deslocamento de 300 mm. Do mesmo modo, o cerra-chapas também tem todos os deslocamentos e rotações restringidos exceto no eixo dos zz onde tem aplicada uma força de 85.8 kN (correspondente a um quarto dos 343.2 kN aplicados na obtenção das peças em estudo). Relativamente às condições de fronteira do esboço, uma vez que apenas foi desenhado um quarto da chapa, tem que se garantir a sua simetria. Para esse fim,

definiu-se que a aresta do eixo dos xx é simétrica à do eixo dos yy, e igualmente, a aresta do eixo dos yy é simétrica à do eixo dos xx.

Tabela 4.4: Condições de fronteira.

	Translações			Rotações		
	X	Y	Z	X	Y	Z
Matriz	0	0	0	0	0	0
Punção	0	0	300 mm	0	0	0
Cerra - chapas	0	0	85.8 kN	0	0	0

A velocidade do punção foi definida como sendo 10 m/s . Para isso foi utilizada uma curva de amplitude “smooth step” pois uma carga instantânea poderia induzir a propagação de tensões produzindo resultados indesejáveis enquanto que aumentando gradualmente a carga do zero minimiza esses efeitos [82].

4.2.4 Resultados das simulações

Inicialmente, para comprovar a sensibilidade do programa simulou-se uma operação de embutidura para um material isotrópico.

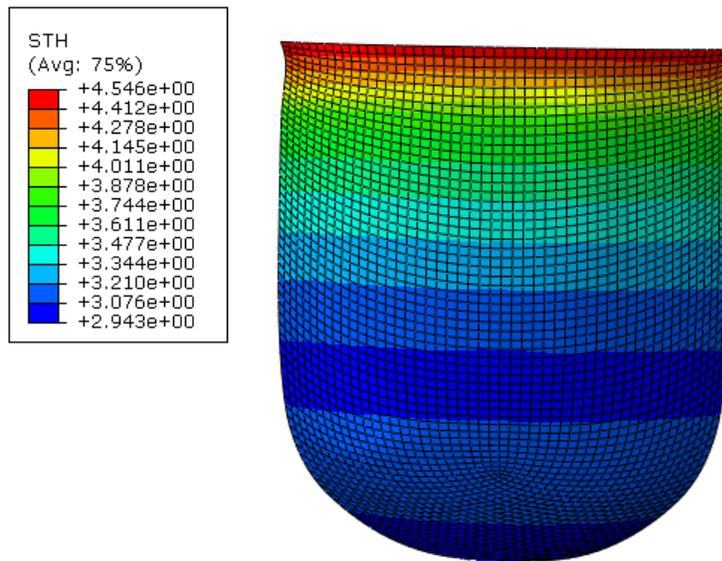


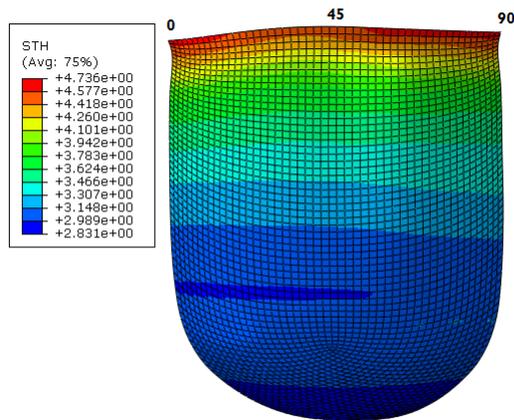
Figura 4.14: Distribuição da espessura, em mm.

Nos resultados obtidos para o material isotrópico não se verifica a existência de orelhas de embutidura. Na Fig. 4.14 que apresenta a distribuição da espessura em mm observa-se que essa distribuição é uniforme ao longo de cada seção.

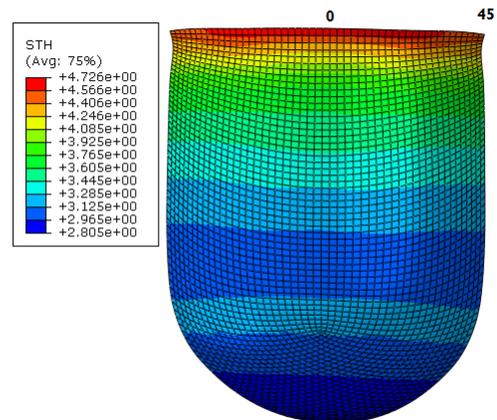
Uma vez que estes resultados vão de encontro ao previsto na teoria realizaram-se as simulações com os coeficientes de anisotropia correspondentes aos lotes 1 e 2.

Lote 1

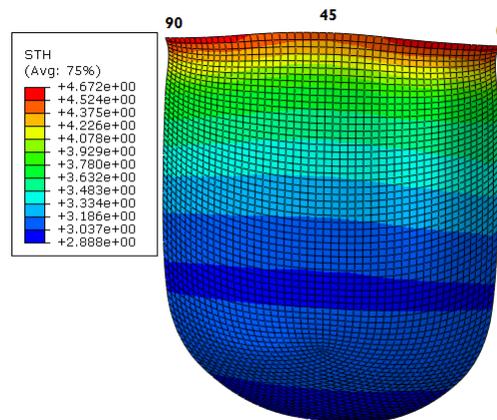
Com os valores de anisotropia do lote 1, os resultados que se obtiveram para a distribuição de espessuras, em mm, encontram-se na Fig. 4.15.



(a) Direção de laminagem paralela à frente da prensa



(b) Direção de laminagem orientada a 45° da frente da prensa



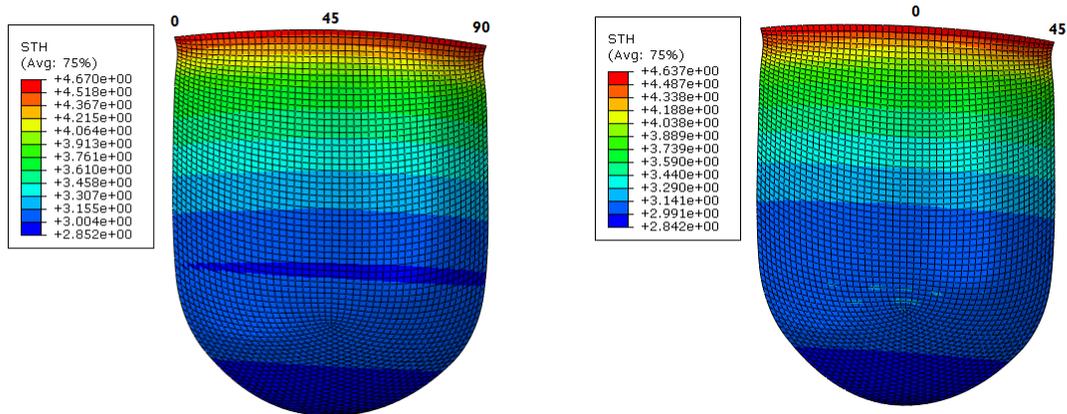
(c) Direção de laminagem perpendicular à frente da prensa

Figura 4.15: Distribuição da espessura em mm para as peças com o comportamento mecânico do lote 1.

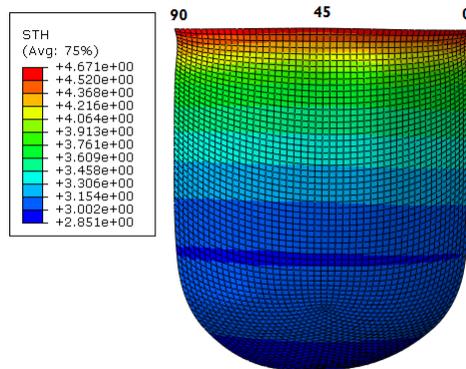
Pode-se observar que a formação das orelhas ocorre a 45° da direção de laminagem para as três orientações de embutidura. Assim, verifica-se que a maior espessura acontece para os 0° e os 90° tal como se verificou na prática.

Lote 2

Os resultados obtidos, para a variação da espessura em mm, com os coeficientes de anisotropia do segundo lote encontram-se na Fig. 4.16



(a) Direção de laminagem paralela à frente da prensa (b) Direção de laminagem orientada a 45° da frente da prensa



(c) Direção de laminagem perpendicular à frente da prensa

Figura 4.16: Distribuição da espessura em mm para as peças com o comportamento mecânico do lote 2.

Uma vez mais pode-se verificar que a formação das orelhas acontece a 45° da direção de laminagem para as três orientações de embutidura. Estes resultados vem de encontro aos resultados experimentais.

Apesar de o modelo do *ABAQUS*[®] reproduzir a variação da espessura, a ovalização não foi considerada pois não se conseguiram obter resultados viáveis com o modelo utilizado.

4.3 Conclusões

As dificuldades que foram encontradas ao longo deste capítulo estão relacionadas com a escolha e execução do modelo. Inicialmente foi utilizado um modelo no programa *AutoForm*[®] que não reproduziu a tendência da variação de geometria obtida nos resultados experimentais anteriores. De modo a contornar essa limitação do *AutoForm*[®], utilizou-se um segundo software.

No desenvolvimento do modelo do *AutoForm*[®], inicialmente importaram-se as ferramentas (tal como foi feito com o *AutoForm*[®]) no entanto, esta geometria mostrou-se incompatível com algumas das operações necessárias e por esta razão optou-se por desenhar diretamente as ferramentas neste programa. A escolha da lei do material foi igualmente importante devido às deformações a que o esboço está sujeito. O deslocamento do punção foi definido como instantâneo e apenas posteriormente é que foi utilizada uma amplitude “smooth step” de modo a diminuir a propagação de tensões indesejáveis. Outro dos problemas na obtenção deste modelo está relacionado com a discretização da malha. Foram testadas várias malhas e numa análise inicial utilizou-se uma malha com partições que apresentava bons resultados com o material anisotrópico contido, quando se simulavam os lotes anisotrópicos introduzia um erro que levava à interrupção da simulação. Deste modo preferiu-se a malha estruturada, mostrada na Fig. 4.13. Apesar de o modelo utilizado no *ABAQUS*[®] reproduzir a variação da espessura o mesmo não considerou o retorno elástico e consequentemente a ovalização não faz parte dos resultados obtidos.

Comparando os resultados dos modelos utilizados, concluiu-se o modelo utilizado no *AutoForm*[®] reproduziu de forma mais adequada a distribuição de espessura das peças embutidas. Assim, pode utilizar-se este modelo para prever a influência que a caracterização mecânica do material irá ter na execução das coquilhas da garrafa de 30L.

Capítulo 5

Considerações finais

5.1 Síntese e conclusões do trabalho realizado

As garrafas de gás são sujeitas a vários processos de fabrico durante a sua produção até à obtenção do produto final, nomeadamente embutidura e soldadura a laser. A embutidura, operação com a qual se inicia o fabrico das garrafas de gás, é um processo de conformação de chapa complexo ao qual podem estar associados defeitos que irão afetar operações seguintes, onde se inclui a soldadura a laser.

Esta dissertação foi desenvolvida com a finalidade de analisar a influência que a caracterização mecânica do material tem na existência de defeitos e imperfeições de peças embutidas, e assim estabelecer uma metodologia que permita diminuir ou mesmo eliminar as limitações impostas. Nesse sentido, foi efetuado um estudo preliminar sobre caracterização do comportamento mecânico dos materiais e dos processos de fabrico de embutidura e soldadura a laser, com o intuito de introduzir os conceitos necessários ao desenrolar do trabalho.

Este trabalho passou por várias fases de análise. Foram realizados ensaios de caracterização mecânica do aço utilizado na produção das botijas com recurso aos ensaios de tração e de anisotropia. Com os resultados destes ensaios verificou-se que o material em estudo é anisotrópico com as deformações dominantes na direção da espessura.

Neste trabalho, foram analisadas 21 coquilhas. Estas foram embutidas com diferentes orientações do esboço relativamente à ferramenta de embutidura. Inicialmente analisou-se uma peça embutida com a direção de laminagem perpendicular à frente da prensa, uma com a direção de laminagem a 45° da frente da prensa e outra com a direção de laminagem paralela à frente da prensa e numa segunda etapa analisaram-se 6 peças para cada uma das orientações anteriores. Nas coquilhas foi determinada a espessura e a geometria com o objetivo de definir a influência do comportamento mecânico nestas duas variáveis. A análise de resultados permitiu concluir:

- as peças analisadas apresentavam uma tendência da variação de geometria e da espessura semelhante independentemente da orientação com que são colocadas na prensa;
- a variação de espessura e a evolução da geometria obtidas estão diretamente relacionadas com a anisotropia exibida pela chapa de aço utilizada na produção das coquilhas.

Tendo como base os resultados experimentais, utilizou-se a simulação numérica para tentar prever a influência que o comportamento mecânico tem nos defeitos analisados. Para isso, utilizou-se o *AutoForm*[®] para simular a operação de embutidura. Os resultados obtidos com este programas contudo não reproduziram perfeitamente a análise experimental realizada. Esta limitação deve-se ao facto de o modelo utilizado não

ter sido o mais adequado. Recorreu-se a um segundo programa de simulação, o *ABAQUS*[®]. Este software previu de forma bastante aceitável a distribuição de espessura ao longo do perímetro circunferencial. No entanto, deparamo-nos uma vez mais com limitações com o modelo utilizado que não considerou o retorno elástico e consequente ovalização da geometria obtida.

Em suma, observou-se que, com os materiais anisotrópicos, não se obtém peças com a distribuição da espessura homogênea e por isso pode concluir-se que o comportamento mecânico influencia a evolução de espessura e a ovalização. A ovalização afeta a qualidade da soldadura, que requer que se respeite certas tolerâncias. Esta variação entre o raio das peças consegue-se minimizar se houver o cuidado de juntar as coquilhas alinhando-as com a direção de laminagem.

5.2 Desenvolvimentos futuros

Apesar do trabalho realizado durante esta dissertação ter alcançado resultados bastante satisfatórios, o tempo disponível apenas permitiu fazer uma análise inicial do que se pretendia inicialmente. Assim apresentam-se três sugestões de trabalhos a desenvolver futuramente.

Melhorar os modelos de simulação

Uma vez que os resultados obtidos com a simulação não reproduziram perfeitamente os resultados obtidos um dos trabalhos futuros passa por melhorar os modelos de simulação. Deste modo deve desenvolver-se um modelo em *ABAQUS*[®] capaz de prever o retorno elástico para materiais anisotrópicos e assim prever a ovalização. Igualmente, pode-se otimizar o modelo utilizado no *AutoForm*[®] com o objetivo de prever de forma eficaz a influência dos coeficiente de anisotropia na formação de orelhas de embutidura.

Analisar as garrafas de 30L

As garrafas CoMet de 30L são as mais problemáticas relativamente ao problema em questão, uma vez que são submetidas a duas etapas de embutidura e tem uma maior altura do embutido. Como tal deveria-se seguir a mesma linha de trabalhos para a sua análise:

- Embutir 18 coquilhas da garrafa de 30L - 6 com a direção de laminagem paralela à frente da prensa, 6 com a direção de laminagem orientada a 45° da frente da prensa e 6 com a direção de laminagem perpendicular à frente da prensa - utilizando sempre o mesmo lote e efetuando a primeira operação de embutidura na AMTROL-ALFA e a apenas a segunda na Silampos;
- Embutir 18 coquilhas da garrafa de 30L - 6 com a direção de laminagem paralela à frente da prensa, 6 com a direção de laminagem orientada a 45° da frente da prensa e 6 com a direção de laminagem perpendicular à frente da prensa - utilizando sempre o mesmo lote e efetuando as duas etapas de embutidura na Silampos de seguida;
- Fazer a análise de desvios de espessura e o geometria utilizando o procedimento utilizado nesta dissertação e repetir os ensaios de anisotropia.
- Analisar de que modo as propriedades mecânicas e o tempo decorrido entre as operações de embutidura influenciam os defeitos.

Marcação da direção de laminagem na chapa

Uma vez que se concluiu que se as coquilhas fossem alinhadas pela direção de laminagem o desvio entre elas seria minimizado, uma das hipóteses de trabalho futuro é a implementação da marcação da direção de laminagem das chapas antes de embutir e garantir posteriormente que quando as coquilhas são juntas, aquando da operação de soldadura, se tem a direção de laminagem alinhada. Ao adotar esta metodologia, pretende-se diminuir as peças que são consideradas defeituosas e inaceitáveis na operação de soldadura a laser.

Bibliografia

- [1] Inegi - instituto de engenharia mecânica e gestão industrial. <http://www.inegi.pt/instituicao.asp?idm=1&idsubm=5&LN=>
- [2] Amtrol-alfa. <http://www.amtrol-alfa.com/>.
- [3] Mohammad Z. Kabir. Finite element analysis of composite pressure vessels with a load sharing metallic liner. *Composite Structures*, 49:247–255, 2000.
- [4] Rudolph J. Scavuzzo Earl Livingston. Pressure vessels. 1998.
- [5] Sp systems guide to composites. Technical report, SP Systems.
- [6] Pedro Vieira; A. Tenreiro; T. Oliveira. The increase of sustainability in cylinder manufacturing. *Clean Techn Environ Policy*, 12:83 – 86, 2010.
- [7] J.L. Alves L.F. Menezes R. Padmanabhana, M.C. Oliveira. Numerical simulation and analysis on the deep drawing of lpg bottles. *Journal of Materials Processing Technology*, 200:416 – 423, 2008.
- [8] KOU Hong-chao CHANG Hui LI Jin-shan ZHOU Lian GAO En-zhi, LI Hong-wei. Influences of material parameters on deep drawing of thin-walled hemispheric surface part. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 19:433 – 437, 2009.
- [9] Amit Mukund Joshi. Strain studies in sheet metal stamping. <http://jamesskaar.hopto.org:8080/download-literature/engineering/tools/metalworking>
- [10] *Encyclopedia of Materials: Science and Technology*, chapter Sheet steel: low carbon, pages 8456 – 8462. Elsevier Science Ltd., 2001.
- [11] Muhammad Safwan Bin Ismail. Experimental study of formability of sheet metal in deep drawing process. Master’s thesis, Universiti Malaysia Pahang, 2010.
- [12] Rolling process, 2010.
- [13] *Encyclopedia of Materials: Science and Technology*, chapter Hot rolling, pages 3836 – 3843. Elsevier Science Ltd., 2001.
- [14] Laminagem. <http://wiki.ued.ipleiria.pt/wikiEngenharia/index.php/Laminagem>, 2010.
- [15] Mikell P. Groover. *Fundamentals of modern manufacturing: materials, processes and systems*. 2010.
- [16] Cristiano Roosevelt Cerceau. Estampabilidade de chapas finas e laminadas a quente. Master’s thesis, Rede Temática em Engenharia de Materiais: UFOP; CETEC; UEMG, 2004.

- [17] Caetano Nunes da Silva. Influência da laminação de encruamento sobre a planicidade e propriedades mecânicas de tiras de aço laminadas a quente. Master's thesis, Rede Temática em Engenharia de Materiais: UFOP; CETEC; UEMG, 2007.
- [18] ArcelorMittal. Steels for gas containers.
- [19] Vukota Boljanovic. *Sheet metal forming process and die design*. 2004.
- [20] M. Bäker J. Rösler, H. Harders. *Mechanical behaviour of engineering materials: metals, ceramics, polymers and composites*. Springer.
- [21] Frank B Marlow. <http://www.globalspec.com/reference/80925/203279/chapter-12-welding-metallurgy>, 2001.
- [22] J. R. Davis, editor. *Tensile testing*. ASM International, 2^o edição, 2004.
- [23] Jean Barralis; Gérard Maeder. *Prontuário de metalurgia*. Fundação Calouste Gulbenkian, 2^o edição, 1997.
- [24] Ramesh Singh. *Applied welding engineering: processes, codes and standards*, chapter Mechanical properties and testing of metals, pages 87 – 94. 2012.
- [25] Jr. William D. Callister. *Fundamentals of materials science and engineering*, chapter Chapter 7 Mechanical properties, pages 147 – 196. John Wiley & Sons, Inc, 2001.
- [26] William F. Hosford; Robert M. Caddell. *Metal forming: mechanics and metallurgy*. Segunda edição, 1993.
- [27] William F. Hosford. *Mechanical behavior of materials*. Cambridge University Press, 2009.
- [28] Strain-life fatigue analysis.
- [29] Ing. E.V. ter Wijlen. Optimisation of a deep drawing process with experimental validation, applied to an automotive deep drawing process of a b-pillar. Master's thesis, University of Twente, 2007.
- [30] RudiDenys Stijn Hertele, WimDeWaele. A generic stress-strain model for metallic materials with two-stage strain hardening behaviour. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, Volume 46:513–531, 2011.
- [31] George E. Dieter; Howard A. Kuhn; S. Lee Semiatin, editor. *Handbook of workability and process design*. 2003.
- [32] Z. Marciniak; J. L. Duncan; S. J. Hu. *Mechanics of Sheet Metal Forming*. 2002.
- [33] H.J. Bunge; K. Pöhlhndt; A.E. Tekkaya; D. Banabic. *Formability of metallic materials*. Springer, 2000.
- [34] J. Ferreira Duarte A. Barata da Rocha. *Tecnologia da embutidura*. 1992.
- [35] Naval Kishor; D. Ravi Kumar. Optimization of initial blank shape to minimize earing in deep drawing using finite element method. *Journal of Materials Processing Technology*, pages 20–30, 2002.

- [36] Mauricio Centeno Lobão. Determinação de curvas llimit de conformação por procedimentos experimentais e simulação numérica do processo de estampaem. Master's thesis, Universidade Federal de Santa Catarina, 2003.
- [37] Dorel Banabic. *Sheet metal forming processes: constitutive modelling and numerical simulation*. Springer, 2010.
- [38] R. Hill. A theory of the yielding and plastic flow of anisotropic materials. *Proceedings: Mathematical, Physical and Engineering Science*, pages 281 – 297, 1948.
- [39] Pedro Manuel Cardoso Teixeira. "benchmarks"experimentais e modelação numéérica por elementos finitos de processos de conformação plástica. Master's thesis, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2005.
- [40] José Luís de Carvalho Martins Alves. *Simulação numérica do processo de estampagem de chapas*. PhD thesis, Universidade do Minho, 2003.
- [41] Miklós Tisza; Zsolt Lukács. Springback analysis of high strength dual-phase steels. *Procedia Engineering*, 2014:975 – 980, 81.
- [42] Michael L. Wenner. Overview - simulation of sheet metal forming. *Numisheet 2005: Proceedings of the 6th Internatioal Conference on Numerical Simulation of 3D Sheet Metal Forming Processes*, pages 3–7, 2005.
- [43] A. Barata da Rocha A Dias dos Santos, J. Ferreira Duarte. *Tecnologia da embutidura, princípios e aplicações*. 2005.
- [44] Schuler GmbH. *Metal forming handbook*. Springer-Verlag, 1998.
- [45] Miklós Tisza; Zoltán Péter Kovács. New method for predicting the formability of sheet metals. *Production Processes and Systems*, 5:45–54, 2012.
- [46] Claudia Girjob; Gabriel Racz; Octavian Bologa. The determination of the forming limit curve using a modular device. *Academic Journal of Manufacturing Engineering*, 8:39 – 44, 2010.
- [47] Kostas Papamantellos Christopher Oliver Gusek Wolfgang Bleck, Zhi Deng. A comparative study of the forming-limit diagram models for sheet steels. *Journal of Materials Processing Technology*, 83:223 – 230, 1998.
- [48] Najmeddin Arab; Abotaleb Javadimanesh. Theoretical and experimental analysis of deep drawing cylindrical cup. *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, pages 336–342, 2013.
- [49] Stefan Holmberg; Bertil Enquist; Per Thilderkvist. Evaluation of sheet metal formability by tensile tests. *Journal of Materials Processing Technology*, 145:72 – 83, 2004.
- [50] EPRI Project Manager; D. Gandy. Carbon steel handbook. Technical Report 1014670, Electric Power Research Institute, March 2007.
- [51] Kwansoo Chung; Dongun Kim; Taejoon Park. Analytical derivation of earing in circular cup drawing based on simple tension properties. *European Journal of Mechanics A/Solids*, pages 275–280, 2011.

- [52] Robert H. Wagoner; Hojun Lim; Myoung-Gyu Lee. Advanced issues in springback. *International Journal of Plasticity*, 45:3 – 20, 2013.
- [53] Jenn-Terng Gau; Gary L. Kinzel. A new model for springback prediction in which the baushinger effect is considered. *International Journal of Mechanical Sciences*, 43:1813 – 1832, 2001.
- [54] Aboozar Taherizadeh; Abbas Ghaei; Daniel E. Green; William J. Altenhof. Finite element simulation of springback for a channel draw process with drawbead using different hardening models. *International Journal of Mechanical Sciences*, 51:314 – 325, 2009.
- [55] R. Padmanabhana; M. C. Oliveira; J. L. Alves; L. F. Menezes. Influence of process parameters on the deep drawing of stainless steel. *Finite Elements in Analysis and Design*, 43:1062 – 1067, 2007.
- [56] V. Uthaisangskuk; S. Suranuntchai; S. Jirathearanat B. Chongthairungruang. Springback prediction in sheet metal forming of high strength steels. *Materials and Design*, 50:253 – 266, 2013.
- [57] E. Chu; Yu Xu. An elastoplastic analysis of flange wrinkling in deep drawing process. *International Journal of Mechanical Sciences*, 43:1421–1440, 2001.
- [58] W. Johnson T. X. Yu. The buckling of annular plates in relation to the deep-drawing process. *International Journal of Mechanical Sciences*, 24:175 – 188, 1982.
- [59] M. Kadkhodaya; M. . Moayyedean. Analytical elastic-plastic study on flange wrinkling in deep drawing process. *Scientia Iranica, Transactions B: Mechanical Engineering*, 18:250–260, 2011.
- [60] K. Y. Benyounis. *Prediction and optimization of residual stresses, weld-bead profile and mechanical properties of laser welded components*. PhD thesis, School of Mechanical and Manufacturing Engineering Dublin City University, December 2006.
- [61] Laser welding. laserline technical.
- [62] Klas Weman. *Welding processes handbook*. Woodhead Publishing Ltd.
- [63] Ivanilza Felizardo; Alexandre Queiroz Bracarense. Soldagem e corte a laser.
- [64] Parviz Asadi; Kamel Kazemi-Choobi; Amin Elhami. *New features on magnesium alloys*. 2012.
- [65] L. Quintines M. Rasmussem F.O. Olsem) P Pegas, H. Gouveia. Soldadura laser de sub-conjuntos para estampagem (tailored blanks). *Revista de Metalurgia*, 34:210 – 216, 1998.
- [66] David Havrilla. Design principles for laser welding. Technical report, University of Virginia, 2014.
- [67] Rosa Miranda. Soldadura híbrida. Technical report, DEMI-FCT-UNL, 2013.
- [68] JyotirmoyMazumder WilliamM. Steen. *Laser Material Processing*, chapter Laser Welding, pages 199 – 250. Springer-Verlag, 2010.
- [69] Nd:yag laser welding guide. Technical report, UNITEK MIYACHI CORPORATION, 2003.
- [70] M. Chiappini O. Brun G. Desplaces R. Bregnon S. Vanrostenberghe, J. Goudemez. New steel grades for light weight lpg cylinders. *Rev. Met. Paris*, 105:218 – 224, 2008.
- [71] Tecnologia naval e comportamento dos materiais no meio ambiente. Technical report, 2005-2006.

- [72] Hirpa L. Gelgele Tomasz Trzepiecinski. Investigation of anisotropy problems in sheet metal forming using finite element method. *International Journal of Material Forming*, 2010.
- [73] Standard test method for plastic strain ratio r for sheet metal.
- [74] G. Brabie; E. M. Costache; B. Chirita. Reduction of the sheet thickness variation and its negative effects on the accuracy of mini drawn parts using different geometries of tool components. *Precision Engineering*, 38:828 – 838, 2014.
- [75] Introduction to sheet metal forming processes. Technical report, Simtech, 1999.
- [76] Tiago José Martinho Soares. Análise técnica e económica do processo de estampagem a quente com aços microligados ao boro. Master's thesis, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2008.
- [77] A. Erman Tekkaya. State-of-the-art of simulation of sheet metal forming. *Journal of Materials Processing Technology*, 103:14 – 22, 2000.
- [78] Kuang-Hua Chang. *Product Manufacturing and Cost Estimating Using Cad/Cae*, chapter Chapter 4 - Sheet Metal Forming Simulation, pages 133 – 190. Academic Press, 2013.
- [79] M. Shahabizadeh A. Pourkamali Anaraki and B. Babae. Finite element simulation of multi-stage deep drawing processes and comparison with experimental results. *International Scholarly and Scientific Research & Innovation*, 6:553 – 557, 2012.
- [80] T. Trzepiecinski F. Stachowicz. Modelling of friction anisotropy of deepdrawing sheet in abaqus/explicit. *Archives of Foundry Engineering*, 10:47 – 52, 2010.
- [81] Contact modeling. Technical report, ABAQUS, Inc, 2005.
- [82] Quasi-static analyses. Technical report, ABAQUS, Inc, 2005.

Apêndices

Apêndice A

Curvas de tração

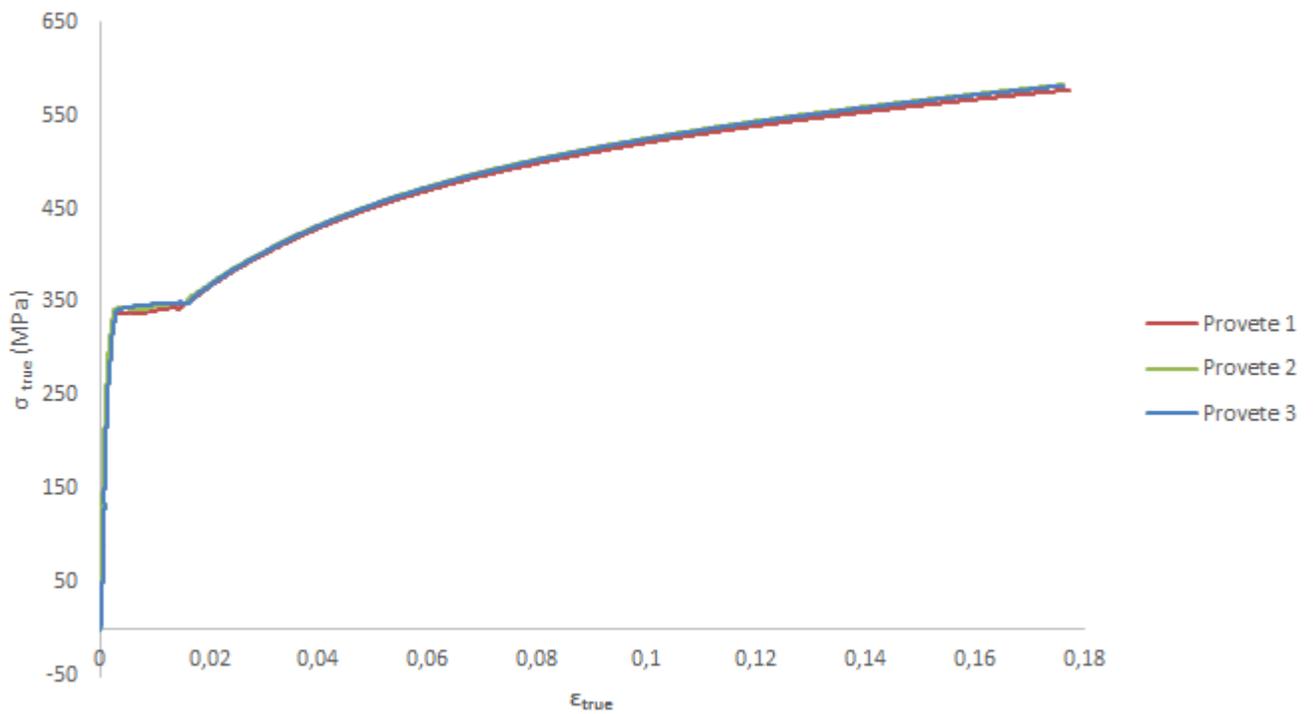


Figura A.1: Curva tensão-deformação para o provete orientado a 45° da direção de laminagem.

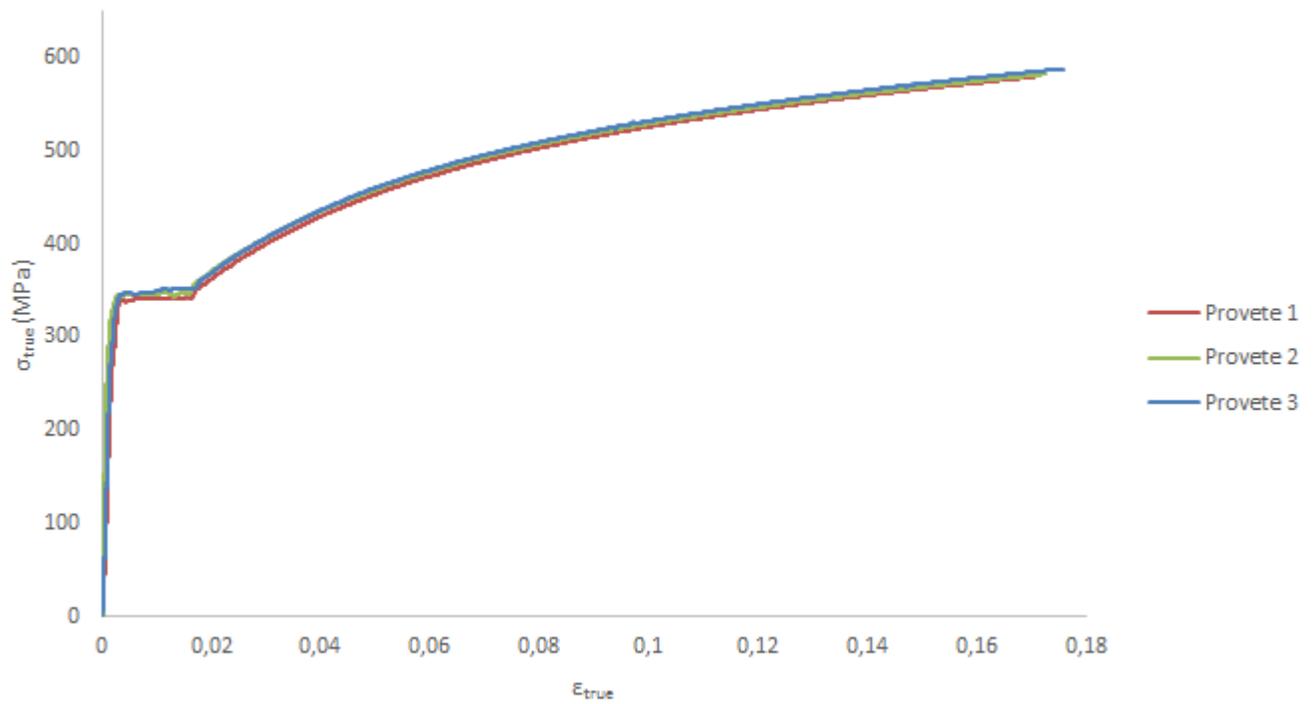


Figura A.2: Curva tensão-deformação para o provete da direção transversal.

Apêndice B

Curvas reais

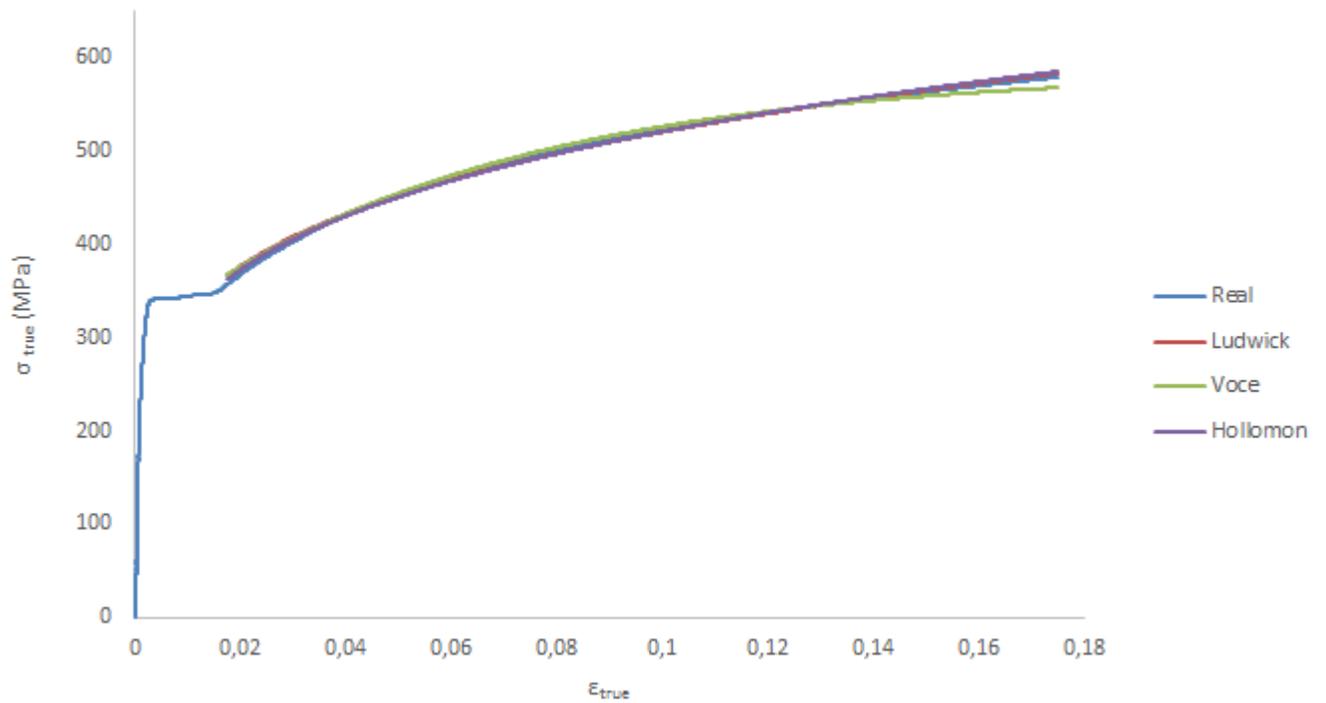


Figura B.1: Aproximações da curva real para o provete orientado a 45° da direção de laminagem.

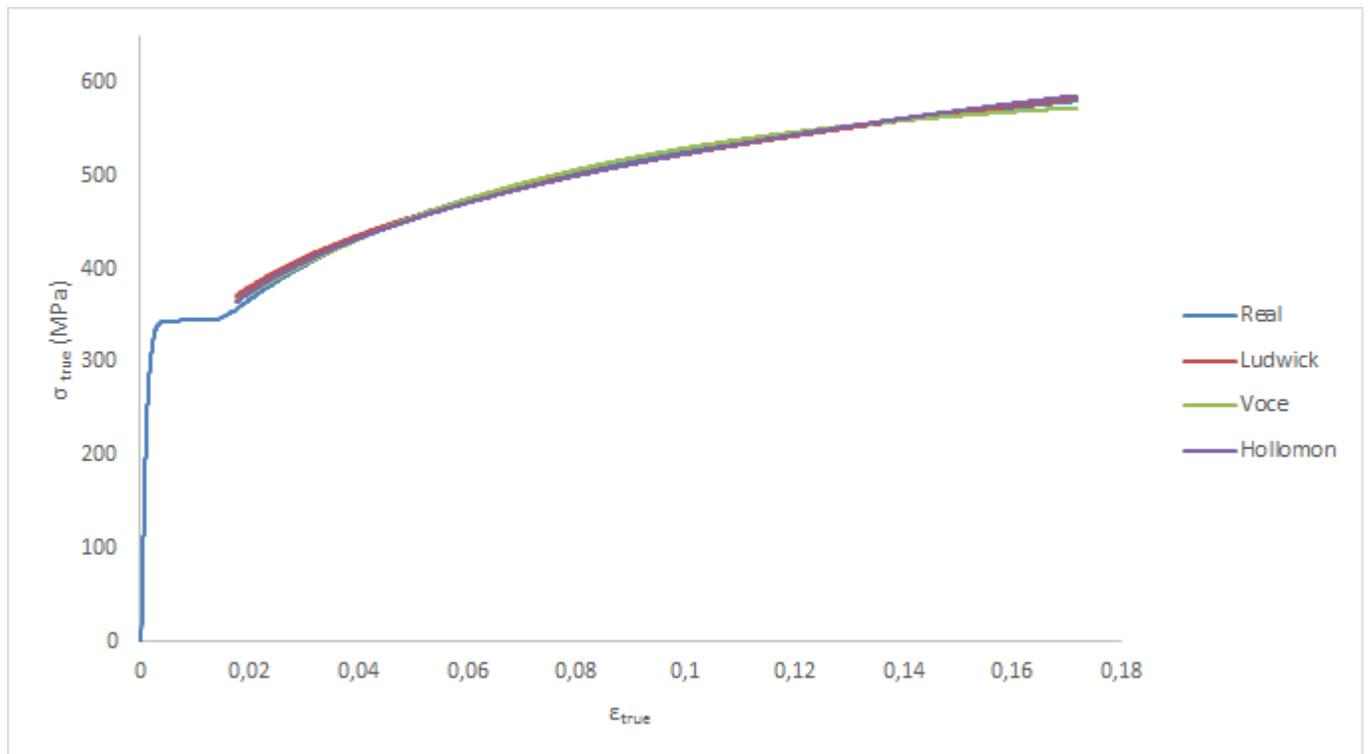


Figura B.2: Aproximações da curva real para a direção transversal.

Apêndice C

Curvas anisotropia

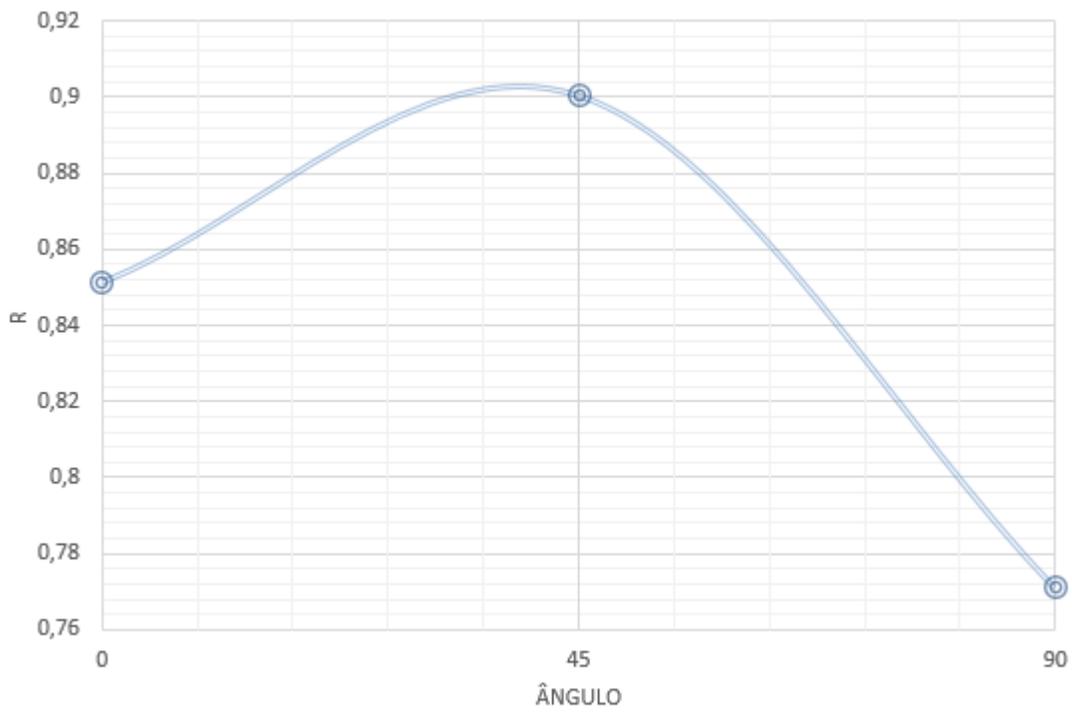


Figura C.1: Distribuição do coeficiente de anisotropia em função do ângulo relativamente à direção de laminagem, para o lote 1

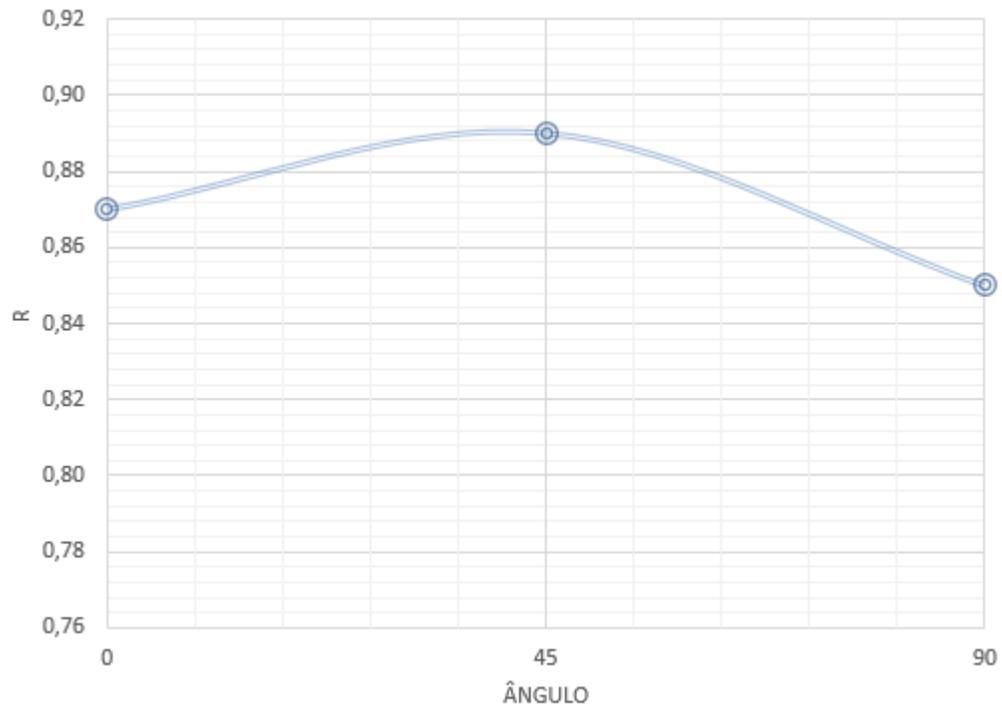


Figura C.2: Distribuição do coeficiente de anisotropia em função do ângulo relativamente à direção de laminagem, para o lote 2

Apêndice D

Variação do Diâmetro

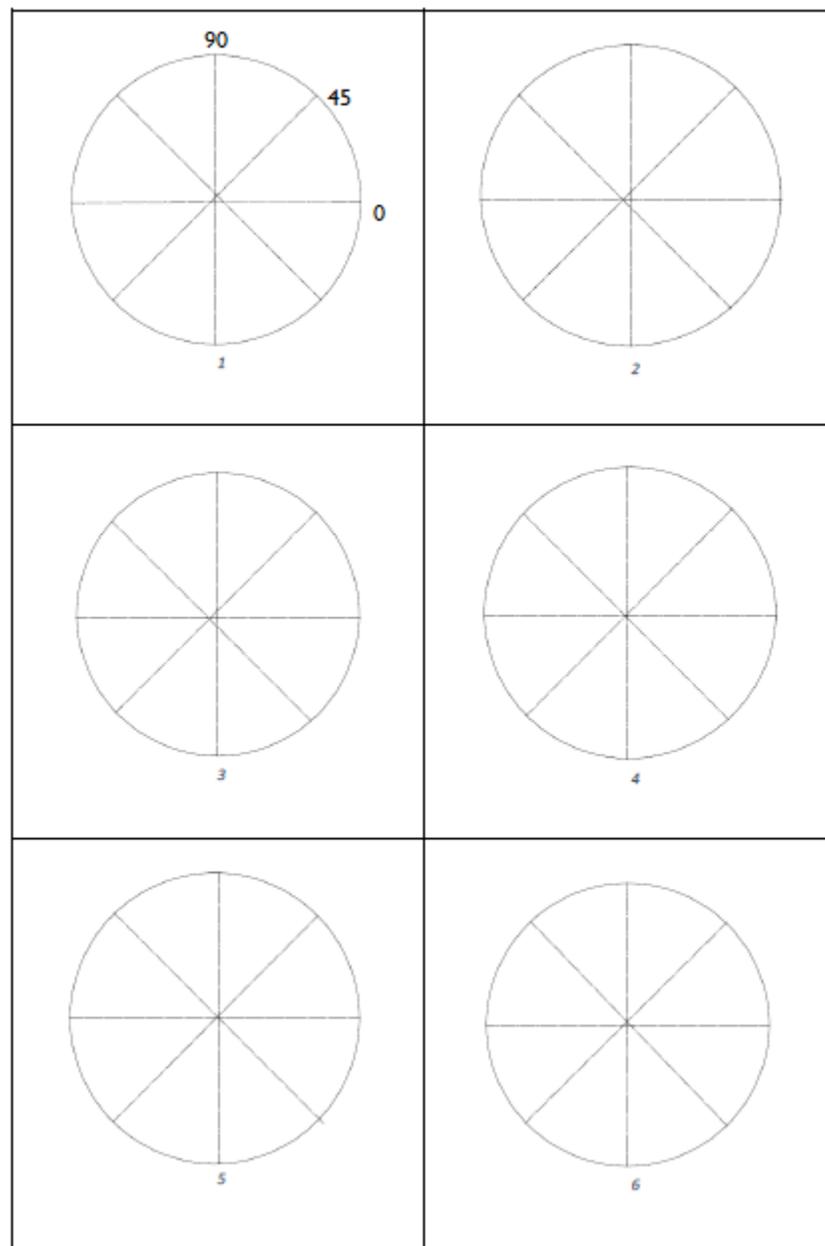


Figura D.1: Geometria obtida a partir dos pontos identificados nas peças embutidas com a direção de laminagem paralela à frente da prensa

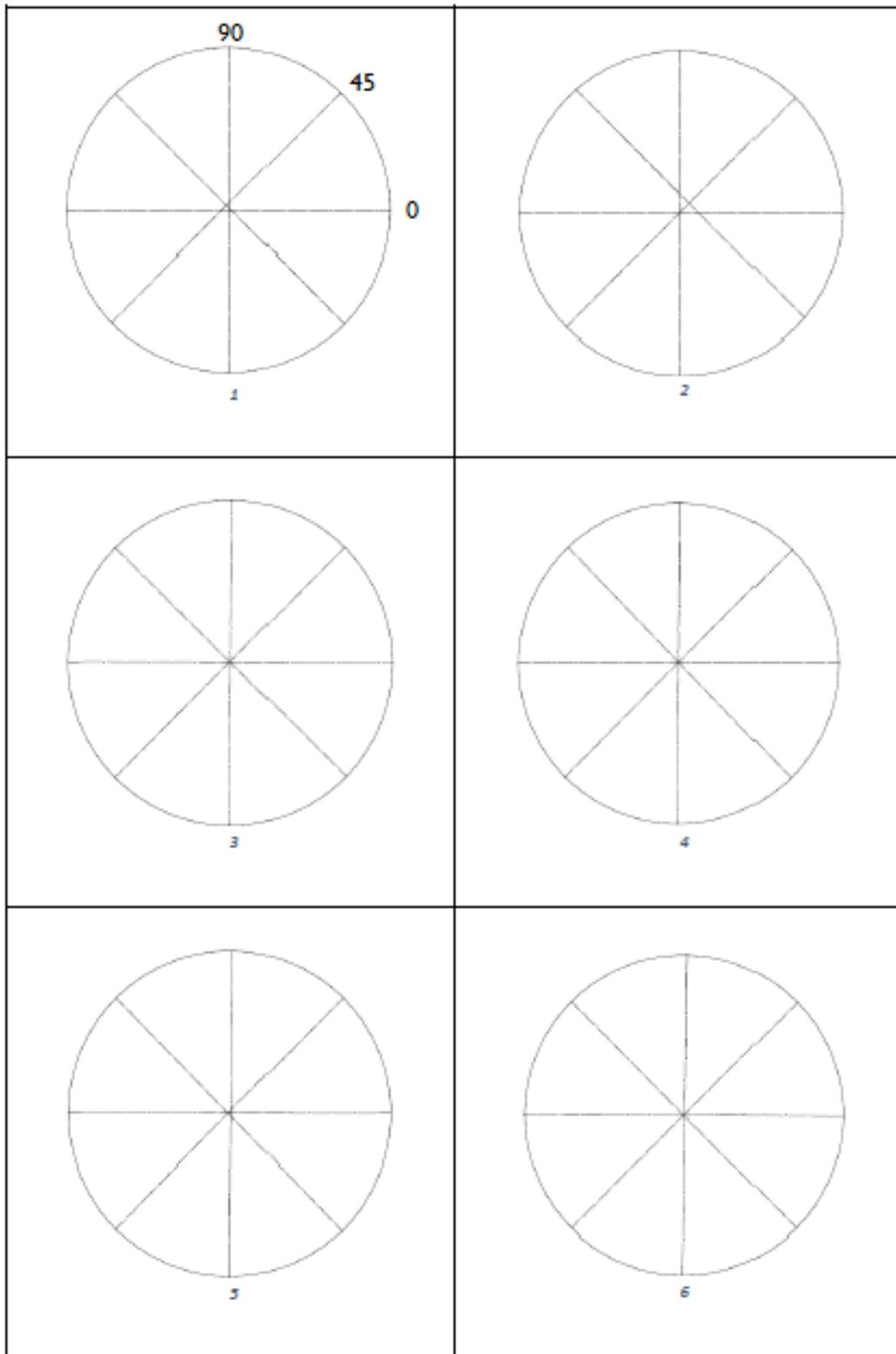


Figura D.2: Geometria obtida a partir dos pontos identificados nas peças embutidas com a direção de laminagem paralela à frente da prensa

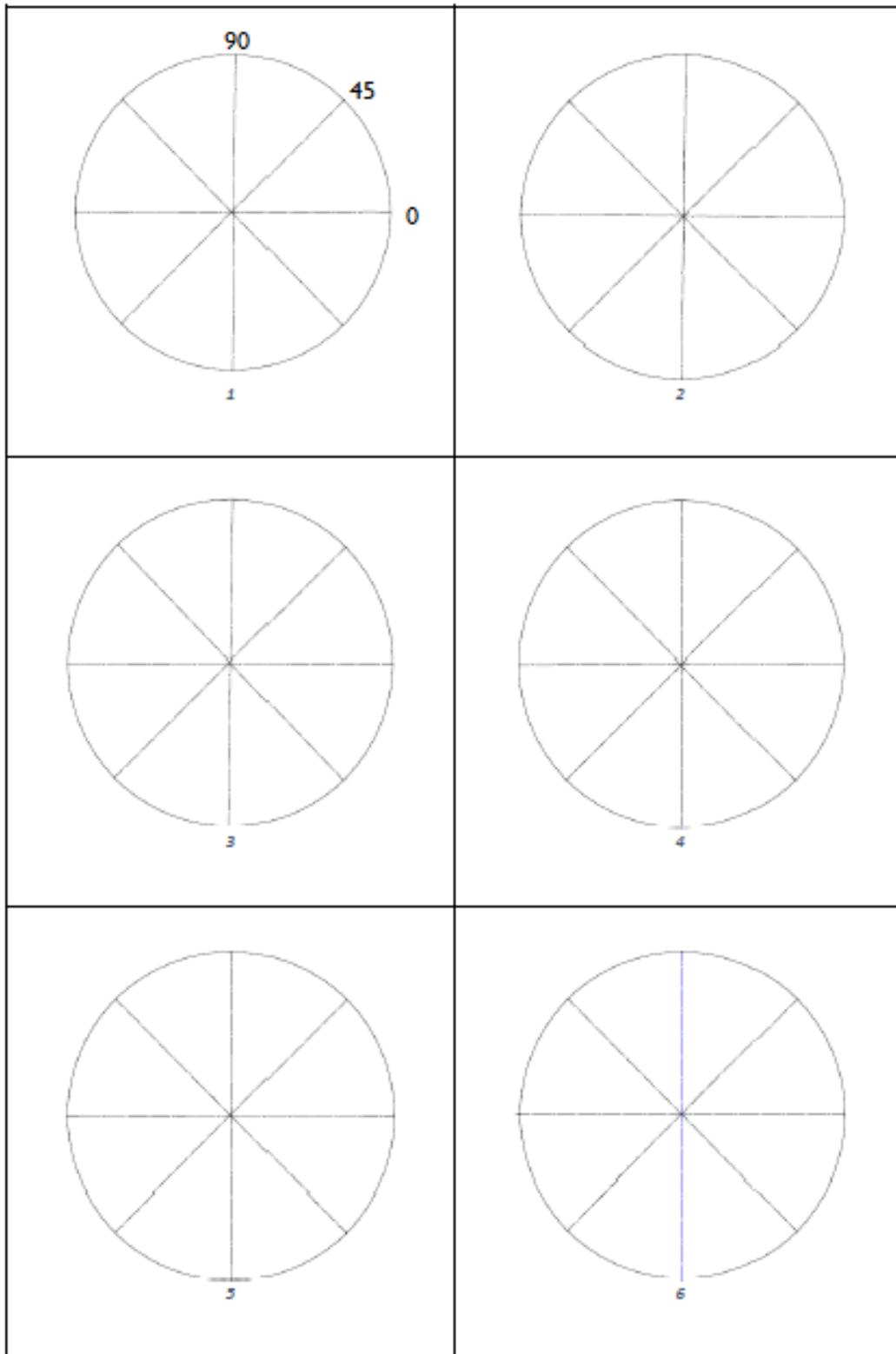


Figura D.3: Geometria obtida a partir dos pontos identificados nas peças embutidas com a direção de laminagem paralela à frente da prensa

