Comportamento Mecânico de Peças Hidroformadas

Jorge Manuel Lopes Ramalheira

Relatório do Projecto Final / Dissertação do MIEM

Orientador na FEUP: Prof. Renato Natal Jorge

FEUP

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Setembro 2008

Conteúdo

1 Introdução **6**
1.1 Contexto da dissertação 6

2 A hidroformagem de tubos **9**
2.1 Introdução 9
2.2 Os primórdios da hidroconformação 11
2.3 A década de 80 12
2.4 Dos anos 90 do século XX até hoje - o uso de simulações computacionais 15
2.5 O futuro da hidroconformação 18

3 O Processo de Hidroconformação **21**
3.1 Hidroconformação de Tubos 21
3.1.1 Introdução 21
3.1.2 Tipos ou classes de processo da hidroconformação tubular . . . 23
3.2 Hidroconformação de chapas 27
3.2.1 Introdução 27
3.2.2 Hidroconformação com um diafragma de membrana 28
3.2.3 Estampagem profunda hidromecânica 28
3.2.4 Conformação hidráulica de estiramento 29
3.2.5 Estampagem profunda e conformação de estiramento combinadas 29
3.2.6 Hidroconformação de peças duplas 30
3.3 Falhas típicas no processo de hidroconformação 31

4 Peças soldadas à medida **32**
4.1 Vantagens da utilização de *tailor welded blanks* 33
4.2 Desvantagens da utilização de TWBs 34
4.3 Potencialidades e filosofia de aplicação dos TWB 35
4.4 Investigação e desenvolvimento dos TWB e das suas aplicações 36
4.5 Peças soldadas à medida e Hidroconformação 37
4.6 Tubos soldados à medida 38

5 Equipamento do sistema de hidroconformação **41**
5.1 Prensas de hidroconformação 42
5.1.1 Requisitos da Prensa e Concepção para a Hidroconformação de Tubos 42
5.2 Controle do processo de hidroconformação 44
5.2.1 Cálculo da força de vedação nas extremidades 48

6 Materiais e suas propriedades **50**
6.1 Propriedades mecânicas dos materiais 50
6.1.1 Regime elástico do material 50
6.1.2 Regime plástico 51
6.1.3 Encruamento (ou endurecimento por deformação) 54
6.1.4 Anisotropia 54
6.1.5 Coeficiente de anisotropia 55
6.2 Análise de grelha de círculos 57
6.3 Diagramas de Limite de Conformação 59
6.3.1 Mecânica da Conformação dos Metais 62
6.3.2 Estado de tensão 62
6.4 Deformação plástica de tubo sob pressão interna e força axial de compressão 64
6.4.1 1ª fase de deformação plástica - expansão uniforme 64
6.4.2 2ª fase - instabilidade plástica; deformação não uniforme 67

7 Cálculos do processo e do produto **72**
7.1 Pressão de conformação, prensa, redução da espessura devida à dobragem 72
7.1.1 Cálculo da pressão de conformação 73
7.1.2 Cálculo da tonelagem da prensa 73
7.1.3 Redução da espessura do material devida à dobragem 74
7.2 Expansão com alimentação axial 74
7.3 Parâmetros da hidroconformação de chapas metálicas 77
7.4 Retorno elástico 78

8 Comportamento mecânico de peças tubulares hidroconformadas **82**
8.1 O programa de simulação por elementos finitos Abaqus 82
8.1.1 Análise não linear 83
8.2 Apresentação do problema 86
8.2.1 Sequência das etapas (*steps*) da simulação 86
8.3 Análise de resultados 88
8.3.1 Análise da variação percentual de espessuras 89
8.3.2 Análise de tensões 97
8.3.3 Análise das deformações plásticas (PEEQ) 102
8.3.4 Conclusão 118

Resumo

Comportamento mecânico de peças hidroformadas

O objectivo do presente trabalho é analisar o comportamento mecânico de peças tubulares hidroconformadas. Para o efeito, executam-se simulações computacionais com recurso a software de simulação por elementos finitos. As peças objecto de análise são peças tubulares soldadas à medida (tailor-welded tubular blanks, TWTs). Em termos genéricos, as TWTs são formados por dois ou mais tubos cujas espessuras podem variar entre si. Esta combinação de diferentes espessuras reflecte-se nos diâmetros dos tubos componentes da peça (diâmetro exterior igual, diâmetro interior igual ou ambos diferentes). Os tubos são soldados entre si normalmente por soldadura topo a topo.

Estas TWTs são então submetidas à tecnologia da hidroformagem tubular, que consiste, essencialmente, na aplicação de uma pressão hidráulica de conformação ao interior de uma peça tubular, com o auxílio eventual de outros mecanismos como a força axial de conformação (alimentação) aplicada nas extremidades do tubo. Estes mecanismos realizam a expansão do perímetro da secção transversal da peça de encontro à cavidade do molde onde ela se encontra, que confere à peça a forma final pretendida. As TWTs têm várias vantagens, de que se destacam a redução de peso e do número de componentes (com o consequente aumento da rigidez específica das peças, melhores qualidades de absorção de energia em caso de choque ou de colisão, redução dos custos de fabrico e flexibilidade de produção industrial).

A hidroformagem é uma técnica de conformação aplicada sobretudo nas indústrias automóvel e aeronáutica, com vantagens relativamente a outros processos de conformação: economia de operações por ciclo de fabrico da peça, e portanto de custos, nomeadamente de matéria-prima e de mão-de-obra; melhoria da integridade e da prestação estruturais. A hidroformagem e as peças soldadas à medida são duas técnicas inovadoras que se associam neste trabalho.

A simulação computacional foi executada com a aplicação computacional de análise por elementos finitos Abaqus. As TWT estudadas nas simulações são formadas por dois tubos de diâmetros exteriores iguais e um intervalo de razão de espessuras de 1 a 2, e soldados entre si por soldadura topo a topo. Os dois tubos das peças têm comprimentos diferentes, de que resulta uma variação da distância do cordão de soldadura às suas extremidades. No estudo, utilizaram-se dois valores para a distância do cordão de soldadura às extremidades.

A análise tem em linha de conta a influência destes três factores no comportamento mecânico das peças: a variação das espessuras dos tubos, a presença do cordão de soldadura e a distância deste último às extremidades da peça.

Palavras-chave: hidroformagem, hidroconformação, peças soldadas à medida, tubos soldados à medida, conformação mecânica, ensaios mecânicos.

Abstract

Mechanical behaviour of hydroformed blanks

The aim of this work is to analyze the mechanical behaviour of tubular hydroformed blanks. In order to do it, computational simulations are carried out, using finite element analysis software. The analysis focuses on tailor-welded tubular blanks (TWTs). Generally speaking, TWTs consist of two or more tubular parts, joined together at their ends by welding; these component tubes may have the same or different thicknesses. Thicknesses' combinations include same outer diameter, same inner diameter or different inner and outer diameters.
These tubular blanks are formed using the tubular hydroforming technology. In general, tubular hydroforming consists in applying a pressure to a forming fluid located inside a tubular part, which is to be formed. Together with this forming pressure, other forming mechanisms might act, such as – for instance - axial forming (feeding) force applied at the tube's ends. These forming mechanisms allow the expansion of the part's cross-sectional length against the die's cavity in which the part is confined, forcing the part to adopt the cavity's shape.
The advantages of TWTs include reduced weight, reduced part count (wich increases part specific stiffeness and properties of energy absorption in case of shock or crash), lower manufacturing costs, manufacture's flexibility.
Hydroforming is a forming technology used mainly in the automotive and aircraft industries. It has some advantages, when compared to other forming processes: less operations count per part's manufacturing cycle reduce costs in raw material and workmanship; increased structural integrity and performance of the part. Hydroforming and TWBs are innovative techniques. In this work, they are working together to produce a hydrofomed part.
Computing simulation was carried out using Abaqus, a finite element analysis software package. TWTs studied in the simulations consist of two tubes of the same material, with equal outer diameters and thickness ratios ranging from 1 to 2. The part's two joining tubes have different lengths, i.e. the weld line joining the tubes together has a varying distance length to the tube's ends. In this work, two different weld line positions (i.e., two different weld line distances to the tube's ends) were considered. The analysis ponders the influence of these three factors in the parts' mechanical behaviour: tubes' thicknesses variation, the presence of the weld seam line and the weld line distance to the tubes' ends.

Keywords: hydroforming, forming pressure, axial feeding, tailor-welded blanks, tailor-welded tubes, mechanical forming, mechanical tests.

Capítulo 1

Introdução

1.1 Contexto da dissertação

A hidroformagem (ou hidroconformação) é uma técnica de conformação com aplicação crescente nas indústrias automóvel e aeronáutica. A importância que vem assumindo nos últimos anos deve-se ao facto de ela apresentar um conjunto de vantagens, reais e potenciais, relativamente a outros processos de fabrico de peças de maior ou menor responsabilidade estrutural, utilizadas em veículos. Embora os princípios físicos em que se baseia sejam relativamente simples, a sua aplicação prática é notoriamente mais complexa; no entanto, esta tecnologia tem sido objecto nos últimos 20 - 25 anos, de investigação e desenvolvimento intensivos, levados a cabo em centros universitários de I&D, mas também em empresas privadas, nomeadamente fabricantes de prensas e construtores de automóveis. A interacção universidade - empresa tem sido muito grande: destaquemos, por exemplo, a cooperação que tem sido feita na Alemanha (um dos países que mais tem apostado nesta tecnologia) entre universidades (nomeadamente a Universidade de Estugarda, através do seu IFU - Instituto para a Tecnologia da Conformação, ou a Universidade de Paderborn) e empresas como a Schuler Hydroforming e os vários construtores de automóveis alemães. Também nos Estados Unidos e no Canadá tem havido um investimento muito grande a nível empresarial e académico na hidroconformação. Construtores como a General Motors, empresas como a Vari-Form e investigação universitária (de que é exemplo o trabalho académico realizado na Universidade Estadual de Ohio) atestam a importância que esta tecnologia vem assumindo, em particular para os construtores de automóveis em todo o mundo.

A hidroconformação consiste, essencialmente, na aplicação de uma pressão hidráulica de conformação ao interior de uma peça tubular ou em forma de chapa; na hidroconformação tubular, além da pressão hidráulica de conformação, podem ser utilizados outros mecanismos, como a força axial de conformação (alimentação) aplicada nas extremidades da peça tubular. Pressão hidráulica de conformação e/ou força de alimentação axial realizam a expansão do perímetro da secção transversal da peça de encontro à cavidade do molde onde ela se encontra, a qual confere à peça a forma final pretendida. O processo é devidamente monitorizado com

controles especiais, como sistemas de automatização que incluem autómatos programáveis, monitorização por computador, etc.

As vantagens da hidroconformação relativamente a outros processos de conformação são relevantes: ela permite uma economia de operações por ciclo de fabrico da peça, e por consequência, de custos, nomeadamente de matéria-prima e de mão-de-obra (uma operação típica de hidroconformação de uma peça pode substituir várias operações de conformação (por exemplo, de estampagem) com posterior montagem de sub-componentes, por soldadura, necessárias em outros processos mais tradicionais de fabrico); uma melhoria da integridade e da prestação estruturais (a hidroformagem permite produzir-se peças mais leves e com melhor relação resistência mecânica/peso).

As principais desvantagens deste processo de conformação residem no facto de ainda ser uma tecnologia nova e complexa, com custos elevados de equipamento de prensas e de controlo. A sua "juventude" faz com que não haja ainda um "histórico" de experiência de campo muito significativo, o que colocou inicialmente dificuldades aos projectistas quanto à optimização do projecto das peças a hidroconformar; outras fragilidades da tecnologia devem-se ao facto de não se conhecer exactamente o comportamento do material bem como a influência do atrito durante o processo de conformação.

A tecnologia das peças soldadas à medida (em chapa ou tubulares) é uma tecnologia também relativamente recente. Uma peça soldada à medida (*tailor-welded blank, TWB*) é fabricada por soldadura entre si de duas ou mais chapas de metal de espessuras, qualidades de material e/ou revestimentos diferentes. Produz-se assim uma só peça, que será posteriormente conformada. Esta técnica foi desenvolvida com o objectivo de reutilizar as sobras de chapa originadas nos processos de fabrico de peças. Os TWB começaram a aparecer na Europa e no Japão em meados dos anos 80 e a sua utilização tem aumentado progressivamente. Uma peça tubular soldada à medida (*tailor-welded tubular blank, TWT*) é formada por dois ou mais tubos cujas espessuras podem variar entre si. Esta combinação de diferentes espessuras pode reflectir-se nos diâmetros dos tubos componentes da peça (diâmetro exterior igual, diâmetro interior igual ou os dois diâmetros diferentes). Os tubos são soldados entre si normalmente por soldadura topo a topo. A utilização de TWT não tem tido a intensidade das TWB. No entanto, a possibilidade de se obter peças finais estruturais por hidroconformação de tubos soldados à medida (TWT) poderá conciliar as vantagens que tanto o material como o processo proporcionam: a relação peso/rigidez aos esforços de flexão e de torção, próprias de secções fechadas como são as dos tubos, quando comparadas com estruturas de secção aberta, e as vantagens do processo, nomeadamente a eliminação de operações posteriores de soldadura e a redução do número de componentes que constitui a peça a conformar, que se fazem nas operações de estampagem. Daqui resulta um aumento da rigidez específica das peças, melhores qualidades de absorção de energia em caso de choque ou de colisão. São também de considerar a redução dos custos de fabrico e flexibilidade de produção industrial.

A utilização de simulações computacionais com base no método dos elementos finitos tornou-se

uma ferramenta indispensável para o projecto de peças para hidroconformar. As suas vantagens são grandes: a simulação do processo permite prever à partida dificuldades e estudar modos de as contornar; as peças estudadas por simulação podem ser optimizadas evitando-se numa primeira fase o recurso a protótipos, com a economia de tempo e de dinheiro consequentes. O ciclo de vida da peça, desde o seu projecto até à sua produção é em consequência encurtado. A simulação computacional representa assim uma ferramenta de importância fundamental na evolução destas tecnologias.

O objectivo do presente trabalho é analisar o comportamento mecânico de peças tubulares hidroconformadas. Para o efeito, executam-se simulações computacionais com recurso à aplicação de elementos finitos Abaqus. As peças objecto de análise são peças tubulares soldadas à medida (TWTs).As TWTs estudadas nas simulações são formadas por dois tubos do mesmo material, com diâmetros exteriores iguais e uma variação de espessuras, num intervalo de razão de espessuras de 1 a 2, e soldados entre si por soldadura topo a topo. Os dois tubos das peças têm comprimentos diferentes, de que resulta uma variação da distância do cordão de soldadura às suas extremidades. No nosso estudo, utilizaram-se dois valores diferentes para a distância do cordão de soldadura às extremidades. A análise tem em linha de conta a influência destes três factores no comportamento mecânico das peças: a variação das espessuras dos tubos, a presença do cordão de soldadura e a distância deste último às extremidades da peça.

Para melhor se compreender o resultado dos ensaios efectuados, torna-se necessário analisar com alguma profundidade estas duas tecnologias. Assim, no capítulo 2 é feita uma introdução à tecnologia da hidroconformação, uma resenha histórica da evolução do processo até à actualidade, bem como algumas pistas sobre o que deverá ser a tendência futura desta tecnologia. No capítulo 3, faz-se uma análise dos vários tipos ou classes de hidroconformação, das suas vantagens e das suas desvantagens. O capítulo 4 é dedicado à tecnologia das peças em chapa soldadas à medida (TWB), às suas potencialidades e filosofia de utilização, a uma ideia do investimento em I&D nesta área, bem como da utilização deste tipo de peças com hidroconformação. O capítulo seguinte dedica alguma atenção às peças tubulares soldadas à medida. O equipamento utilizado nos sistemas de hidroconformação (prensas e seus requisitos, controles do processo) é abordado no capítulo 6; as propriedades mecânicas dos materiais utilizados na hidroconformação e o seu comportamento nos regimes elástico e plástico são abordados no capítulo 7. Alguns cálculos relativos ao processo (pressão de conformação, alimentação axial, tonelagem da prensa, etc.) e às peças (tubos e chapas) são abordados no capítulo 8. Neste capítulo são também abordados alguns parâmetros em operações de pré-hidroconformação Feita a análise teórica do processo de hidroconformação e dada uma panorâmica sobre os TWB e TWT, executa-se então as simulações computacionais. As simulações incidem, numa primeira fase, sobre as etapas do processo de hidroconformação das peças até se obter os componentes hidroconformados; numa segunda fase, elas incidem sobre os ensaios mecânicos a esses componentes já conformados. Estas análises e a interpretação dos resultados são o objecto do capítulo 9.

Capítulo 2

A hidroformagem de tubos

2.1 Introdução

A hidroformagem [1] (ou conformação hidrostática [2]) [1] é um processo de conformação mecânica, plástica, de um material dúctil [4] (normalmente chapas ou tubos) por meio da aplicação de pressão hidráulica exercida no interior da peça que se vai trabalhar. Essa pressão hidráulica de conformação (aplicação conjunta de esforços de compressão e de pressão hidrostática [3]) exercida por um fluído injectado no interior da peça de trabalho, faz com que haja uma expansão do material da peça em função dos limites dimensionais que a matriz de conformação lhe impõe. Por este método consegue-se obter peças finais de geometrias muito variadas; uma só peça pode ter zonas de geometrias diferentes, portanto a sua secção transversal pode ter variações.

Se as peças iniciais são de chapa, o processo designa-se *hidroconformação de chapa*; se elas são de secção tubular, o processo designa-se *hidroconformação tubular*. Em ambos os processos, o equipamento é composto [no essencial] por uma ferramenta ou matriz de conformação, uma prensa hidráulica, e um sistema de intensificação de pressão no fluído.

O ciclo típico de processo inclui a colocação da peça na metade inferior da matriz de conformação, o fecho da matriz após a descida da sua metade superior e a aplicação de pressão no fluído que entra na secção tubular ou - tratando-se de uma peça de chapa - que actua num dos lados da chapa. A pressão é suficiente para causar deformação plástica na peça inicial e para fazer com que ela adopte a forma da cavidade da matriz (ferramenta). O componente pode ser sujeito à perfuração de ranhuras e de furos, enquanto ele ainda se encontra a alta pressão [4]

A operação de hidroconformação é normalmente precedida de outros processos de pré-conformação, como pré-dobragens [1, 2], que dão ao tubo uma pré-forma que encaixe minimamente na ma-

[1] O termo *hidroformagem* é de origem francesa: *hidroformage*. Outras designações do processo são: THF (*Tube Hydroforming*), (inglesa); IHU (*Innenhochdruckumformung* = Conformação a alta pressão interior) (alemã). *Conformação por Pressão Hidrostática* é a sua designação mais antiga [3]

triz de hidroconformação. Em seguida, utilizam-se lubrificantes especiais que minimizam o atrito entre a peça e as matrizes ([**?**]). Eles auxiliam o processo de conformação hidráulica reduzindo a área de contacto entre a peça e a matriz [2]. As peças a hidroconformar devem ser de materiais seleccionados, com boas propriedades de cedência (escoamento) que lhes permitam uma boa conformação nas cavidades da matriz sem sofrerem ruptura nem produzirem uma peça de fraca qualidade nos seus bojos ou nas suas arestas [19].

Os produtos que se obtêm por hidroformagem destinam-se essencialmente às indústrias automóvel e aeronáutica e são componentes de fabricação em grandes séries. Exemplos de componentes são por exemplo, barras estruturais, colectores de escape, apoios de motor [1, 2], longarinas de chassis, pilares laterais de automóveis, assentos e quadros de motociclos [3]. Uma aplicação comum durante várias décadas tem sido o fabrico de Tês em cobre.

Uma vantagem da hidroconformação é que permite fazer numa só operação uma peça inteira, a qual, noutros processos seria obtida a partir de várias operações de conformação de sub-componentes (por exemplo, por estampagem), cuja junção (montagem) seria feita através de operações de soldadura (por exemplo, soldadura por pontos). É o caso de algumas peças de carroçaria e de chassis de automóveis, como pilares das portas. [1, 2]
A redução do número de processos de produção que a hidroconformação permite faz com que os custos de produção se reduzam, o que é um factor decisivo nas indústrias automóvel e aeronáutica. Além disso, as peças são mais leves, pois podem ser fabricadas com materiais de menor espessura, e têm maior integridade estrutural, pois não existem descontinuidades ou zonas de sobreposição de subcomponentes para a ligação por soldadura [1, 2]. As peças são assim produzidas com economia de mão-de-obra, de matéria-prima e com uma melhor relação resistência mecânica/peso [Lei *et al*, citado por [3].

Materiais de utilização comum na hidroformagem são várias classes de aços (aços de baixo carbono, aços de alta resistência e baixa liga (ARBL ou HSLA, nas siglas em inglês), na forma de chapas e tubos (nomeadamente tubos com costura) e ligas de alumínio, tubos de alumínio extrudidos (aplicados sobretudo na indústria aeronáutica) (Moreira Filho, 98 – citado por [3]). São ainda utilizados, embora em menor escala, cobre e ligas de cobre. [1, 2, 3, 18]

A utilização intensiva dos aços deve-se às suas propriedades de resistência à fadiga, capacidade elevada de absorção energética e resistência razoável à corrosão [1]. De um modo geral, os materiais utilizados no processo de hidroformagem devem ter grande capacidade de resistência a esforços multiaxiais (particularmente em chapas finas ou em tubos de chapa fina). É desejável que o material possua índices de anisotropia elevados, para aumentar a capacidade de resistir à redução da espessura e características tribológicas que favoreçam a deformação, minimizando a dispersão de energia através do atrito entre peça e ferramenta e da geração de calor causada pela deformação do material [3].

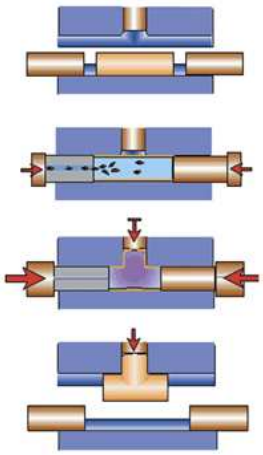


Figura 2.1: Sequência do processo de hidroconformação: 1 - Fecho da matriz e travamento mecânico da peça a conformar; 2 - Enchimento da peça com o fluído de conformação; 3 - Actuação dos cilindros axiais; regulação da pressão do fluído e da força do cilindro de contra-pressão; 4 - Abertura da ferramenta; remoção do componente hidroconformado (adaptado de [5])

2.2 Os primórdios da hidroconformação

Os princípios da história da hidroconformação remontam ao início do século XX [4] e as patentes de técnicas de hidroconformação foram registadas, ao longo deste século, nos EUA, na Europa (em particular, na Alemanha) e no Japão. Uma das primeiras patentes, de Parker, em 1903, descreve um aparato para conformar elementos ocos em serpentina para caldeiras de vapor. Nesta patente já se podem identificar os elementos principais da hidroconformação tubular: o metal dúctil pré-conformado, colocado na cavidade inferior da matriz, e o método de fluído presente na matriz fechada. A patente definia as vantagens do processo: "mão de obra e sobras reduzidas e melhoria da uniformidade da forma e das dimensões."

Outras patentes foram surgindo: por exemplo, a de Gray (de 1940) descreve um aparelho para fabricar acessórios em tê de metal forjado. Nela já é detalhada, além da matriz e do fluído de conformação, a alimentação axial das extremidades do material (o que permitia fabricar produtos com ramificações) a baixa pressão e o aumento da pressão até um valor máximo para se obter a conformação final. Davis (1945) trabalhou com aços de teor médio de carbono solicitados por pressão interna e por carga axial. Em 1950, Kearns patenteou um método de produção de hélices de avião em metal oco por hidroconformação. Nos anos 50, Faupel (1956) e Crossland *et al.* (1959) publicaram artigos com os seus trabalhos de investigação, experimentais e analíticos, sobre a pressão de rotura em cilindros de parede grossa.

Nos anos 60 investigadores como Mellor (1960), Weil (1963) e Woo (1964) realizaram ensaios em cilindros de paredes finas, produzindo também argumentação analítica. Fuchs (1966) re-

lata estudos experimentais sobre a expansão e o flangeamento de tubos de cobre por pressão hidráulica.
Nesta década, no Japão trabalhava-se activamente na pesquisa e no desenvolvimento das técnicas de conformação. A conformação de bojo por líquido era já executada neste país (cf. citam Oeda e Ogura, 1968). A Nippon Bulges Industries, por exemplo, desenvolveu várias técnicas que utilizavam a pressão de fluído, produzindo pequenos tês por conformação de bojo de tubos de cobre sem costura. O desenvolvimento destes processos e de métodos de vedação de alta pressão permitiu fabricar também componentes em aço, conformados e expandidos em bojo, com ramificações (como, por exemplo, uniões dos tubos dos quadros de bicicletas). Nesta altura foram apresentados vários resultados experimentais da conformação destes tipos de tubos em tê e ramificados, com o uso de pressão interna e carregamento axial de alimentação. Os dados incluiam mesmo um *diagrama de região de conformabilidade* de um tubo em tê.

Na patente de Fuchs (1970), o método de conformação e as ferramentas utilizadas ilustram a swagging (redução do diâmetro das extremidades), a alimentação axial para a expansão do diâmetro das peças tubulares, a furação de uma fenda e o corte de uma ranhura na extremidade da peça, dentro da matriz, executado por alta pressão.

Nos anos 70, a investigação teórica e aplicada na área da conformação de bojo intensificou-se. Desenvolveram-se novos materiais, formas e meios de expansão; em simultâneo, a investigação analítica apresentava um grau crescente de sofisticação, de que se destaca a introdução de soluções numéricas.
Al-Qureshi (1970) comparou vários materiais utilizados como meios de expansão (poliuretano, borracha e elastómeros). Em 1973, Woo formulou uma solução com base no método das diferenças finitas, para um tubo sujeito à tracção em todo o seu comprimento. Limb *et al.* (1976) experimentaram materiais como cobre, alumínio, aço de baixo carbono e latão para a conformação de peças tubulares em tê, utilizando óleo como meio de pressão. Os resultados experimentais a que chegaram Woo e Lua (1978) foram comparados com a solução analítica que apresentaram, que incluia o efeito da anisotropia, com base na teoria da anisotropia plástica de Hill [15].

2.3 A década de 80

Vários autores estão de acordo em que a década de 80 do século XX foi decisiva para o estabelecimento da técnica de hidroconformação.

Durante muitos anos, estruturas de tipo tubular realizaram da melhor forma certas funções executadas pelos veículos automóveis. No entanto, até finais dos anos 80 não havia modo de construir uma peça tubular com *flexibilidade de concepção* [2] suficiente, estabilidade dimen-

[2] Morphy [18] define a *flexibilidade de concepção* como uma filosofia de projecto em que se pretende flexibilizar o fabrico dos componentes, recorrendo às técnicas e métodos mais adequados

sional e capacidade de execução de orifícios. A indústria fornecedora de peças estruturais desenvolveu o fabrico de componentes de tipo tubular a partir de várias peças estampadas e soldadas entre si, para obviar essas lacunas. A hidroconformação de tubos preencheu uma necessidade há muito aguardada pela indústria, o que poderá explicar a sua aceitação relativamente rápida como método de fabrico de estruturas para automóveis [11].

Em meados da década de 80, a hidroconformação tubular foi alvo de estudo e desenvolvimento extensivos na América do Norte (EUA e Canadá) e na Europa (Alemanha). Em 1986, a Standard Tube Canada adquiriu a primeira patente na América do Norte para a aplicação da técnica da hidroconformação a membros estruturais maiores, dando ao processo o nome de Vari-Form, tendo-se entretanto tornado na conhecida empresa de hidroconformação Vari-Form [4]. Em 1990, ela começou a fabricar a primeira peça estrutural de grande série, uma viga para um painel de instrumentos, por hidroconformação de baixa pressão (*low-pressure hydroforming*, LPH) que mais tarde evoluiu para a *hidroconformação por pressurização sequenciada (pressure sequence hydroforming, PSH) (ver 3.1.2)*. O tubo, de perímetro igual ao da cavidade da matriz, era colocado nesta, sendo-lhe introduzido fluído a baixa pressão ainda antes de a matriz ser fechada. A secção transversal da peça a trabalhar podia ter variações substanciais, tendo porém um perímetro constante ao longo do seu comprimento para se obter a melhor economia no processo. A pressão do fluído dentro do tubo empurrava o metal contra as paredes da cavidade da matriz de modo mais uniforme, obtendo-se um maior controle dimensional da superfície.

Esta patente previa uma expansão do perímetro da secção de até 5%. Melhorias posteri-

---

para a produção da peça, de acordo com o seu tipo e com as funções que ela vai desempenhar. Morphy subdivide a flexibilidade de projecto em várias *categorias* ou *aspectos*, sendo os principais os seguintes:

- o projecto do perímetro variável da secção transversal da peça em oposição ao projecto de peças com secção de perímetro constante.
- a expansão
- o tipo do material da peça, as suas propriedades e a sua espessura (variação global da espessura e variação da espessura introduzida pelo processo).
- a dobragem
- a nitidez da aresta da secção transversal da peça hidroconformada.
- as características da peça (severidade de conformação).

Cada um destes aspectos da concepção deverá ser analisado e avaliado logo na fase inicial do projecto de um componente, para se seleccionar várias abordagens diferentes de produção, tendo-se a maior consciência possível das vantagens (em custos e em qualidade estrutural) que a opção por uma abordagem traz e do que se perde ao preterir-se outras abordagens. Morphy refere a *expansão* é um dos aspectos mais discutidos na hidroconformação; ele advoga que se analise o método de hidroconformação tubular mais adequado para o tipo de expansão pretendido (de perímetro constante ou com variações, ao longo da peça) e que se avalie se é mesmo necessário expandir a secção da peça, dadas as funções que irá desempenhar. A selecção à priori de uma abordagem determinada sem se ponderar as alternativas poderá fazer aumentar os custos e limitar as possibilidades do projecto, sem se ter consciência disso.

ores ao processo, descritas nas patentes 4744237 (Cudini, 1988) e 4829803 (Cudini, 1989) realçam as vantagens de pressurizar a peça a hidroconformar durante a fase de fecho da matriz, no ciclo de conformação [4]. Esta técnica não necessitava de tubo de qualidade muito elevada para funcionar bem e a Vari-Form começou passado pouco tempo a utilizá-la também no fabrico de outras peças[18].

Entretanto, fabricantes de equipamentos na Alemanha começaram a fabricar peças pelo processo de *hidroconformação de alta pressão interna (IHU, Innenhochdruckumformung ou high-pressure hydroforming, HPH) (ver secção 3.1.2)* - desenvolvido a partir de um método bem sucedido de fabrico de Tês de canalização - que permitia uma expansão da secção transversal de 2 a 5%. O estiramento do material para as arestas da secção transversal com fluído após o fecho da matriz exigia uma pressão do fluído elevada. Com este processo, a expansão das secções transversais durante a conformação tornou-se ainda maior.

Estabeleceu-se assim uma dicotomia interessante: a tecnologia LPH na América do Norte e a tecnologia HPH na Europa. A LPH era utilizada pelos fabricantes de componentes (Vari-Form, GM, HydroDynamic) e a HPH foi promovida pelos fabricantes de prensas alemães (Schafer, SPS, Siempelkamp, Huber & Bauer e Hydrap) com o apoio de universidades, como a Universidade GH de Paderborn e a Universidade de Estugarda. Ambos os lados encontraram um pequeno número (no início) de clientes receptivos à tecnologia da hidroconformação em alguns fabricantes de equipamento original para a indústria automóvel e nos fornecedores destes últimos, pois as suas vantagens tornavam-se demasiado convincentes para serem ignoradas. Isto constituiu um estímulo para a adopção progressiva da hidroconformação.

Assim, a investigação nesta década prosseguia e intensificava-se. No Japão, conduziram-se trabalhos de determinação de propriedades de materiais e avaliou-se o efeito dessas propriedades na hidroconformação tubular. Manabe *et al.* (1984) estudaram a conformação de tubos utilizando pressão interna e carga axial com um sistema de controle por computador. Examinou-se o comportamento de deformação e a expansão limite de tubos de alumínio para processos com carregamento linear e não linear. Fuchizawa (1984, 1987) investigou as propriedades dos materiais dos tubos sujeitos à pressão interna. Ele apresentou a influência do expoente n (o parâmetro de encruamento) nos limites da altura de expansão. No trabalho analítico foram utilizadas as teorias de membrana e da plasticidade incremental. A utilização da anisotropia na direcção longitudinal ou na direcção tangencial permitiu estudar a influência da *anisotropia plástica* no comportamento do material na deformação [15].

2.4 Dos anos 90 do século XX até hoje - a utilização de simulações computacionais

De facto, só nos anos 90 do século XX a tecnologia da hidroconformação tubular foi adoptada firmemente pela indústria automóvel e aeronáutica. Nesta década, o trabalho experimental e as derivações analíticas aumentaram sem cessar. Com o desenvolvimento contínuo dos computadores, a simulação numérica do processo de hidroconformaçao tubular foi-se tornando cada vez mais importante. O método dos elementos finitos começava agora a ser utilizado como uma ferramenta normal de desenvolvimento, utilizada por muitos investigadores.

Thiruvarudchelvan e Lua (1991) e Thiruvarudchelvan *et al.* debruçaram-se sobre o estudo da expansão (bulging) hidráulica, retirando dessas experiências dados que permitiram comparações analíticas. Thiruvarudchelvan (1994) utilizou uma barra de uretano com meio de expansão (bulging) e desenvolveu trabalho analítico que se concentrava nas condições iniciais de cedência. Sheng e Tonghai (1995) conformaram protrusões em T utilizando poliuretano como meio de pressão e carga axial de compressão. Utilizou-se um método de *upper bound* para prever a carga total de conformação. Uma nova figuração no processo de conformação foi a utilização de uma força de oposição. Tirosh *et al.* executaram trabalhos de expansão de tubos com pressão interna e carga axial, tendo investigado os fenómenos do enrugamento e da rotura, de modo experimental e analítico. Sokolowski *et al.* descrevem um método de ensaio para determinação da tensão de cedência de materiais dos tubos. Prasoody *et al.* trabalharam com tubos de alumínio extrudidos para determinar o *diagrama de limite de conformação* (pág.59) e a *janela de processo* (pág. **??**).

Na indústria, os fornecedores de equipamentos alemães citados, com destaque para a líder de mercado Schafer Maschinenbau, mais tarde Schuler Hydroforming, promoveram a sua tecnologia HPH na Europa e na América do Norte, e esta rapidamente se difundiu como método convencional, muitas vezes mesmo como único método conhecido pelas empresas e pelos técnicos. Dadas as vantagens reais e potenciais da hidroconformação, cada vez mais fabricantes de automóveis e seus fornecedores de peças estruturais pensaram seriamente em incorporar a hidroconformação nos seus processos de fabrico para manter e desenvolver a sua actividade, até por razões estratégicas.

A HPH era a única técnica disponível prontamente – a utilização da LPH estava restringida por patentes e não era proposta pelos fabricantes de equipamentos – pelo que a sua aceitação pelos fornecedores foi óbvia.

No entanto, muitas empresas que adoptaram a hidroconformação tinham um conhecimento limitado dos detalhes desta tecnologia e em muitos casos depararam-se com as suas limitações, confrontando-se com alguns imprevistos. O facto de ser uma tecnologia nova e complexa, associado à inexistência de um "histórico" de experiência, colocava muitos desafios aos projectistas, porque:

- não era possível puncionar na peça, quando na matriz de conformação, muitos dos orifícios de que ela necessitava.
- muitos sistemas de automação não eram suficientemente vantajosos ou acrescentavam complexidade à produção, com a diminuição consequente de eficiência.
- algumas das ferramentas da hidroconformação não revelavam durabilidade necessária ou eram sujeitas a esforços muito elevados e fracturavam prematuramente.
- o material muitas vezes não tinha conformabilidade suficiente para ser hidroconformado, o que obrigava a recorrer-se a materiais de conformabilidade superior ou a tratamentos de recozido.

Estas dificuldades obrigaram por vezes a alterações de projectos dos componentes e provocaram um aumento de custos, por vezes considerável. Assim, a utilização da hidroconformação na sua fase inicial não se revelou muito vantajosa técnica e economicamente: a rentabilidade inicialmente não foi a esperada e as vantagens potenciais não eram todas obtidas na prática. Tornou-se então necessário aprender a lidar melhor com as dificuldades.

Percebeu-se que a expansão abaixo de um certo valor máximo (por exemplo, 20%) poderia conseguir-se de modo simples sem se aumentar os custos. Havia porém que se tomar algumas medidas para o processo funcionar bem, de que se destacam:

- a utilização de materiais de alta conformabilidade;
- a realização de tratamento de recozido à peça a conformar, antes ou durante o processo de hidroconformação;
- a realização de operações de pré-conformação (por exemplo, de dobragem);
- operações de pós-conformação, como corte por laser e furação de orifícios;
- o controle da geração e da contenção do fluído a alta pressão;
- peças tubulares com requisitos especiais (ensaio de ruptura, Length Tolerance Diameter, solda da costura);
- melhoramento da resistência da ferramenta de hidroconformação, tempo de ciclo;
- a avaliação do custo da prensa e do custo de operação;
- a utilização de lubrificante adequado.

Algumas destas operações podiam conduzir a um aumento substancial dos custos.
Este factor terá sido grande responsável pelo abrandamento da difusão da tecnologia (no início dos anos 90). Algumas empresas na América do Norte regressaram mesmo à produção de vários componentes por estampagem e soldadura, por razões económicas. Algumas vantagens que a hidroconformação proporcionava dependiam do modo como as peças eram projectadas e da concepção do processo, bem como do custo global de produção da peça [11].

O desenvolvimento contínuo de novas máquinas-ferramentas, de sistemas hidráulicos de alta pressão, da vedação, dos materiais das peças de trabalho, da lubrificação e dos processos de controle por computador, permitiu que esta tecnologia se começasse a tornar viável como técnica de conformação adequada para a produção em série [15].

Também a utilização intensiva em modelos computacionais de simulação (análise pelo método dos elementos finitos, *software* de concepção e engenharia assistidos por computador (sistemas CAD/CAE)) tem sido um contributo fundamental no desenvolvimento da tecnologia de hidroconformação tubular, permitindo prever o maior número de problemas possível na fase do projecto e no decurso do processo, permitindo o estudo e a análise de vantagens e desvantagens de várias alternativas de projecto, sem se ter de recorrer a protótipos. Com a simulação computacional, a redução do tempo de projecto e dos custos em protótipos torna-se substancial.

A automatização e o aperfeiçoamento dos controles do processo têm sido fundamentais para o melhoramento contínuo desta tecnologia. Como exemplo, o construtor automóvel alemão Opel (subsidiária da General Motors) construiu uma fábrica com grande percentagem de automatização em Bochum, na Alemanha (próximo de Düsseldorf), para a produção do seu berço de motor hidroconformado. Esta foi a primeira fábrica completamente automatizada na indústria automóvel a produzir peças hidroconformadas desde a pré-dobragem com verificação por laser, com sistemas de manipulação do material do que havia de mais moderno.

Os vários sistemas de ensaio e de previsão das prestações do metal na hidroconformação incluem simulação computacional com recurso ao método dos elementos finitos e sistemas de concepção assistida por computador (CAD/CAE).

Como foi referido no 2ª Congresso Internacional de Hidroconformação, realizado nos EUA em Novembro de 1998 com o patrocínio da Schafer Hydroforming (do Grupo alemão Schuler), o "período experimental" - em que a falta de "histórico" de experiência de campo da hidroconformação causou alguma apreensão mas, em simultâneo, estimulou a investigação e o desenvolvimento de aperfeiçoamentos do processo - terminou e a decisão de utilizar a hidroconformação pode agora ser tomada com a mesma confiança que os utilizadores tinham tido com as prensas de estampagem ou de dobragem. A tecnologia, concordaram os Drs. Altan e Ahmetoglu e muitos outros na conferência, está destinada a continuar a revolucionar o fabrico de automóveis [19].

Três patentes da Hydrodynamic Technologies Inc. (5353618, 5481892 e 5890387 (Roper e Webb, 1994, 1996, 1999) realçam a importância de expansões maiores através de alimentação axial das extremidades, a hidroperfuração de orifícios, a conformação localizada de ressaltos e a hidrodobragem na matriz de elementos do chassis de veículos. Podem produzir-se dobragens no plano na matriz de hidroconformação, eliminando-se assim a operação de dobragem por CNC. Até à data, a alimentação axial do material tem sido feita apenas em componentes de dimensões pequenas. A aplicação de alimentação axial a peças estruturais maiores - para expandir a estrutura sem que haja uma redução apreciável da sua espessura - permite obter-se estruturas muito eficientes.
A patente nº 5720092 da GM (Chi Mou Ni e Bruggemann, 1998) introduz a ideia de se utilizar vários tubos de espessuras e diâmetros diferentes para se hidroconformar uma estrutura completa numa só matriz. Várias peças tubulares são soldadas entre si para formar a montagem

requerida. Esta montagem é então hidroconformada numa só ferramenta (matriz) para se obter os conjuntos estruturais requeridos.

Nos finais da década de 90 e no princípio deste século, já estavam disponíveis vários sistemas para ensaiar e prever as prestações do metal na hidroconformação. Estes sistemas já incluiam alta tecnologia, desde a análise por elementos finitos até sistemas de concepção assistida por computador (CAD/CAE) e de simulação. De facto, a simulação computacional baseada na análise por elementos finitos foi ganhando cada vez maior preponderância como ferramenta de apoio, desenvolvimento e previsão nos trabalhos de investigação dedicados aos processos de conformação e de hidroconformação. Assim, numerosos investigadores começarama recorrer cada vez mais a modelações computacionais nos seus trabalhos. Dohmann e Hartl (1994, 1997) e Ahmetoglu e Altan (2000) apresentaram parâmetros de processo necessários e importantes da hidroconformação de tubos juntamente com simulações pelo MEF. Macdonald e Hashmi (2000) recorreram a simulações por elementos finitos para estudar a conformação de uma ligação transversal. Em 2001, estes mesmos investigadores fizeram comparações entre as conformações de bojo obtidas por meio sólido e por meio hidráulico, recorrendo para o efeito ao *software* de modelação LS-DYNA 3D. Nesse mesmo ano, Ahmed e Hashmi simularam com o mesmo *software* duas trajectórias de carregamento para pressão interna. Kridl *et al.* (2003) executaram trabalhos sobre o enchimento de cantos (arestas) das secções das peças fazendo simulações 2D com o programa Abaqus/Standard, complementadas com ensaios reais. Kwan e Liu (2003) analisaram parâmetros da hidroconformação de um tê com o programa de elementos finitos DEFORM-3D.

2.5 O futuro da hidroconformação

Actualmente está-se dedicando um esforço considerável de aplicação dos processos de hidroconformação de tubos e de chapas metálicas às estruturas de veículos automóveis. Métodos avançados de fabrico de tubos, um aumento da compreensão dos parâmetros do processo e do comportamento dos materiais e sistemas de montagem modernos que utilizam métodos de soldadura por laser estão-se conjugando para resolver com êxito muitos problemas existentes. Estes êxitos irão produzir vantagens globais muito grandes. A estrutura actual de uma carroçaria é formada por muitas peças e é reprojectada (e renovadas as suas ferramentas) de 5 em 5 anos; os elementos de chassis, formados por bastante menos componentes, são reprojectados em cada 7 a 10 anos. Uma estrutura típica da carroçaria contabiliza 20% a 25% do peso total do veículo (ULSAB 1995). A utilização de elementos hidroconformados nesta área proporciona um grande potencial de poupanças de peso ao mesmo tempo que melhora o desempenho estrutural.

O International Steel Consortium, coordenado pela Porsche Engineering, desenvolveu e construiu o Ultra Light Steel Auto Body (ULSAB, 1995) (ou Carroçaria Ultra Leve em Aço), referido acima. A estrutura da carroçaria da figura mostra vários elementos hidroconformados que podem ser integrados na estrutura unibody. O protótipo contem duas peças principais

hidroconformadas: uma longarina tubular lateral de tejadilho hidroconformada e um painel da capota do tejadilho em chapa hidroconformada [19]. Neste protótipo são também utilizados *tailor-welded blanks* A carroçaria do ULSAB não utiliza nenhuma metalurgia nova. Este estudo concluiu que uma estrutura de carroçaria com hidroconformação intensiva (HIBS) proporcionaria vantagens significativas - reduções de 11 % em peso (cerca de 45 Kg), de 15 % em número de peças e de 10% de custos - em relação a uma estrutura monocorpo de dimensões semelhantes concebida em 2000. Como este estudo se concluiu em 1995, novos desenvolvimentos da tecnologia de hidroconformação indicam que serão possíveis poupanças ainda maiores. Desenvolvimentos adicionais baseados num aumento dos conhecimentos e da compreensão do processo de hidroconformação poderão revolucionar o fabrico de estruturas de chassis e de carroçaria de automóveis [4].

As ideias descritas na patente nº 5720092 da General Motors podem ser utilizadas para combinar e conformar toda a estrutura lateral da carroçaria numa só etapa, como mostra a figura, incluindo a secção inferior de reforço do chassis, o pilar da frente das dobradiças das portas, a longarina do tejadilho, o pilar central, o pilar traseiro e a longarina traseira. A estrutura superior, que inclui os pilares A, as longarinas do tejadilho e os paineis da frente e traseiro poderia ser conformada como uma montagem. Um módulo de traseira com longarinas traseiras e travessas é outra aplicação passível de hidroconformação numa só etapa. É assim possível obter-se reduções consideráveis de peso na estrutura do veículo com esta abordagem, sem se comprometer a segurança e a integridade estruturais. Utilizada no mundo inteiro, esta tecnologia produziria poupanças que se traduziriam em menores consumos de combustível e reduções significativas das emissões com efeito de estufa para o ambiente [4].

O Prof. Muammar Koç, no seu artigo "Hidroconformação a Quente de Materiais Leves"[3] lembrou que os E.U.A. consomem 25% da produção mundial de petróleo, dos quais quase 70% nos transportes. Uma redução de 10% no peso de um veículo resulta numa redução de cerca de 6 a 8% no consumo desse veículo. Ele afirma que a hidroconformação é uma das melhores maneiras de conseguir esta redução de peso [33].

A incorporação de alumínio e de magnésio em peças de automóveis poderá abrir a porta para poupanças enormes de peso. Por exemplo, uma peça de alumínio que substitua uma peça em aço ou em ferro fundido significa uma redução de peso de 40 a 60%".

Segundo Koç, a chave para conformar esses metais é a evolução da *hidroconformação a quente*. A estampagem a quente utiliza-se actualmente para aumentar a conformabilidade de peças de alumínio e de magnésio. A conformabilidade destes dois metais, à temperatura ambiente, é de apenas cerca de 15% da alteração da estrutura original antes de ocorrer rotura. A hidroconformação a quente pode significar uma redução de peso maior e uma compactação posterior da peça, em comparação com os métodos convencionais. Uma previsão precisa da distribuição conveniente de temperatura no processo obteve-se por análise de elementos finitos

[3] apresentado na 5ª Annual North American Hydroforming Conference and Exhibition, organizada pela Tube & Pipe Association, International, e pela Society of Manufacturing Engineers, em 2007

(adaptive isothermal finite element analysis) e pela execução de experiências [33].

A Schuler Hydroforming desenvolveu recentemente uma nova tecnologia de conformação, HEATforming®, cujo fluído de conformação, em vez de água, é uma mistura de ar e azoto pressurizada até 3000 PSI (20,7 MPa) e aquecida entre 350ºC e 1100ºC. Como é necessária menos pressão, uma prensa de tonelagem inferior pode imitar as capacidades de conformação de uma prensa muito maior utilizada na hidroconformação. Esta tecnologia está sendo utilizada para conformar peças de alumínio, magnésio e latão, e está em andamento investigação sobre a conformação pelo mesmo processo de aços macios, inoxidáveis e de alta resistência. O novo processo de conformação pode proporcionar uma boa definição de cantos e de arestas, roscas conformadas e uma expansão circunferencial de até 400%, tudo com uma redução limitada da espessura da parede.

A Schuler acredita que esta tecnologia tem aplicação potencial no fabrico de estruturas de veículos de todo-o-terreno, em equipamento de energia outdoor, quadros de bicicletas, equipamentos de cozinha e de casa de banho, equipamento desportivo, mobiliário (por exemplo, maçanetas de portas e pegas de electrodomésticos [33]. ([4, 11, 15])

Capítulo 3

O Processo de Hidroconformação

As peças que são submetidas ao processo de hidroconformação têm a forma de chapas planas (hidroconformação de chapas) ou de tubos (hidroconformação tubular). Vamos descrever cada um destes dois processos nas secções seguintes.

3.1 Hidroconformação de Tubos

3.1.1 Introdução

A hidroconformação tubular é o tipo de hidroformagem mais comummente utilizado. Este processo altera a forma da secção transversal de um tubo inicialmente circular para outras formas que vão variando ao longo do seu comprimento. A peça que se obtém tem uma forma muito mais precisa e intricada do que a que era possível há 20 anos [18].

Neste processo de conformação, o material com que se começa é normalmente um tubo recto de secção circular. Embora se possam utilizar também tubos de secção quadrada, a secção circular tem a vantagem de proporcionar o maior número de opções de projecto de peças [9]. Antes de ser colocado no interior da matriz do molde, normalmente feito de duas peças [1], o tubo pode ser sujeito a operações de pré-conformação. Uma pré-conformação comum é a realização da dobragem, para fazer com que o tubo siga a configuração geral da peça final pretendida. Em muitos casos é exigida também uma pré-conformação das secções transversais [18].

Uma vez colocado no interior das matrizes do molde, e após o seu fecho, o tubo é sujeito à pressão hidrostática exercida pelo fluído que é injectado no seu interior e, em simultâneo, aos esforços de compressão nas suas extremidades (alimentação axial). A pressão do fluído faz com que o material se expanda de encontro às cavidades da geometria do molde. O fluído é pré-pressurizado num sistema de enchimento de baixa pressão e é enviado em seguida para uma zona de alta pressão. A injecção do fluído no interior do tubo faz-se com o auxílio de uma bomba. Uma vez o tubo cheio de fluído, os punções acoplados aos cilindros vedam a sua

Figura 3.1: Hidroconformação de peça típica. As setas exemplificam os esforços de compressão (adaptada de Schuler, 1998) [3]

extremidade. Então a pressão hidrostática no interior do tubo começa a aumentar. Durante o processo, a prensa tem que manter uma força de fecho superior à força oriunda da pressão interna do processo [2].
A compressão nas extremidades do tubo é feita por cilindros axiais, posicionados de acordo com a geometria que se pretende obter no material. A compressão tem por finalidade mover o material na direcção da conformação, para evitar que ocorra uma redução excessiva da espessura [3]. Além da função de compressão - que pode não ser necessária (por exemplo, nos casos em que não há fluxo de material na direcção axial do tubo) - os cilindros têm a função de vedar a saída do fluído da cavidade da peça.

As prensas utilizadas são prensas hidráulicas. Estas prensas apresentam melhores características que as prensas mecânicas [1].

A hidroformagem produz tubos com forma muito mais precisa e intricada do que a que era possível há 20 anos. Embora a hidroformagem tubular seja relativamente recente no seu campo de aplicações, a utilização de fluído para conformar metal data de há mais de 100 anos, como vimos no capítulo anterior.

A hidroformagem é muitas vezes combinada com a operação de puncionamento, na matriz, de furos na peça. Uma vez conformada a peça, seguem-se usualmente a remoção de sobras das extremidades e a soldadura de componentes adicionais ao tubo acabado de conformar [18].
Certas peças e requisitos de processo implicam a utilização de material especial, de tubos de alta qualidade, de lubrificação (e limpeza) e, eventualmente, de operações adicionais de abertura e corte de orifícios na peça já fora da matriz de hidroconformação. Estes factores acrescentam custos, que podem no entanto valer a pena pela mais-valia que proporcionam. Porém, eles só deverão ser implementados após o estudo de abordagens de projecto e de processos alternativos que possam tornar essas etapas desnecessárias.

3.1.2 Tipos ou classes de processo da hidroconformação tubular

De acordo com [4], a hidroconformação de tubos pode-se dividir em 5 classes de processo: de baixa pressão, de alta pressão, de multi-pressão, de hidro-saliência e de conformação de foles.

Hidroconformação de baixa pressão

O valor de pressão utilizado na hidroconformação de baixa pressão é definido arbitrariamente pela Tube and Pipe Fabricators Association como sendo inferior a 83 Mpa (12000 psi). Na hidroconformação de baixa pressão, o comprimento da linha da secção transversal (ou seja, a medida do perímetro dessa secção) permanece quase igual ao da circunferência do tubo original de trabalho. Em alguns componentes, dependendo das propriedades do material que constitui o tubo e da sua espessura, o comprimento de linha pode expandir-se até próximo dos 3%.

Durante o processo de hidroconformação, quando a ferramenta (matriz) se fecha, não há pressão de fluído dentro do tubo. A superfície da secção da peça inicial pode portanto deformar-se e enrugar, como mostra a figura da página seguinte.

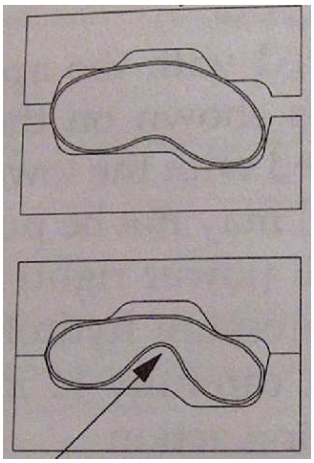


Figura 3.2: Enrugamento inicial provocado pela acção de fecho da ferramenta [4]

Estas rugas podem ser então removidas com a aplicação do fluído pressurizado, mas uma ruga profunda - como mostra a imagem inferior da figura - não pode ser removida com as baixas pressões deste processo. Além disso, o material não pode ser empurrado totalmente para os raios dos cantos da superfície superior a pressões abaixo dos 83 MPa.

Assim, na hidroconformação de baixa pressão, as secções dos componentes têm que ser projectadas cuidadosamente para minimizar o enrugamento inicial provocado pela acção de fecho da ferramenta (matriz). Como a expansão do comprimento de linha da secção é muito pequena ou nula, há uma variação mínima da espessura em volta da secção. O controle dimensional

global na hidroconformação de baixa pressão é menor que o controle no processo de alta pressão; no entanto é adequado para a maioria das aplicações. As peças fabricadas por este processo estão sujeitas a tensões residuais nas zonas dobradas, responsáveis pelo fenómeno de *retorno elástico*.
Os tempos de ciclo de produção e o investimento de capital necessários na hidroconformação de baixa pressão são geralmente inferiores aos da hidroconformação por alta pressão [4].

Hidroconformação de alta pressão

Do ponto de vista do processo, a diferença mais significativa entre a hidroconformação a baixa pressão e a de alta pressão é que aquela faz deslizar o material para os cantos da [cavidade] da matriz enquanto esta expande o material para os cantos [20]. A gama de pressões utilizadas na hidroconformação de alta pressão vai usualmente desde os 83 MPa (12000 psi) até aos 414 MPa (60000 psi) [4], podendo atingir os 690 MPa [11].

As pressões mais altas permitem que a linha de comprimento (o perímetro) da secção hidroconformada seja expandida até ao limite permitido pelo alongamento plástico do material. Quaisquer rugas ou deformações de superfície que possam ocorrer durante a etapa de fecho da matriz são eliminadas com as pressões mais altas [4].A utilização de uma peça com um perímetro de secção transversal entre 5 e 10 % inferior ao perímetro da cavidade da matriz (menor, portanto, que o perímetro da secção da peça final) evita que a peça seja sujeita a dobras durante a conformação [11].

Com a peça a conformar colocada na cavidade da matriz, as duas metades da matriz fecham e a peça é deformada em consequência, assumindo até um certo grau a forma da cavidade da matriz. Nesta altura, no interior da peça ainda não há fluído de pressurização. Uma vez a matriz fechada, os cantos da secção transversal ainda não estão preenchidos completamente. Após o fecho da ferramenta, o fluído é injectado na peça e é pressurizado até as arestas da secção transversal serem completamente conformadas.

O valor da pressão utilizada depende

- da espessura da parede do tubo a conformar
- do valor da tensão de cedência do material do tubo
- do raio interior da aresta mais fechada da secção transversal do tubo
- da *pressão de calibração* atingida.

A *pressão de calibração* [1] provoca a cedência do material e, com isso, reduz o retorno elástico do mesmo, resultante do processo. Em consequência, as paredes do tubo são "projectadas" de encontro à cavidade da matriz. Um inconveniente é que poderá haver alguma variação da espessura por toda a peça. A variação da espessura em torno do perímetro da secção é

[1] A pressão de calibração é o nível de pressão máxima a que o fluído no interior do tubo é elevado, após a alimentação axial, necessário para se realizar o processo de conformação (ver 3.1.2)

geralmente maior e o material tende a ter menos espessura nas zonas dos cantos da secção. Nas zonas de dobragem, a alta pressão estira o material para os cantos da cavidade da matriz, completando um processo conhecido por dobragem por tensão sobreposta. Toda a secção transversal da dobra atinge a tensão de cedência eliminando assim zonas que não cederam, com a [eventual] presença de tensões residuais, a base do retorno elástico [20].

Devido às expansões maiores provocadas pela alta pressão, as secções hidroconformadas são geralmente sujeitas a maiores deformações plásticas de tracção, o que origina, como vimos, um retorno elástico mais baixo e permite um controle dimensional maior. As pressões mais elevadas também dão mais liberdade de criação de secções complexas, o que não era possível com o processo de baixa pressão.

No entanto, devido às maiores expansões, o processo é mais sensível à qualidade do material do tubo e das suas soldaduras. As peças a conformar também necessitam de lubrificação para evitar roturas do material e uma redução da sua espessura excessivamente localizada [em certas zonas] durante o processo. Os inconvenientes da redução de espessura da parede e das variações de espessura ao longo da peça podem ainda ser minimizados com a utilização de alimentação axial das extremidades, com tratamentos de pré-conformação de recozido da peça a conformar, com materiais especiais de baixa resistência e alongamento elevado.

Para o processo de alta pressão gerar, conter e reagir às pressões mais altas são necessárias ferramentas mais robustas e prensas maiores. Além disso, os tempos de ciclo de produção e o investimento de capital necessários para a hidroconformação de alta pressão são em geral maiores que na hidroconformação de baixa pressão [4].

Hidroconformação de multi-pressão (ou de pressurização sequenciada)

Sendo uma variação da hidroconformação de baixa pressão, a hidroconformação de multi-pressão também é designada de Hidroconformação de Pressurização Sequenciada (Pressure Sequence Hydroforming, PSH) pela Vari-Form [21]. A diferença entre os dois métodos reside no modo como a peça a trabalhar se posiciona na cavidade da matriz (e não no modo de aplicação da pressão) para conformar uma peça com êxito. Uma vez posicionada a pré-peça na cavidade inferior da matriz, inicia-se o processo de fecho das cavidades da matriz. Pela acção da operação de fecho, a peça é parcialmente esmagada [9].

Enquanto a matriz ainda está aberta, o fluído é introduzido no interior do tubo [4]; A peça cheia de fluído a baixa pressão torna-se um sólido relativamente incompressível e conformável. A matriz começa a fechar outra vez, mantendo-se a baixa pressão, e o volume da peça reduz-se [9]. A pressão é então aumentada até ao valor de *pressão de fecho da matriz*. Uma vez fechadas as matrizes, a pressão no tubo é aumentada até ao valor de *pressão de calibração*. Durante a etapa de fecho da ferramenta, o fluído actua como um mandril, o que evita uma deformação excessiva da superfície e o enrugamento da hidroconformação de baixa pressão. A tendência do material para formar pregas entre a linha de divisão das metades superior e inferior da matriz também é significativamente reduzida. O material também é empurrado

para os cantos da secção pela acção do fecho da ferramenta. As forças mecânicas originadas pelo fecho da matriz, responsáveis pela deformação do tubo, aliam-se à presença do fluído a baixa pressão, e actuam através da parede do tubo de modo compressivo, forçando o material a encostar aos cantos da cavidade. A baixa pressão do fluído durante o fecho desencoraja a ocorrência de pregas entre as metades da matriz [4, 9].

Se a expansão do *comprimento de linha* [2] da secção for mantida dentro de um intervalo de 1% a 3%, a hidroconformação PSH terá todas as vantagens da hidroconformação LPH, com a capacidade de conformar secções complexas semelhante à do processo de hidroconformação HPH. Com a utilização deste método, a necessidade de lubrificação pode ser reduzida significativamente, ou mesmo eliminada, e é alcançada uma definição melhor da superfície, mesmo a pressões de conformação inferiores. O processo de hidroconformação por multi-pressão com pressões de calibração no intervalo dos 69 a 173 MPa (10000 a 25000 psi) parece ser adequado para a maioria das aplicações estruturais de chassis e de carroçaria de automóveis. Com essas pressões também se obtém uma boa qualidade dos orifícios perfurados nas peças [4]. (Morphy fala em pressões máximas inferiores a 48 MPa).

Conformação de hidro-saliência

A conformação de hidro-bojo ou hidro-saliência divide-se em duas categorias: expansão do tubo e componentes multi-ramificação, como é o caso das secções em tê. Durante o processo de conformação de saliência (bojo), um comprimento considerável de tubo é empurrado para dentro da cavidade da matriz. Geralmente, isto é feito para: obter maiores relações de expansão próximo das extremidades de elementos hidroconformados de grande comprimento; estirar secções ramificadas em Tê, em Y; expandir componentes e veios de exaustão com redução mínima de espessura do material.

Componentes com várias ramificações ou com zonas salientadas / expandidas exigem um controle preciso da alimentação axial relativamente à pressão de alimentação de extremidades no interior da peça. O processo de alimentação das extremidades aumenta consideravelmente a conformabilidade do material. A melhor maneira de entender este comportamento do material durante o processo de alimentação das extremidades é representar graficamente a deformação maior versus a deformação menor num *diagrama de limite de conformação*.

A *deformação menor* é comunicada (imparted) ao material do tubo ao longo do seu comprimento pela força de extremidade, enquanto a *deformação maior* é induzida na direcção circunferencial pela pressão interna. A alimentação das extremidades e a pressão interna são controladas para se manterem sobre a linha de espessura constante representada no diagrama de limite de conformação (pág.59). Até que distância ao longo da linha de espessura constante pode o processo avançar depende da forma da secção e da quantidade de expansão. As mudanças de geometria devidas à expansão seccional e ao desenvolvimento de resistência de

[2] perímetro

atrito opõem-se às forças compressivas ao longo do comprimento até que não possa ocorrer mais deformação menor.

Conformação de foles

A hidroconformação também permite fabricar componentes que necessitem de foles (para flexibilidade na montagem ou para um funcionamento em ambiente protegido, por exemplo). A ferramenta contém várias placas de conformação que se podem deslocar axialmente, formando o espaço entre duas placas consecutivas e o contorno das próprias placas uma forma de onda que permite reproduzir a forma de fole. O tubo é então cheio de fluído de conformação, a uma pressão baixa (por exemplo, de 1500 psi, ou 10,34 MPa) que expande ligeiramente a sua secção de encontro aos contornos ondulados das placas de conformação. O movimento axial de encosto das placas faz com que o tubo sofra uma compressão axial. Por acção da pressão do fluído e do movimento de compressão axial, as formas onduladas são realçadas no tubo.
Este tipo de hidroconformação é adequado para tubos de parede fina em aço inox. Certos processos de hidroconformação de foles usam tubo fabricado a partir de chapa metálica sujeita a operações de estampagem profunda sucessivas, que lhe dão uma forma de copo. As várias estampagens vão aumentando o comprimento do copo e reduzindo o seu diâmetro até se obter o tubo com as medidas necessárias para a hidroconformação posterior. ([4, 35].

3.2 Hidroconformação de chapas

3.2.1 Introdução

A hidroconformação de chapa metálica é comparável ao processo de estampagem. As ferramentas utilizadas na estampagem são uma matriz, um punção e um apoio da peça a conformar (bloco de travamento (binder), anel de estampagem). Na hidroconformação de chapa metálica, a matriz ou o punção é substituído pela pressão do fluído. Durante a maior parte do tempo de conformação, um dos lados da chapa está exposto ao fluído, ou a uma membrana ou diafragma de borracha. Este último produz uma distribuição de deformações maior e mais uniforme em toda a superfície da chapa.

A utilização de hidroconformação de chapa permite uma maior profundidade de estampagem (até 1,5 vezes) que a estampagem em matriz tradicional. Outras vantagens do processo são um acabamento superior da superfície, menor retorno elástico, tempo de desenvolvimento da ferramenta mais curto e custos mais baixos das ferramentas. No entanto, devido aos tempos de ciclo maiores, a hidroconformação de chapa metálica é mais adequada a uma produção de baixo volume (pequenas séries). Paineis maiores exigem geralmente prensas hidráulicas muito grandes, o que poderá significar gastos elevados em capital [4].

3.2.2 Hidroconformação com um diafragma de membrana

Este método foi desenvolvido nos finais dos anos 40 e princípios dos anos 50 e tem sido utilizado principalmente no fabrico de peças de aviões por estampagem profunda. O processo é apropriado para o fabrico de pequenas séries em virtude da flexibilidade que lhe é inerente.

A prensa de hidroconformação que se utiliza é uma câmara cheia de fluído vedada por um diafragma elástico (de borracha), pelo que não há contacto directo entre o fluído e a chapa. O processo dispensa a utilização de matrizes. A superfície do diafragma actua como um suporte da peça a conformar e como uma matriz universal que pode assumir qualquer forma. A outra ferramenta é normalmente um punção e um anel de suporte (ou encostador) da peça a conformar. O topo do punção posiciona-se em linha com o anel. Um ciclo típico de conformação, de cerca de 30 segundos de duração, consiste nas etapas seguintes:

1. 1.A peça a conformar é coberta de lubrificante e é posicionada sobre o anel do seu suporte. Por vezes coloca-se uma tela flexível de desgaste sobre a chapa a conformar para proteger o diafragma de borracha.

2.O punção (ou cunho) vai avançando para o interior da câmara onde se encontra o fluído (câmara de conformação) a uma velocidade pré-determinada. Em resultado desta penetração, cria-se uma pressão que actua no diafragma, que a transmite à chapa, forçando-a a aassumir o contorno do punção.

3.A pressão é aliviada e a câmara de conformação é levantada. O punção recua em relação à peça estampada [4, 30].

3.2.3 Estampagem profunda hidromecânica

Neste processo, a configuração básica de ferramentas é um punção, um encostador (de travamento das abas da peça a conformar), um anel de estampagem e uma câmara de pressão. O punção está geralmente numa posição superior, rodeado do contentor da peça a conformar. Ao colocar-se a peça sobre a matriz, que está cheia de fluído e forma assim a câmara, esta é fechada. O suporte da peça a conformar desce e faz a vedação entre a peça e o anel de estampagem. A câmara de fluído é então pressurizada e o punção avança sobre a chapa a conformar. A contrapressão hidráulica é então usada na câmara de fluído em vez de uma matriz rígida. Esta contrapressão desenvolve-se à medida que o fluído é comprimido pelo avanço do punção. A contra-pressão é controlada por uma válvula proporcional ou servo-válvula [4],[22].

Durante este processo de conformação, o material é estirado controlando-se o peso sobre

o anel de estampagem. Vários estilos de caneluras ou freios [3] – tal como se usa nas operações de estampagem – podem também ser aplicados de maneira semelhante para controlar o escoamento do material. Um controle activo da pressão do fluído na câmara pode forçar a peça a estirar de maneira uniforme e a conformar-se segundo o perfil do punção [24, 30].

3.2.4 Conformação hidráulica de estiramento

A configuração de ferramentas deste processo é uma câmara de pressão hidráulica e uma matriz. Esta poderá estar em posição superior ou inferior na prensa. A peça é colocada na ferramenta e é mantida nessa posição pelo suporte da peça e pelos *lock beads* [4]. A pressão na câmara do fluído começa a aumentar para estirar a peça de encontro à forma da matriz. A profundidade de estampagem que se obtém depende das propriedades de conformabilidade do material.

3.2.5 Combinação de estampagem profunda e conformação de estiramento

No IFU (Institut für Umformungtechnik) da Universidade de Estugarda desenvolveu-se um processo de hidroconformação que combina a estampagem profunda convencional e a estampagem profunda com contra-pressão hidráulica Este processo permite estampagem profunda com um escoamento controlado do metal para dentro da cavidade. Com uma ferramenta concebida adequadamente e com uma cedência (escoamento) controlada do material da peça a conformar, pode-se combinar a operação de estampagem profunda e a operação de conformação de estiramento. Este método é adequado para produzir painéis estruturais da carroçaria do automóvel. O estiramento da chapa metálica transmite deformações uniformes à maior parte da superfície do componente, o que induz um maior encruamento e uma melhoria da resistência à amolgadura.
A parte de estampagem profunda do ciclo atinge maiores profundidades de estampagem e faz com que este processo seja adequado para conformar peças de geometrias mais complexas.

[3] As caneluras - em inglês: *draw beads* são elementos activos salientes, em forma de pequenas ripas, alojadas em cavidades ou no encostador (ou bloco de travamento) ou na superfície do anel de estampagem, que têm uma geometria de obstrução que restringe e controla a velocidade do escoamento do metal para a cavidade da matriz pela acção vertical da prensa de estampagem. Elas forçam o material dos lados a flectir e a endireitar de novo (sofrendo assim dobragens sob tensão) antes de entrar na cavidade da matriz. Esta acção cria uma força de restrição sobre a chapa metálica que faz com que o material entre na cavidade a uma velocidade e a um volume reduzidos, ou que inclusivamente seja bloqueado. A altura, a forma e o tamanho de uma canelura e da cavidade onde ela se aloja governam a quantidade de força restritiva gerada

[4] As *lock beads* são caneluras que fixam as abas da chapa metálica, restringindo-lhe completamente o escoamento para a matriz [36, 30]

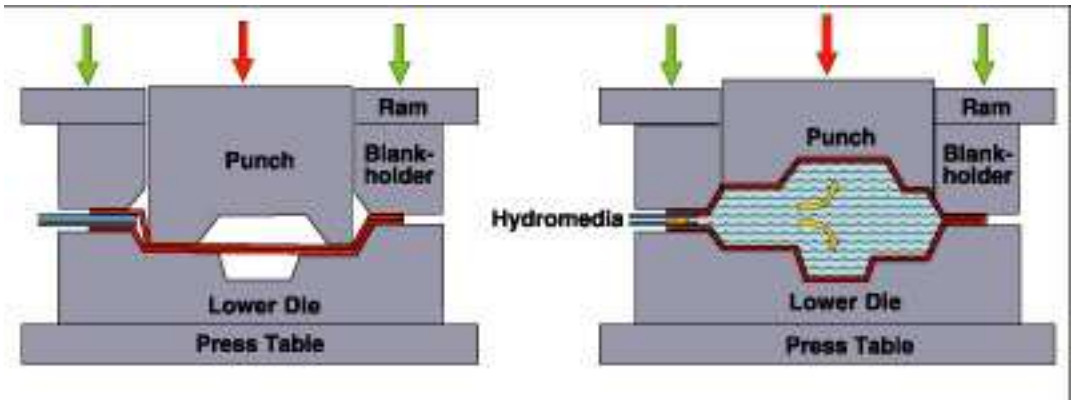


Figura 3.3: Hidroconformação de peça dupla [22]

Ele permite produzir superfícies de classe especial de qualidade, colocando-se a superfície de classe especial da peça do lado em contacto com o fluído [4, 22].

3.2.6 Hidroconformação de peças duplas

O IFU debruçou-se igualmente no estudo e desenvolvimento deste método, também chamado *conformação de almofada* ou *hidroconformação de placas paralelas*. Entre as cavidades inferior e superior da matriz colocam-se duas peças de chapa metálica previamente conformadas por um processo convencional de estampagem profunda e unida s por soldadura no seu perímetro. Em seguida, o fluído hidráulico é bombeado e introduzido entre as peças a conformar, que as estampa e conforma por estiramento de encontro às cavidades da matriz: a pressão interna faz com que uma das peças seja conformada de encontro ao contorno da cavidade da matriz rígida inferior e com que a outra peça seja conformada de encontro à superfície do punção. Se necessário, o punção pode ser recuado até uma posição definida aquando da hidroconformação.

Este método pode-se utilizar na produção de secções montadas, de perímetro totalmente fechado e variável ao longo do componente; cada uma das duas peças que formam o componente poderá ter uma espessura diferente, de acordo com os requisitos esperados em termos de massa e de desempenho estrutural. A largura da flange onde se situa a zona de união soldada pode ser controlada por meio de um controle melhorado da força do bloco de travamento; a flange pode inclusivamente ser eliminada se as duas peças forem soldadas por soldadura de canto.

Por este método podem produzir-se componentes completamente fechados tais como tanques de combustível, elementos transversais estruturais e componentes que não podem ser fabricados a partir de tubos. ([4, 22])

3.3 Falhas típicas no processo de hidroconformação

Durante a hidroconformação de tubos e de chapas, podem ocorrer três tipos de defeitos, que resultam de uma manipulação deficiente dos parâmetros principais do processo, a *pressão interna* do fluído e o *deslocamento axial*:

Enrugamento - se a alimentação axial for muito rápida para o nível de pressão interna associado (Lei *et al.*, citado por [3]). Este fenómeno ocorre com mais frequência em tubos.

Estricção - é provocado pelo estiramento excessivo resultante de uma pressão interna muito elevada, e reflecte-se numa redução significativa da espessura do material. Este fenómeno pode ocorrer em toda a área de deformação (estricção generalizada) ou em regiões concentradas (estricção localizada). Esta última leva o material à rotura.

Rotura (ou fissura) - ocorre as mais das vezes após a estricção localizada e é provocado pela pressão interna excessiva.

Estas falhas podem ocorrer devido à instabilidade do material sob carregamentos em que há uma relação inadequada dos parâmetros *força de alimentação axial (força dos cilindors axiais)* ou *deslocamento* e a *pressão interna* (Lejeune, Boudeau, Gelin (2003), citados por [3]. (adaptado de [3])

Capítulo 4

Peças soldadas à medida

Uma peça soldada à medida (*tailor-welded blank, TWB*) é fabricada por soldadura entre si de duas ou mais chapas de metal de espessuras, qualidades de material e/ou revestimentos diferentes. Produz-se assim uma só peça, que será posteriormente conformada. Esta técnica foi desenvolvida com o objectivo de reutilizar as sobras de chapa [originadas nos processos de fabrico de peças][1]. Os TWB começaram a aparecer na Europa e no Japão em meados dos anos 80 e a sua utilização tem vindo a aumentar. Estimava-se que, no ano 2000, fossem produzidos 40 a 60 milhões de TWB (S.Das, citado por [6]).

Os materiais utilizados nos TWB são ligas de aço e de alumínio, podendo também utilizar-se ligas de magnésio e de titânio [37] . A utilização do alumínio nos TWBs - mais recente - proporciona poupanças adicionais no peso, o que de certo modo contrabalança desvantagens como o aumento do custo e a diminuição do desempenho à colisão que se verifica normalmente quando as peças deste material substituem as peças em aço.

Podem utilizar-se vários métodos de soldadura, como por exemplo a soldadura MIG, TIG e outras. No entanto, a tecnologia de soldadura mais utilizada nos TWB é a soldadura laser (por exemplo, a soldadura YAG) [1] - que não necessita de fio de enchimento ou de fluxo, e que transmite menos calor às peças a soldar que a soldadura MIG, por exemplo [37, 4]. A soldadura laser é adequada para peças de pequena espessura; a sua largura (incluindo a largura da zona afectada pelo calor) é de 1 a 2 mm, portanto ela é estreita e raramente afecta a protecção catódica dos TWB galvanizados [31]; os componentes da peça podem ser soldados topo-a-topo ou com costura de sobreposição; o acabamento superficial da linha de soldadura é de boa qualidade. No entanto, exige uma preparação muito cuidada das superfícies a soldar, sem vazios entre si.[1, 4, 10] Devido às altas razões de temperatura durante o arrefecimento, o volume da fracção de martensite formada na soldadura laser é maior que o de outros processos de soldadura (como a RMSW), e portanto a dureza na zona de soldadura aumenta, o que lhe poderá dar uma menor conformabilidade [31].

[1] YAG - Ítrio Alumínio Granada dopado com Neódmio, $Y_3Al_5O_{12}$, é um cristal utilizado como meio de *lasing* para os *lasers* no estado sólido [10]

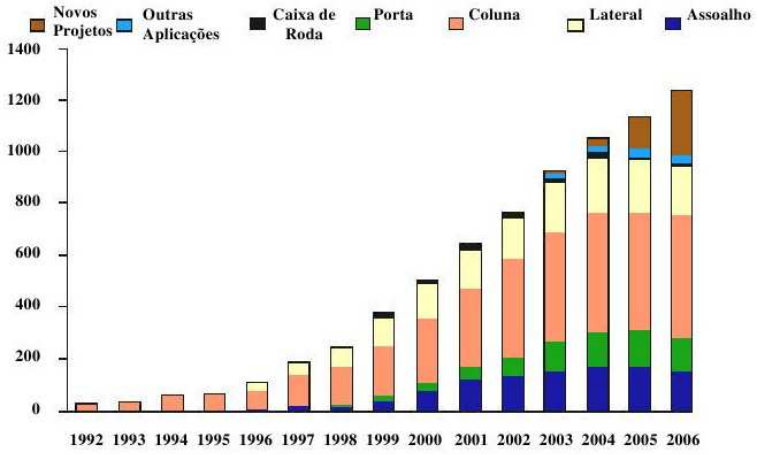


Figura 4.1: Previsão do consumo de TWBs (adaptado de Korves e Mohrbach) [31]

4.1 Vantagens da utilização de *tailor welded blanks*

Os fabricantes de automóveis têm-se empenhado na investigação e no desenvolvimento de soluções inovadoras, tentando conciliar exigências - tantas vezes divergentes entre si - de poupança de peso, de segurança e de redução de custos nos veículos que produzem, tentando corresponder à pressão enorme que o mercado - a concorrência e o consumidor - e as normas legislativas - de consumo, de segurança, ambientais - de vários países, em particular, dos EUA, do Japão e da Europa, lhes impõem . As peças soldadas à medida (*tailor welded blanks*, TWB) permitem ter em conta todas estas preocupações: elas permitem reduzir os custos de fabrico, diminuir o peso do veículo, melhorar o desempenho à colisão, o rigor dimensional da peça final e a resistência à corrosão (de acordo com a Auto/Steel Partnership, citada por [6]). Outra grande vantagem dos *tailor welded blanks* é a possibilidade de se utilizar e optimizar materiais de espessuras diferentes [6].

Esta possibilidade é um trunfo destas peças como componentes de automóveis (designadamente nas carroçarias): na constituição de um TWB pode haver uma distribuição correcta e precisa de peso na estrutura da carroçaria de um veículo. De acordo com Meinders et al. (2000), citado por [31], materiais mais resistentes e/ou de maior espessura são posicionados em regiões da carroçaria sujeitas a maiores solicitações mecânicas, e materiais de menor espessura e com características especiais de absorção de energia são introduzidos fundamentalmente com a finalidade de completar a peça, constituindo zonas de deformação e proporcionando maior segurança à célula do habitáculo em situações de colisões. Um componente produzido de uma TWB vai ao encontro desta filosofia construtiva: podemos observar esse conceito (ainda segundo Meinders, [31] nas estruturas internas das portas dos veículos, onde as regiões que

acomodam as dobradiças e a fechadura permitem a utilização de materiais mais espessos e resistentes, e o restante da zona de fecho é produzido com materiais mais leves e de menor espessura, garantindo maior eficiência da peça a ser produzida em termos de desempenho e de viabilidade do processo. Assim, não há necessidade de reforços nas zonas das dobradiças e não são necessários suportes especiais [19].

Com a utilização de uma peça soldada à medida pode evitar-se várias operações de soldadura e de estampagem; por exemplo, a utilização de TWBs numa porta de automóvel pode suprimir até 14 operações diferentes de estampagem e soldadura. outro exemplo: uma travessa típica da frente de um automóvel utiliza 9 estampagens e é montado com aproximadamente 120 pontos de soldadura. Com soldadura a laser e as peças soldadas à medida, a operação reduz-se a três sub-peças com duas operações de soldadura antes da montagem [19].

A tecnologia TWB proporciona redução de peso e diminuição dos desperdícios. Estes últimos estão habitualmente presentes em quantidades significativas quando se trata da fabricação de painéis com grandes aberturas, como painéis interiores das portas e laterais (adaptado de [31]).

4.2 Desvantagens da utilização de TWBs

Algumas desvantagens da utilização dos TWBs (segundo Meinders *et al.*, citado por [31]):

- A soldadura das chapas planas é uma etapa extra no processo de produção,elevando os custos de fabricação em decorrência da implantação de células de fabricação destinadas exclusivamente à produção dos "blanks";

- Redução da conformabilidade do TWB em relação à conformabilidade dos materiais-base, devido à solda e à zona afetada pelo calor, que influenciam negativamente a conformabilidade do "blank" em decorrência do desenvolvimento de estruturas martensíticas.

Por ser uma técnica relativamente recente, embora as aplicações actuais já sejam consideráveis, algumas aplicações dos TWB são ainda potenciais: por exemplo, os TWB em alumínio ainda apresentam algumas desvantagens, como a diminuição da conformabilidade devida a alterações nas propriedades do material na zona de fusão e na zona afectada pelo calor da soldadura. Também ocorre frequentemente rasgamento, próximo do cordão de soldadura, e o enrugamento na face, quando se utilizam os processos convencionais de conformação no fabrico destas peças. Devido a estas limitações, os TWB de alumínio ainda se utilizam preferencialmente em componentes de menor responsabilidade estrutural, tais como capôts e tampas de porta-bagagens. A análise da degradação da conformabilidade dos TWB e dos seus processos de conformação é uma área sujeita a trabalho de investigação (adaptado de [6]).

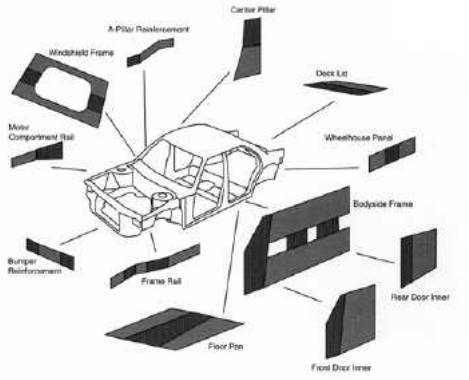


Figura 4.2: Perspectiva explodida de componentes hidroconformados de TWBs para carroçaria de automóvel, em aplicação corrente ou com aplicação potencial (Auto/Steel partnership (1995), citado por [6])

4.3 Potencialidades e filosofia de aplicação dos TWB

A Toyota vem aplicando o processo TWB em carroçarias de automóveis desde 1985 e produzia, em 1997, 3,6 milhões de painéis para 60 tipos de aplicações diferentes (KUSUDA *et al.*, 1997, citado por [31]). A indústria americana começou a utilizar os TWB de preferência em peças grandes, como portas e painéis laterais. Já na Europa, começou-se a utilizar os TWB em peças mais pequenas, como longarinas. A utilização de TWBs era em 2000 bastante mais utilizada na Europa, porque os construtores europeus utilizam os componentes obtidos de TWBs em locais do veículo onde o desempenho à colisão tem importância crucial (ao contrário dos construtores norte-americanos). Verifica-se agora (2001) uma tendência para um movimento recíproco nos dois lados do Atlântico. De acordo com T.Fant, citado por [19] em 2000 (na América) um carro tinha em média uma incorporação de 1,6 componentes originads em TWB, e há cerca de 23 componentes de carroçaria que são apropriadas a esta tecnologia. Para uma produção de 17 milhões de veículos, podemos concluir do potencial de aplicações que as TWBs possuem.

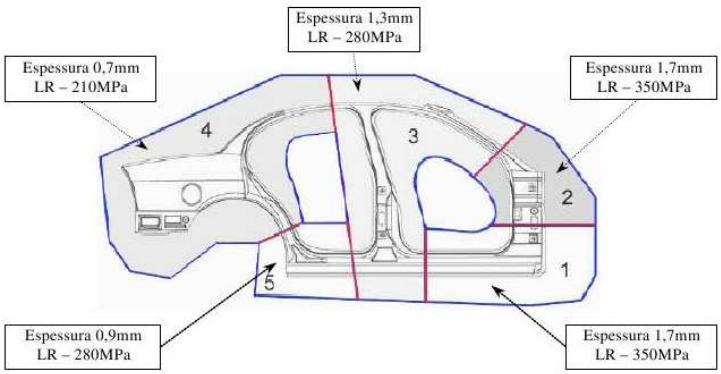


Figura 4.3: Lateral de carroçaria constituído de *tailor welded blanks* (ULSAB, em [31])

4.4 Investigação e desenvolvimento dos TWB e das suas aplicações

Tem sido desenvolvido trabalho de investigação relevante sobre a conformabilidade do TWBs e no desenvolvimento (adaptação) dos processos de conformação destas peças.
A aplicação dos TWB em painéis da carroçaria de automóveis exige que o material de soldadura seu constituinte se deforme sob carregamento biaxial durante a estampagem de chapa metálica. Para avaliar da conformabilidade dos TWBs, nomeadamente do material de soldadura que entra na sua constituição, investigadores como Davis *et al.* [27] desenvolveram *diagramas de limite de conformação*(DLC) de materiais soldados em tailor-welded blanks de alumínio, em condições de estiramento biaxial. Outros ainda, como Chan *et al.* [29] investigaram os efeitos de diferentes relações de espessuras dos materiais dos TWB sobre os seus diagramas de limite de conformação.
Kinsey et al. (2001) [6] estudaram a liga de alumínio Al 5182-H00, recolhendo dados sobre a sua conformabilidade, num ensaio de Altura de Limite de Abóbada (*Limit Dome Height, LDH* [2]), e com eles elaboraram um DLC deste material. O ensaio LDH também permitiu investigar o efeito da localização e da orientação da soldadura na deformação potencial.
Cao e Kinsey (em 1999) (citados por [6]) desenvolveram um novo processo de estampagem pro-

[2]No ensaio LDH mede-se a conformabilidade de um material. Por exemplo, uma chapa de aço plana é fixada com um anel de travamento vertical com ranhuras e é estirada até à fractura pela acção de uma abóbada hemisférica. A relação entre a altura da abóbada aquando da fractura e o raio da abóbada hemisférica é confrontada com a deformação verdadeira menor para estabelecer o limite prático de conformabilidade. A carga máxima aquando da fractura é também medida – pode-se utilizar a altura da abóbada à carga máxima para definir o limite de conformabilidade desde que ocorre a instabilidade plástica até para além deste ponto. Noutra variante do ensaio, uma peça rectangular de chapa de aço é fixada ao longo da sua dimensão longitudinal. A força de fixação ao longo da direcção transversal pode ser variada, para permitir que quantidades diferentes de material sejam sujeitas à estampagem na zona da abóbada. Os ensaios podem efectuar-se com amostras de aço secas e limpas ou com lubrificação, dependendo da aplicação em vista [32].

funda onde matrizes com controladores locais se fixam junto ao cordão de soldadura durante a operação de conformação, reduzindo assim a deformação do material próximo do cordão de soldadura, limitando o movimento do cordão e reduzindo o risco de ruptura por rasgamento. Com este novo processo de fabrico, conseguiram, num painel de ensaio, um aumento de 22% da profundidade da estampagem, uma redução da deformação transversal à linha de soldadura, no material de menor espessura, em mais de 40% e uma redução em 44% do movimento da linha de soldadura.

Parte da investigação sobre os TWB tem-se concentrado na quantificação dos efeitos do processo de soldadura na sua conformabilidade. Venkat *et al.* (citado por [6]) investigaram as ligas de Alumínio 5754-O e 6111-T4, que possuem características de soldabilidade e conformabilidade.

Kridli *et al.* (citado por [6]) efectuaram ensaios de tracção em provetes de TWB com linhas de soldadura transversais à direcção de tracção e em provetes em miniatura formados só pelo material de soldadura para representar a conformabilidade potencial deste material quando solicitado longitudinalmente. Os resultados mostraram uma redução no alongamento potencial de 12,1% e 14,7%, respectivamente, em specimens transverse e material de soldadura.

4.5 Peças soldadas à medida e Hidroconformação

Como vemos, os processos de conformação das *peças soldadas à medida* são quase exclusivamente os processos de estampagem convencional ou algumas variantes aperfeiçoadas. A utilização conjunta das técnicas dos TWB e da hidroconformação será uma mais valia nos processos de produção de componentes estruturais. Tem vindo a ser desenvolvida investigação nesta área, sendo possível encontrar na literatura existente disponível informação relativa à utilização conjunta da técnica dos TWB e da hidroconformação.
É o caso, por exemplo, da "US Patent 6825442 B2, de Novembro de 2004, registada pela General Motors Corp. e representada na Europa com o n^{o} EP 1435268 A1. Esta patente prevê o fabrico de TWBs para posterior hidroconformação, podendo os seus elementos constitutivos ser de ligas de aço, de alumínio, de magnésio, de titânio ou outras [37].
Caldin (2006) [31] estudou a possibilidade de viabilizar a utilização da hidroconformação de "Tailored Welded Blanks". No seu trabalho, desenvolveu-se uma ferramenta híbrida que permite fabricar peças pelos métodos da estampagem convencional e da hidroconformação. O TWB utilizado era formado por chapas de aço ST-06 e ST-07 com espessuras 1,5 e 0,9 mm respectivamente, soldadas a laser. Comparou-se a conformabilidade do TWB submetido à estampagem convencional e à hidroconformação, empregando-se o Diagrama Limite de Conformação, obtido a partir do ensaio Nakazima 6.2 modificado, para determinar o limite de conformação da matéria-prima, e a Frente Máxima de Deformação (FMD) para determinar a deformação máxima ocorrida nos produtos. Com a análise comparativa entre a Curva de Limite de Conformação da matéria-prima e a FMD dos produtos estampados e hidrocon-

formados, foi possível "identificar que a hidroconformação de chapas supera a estampagem convencional em relação a conformabilidade dos *Tailored Welded Blanks*, pois permitiu obter produtos com domos mais elevados e regulares, com uma menor redução de espessura e sem o aparecimento de falhas"
.

4.6 Tubos soldados à medida

Os tubos soldados à medida (*tailor welded tubular blanks,TWT*) são tubos de espessuras diferentes, com o mesmo diâmetro exterior, ligados entre si normalmente por soldadura de topo. Estes pré-produtos soldados à medida proporcionam uma oportunidade excelente para reduzir custos de fabrico, diminuir o peso do veículo e melhorar a qualidade das estampagens de chapas metálicas.

As formas tubulares e os tubos soldados à medida podem ter uma variedade de formas e podem ser soldados com mash ou laser. As aplicações dos tubos soldados à medida são viáveis quando se consideram aplicações de hidroconformação tubular. Tal com nas aplicações de chapa, os TWTs permitem uma optimização aumentada da utilização do material.

Exemplos de possíveis aplicações para os tubos soldados à medida são [28]:

- Colectores de escape;
- Pilar A;
- Longarinas do compartimento do motor;
- Longarinas laterais de pequenos camiões;
- Barras de rolamento;
- Longarinas laterais.

A utilização dos tubos soldados à medida como peças iniciais para posterior hidroconformação. Citamos por exemplo, Liu et al. [7], que simularam um processo de hidroconformação utilizando um modelo de elementos finitos bidimensionais de um tubo soldado à medida típico (TWT) com duas espessuras diferentes, com a inclusão da soldadura. Na simulação foram utilizadas duas matrizes: uma com diâmetro constante [da cavidade] e outra com dois diâmetros. Eles estudaram o comportamento do TWT quanto à redução da espessura e ao efeito de bojo, e o efeito da diferença de espessura e da soldadura no processo de hidroconformação. Também Jorge et al. [14] desenvolveram simulações de processos de hidroconformação de tubos soldados topo-a-topo, com diferentes espessuras e posições da linha de soldadura, utilizando modelos em elementos finitos. Um objectivo deste trabalho foi desenvolver uma ferramenta para uma avaliação estrutural preliminar e auxiliar do projecto de peças tubulares hidroconformadas.

Também várias empresas se têm dedicado à investigação dos TWTs. A Soudronic (suíça) e a AWS, que desenvolvem máquinas e processos de soldadura, soldaram tubos de várias

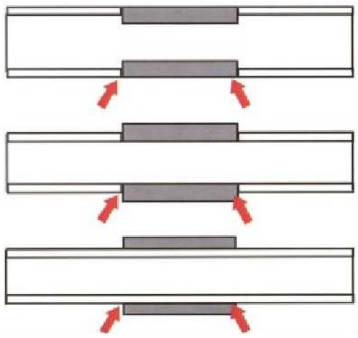


Figura 4.4: Tubos soldados à medida: diâmetro exterior constante, diâmetro interior constante e "manga"(de [28])

bitolas para produzir peças TWT hidroconformadas. A tecnologia de produção de TWTs cilíndricos e cónicos está disponível, como é o caso do processo Soutube da Soudronic, mas falta ainda encontrar uma aplicação economicamente viável para produção. A ATB acreditava que a questão da integração de tubos hidroconformados no projecto das carroçarias convencionais dos automóveis seria o factor limitador que controlaria a procura. A Thyssen Krupp Stahl também revelava ter planos para produzir TWTs num futuro próximo. A integração no projecto dos TWT de modo a incorporá-los nas carroçarias tradicionais dos automóveis é um desafio que se coloca aos engenheiros de projecto.

Outro tipo de TWT utiliza uma manga na zona onde é necessário o reforço. Esta abordagem é análoga à do TWB do tipo emendado, onde se evita soldar topo a topo duas peças do material, sendo estas simplesmente sobrepostas e presas. Um segundo tipo de TWT utiliza um material de espuma expansível que pode ser inserido no tubo. Várias empresas estão desenvolvendo tecnologias de espuma expansível, incluindo o Fraunhofer Institut.

A possibilidade de se obter peças finais estruturais por hidroconformação de tubos soldados à medida (TWT) poderá conciliar as vantagens que tanto o material como o processo proporcionam: a relação peso/rigidez aos esforços de flexão e de torção, próprias de secções fechadas como são as dos tubos, quando comparadas com estruturas de secção aberta, e as vantagens do processo, nomeadamente a eliminação de operações posteriores de soldadura e a redução do número de componentes que constitui a peça a conformar, que se fazem nas operações de estampagem

Há vários factores que contribuem para o interesse cada vez maior pelos tubos soldados à medida (TWTs). Em geral, os tubos para aplicações na carroçaria são hidroconformados. Os tubos presentemente disponíveis têm limitações quanto à sua relação diâmetro – espessura da parede e à sua conformabilidade relativamente baixa, devida aos processos convencionais de produção de tubos e à qualidade de soldadura resultante. A Soudronic anuncia que pode soldar tubos de parede fina utilizando o seu processo de soldadura laser Soutubecom uma relação D/t (diâmetro do tubo / espessura da parede) de 65 - 200, sendo as relações standard dos tubos da ordem de 17 - 38.

O maior interesse nos tubos soldados é pelos tubos cilíndricos ou cónicos, tendo os cónicos

o maior interesse, com relações diâmetro-espessura pequenas. Baron e Jack, num artigo de 1999 citado por [28], diziam que "tem havido muito menos interesse pelos tubos soldados à medida (Ref. 11) na Europa" [do que na América do Norte]. A Thyssen acreditava (2001) que os primeiros tubos TWB estariam em produção em 2004-2005 e que os maiores desafios que se iriam pôr aos construtores de automóveis seriam aqueles que a conformação e a ligação (soldadura) dos tubos colocam (adaptado de [28])

Capítulo 5

Equipamento do sistema de hidroconformação

O equipamento necessário para um sistema de hidroconformação pode distribuir-se em quatro categorias de operações:

- operações de recepção e manipulação do material a conformar
- operações pré-hidroconformação
- operação de hidroconformação
- operações pós-hidroconformação

O material para a hidroconformação de chapas é fornecido em rolos ou em peças a trabalhar pré-cortadas, sendo eventualmente aplicado lubrificante à sua superfície. O equipamento de manipulação e de preparação das peças de chapa a hidroconformar é o utilizado em operações de estampagem.

As peças tubulares a conformar vêm em geral já cortadas no comprimento, com um acabamento adequado das extremidades, com as superfícies exterior e interior limpas. A face exterior está por norma ligeiramente oleada para reduzir a oxidação da superfície. Equipamento adequado para manipular os feixes ou as caixas de tubos inclui gruas aéreas suspensas e empilhadores.
Os tubos são carregados no recipiente/desempacotador de carga, que eleva e apresenta um tubo de cada vez a uma altura adequada para a sua alimentação automática ou robotizada na operação de pré-conformação ou de hidroconformação.

As operações típicas de pré-conformação são:

- detecção de costura da soldadura
- dobragem por CNC
- pré-conformação
- tratamento térmico
- aplicação de lubrificante

Em componentes que não necessitam de pré-conformação, o hopper de carga /desempacotador fica adjacente à prensa de hidroconformação. Se necessário, pode-se fazer um spray de lubrificantes onto o tubo na altura em que ele é carregado na ferramenta de hidroconformação. Após ser hidroconformado, o componente é retirado da matriz e está pronto para eventuais operações de pós-hidroconformação.

As operações típicas de pós-hidroconformação são:

- corte das extremidades
- execução de ranhuras e de orifícios.
- lavagem
- montagem final [4]

5.1 Prensas de hidroconformação

Uma configuração de hidroconformação consiste nas peças principais do equipamento seguintes:

- ferramenta de hidroconformação
- prensa hidráulica.
- sistema hidráulico para intensificação da pressão da água e cilindros de força axial de alimentação
- sistema de controle

5.1.1 Requisitos da Prensa e Concepção para a Hidroconformação de Tubos

As prensas de hidroconformação IHP têm que ter uma força de êmbolo elevada, necessária para o processo. Em estampagem profunda convencional, a força de êmbolo tem que ser aplicada em todo o curso de conformação. Na hidroconformação IHP a força só é necessária para trancar e imobilizar a matriz durante o processo de conformação. O curso dos cilindros hidráulicos durante a conformação é necessário apenas para compensar o alongamento da estrutura da prensa causado pela força de trancamento. A quantidade máxima de força do êmbolo da prensa é igual ao produto da pressão interna máxima pela área projectada da peça a conformar na mesa da prensa.

As prensas são concebidas para lidar com forças de hidroconformação muito elevadas (de até 10000 toneladas). Elas têm portanto de ter características especiais, de que se destacam:

- curso longo de fecho com forças pequenas
- mesa grande para as peças estruturais
- força de trancamento (imobilização) elevada com curso pequeno
- rigidez elevada da mesa, do êmbolo e da estrutura da prensa
- capacidade de tratar e fazer a gestão de meios hidráulicos
- capacidade de alojar várias matrizes
- capacidade de executar tempos de ciclo curtos
- aplicação de um cilindro axial

Estas características implicam um investimento financeiro razoável na prensa e no equipamento [23].

As funções principais da prensa hidráulica são abrir e fechar a ferramenta de conformação e fornecer a força de trancamento e imobilização da matriz durante o processo de conformação, eliminando flexões elásticas da ferramenta e a separação das suas duas metades [25]. Uma vez fechada a ferramenta (matriz), a força hidráulica gerada pela prensa imobiliza as duas metades da matriz durante a fase de pressurização do processo de conformação. A fixação da ferramenta pode também ser feita por um mecanismo especial de trancamento combinado com uma plataforma de grande diâmetro e de curso vertical curto, onde assenta a matriz. Neste caso, um cilindro hidráulico mais pequeno situado no topo do mecanismo inicia o movimento de descida, deslocando a metade superior da matriz até à metade inferior, fechando-a e obrigando a peça a conformar-se mecanicamente. Fechada a ferramenta, os blocos de trancamento entram em acção. Então, a plataforma inferior onde a matriz assenta gera uma força hidráulica de grande intensidade que imobiliza a matriz nela assente. O movimento da prensa é rápido, bem como a subida da pressão de imobilização. Daqui resulta um tempo de ciclo mais rápido.

O sistema de hidroconformação tem dois circuitos hidráulicos separados: um circuito fechado de óleo, de actuação da prensa, e um circuito de hidroconformação, em que o fluído é agua. O primeiro circuito actua o fecho e a abertura da matriz pela prensa, fornece-lhe a força de imobilização durante a hidroconformação e actua ainda o sistema hidráulico intensificador de pressão. As suas pressões de trabalho são da ordem dos 25 a 35 MPa.
O segundo circuito contém o fluído de hidroconformação (normalmente água, com aditivos de lubrificação, anti-ferrugem, agentes de secagem e bactericidas). Ele contém um sistema de enchimento que introduz o fluído no interior da peça a conformar - de débito elevado e pressão baixa - e que é actuado pelo intensificador de pressão, que lhe eleva a pressão até ao valor necessário para se realizar a hidroconformação. O valor da pressão de hidroconformação pode atingir em certas aplicações os 690 MPa. Após a hidroconformação, o fluído é recolhido num tanque de recepção, onde é filtrado e bombeado posteriormente para o tanque principal.

As prensas de hidroconformação são normalmente muito caras, ao que se soma o facto de serem dedicadas exclusivamente à hidroconformação. No entanto, os fabricantes de prensas estão a desenvolver sistemas separados de abertura e fecho da ferramenta e de imobilização e

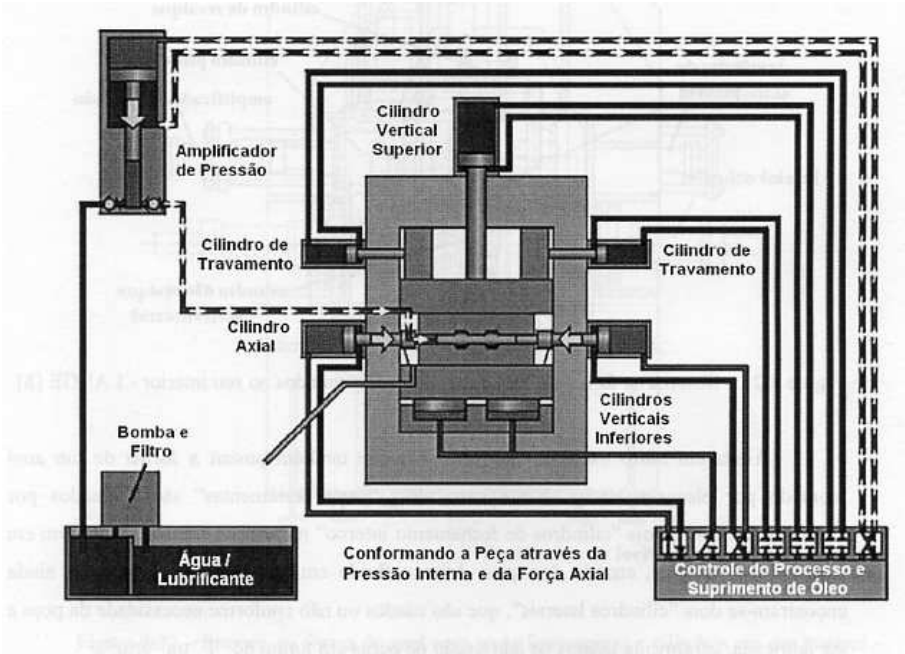


Figura 5.1: esquema da prensa de hidroconformação existente no IFU - Universidade de Estugarda (Siegert, adaptado por [2])

trancamento da mesma, com um custo mais acessível [25]. Isto permite que a prensa possa trabalhar em outras operações além da hidroconformação, podendo-se inclusivamente utilizar prensas já existentes na linha de produção das empresas, caso elas tenham a capacidade de exercer as forças que a hidroconformação dos componentes exige. Os sistemas de intensificação da pressão e de controle podem também ser projectados de modo a, se necessário, se transferirem facilmente de uma prensa para outra. Esta flexibilização traduz-se em redução de custos, um factor sempre crucial.

5.2 Controle do processo de hidroconformação

O sistema de controle executa o controle seguro e preciso dos parâmetros do equipamento de hidroconformação e dos parâmetros do processo. Esses parâmetros são a actuação da prensa,a posição da ferramenta (sistema de eixos da matriz), o enchimento do componente com o fluído de conformação, o controle do mecanismo de vedação, a alimentação axial das extremidades e a pressão de conformação. Estes dois últimos parâmetros, de processo, têm grande influência no processo de hidroconformação.

Os sistemas de controle do processo baseiam-se em geral em controladores PC ou em autómatos programáveis (PLCs). No controle do movimento da prensa é em geral suficiente um

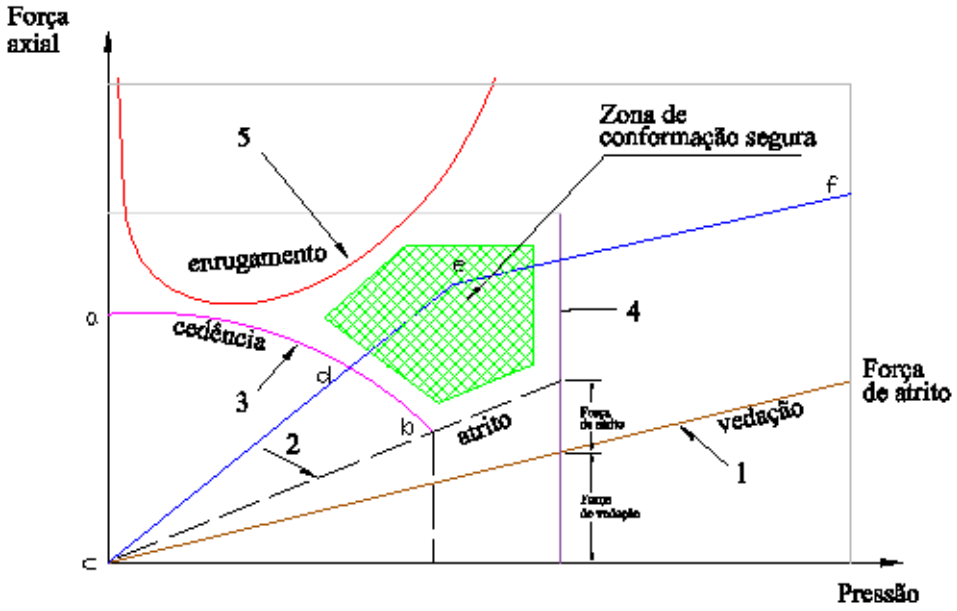


Figura 5.2: Diagrama do processo de hidroconformação (adaptado de Dohmann (1997), em Singh (2003) [4])

autómato programável. Os dados relativos ao processo podem introduzir-se por meio de monitores com sensores de toque. O sistema de controle tipicamente armazena numa biblioteca todos os parâmetros necessários do processo. Quando se muda a ferramenta para produzir um componente diferente, os parâmetros do processo são recarregados automaticamente no sistema a partir da biblioteca.

A pressão no interior da peça pode ter um valor constante, pode ser função da força (ou do deslocamento) axial do cilindro de alimentação ou uma combinação destas duas condições (força e deslocamento). Durante a alimentação das extremidades e a conformação, a pressão pode ser controlada de vários modos.

Um método que permite compreender os parâmetros do processo da hidroconformação tubular é fazer a representação gráfica das condições de limite de conformação, sendo a pressão no interior do componente representada no eixo das abcissas e a força do cilindro de vedação axial representada no eixo das ordenadas. Da construção deste gráfico obtém-se uma zona de conformação em segurança. Durante a hidroconformação os parâmetros deverão estar dentro desta zona (ou janela). Neste gráfico, designado *diagrama de processo de hidroconformação*, é ainda representada a curva de andamento do processo (curva a, b, c, d, e).

A linha 1 do gráfico representa a força mínima necessária para se fazer a vedação do tubo, à medida que a pressão de conformação é aumentada. Essa força é dada por:

$$F_{ved} = \underbrace{\frac{\pi}{4}(D-2t)^2}_{A_{ved}} .P_r \tag{5.1}$$

onde:

$$\begin{aligned} F_{ved} &= \text{força mínima de vedação} \\ A_{ved} &= \text{área de vedação da secção transversal do tubo} \\ D &= \text{diâmetro exterior do tubo} \\ t &= \text{espessura do material do tubo} \\ P_r &= \text{pressão do fluído de conformação} \end{aligned}$$

Observamos que se a pressão interna do fluído de conformação for superior à força axial de vedação (alimentação), a vedação não é eficiente.

A linha 2 representa a força de atrito aproximada (F_a) na área de expansão da parede do tubo, desde a sua extremidade até uma distância L no interior da matriz. Ela é dada por:

$$F_a = \mu \, . \underbrace{\pi \, . \, (D - 2t) \, . \, L}_{A_{parede}} \, P_r \tag{5.2}$$

onde:

$$\begin{aligned} F_a &= \text{força de atrito (N)} \\ A_{parede} &= \text{área da parede do tubo em contacto com a cavidade da matriz (mm)} \\ \mu &= \text{coeficiente de atrito} \\ L &= \text{distância à extremidade de vedação (mm)} \end{aligned} \tag{5.3}$$

Vemos que esta linha depende do coeficiente de atrito entre as superfícies da peça tubular e da cavidade da matriz (em contacto uma com a outra) e da distância à extremidade de vedação da peça.

A curva 3 representa a força e a pressão necessárias para se obter a cedência do material. Acima desta curva, obtém-se a cedência do material. Se a curva de andamento da hidroconformação não atinge a curva 3, isso indica que a força axial e a pressão interna são demasiado pequenas para se obter a cedência. Nos pontos extremos desta curva (a e b) a cedência obtém-se exclusivamente à custa de uma das duas variáveis (no ponto a é a variável força axial (a pressão interna é nula) e no ponto b é a pressão interna (a força axial é nula). Nos restantes pontos da curva, actuam as duas variáveis. A força no ponto a e a pressão no ponto b são

dadas respectivamente pelas fórmulas:

$$F_a = \gamma_d \cdot \underbrace{\pi \cdot (D - t) \cdot t}_{A_{stm}} \tag{5.4}$$

$$P_b = \frac{2\,\gamma_d \cdot t}{D - 2\,t} \tag{5.5}$$

onde:

F_a = força necessária para se obter a cedência do material, para uma pressão do fluído nula (N)
A_{stm} = área da secção transversal do material do tubo
γ_d = esforço de cedência do material (MPa)
P_b = pressão necessária para se obter a cedência do material, para uma força axial nula (MPa)

A linha 4 representa a pressão necessária para expandir o tubo. Ela é dada por:

$$P_f = \frac{2\sigma_{rot} \cdot t}{D - 2t} \tag{5.6}$$

de acordo com a teoria dos cilindros de paredes finas. Se a linha do andamento da hidroconformação ultrapassar a linha 4, ou seja, se a força axial de alimentação e a pressão interna do fluído forem muito altas, o material poderá sofrer estricção e/ou rotura.

A linha 5 identifica o limite superior para além do qual as paredes do tubo estarão sujeitas a encurvadura e/ou a enrugamento. É uma curva sem expressão analítica; é determinada experimentalmente e/ou por simulação computacional por elementos finitos do processo de hidroconformação da peça de trabalho. Este limite superior depende bastante da geometria do componente e das propriedades do material. Observamos que se a força axial de alimentação for maior do que a pressão interna do fluído de conformação, a hidroconformação ultrapassa esta linha e o material estará sujeito ao enrugamento e à encurvadura.

As linhas 2, 3, 4 e 5 delimitam assim uma região, ou *janela*, onde o processo de hidroconformação decorre em segurança. Assim, numa conformação bem sucedida, considera-se a parte da curva *c*, *d*, *e*, *f* de conformação que situa dentro da janela de segurança: os valores dos parâmetros *força do cilindro de vedação* e *pressão interna de conformação* estarão dentro da janela; também a maior parte da superfície do componente deverá estar em contacto com as paredes da cavidade da matriz. A pressão pode então ser aumentada até à *pressão máxima de calibração* para "alisar" todas as pequenas rugas. Com o andamento da conformação ao longo da curva *c, d, e, f*, a quantidade de alimentação axial será muito pequena até ao ponto 3 da curva de cedência 3. Uma quantidade grande da alimentação necessária deverá ocorrer

entre o ponto d e o ponto e, que estão dentro dos limites da janela de conformação.

Quanto maior for a janela de conformação de segurança, mais robusto será o processo de produção. O aumento do atrito fará a linha 2 deslocar-se para cima, o que diminui o tamanho da janela de conformação. Para o evitar, é fundamental utilizar-se um bom lubrificante; a peça deverá ter também uma superfície de contacto com a matriz com uma boa condição, para a linha 2 se manter em baixo, aumentando a janela de conformação. Os materiais dos tubos deverão ter um intervalo razoável entre as suas tensões de cedência, σ_{ced} e máxima, σ_{max}, mantendo assim uma afastamento entre a linha de cedência, 3, e a linha de rotura, 4, suficiente para se ter uma janela de conformação de tamanho razoável. Materiais com menor ductilidade ou com um encruamento excessivo, resultante de operações de pré-conformação e de dobragem terão valores de σ_{ced} e de σ_{max} mais próximos entre si, o que piora a robustez do processo de hidroconformação, ao aproximar as curvas 3 e 4 da janela de conformação.

Um outro método de controle do processo de conformação é estabelecer a pressão de conformação como uma função do deslocamento do cilindro de alimentação das extremidades (ou de vedação). Este método pode ser visualizado por representação num gráfico dos parâmetros-chave do processo de hidroconformação,a pressão de conformação e a alimentação de extremidades, como mostra a figura. Uma vez fechada a matriz, o componente é cheio com fluído de conformação e os cones de vedação são posicionados. A pressão é aumentada até um valor pouco abaixo da pressão de cedência com uma quantidade muito pequena da alimentação das extremidades, ponto b. A alimentação de extremidades necessária é conseguida com um aumento da pressão entre os pontos b e c. a pressão no ponto c tem um valor próximo do da pressão de expansão do tubo. No ponto c da curva, a maior parte da superfície do componente deverá estar em contacto com as paredes da matriz. A pressão pode agora ser aumentada até o valor máximo de conformação, ponto d, para eliminar todas as rugas menores. Durante esta fase de pressurização, uma pequena quantidade de alimentação axial contribui com eficácia para uma boa vedação.
A pressão de cedência do tubo pode calcular-se com a equação 5.5 e a pressão de *expansão* do tubo é dada pela equação 5.6. [4]

5.2.1 Cálculo da força de vedação nas extremidades

A força de vedação durante a alimentação é dada pela equação seguinte:

$$F_{ved} \; = \; \pi(D-t).t.\sigma_{rot} \; + \; P_{alim.} \, \frac{\pi}{4}(D-2t)^2 \tag{5.7}$$

em que:

$$
\begin{aligned}
F_{ved} &= \text{força de vedação durante a alimentação (KN)} \\
D &= \text{Diâmetro exterior do tubo (mm)} \\
t &= \text{espessura do material (MPa)} \\
\sigma_{rot.} &= \text{Tensão de rotura do material (MPa)} \\
P_{alim.} &= \text{Pressão máxima de alimentação (MPa)}
\end{aligned}
$$

A primeira parcela corresponde à força de rotura na secção da parede do tubo. A segunda parcela corresponde à força, devida à pressão máxima de alimentação, que actua na área da secção interior do tubo (ou seja, na área da secção do fluído no interior do tubo).
A força de vedação para a pressão máxima de vedação é:

$$F_{ved_{max.}} = P\frac{\pi}{4}(D-2t)^2 \tag{5.8}$$

em que P é a pressão máxima de conformação (MPa) [4].

Capítulo 6

Materiais e suas propriedades

6.1 Propriedades mecânicas dos materiais

As propriedades mecânicas dos materiais dúcteis que se utilizam mais comummente são:

- o módulo de elasticidade, E
- a tensão de cedência, σ_{ced}
- o coeficiente de Poisson, ν
- a tensão de rotura, σ_{rot}
- o alongamento uniforme
- o alongamento percentual
- o coeficiente de encruamento, n
- a relação de deformação plástica, r

Estas propriedades são a base para o cálculo dos parâmetros do processo de hidroconformação. A pressão de conformação, a tonelagem da prensa e a quantidade de alimentação axial são determinados pela utilização destas propriedades mecânicas. Elas poderão também ser usadas na simulação computacional do processo de hidroconformação por elementos finitos. O diagrama de limite de conformação do material (DLC) também é utilizado para avaliar a conformabilidade do material, quando o material é sujeito a estampagem profunda ou a alimentação axial para expansão durante a hidroconformação. [4]

6.1.1 Regime elástico do material

Durante o ensaio de tracção, à medida que a carga se desenvolve no provete de ensaio, a deformação inicial é relativamente pequena até ao ponto da tensão de cedência do material. A relação entre a tensão e a deformação até este ponto é linear [linha recta do diagrama de tensão – deformação]. No regime elástico, as deformações causadas ao material pela carga desaparecem com a retirada dessa carga e o provete regressa à sua forma original. Ele tem portanto um comportamento elástico. O desempenho do material no regime elástico é quantificado por três propriedades mecânicas:

- módulo de elasticidade, E
- tensão de cedência, σ_{ced}
- coeficiente de Poisson, ν

O módulo de elasticidade, E, é a relação entre a tensão e a deformação, em regime elástico, [do material]. Portanto, é dado pelo declive da parte recta da curva do diagrama de tensão – deformação.

$$E = \sigma_e / e \tag{6.1}$$

onde σ_e e e são respectivamente a tensão e a deformação no regime elástico.

O módulo de elasticidade é uma medida da rigidez do material.

A tensão de cedência determina-se traçando uma linha paralela à curva inicial do diagrama de tensão – deformação, partindo da abcissa com o valor de deformação de 0,2 %. O ponto de intersecção desta recta intersecta a curva de tensão – deformação num dado ponto, o qual define a tensão de cedência. Evita-se assim uma estimativa subjectiva do ponto de cedência. Ao contrário do módulo de elasticidade, a tensão de cedência do material depende altamente dos seus elementos de liga, do tratamento térmico e do encruamento durante o processo de fabrico.

Em regime elástico, o alongamento produzido pela carga na direcção longitudinal x é acompanhada por uma contracção em qualquer direcção da secção transversal. Se o material for *isotrópico* [1], a deformação específica será a mesma para qualquer direcção transversal ($\varepsilon_y = \varepsilon_z$). A relação entre a deformação transversal e a deformação longitudinal é o coeficiente de Poisson, ν:

$$\nu = \frac{\text{deformação transversal}}{\text{deformação longitudinal}} = \frac{\epsilon_y}{\epsilon_x} = \frac{\epsilon_z}{\epsilon_x} = \frac{\epsilon_w}{\epsilon_l} \tag{6.2}$$

$$\nu_{\text{aço}} \simeq 0,29 \quad ; \quad \nu_{\text{alumínio}} \simeq 0,35 \quad ; \quad \nu_{\text{cobre}} \simeq 0,34$$

6.1.2 Regime plástico

Quando a carga aplicada ultrapassa o ponto de cedência, o provete começa a ceder: a pequenos incrementos da carga correspondem deformações cada vez maiores. Se se retirar a carga durante este regime "plástico", o provete não regressa à sua forma original: haverá uma deformação permanente no comprimento de bitola do provete. Para além do ponto de cedência,

[1] as suas propriedades mecânicas não variam com a variação da direcção

à medida que a carga aplicada ao provete aumenta, todo o comprimento do provete sofre um alongamento uniforme até atingir o ponto da tensão máxima. Este é o intervalo óptimo para conformar o metal segundo a forma desejada. Para além deste ponto, aparecem alongamentos localizados do material geralmente difíceis de controlar e o material fica excessivamente encruado.
Em todas as operações de conformação do metal, o material é forçado por meio de ferramenta adequada a ir além da sua tensão de cedência, para se lhe dar a geometria desejada, de modo permanente.

O desempenho do material em regime plástico é quantificado pelas propriedades mecânicas seguintes:
- tensão de rotura, σ_{rot}
- alongamento uniforme
- alongamento percentual
- coeficiente de encruamento, n
- coeficiente de deformação plástica, r

Durante a fase de alongamento uniforme, à medida que o comprimento do provete de ensaio aumenta, a área da sua secção transversal diminui. Os valores de tensão e deformação nominais são calculados com base nas dimensões iniciais do provete (área da secção transversal e comprimento) e portanto não têm em consideração as variações consideráveis (diminuição) da área da secção que ocorrem durante a fase de alongamento uniforme da zona de estricção da curva. Para representar com mais exactidão o comportamento do material neste regime, devemos então utilizar os valores de tensão e de deformação *verdadeiros* ou *reais* que se derivam do ensaio de tracção da forma que se segue.

Por definição, a tensão nominal (σ_n) e a deformação nominal (e) são:

$$\sigma_n = \frac{F}{A_0} \tag{6.3}$$

$$e = \frac{\Delta l}{l_0} \tag{6.4}$$

em que:

F	=	carga aplicada ao provete
A_0	=	área original da secção transversal
Δl	=	alongamento
l_0	=	comprimento inicial do provete

A tensão verdadeira (σ_v) e a deformação verdadeira (ϵ) são:

$$\sigma_v = \frac{F}{A_i} \tag{6.5}$$

$$\epsilon = \int \frac{dl}{l} = ln\frac{l_i}{l_0} \tag{6.6}$$

em que

F	=	carga aplicada ao provete
A_i	=	área instantânea da secção transversal
ϵ	=	deformação verdadeira
l_i	=	comprimento instantâneo do provete
l_0	=	comprimento inicial do provete

O comprimento instantâneo do provete é:

$$l_i = l_0 + \Delta l \tag{6.7}$$

Substituindo li da eq. (6.7) na eq. (6.6), obtemos:

$$\epsilon = ln \frac{l_0 + \Delta l}{l_0} \tag{6.8}$$

Resolvendo a eq. (6.4) em ordem a Δl e substituindo na eq. (6.8), temos:

$$\epsilon = ln \frac{l_0 + e.l_0}{l_0} = ln \frac{l_0(1+e)}{l_0} = ln(1+e) \tag{6.9}$$

Num material homogéneo *isotrópico*, a deformação plástica ocorre com conservação do volume do material. Portanto, o volume do provete mantém-se e podemos deduzir a área instantânea:

$$A_0.l_0 = A_i.l_i \quad \Leftrightarrow \quad A_i = \frac{A_0.l_0}{l_i}$$

Tendo em conta a eq. (6.4), a equação anterior vem:

$$A_0.l_0 = A_i.l_i \quad \Leftrightarrow \quad A_i = \frac{A_0.l_0}{l_i} \quad \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow \quad A_i = \frac{A_0.l_0}{l_0 + \Delta_l} = \frac{A_0.l_0}{l_0(1+\frac{\Delta l}{l_0})} = \frac{A_0}{1+e}$$

Substituindo esta expressão na eq. (6.5), a tensão verdadeira vem:

$$\sigma_v = \frac{F}{A_i} = \frac{F}{A_0}(1+e) \quad \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow \quad \sigma_v = \sigma_n(1+e) \tag{6.10}$$

Obtemos assim a tensão verdadeira, σ_v, em função da tensão e da deformação nominais. [4]

6.1.3 Encruamento (ou endurecimento por deformação)

Durante a fase de alongamento uniforme, à medida que o material se deforma, a carga aumenta desde o ponto de cedência até ao ponto de rotura. Esta resposta indica que o material está a ser encruado ou endurecido por deformação. A relação entre a tensão verdadeira e a deformação verdadeira neste intervalo pode ser aproximada pela lei de encruamento exponencial:

$$\sigma_v \; = \; K.\epsilon^n \tag{6.11}$$

onde

- σ_v = tensão verdadeira
- K = coeficiente de rigidez (MPa)
- ϵ = deformação verdadeira
- n = coeficiente de encruamento

Aplicando logaritmos, podemos linearizar a equação (6.11):

$$ln\,\sigma_v \; = \; ln(\,K\,.\,\varepsilon^n) \; = \; ln\,K \; + ln\,\varepsilon^n \quad \Leftrightarrow \quad ln\,\sigma_v \; = \; ln\,K \; + \; n\,.\,ln\,\epsilon \tag{6.12}$$

O declive desta curva linearizada é o valor n do material. A constante K obtém-se por intersecção da curva com o eixo $ln\sigma_v$. O valor n (o declive) pode variar de segmento para segmento da curva. Se necessário, o valor n pode ser definido para um intervalo de valores de deformação, por exemplo, de 5 a 15 %. O valor geralmente indicado é o do intervalo entre o ponto de cedência e ponto de rotura e designa-se valor de n terminal (n_t).

A capacidade do material encruar é uma propriedade muito importante nas operações de conformação: ela promove o alongamento uniforme do material sem uma redução prematura de espessura ou estricção localizados. O coeficiente de encruamento n é uma medida da conformabilidade do material. Materiais com maiores valores de n são mais adequados para operações de estampagem profunda e maiores expansões seccionais na hidroconformação.

Para chapa de aço de baixo carbono laminada a quente e laminada a frio, o valor n situa-se tipicamente entre 0,16 e 0,24, dependendo da classe (qualidade) do aço. Para a chapa de aço inox 304, em estado de recozido, o valor n pode ser de até 0,45 e para o cobre recozido, n = 0,5.

O processo de fabrico do tubo geralmente encrua o material, e portanto o valor n para o tubo é reduzido. A dimensão do encruamento depende do método de laminagem do tubo, da concepção do trem de laminagem e dos parâmetros de execução [4].

6.1.4 Anisotropia

A anisotropia é a característica de um material cujas propriedades mecânicas variam em função da variação das direcções no material em que elas são medidas. Os metais são geralmente

materiais isotrópicos. Quando são submetidos a trabalho mecânico (processos de conformação como laminagem, forjamento, estampagem, etc.) a sua microestrutura cristalina sofre uma deformação: os grãos, inicialmente orientados de uma forma aleatória, são deformados e redistribuídos segundo uma orientaçao preferencial, tendo portanto tendência a ter certos planos (ou direcções) cristalográficos alinhados com a direcção da operação de conformação. É o caso, por exemplo, das chapas sujeitas a estampagem: ocorre o alongamento de grãos na direcção de maior deformação de tração, surgindo uma direção preferencial de orientação cristalina. Também no processo de laminagem de chapas metálicas ocorre deformação da microestrutura e originam-se grãos mais alongados na direcção de laminagem .

Nas chapas e noutros produtos planos obtidos por laminagem consideram-se em geral dois tipos de anisotropia: a *anisotropia planar* e a *anisotropia normal*. A anisotropia planar resulta da variação das propriedades mecânicas, no plano da chapa, segundo a direcção em que são medidas. Temos *anisotropia normal* quando as propriedades mecânicas segundo a espessura são diferentes das que se obtêm no plano da chapa. É possível um material quase não ter anisotropia planar e no entanto ter anisotropia normal. [2, 1, 30]

6.1.5 Coeficiente de anisotropia

Durante a fase de alongamento uniforme, à medida que o material se alonga na direcção longitudinal, a largura e a espessura do provete reduzem-se. A relação de deformações plásticas (ou *coeficiente de anisotropia plástica*) (r) é a relação entre a deformação verdadeira segundo a largura do provete, ε_w, e a deformação verdadeira ocorrida na sua espessura, ε_h:

$$r = \frac{ln\frac{w}{w_0}}{ln\frac{h}{h_0}} = \frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_h} \tag{6.13}$$

em que h_0, w_0 representam respectivamente a espessura e a largura iniciais e h, w a espessura e a largura no instante considerado. Se a deformação na espessura (ϵ_h) for menor que a deformação na largura (ϵ_w), o valor de r será maior que 1,0, o que indica que o material é menos propenso a reduzir a espessura, quando ele é conformado por estiramento. Um material será então isotrópico (com propriedades uniformes em todas as direcções) quando o seu valor de r for 1,0. Em materiais anisotrópicos, o valor de r é calculado a partir de ensaios de provetes cortados a 0°, a 45° e a 90° em relação à direcção de laminagem da chapa, como mostra a figura 6.1. O seu valor médio é obtido pela fórmula:

$$r = \frac{r_{0^\circ} + 2.r_{45^\circ} + r_{90^\circ}}{4} \tag{6.14}$$

A tabela 1, na página seguinte, apresenta valores típicos do coeficiente de anisotropia, r, para alguns materiais metálicos [30].

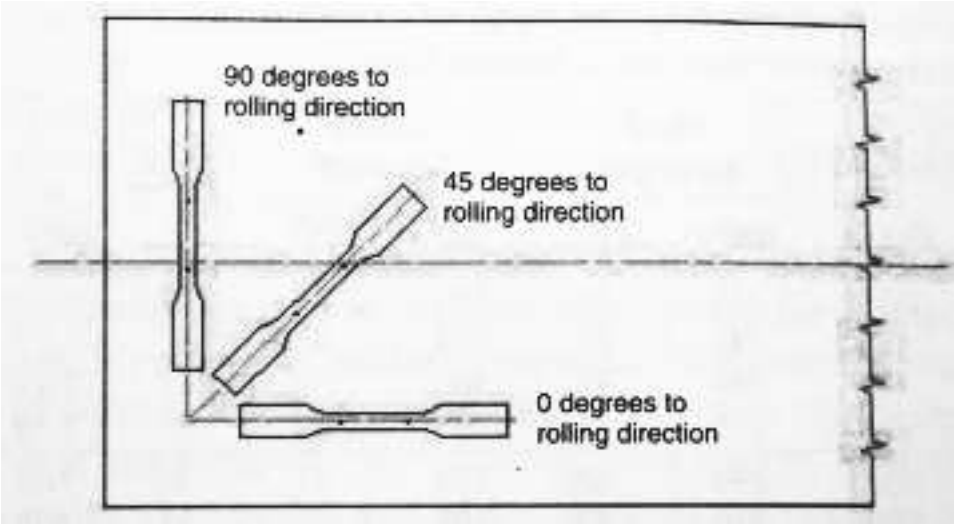


Figura 6.1: Provetes de ensaio de tracção para determinar o valor de r [4]

Tabela 1 - Coeficientes de anisotropia	
Material	**r**
Aço	1 a 2
Alumínio	0,5 a 1
Cobre	0,9 a 1
Titânio	3 a 7

Quando os meios experimentais não permitem medir directamente a extensão segundo a espessura do provete, pode-se considerar a conservação de volume, $\varepsilon_h = -(\varepsilon_w + \varepsilon_l)$ e definir o coeficiente de anisotropia segundo a equação seguinte:

$$r = \frac{\varepsilon_w}{-(\varepsilon_w + \varepsilon_l)} \tag{6.15}$$

Materiais com valores de r mais elevados são menos propensos a reduzir a sua espessura quando o material está sujeito a maiores deformações nas direcções longitudinal e circunferencial, durante operações de estampagem e de estiramento e a maiores expansões de hidroconformação. Portanto, na hidroconformação são desejáveis materiais com índices de anisotropia elevados, porque têm uma capacidade maior de se deformar na largura e ao mesmo tempo de resistir à redução da espessura, bem como características tribológicas que favorecem a deformação, minimizando a dispersão de energia através do atrito entre peça e ferramenta e [d]a geração de calor causada pela deformação do material. Um valor mais elevado de r significa menos instabilidade plástica. [3, 1, 4, 30]

6.2 Análise de grelha de círculos

Durante qualquer processo de conformação, o metal é estirado e/ou comprimido até se obter a forma geométrica requerida. O ponto a que a chapa metálica pode ser estirada e/ou comprimida é função em grande medida:

- das propriedades de conformabilidade do material, ou seja, dos valores n e r e do alongamento plástico percentual.
- da relação entre o alongamento de estiramento (deformação maior) e o alongamento de compressão (deformação menor) [4].

As deformações em diferentes zonas de uma peça sujeita a operação de conformação (como por exemplo a estampagem) variam muito. A análise de grelha de círculos é um método para determinar as deformações maior e menor que ocorrem na superfície do componente em chapa metálica durante a operação de conformação. As curvas de limite de conformação [2] (CLC) da estampagem são construídas com base nos resultados de ensaios de conformação por punção hemisférico ou de ensaios de tracção. No ensaio de Nakazima utiliza-se uma série de peças de chapa de diferentes larguras, em cujas superfícies são gravadas grelhas de círculos, por um processo de gravação fotoquímica ou electroquímica. O diâmetro destes círculos é normalmente de 0,1 ou 0,2 polegadas (5,08 mm) de diâmetro. Estas chapas são em seguida sujeitas a um ensaio de deformação com um punção hemisférico até que ocorra o rasgamento. Quando a peça é conformada, os círculos deformam-se, assumindo formas elípticas na superfície conformada, como mostra a figura 6.2.

A chapa de menor largura poderá deformar-se uniaxialmente (tracção) enquanto a tira mais larga se poderá deformar biaxialmente. Tiras de largura intermédia deformar-se-ão sob uma gama de estados de tensão [40]. Na figura 6.4, página 60, o detalhe (1) representa o estado de tensão uniaxial (tracção) evidenciado no lado esquerdo da CLC – região de estampagem profunda. O detalhe (2) determina o processo de conformação combinada, onde existem tensões combinadas, uniaxiais e biaxiais – estiramento e embutimento profundo. O detalhe (3) apresenta o estado de tensão biaxial, localizado no lado direito da CLC – condição de estiramento puro. [31]

Após a conformação da chapa metálica, os círculos estão transformados em elipses de tamanhos diferentes. As dimensões das elipses não fracturadas mais próximas da linha de fractura do material são medidas e as deformações maiores e menores são calculadas [40]. Os comprimentos do eixo maior (L) e do eixo menor (W) da elipse são medidos e utilizados para se calcular os valores da deformação maior e da deformação menor, respectivamente:

[2] também designadas de curvas limite de estampagem ou de embutidura [30]

$$\text{Deformação maior} = \frac{L - D}{D} \times 100 \tag{6.16}$$

$$\text{Deformação menor} = \frac{W - D}{D} \times 100 \tag{6.17}$$

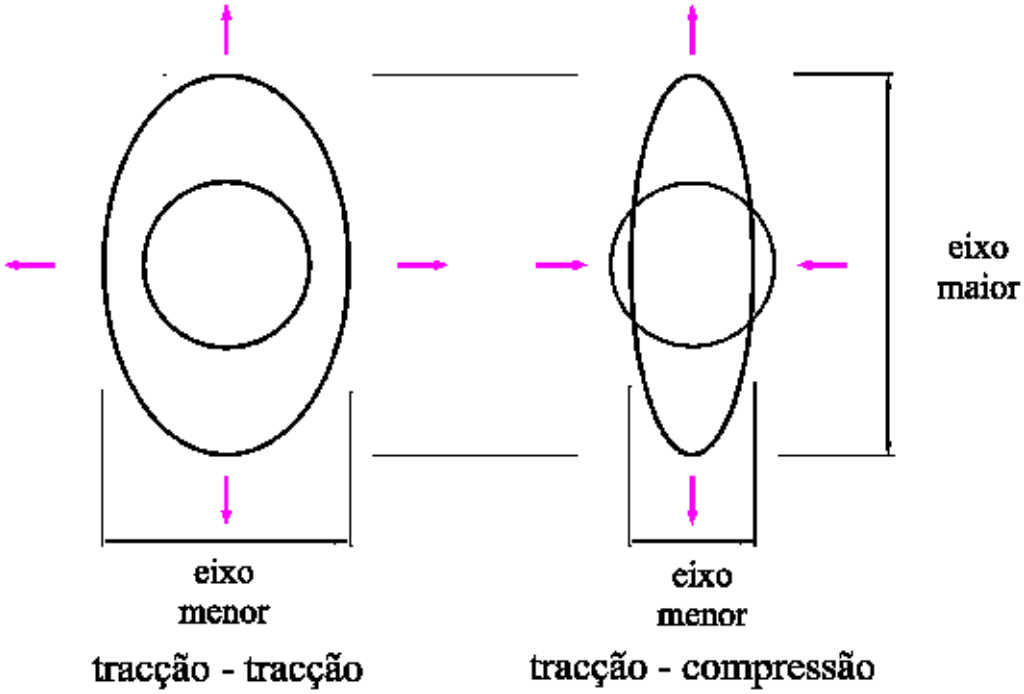


Figura 6.2: Elipses obtidas por deformação dos círculos no ensaio (adaptado de [32])

Como métodos de medida utilizam-se, por exemplo, divisores e régua de aço, fita Mylar, analisador de grelha de círculos (com câmara de vídeo ligada a computador) ou microscópio de movimento horizontal. Destes métodos, a fita Mylar destaca-se pela simplicidade: é uma fita transparente com uma escala graduada com linhas verticais espaçadas igualmente, e duas linhas divergentes - como mostra a figura 6.3. A distância horizontal entre duas linhas verticais consecutivas é igual ao raio dos círculos originais da grelha de círculos. A escala é sobreposta numa elipse, colocando-se uma linha vertical sobre o seu eixo maior, e vai-se deslocando até que as linhas divergentes contactem as extremidades do eixo maior da elipse. Então lê-se directamente a medida da deformação percentual. A fita é em seguida rodada 90 graus para, de modo análogo, ler a deformação menor [32].

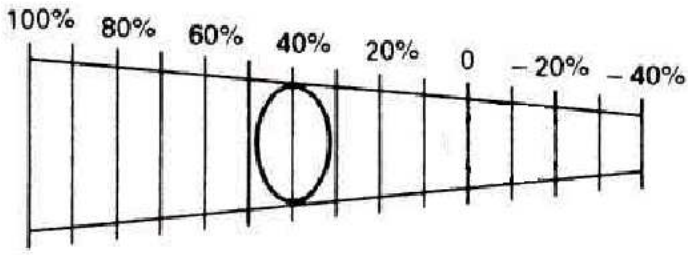


Figura 6.3: Medição dos eixos maior e menor com fita graduada Mylar ([32])

6.3 Diagramas de Limite de Conformação

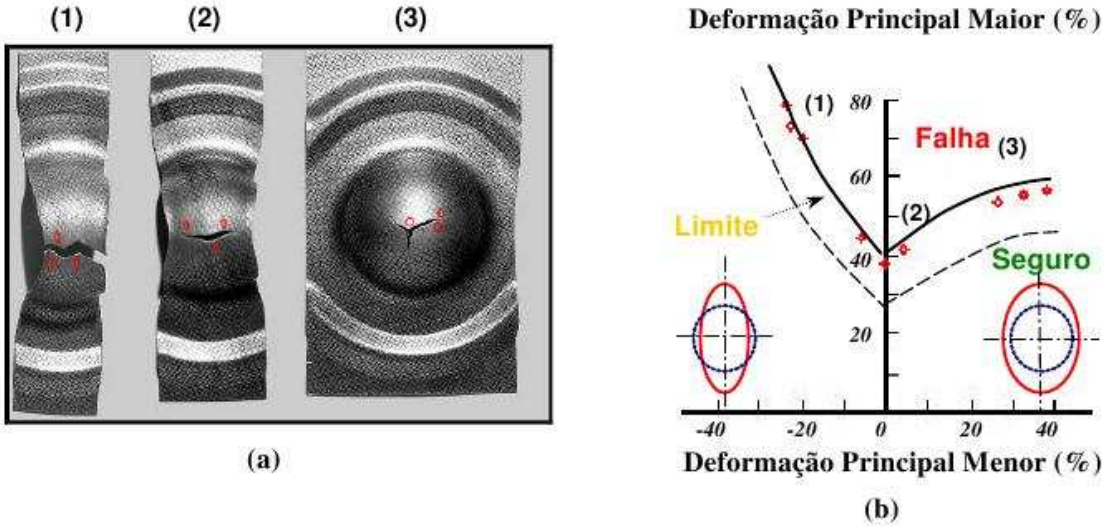
Os valores obtidos na análise de grelha de círculos são então representados num gráfico em que a deformação maior (sempre positiva) se representa no eixo das ordenadas e a deformação menor (positiva ou negativa) se representa no eixo das abcissas. Traça-se então uma curva que une os pontos com os valores representados. Para valores de deformação acima desta curva, o material desta espessura deverá sofrer rotura. Esta curva é a *curva limite de conformação*, CLC, ou *Curva Limite de Estampagem*. O limite de conformabilidade para operações de deformação plástica de chapa é geralmente determinado pelo aparecimento de estricções localizadas; estas são em geral inadmissíveis, quer por questões de natureza estética, quer por perda de resistência mecânica e/ou a ambientes corrosivos [30].

Desenhando-se uma curva paralela 10% abaixo da CLC, estabelece-se uma zona de segurança: para deformações abaixo desta curva, o material está numa zona de segurança, ou seja, não está sujeito a rotura nem a estricção localizada [3]. Estes gráficos são os diagramas de limite de conformação, DLC (*forming limit diagram*, FLD) [40, 32, 4].

O conceito dos diagramas de limite de conformação foi introduzido por Keeler (1964) e Goodwin (1968). Ele representa o primeiro critério de segurança para as operações de estampagem profunda [41]. Os diagramas de limite de conformação indicam as deformações limite que as chapas podem sofrer, numa gama alargada de relações entre deformação maior e menor [40].

A implementação de diferentes modelos matemáticos para determinação das CLC tem sido objecto de estudo de vários investigadores. Marciniak e Kuczynski propuseram um modelo matemático para a determinação teórica do DLC [41]. Keeler e Brazier (1975) ([38], citado por [4]),) estabeleceram relações empíricas entre o coeficiente de encruamento terminal, n_t, a espessura T e as curvas de limite de conformação, para aços de baixo carbono. Assim, com

[3] Níveis de deformação dentro da zona limite formada pela CLC e pela linha de segurança deverão em condições normais ser evitadas, pois pequenas condições no stock do aço, condições de lubrificação, etc., poderia levar à possibilidade de rasgamento

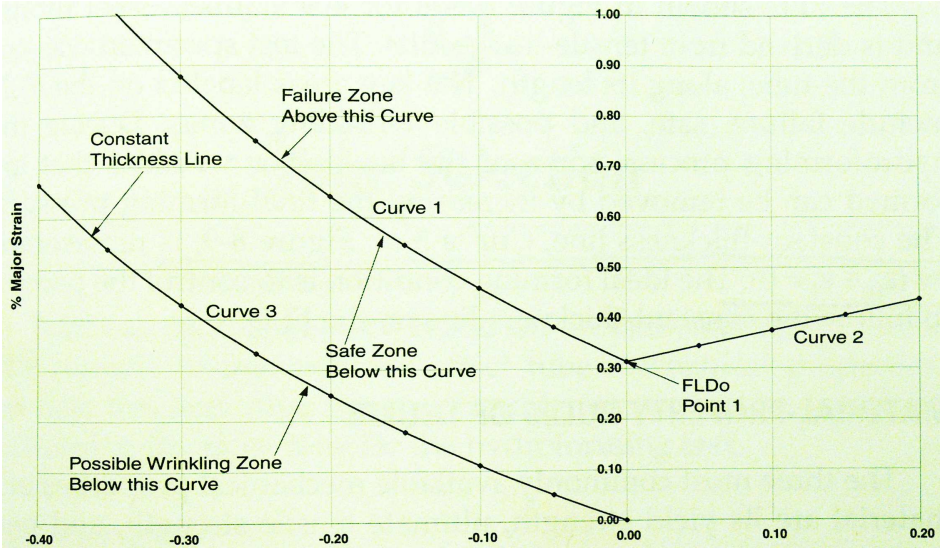


(a) Fractura obtida em chapas de diferentes larguras no ensaio Nakazima; (b) Diagrama de Limite de conformação

Figura 6.4: Diagrama de limite de conformação [31]

os valores das deformações maiores e menores medidas na rotura, as curvas de conformação podem ser identificadas por essas relações empíricas. J.Slota e E. Spisák (2005) compararam três modelos matemáticos (Marciniak - Kuczynski model, Hill - Swift model, Sing - Rao model) bem como um modelo empírico proposto pelo North American Deep Drawing Research Group (NADDRG) com resultados experimentais de trabalhos executados em diferentes chapas de aço. Concluiram que nenhum dos modelos pode prever o DLC para todos os tipos de chapas metálicas com fiabilidade.
O DLC é afectado pela espessura, pela tensão de cedência e de tracção máxima, pelo encruamento e pela anisotropia plástica. Para compreender a influência das propriedades do material e utilizar os materiais com eficiência, há necessidade de adoptar modelos matemáticos para analisar como um todo os factores que interagem, tendo ainda em consideração os constrangimentos do processo prático de fabrico. [41]. As equações empíricas baseiam-se em dados genéricos medidos. Sempre que possível, dever-se-á utilizar os diagramas DLC do material real [4].

As zonas fundamentais representadas no DLC são as zonas de rotura, de segurança e de possível enrugamento. Acima das curvas 1 e 2, está-se na região de rotura; entre a linha de espessura constante e as curvas 1 e 2 temos a zona de conformação segura; abaixo da linha de espessura constante, temos uma zona de possível enrugamento.
Observa-se que para um aumento dos valores negativos da deformação menor a conformabilidade do material aumenta significativamente. O aparecimento de deformação menor negativa, na hidroconformação tubular, deve-se à acção da alimentação axial das extremidades do



(a) Deformação menor percentual. A curva 3 do DLC do tubo é uma linha de espessura constante do material, representada pela equação $\varepsilon_\theta + \varepsilon_l = 0$. As curvas obtiveram-se de um provete cortado longitudinalmente do tubo e sujeito ao ensaio de tracção.

Figura 6.5: DLC de um tubo em aço inox 409 com $n = 0,135$ e $t = 1,8$ mm. [4]

material[4].

A deteminação experimental da CLC é influenciada por inúmeros factores, de que se destacam a velocidade de deformação, a espessura da chapa e o tipo de trajectória de deformação. este último é muito importante, pois uma CLC obtida por trajectórias de deformação simples (ou lineares) geralmente apresenta dificuldades na previsibilidade do comportamento, à rotura e/ou à estricção, de processos de conformação plástica de chapa em que as trajectórias de deformação sejam complexas [30].
Os DLC desenvolvidos para os processos de estampagem – com modificações que têm em conta o encruamento do material devido às operações de laminagem e de dobragem do tubo – podem, no entanto, ser usados como linhas de orientação na avaliação da viabilidade da hidroconformação tubular ([39], citado por [4]).

Os diagramas de limite de conformação são também bastante importantes para avaliar da conformabilidade dos *tailor-welded blanks*. Durante o processo de hidroconformação, alguns dos encurvamentos ou rugas que são conformados podem ser removidos aumentando a pressão final de conformação. A condição ideal de conformação é controlar o processo de modo a que ele siga a linha de espessura constante do DLC [4].

6.3.1 Mecânica da Conformação dos Metais

O objectivo da conformação do metal é transformar a forma na peça final de modo a obter-se, por um lado, as dimensões e tolerâncias desejadas e, por outro, as propriedades do material da peça final (uma melhoria substancial da resistência e/ou da tenacidade do material) e a qualidade da superfície desejadas. Estes objectivos deverão ser conseguidos da maneira mais económica e eficaz, tendo em conta a maquinaria e as ferramentas mais adequadas e os meios apropriados de mecanização e de automatização.

A conformação de metal é no essencial uma deformação plástica controlada do metal, possível de se realizar graças à capacidade dos metais cederem e de se deformarem plasticamente, muitas vezes num intervalo muito grande de deformações, antes de sofrerem rotura por estricção ou por fractura. Durante toda a operação de conformação do metal, a peça tem que ceder mas não pode sofrer rotura [16].

6.3.2 Estado de tensão

Seja um elemento cúbico de material, cujas direcções X_1, X_2 e X_3 são as direcções dos eixos principais, perpendiculares uns aos outros, e cujos lados são planos principais. Nestes planos não há tensões de corte. As tensões normais nestes planos são $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$. σ_1 é a tensão maior e σ_3 é a menor. A tracção tem o sinal positivo e a compressão o sinal negativo. Se duas das tensões principais forem iguais, o estado chama-se de tensão cilíndrica. Se as três tensões forem iguais, o estado de tensões é hidrostático ou esférico.
Com excepção dos planos principais, em todos os outros planos actuam tensões de corte. Para cada um dos três eixos principais, há dois planos não principais que passam por esse eixo que contêm as tensões de corte máximas (as tensões de corte principais). Estes planos fazem um ângulo de 45° com os planos principais. As tensões de corte são:

$$\tau_1 = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{2} \tag{6.18}$$

$$\tau_{max} = \tau_2 = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \tag{6.19}$$

$$\tau_3 = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \tag{6.20}$$

O círculo de Mohr permite obter as tensões em todos os planos do sistema, relativamente às tensões principais.

Vejamos agora os seguintes estados de tensão:

a) estado uniaxial de tensão:

$$\sigma_1 \neq 0 \quad ; \quad \sigma_2 = \sigma_3 = 0$$

As tensões tangenciais (ou de corte) máximas encontram-se nos planos que fazem um ângulo de 45° com o eixo X_1 e que contêm o eixo X_2 ou o eixo X_3. O seu valor é $\tau_{\text{máx}} = 0,5\sigma_1$

b) estado uniaxial de compressão:

$$\sigma_3 \neq 0 \quad \sigma_1 = \sigma_2 = 0$$

A tensão normal de compressão σ_3 (a menor algebricamente) tem o mesmo valor absoluto da tensão σ_1 do caso a). Numa situação análoga ao caso a), as tensões tangenciais (ou de corte) máximas encontram-se nos planos que fazem um ângulo de 45° com o eixo X_3 e que contêm o eixo X_1 ou o eixo X_2. O seu valor é $\tau_{\text{máx}} = 0,5\sigma_3$. A cedência plástica será induzida com a mesma intensidade de a) mas não haverá tendência para a fractura porque as tensões de tracção são nulas.

c) estado plano de tensão:

As tensões existem em duas dimensões.

$$\sigma_1 \neq 0 \quad ; \quad \sigma_2 = 0,5\sigma_1 \quad ; \quad \sigma_3 = 0$$

Supomos o valor de σ_1 igual ao do caso a).

$$\tau_{\text{máx}} = \tau_2 = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = \frac{\sigma_1 - 0}{2} = \frac{\sigma_1}{2} = 0,5\sigma_1 \tag{6.21}$$

Na conformabilidade global, por um lado, e na susceptibilidade à fractura, por outro, este caso não difere muito de a).

$$\sigma_1 \neq 0 \quad ; \quad \sigma_2 = 0 \quad ; \sigma_3 = -0,5\sigma_1$$

$$\tau_{max} = \tau_2 = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = \frac{\sigma_1 - (-0,5\sigma_1)}{2} = \frac{1,5\sigma_1}{2} = 0,75\sigma_1 \tag{6.22}$$

Se este caso estivesse sujeito a uma tensão tal que desenvolvesse uma tensão tangencial máxima igual às dos casos a) e b), onde se tinha $\sigma_1 = 2\tau_{max}$, a tensão de tracção máxima seria agora somente

$$\sigma_1 = \frac{4\tau_{max}}{3} = 1,33\tau_{max} \tag{6.23}$$

Neste caso há menos tendência a fracturar para a mesma intensidade de deformação plástica.

Esta situação pode ser levada ao extremo num estado plano de tensão tal que $\sigma_3 = -\sigma_1$ e $\sigma_2 = 0$. Uma das tensões principais é de tracção e a outra é de compressão, com o mesmo

valor absoluto.

Cedência

Os dois critérios mais utilizados que foram desenvolvidos empiricamente são os estabelecidos por Tresca e por Von Mises. Este último, também conhecido por critério da máxima energia de distorção, num estado triaxial de tensões, representa-se pela fórmula:

$$\sigma_{eq} = \frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \tag{6.24}$$

A cedência de um material ocorrerá quando $\sigma_{eq} = \sigma_{ced}$, onde σ_{ced} é a tensão de cedência do material [16].

6.4 Deformação plástica de um tubo sujeito a pressão interna e a uma força axial de compressão

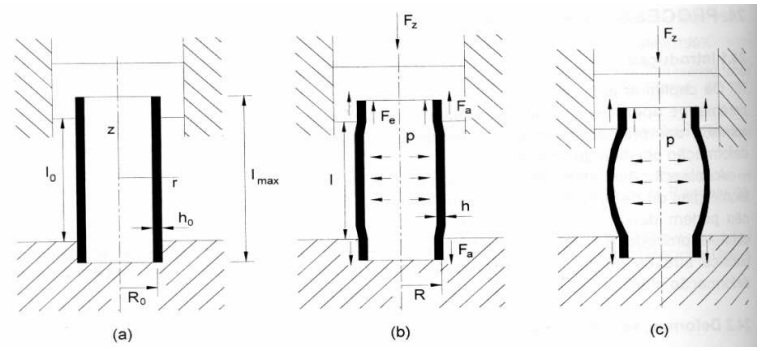


Figura 6.6: Deformação plástica de um componente tubular sob a acção da pressão de um fluído interior e de força axial aplicada nos seus topos, sem conformação a uma cavidade de matriz. a) Tubo não deformado; b) expansão uniforme do tubo; c) expansão do tubo após instabilidade plástica [30]

6.4.1 1ª fase de deformação plástica - expansão uniforme

Supõe-se o material do tubo isotrópico, a espessura h do tubo suficientemente pequena relativamente ao raio e que o tubo pode, no caso geral, ter extremidades fechadas.

O campo de extensões que actua no tubo nesta fase é (supondo r, z e θ eixos principais e desprezando-se os efeitos elásticos):

$$\varepsilon_\theta \;=\; ln\frac{R}{R_0} \quad ; \quad \varepsilon_z \;=\; ln\frac{l}{l_0} \quad ; \quad \varepsilon_r \;=\; -(\varepsilon_\theta \;+\; \varepsilon_z) \tag{6.25}$$

O valor da extensão efectiva ou equivalente, admitindo um material isotrópico, será:

$$\varepsilon_{eq} \;=\; \frac{\sqrt{2}}{3}\sqrt{(\varepsilon_r - \varepsilon_\theta)^2 + (\varepsilon_\theta - \varepsilon_z)^2 + (\varepsilon_z - \varepsilon_r)^2} \tag{6.26}$$

Atendendo à relação de ε_r em 6.25, a expressão anterior vem:

$$\varepsilon_{eq} \;=\; \frac{2}{\sqrt{3}}\sqrt{{\varepsilon_\theta}^2 + {\varepsilon_z}^2 + \varepsilon_\theta\,\varepsilon_z} \tag{6.27}$$

O campo de tensões será:

$$\sigma_\theta \;=\; \frac{p.R}{h} \quad ; \quad \sigma_z \;=\; \frac{p.R}{2h} - \frac{F}{2\pi\, r\, h} \quad ; \quad \sigma_r \;\cong\; 0 \tag{6.28}$$

em que p é a pressão no interior do tubo e F a resultante das forças axiais aplicadas ao tubo.

$$F \;=\; F_z \;-\; F_e \;-\; F_a \tag{6.29}$$

onde F_z é a força de compressão aplicada ao tubo, F_e é a força que a pressão no interior do tubo exerce sobre o prato de compressão do tubo ($F_e \;\cong\; p\,\pi\,{R_0}^2$) e F_a é a força de atrito (se se supuser o atrito reduzido, $F_a \;\cong\; 0$).

A tensão equivalente aplicada ao tubo é, de acordo com o critério de Von Mises (e tendo em conta que $\sigma_r \;\cong\; 0$):

$$\sigma_{eq} \;=\; \frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{{\sigma_\theta}^2 \;+\; {\sigma_z}^2 \;+\; (\sigma_\theta \;-\; \sigma_z)^2} \tag{6.30}$$

Se a razão entre as tensões principais, $\alpha = \frac{d\sigma_z}{d\sigma_\theta}$ se mantiver constante, a tensão equivalente será:

$$\frac{\sigma_{eq}}{\sigma_\theta} \;=\; \frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{\left(\frac{\sigma_\theta}{\sigma_\theta}\right)^2 \;+\; \left(\frac{\sigma_z}{\sigma_\theta}\right)^2 \;+\; \left(\frac{\sigma_\theta \;-\; \sigma_z}{\sigma_\theta}\right)^2} \;\Leftrightarrow\; \sigma_{eq} \;=\; \sigma_\theta\sqrt{1 \;-\; \alpha \;+\; \alpha^2} \tag{6.31}$$

A relação entre o campo de tensões e o campo de deformações pode obter-se com base nas equações constitutivas de Levy-Mises (associadas ao critério de plasticidade de Von Mises):

$$d\varepsilon_\theta \;=\; \frac{d\varepsilon_{eq}}{\sigma_{eq}}\left(\sigma_\theta - \frac{1}{2}\sigma_z\right) \;;\; d\varepsilon_z \;=\; \frac{d\varepsilon_{eq}}{\sigma_{eq}}\left(\sigma_z - \frac{1}{2}\sigma_\theta\right) \tag{6.32}$$

Se α se mantiver constante durante a deformação plástica do tubo, a razão entre incrementos das extensões (deformações) principais, ρ, pode escrever-se:

$$\rho = \frac{d\varepsilon_z}{d\varepsilon_\theta} = \frac{\frac{d\varepsilon_{eq}}{\sigma_{eq}}}{\frac{d\varepsilon_{eq}}{\sigma_{eq}}} \cdot \frac{\sigma_z - \frac{1}{2}\sigma_\theta}{\sigma_\theta - \frac{1}{2}\sigma_z} = \frac{\frac{\sigma_z}{\sigma_\theta} - \frac{1}{2}\frac{\sigma_\theta}{\sigma_\theta}}{\frac{\sigma_\theta}{\sigma_\theta} - \frac{1}{2}\frac{\sigma_z}{\sigma_\theta}} = \frac{\alpha - \frac{1}{2}}{1 - \frac{\alpha}{2}} \quad \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow \quad \rho = \frac{2\alpha - 1}{2 - \alpha} \tag{6.33}$$

Resolvendo a equação 6.31 em ordem a σ_θ e substituindo-a na equação 6.28, temos, resolvendo em ordem a p:

$$p = \frac{h}{R}\frac{\sigma_{eq}}{\sqrt{1 - \alpha + \alpha^2}} \tag{6.34}$$

Da expressão 6.25 temos

$$\varepsilon_\theta = ln\left(\frac{R}{R_0}\right) \quad \Rightarrow \quad e^{\varepsilon_\theta} = \frac{R}{R_0} \quad \Leftrightarrow \quad R = R_0.e^{\varepsilon_\theta} \tag{6.35}$$

e

$$\varepsilon_r = -(\varepsilon_\theta + \varepsilon_z) = -\left[ln\left(\frac{R}{R_0}\right) + ln\left(\frac{l}{l_0}\right)\right] = -ln\left(\frac{R.l}{R_0.l_0}\right) \quad \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow \quad \varepsilon_r = ln\left(\frac{R_0 \,.\, l_0}{R \,.\, l}\right) \tag{6.36}$$

Pela conservação do volume do tubo, temos:

$$R \,.\, l \,.\, h = R_0 \,.\, l_0 \,.\, h_0 \quad \Leftrightarrow \quad \frac{h}{h_0} = \frac{R_0 \,.\, l_0}{R \,.\, l} \tag{6.37}$$

donde a equação 6.36 vem:

$$\varepsilon_r = ln\left(\frac{h}{h_0}\right) \quad \Rightarrow \quad h = h_0 \,.\, e^{\varepsilon_r} \tag{6.38}$$

Substituindo as equações 6.38 e 6.35 na equação 6.34, obtemos a pressão interior p no tubo em função da sua geometria inicial, do material e do tipo de carregamento.:

$$p = \frac{h_0}{R_0} \cdot \frac{e^{\varepsilon_r}}{e^{\varepsilon_\theta}} \cdot \frac{\sigma_{eq}}{\sqrt{1 - \alpha + \alpha^2}} = \frac{h_0}{R_0} \cdot \frac{\sigma_{eq}}{\sqrt{1 - \alpha + \alpha^2}} \cdot e^{(\varepsilon_r - \varepsilon_\theta)} \quad \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow \quad p = \frac{\sigma_\theta \,.\, h}{R} = \frac{\sigma_{eq}}{\sqrt{1 - \alpha + \alpha^2}} \frac{h_0}{R_0} e^{(\varepsilon_r - \varepsilon_\theta)} \tag{6.39}$$

A pressão de expansão uniforme do tubo é assim directamente proporcional aos valores instantâneos da espessura, h, e da tensão efectiva, σ_{eq}, e inversamente proporcional ao valor instantâneo do raio médio R do tubo. Considerando material sujeito a encruamento (relações tensão-deformação do tipo $\sigma_{eq} = K \,.\, {\varepsilon_{eq}}^n$ e $\sigma_{eq} = K \,.\, (\varepsilon_{eq} + \varepsilon_0)^n$) a equação 6.39 virá então:

$$
\begin{aligned}
p &= \frac{K \,.\, {\varepsilon_{eq}}^n}{\sqrt{1-\alpha+\alpha^2}} \frac{h_0}{R_0} e^{-\varepsilon_\theta(2+\rho)} \\
p &= \frac{K\,(\varepsilon_{eq} + \varepsilon_0)^n}{\sqrt{1-\alpha+\alpha^2}} \frac{h_0}{R_0} e^{-\varepsilon_\theta(2+\rho)}
\end{aligned}
\tag{6.40}
$$

Nesta fase, a espessura h do tubo vai-se reduzindo; o seu raio médio R e a tensão efectiva σ_{eq} vão aumentando. Com o encruamento do material, a taxa de crescimento da tensão efectiva começa a diminuir. Correspondentemente, a taxa de crescimento da pressão também começa a diminuir até a pressão atingir um valor máximo, p_{max}.

6.4.2 2ª fase - instabilidade plástica; deformação não uniforme

A partir do instante em que se tem a pressão máxima, inicia-se o mecanismo de instabilidade plástica difusa, que se caracteriza pela expansão (deformação) não uniforme do tubo e sob valores cada vez mais reduzidos da pressão interior.

$$p_{max} \quad \Rightarrow \quad dp = 0 \tag{6.41}$$

Esta condição de instabilidade difusa corresponde à relação entre a tensão e a deformação equivalentes ou efectivas seguinte:

$$\frac{d\sigma_{eq}}{d\varepsilon_{eq}} = \frac{3}{2}\sigma_{eq} \tag{6.42}$$

O passo seguinte é o aparecimento de deformação plástica localizada: a força necessária à deformação é cada vez menor e a fractura ocorre rapidamente. No tubo, a fissuração da parede está associada a um mecanismo de estricção localizada segundo a sua direcção axial.

Cálculo da deformação correspondente ao início da estricção localizada

Seja $A = w \,.\, h$ a área da secção longitudinal de estricção, com $w = cte.$ (ver figura 6.8)

$$\frac{dA}{A} = \frac{w \,.\, dh}{w \,.\, h} = \frac{dh}{h} = d\varepsilon_r \tag{6.43}$$

A formação de estricção localizada ocorre em condições de deformação plana ($d\varepsilon_\theta \neq 0$; $d\varepsilon_r \neq 0$; $d\varepsilon_z = 0$). O instante correspondente ao início da estricção localizada deverá corresponder

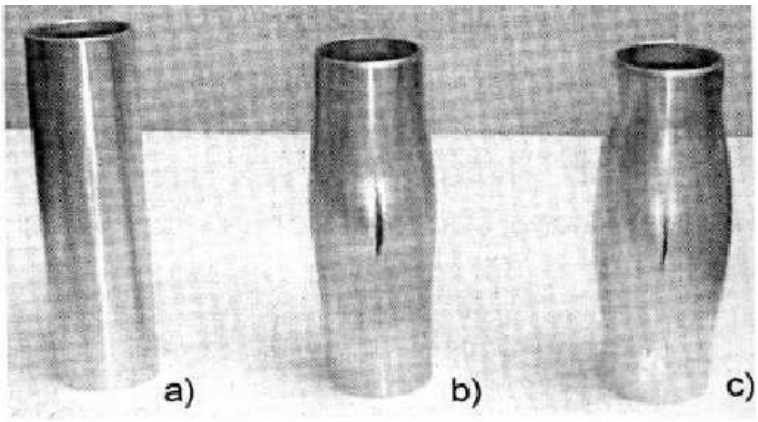


Figura 6.7: Fissuras longitudinais num tubo de alumínio 6060 sujeito a pressão interior. a) geometria inicial; b) fissuração obtida num tubo que foi deformado no estado fornecido c) fissuração obtida num tubo que foi deformado após ter sido submetido a um tratamento térmico de recozimento [30]

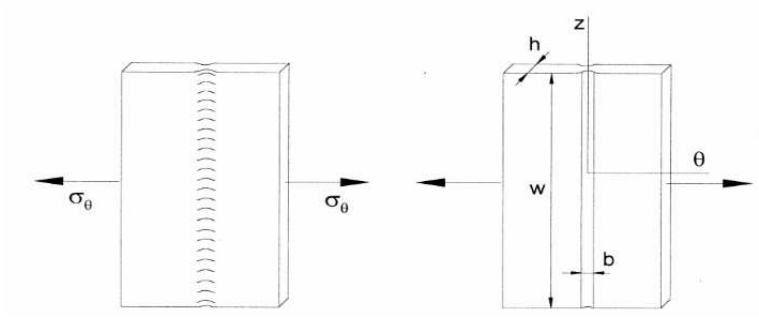


Figura 6.8: Pormenor da parede do tubo procurando evidenciar a estricção localizada que se desenvolve segundo a direcção axial do tubo [30] .

a uma diminuição acentuada da carga tangencial $F_\theta = \sigma_\theta A$. A condição de instabilidade plástica localizada pode exprimir-se pela expressão

$$dF_\theta = 0 \Leftrightarrow d(\sigma_\theta \,.\, A) = d\sigma_\theta \,.\, A + \sigma_\theta \,.\, dA = 0 \Leftrightarrow \frac{d\sigma_\theta}{\sigma_\theta} = -\frac{dA}{A} \tag{6.44}$$

Substituindo a equação 6.44 na equação 6.43, temos

$$\frac{d\sigma_\theta}{\sigma_\theta} = -d\varepsilon_r \tag{6.45}$$

Tendo em conta a relação entre as deformações principais (eq. 6.25):

$$\varepsilon_r = -\varepsilon_\theta - \varepsilon_z \quad \rightarrow \quad \frac{d\varepsilon_r}{d\varepsilon_\theta} = -1 - \frac{d\varepsilon_z}{d\varepsilon_\theta} = -1 - \rho \qquad \Leftrightarrow \quad d\varepsilon_r = -(1+\rho)\, d\varepsilon_\theta \tag{6.46}$$

e a equação 6.45 vem:

$$\frac{d\sigma_\theta}{\sigma_\theta} = (1+\rho)d\varepsilon_\theta \tag{6.47}$$

Tendo em conta que durante a deformação plástica do tubo o quociente $\alpha = \frac{d\sigma_z}{d\sigma_\theta}$ se mantém constante, o radical da equação 6.31 é constante e podemos escrever:

$$d\sigma_{eq} = \sqrt{1-\alpha+\alpha^2}\, d\sigma_\theta \tag{6.48}$$

pelo que

$$\frac{d\sigma_{eq}}{\sigma_{eq}} = \frac{\sqrt{1-\alpha+\alpha^2}}{\sqrt{1-\alpha+\alpha^2}}\frac{d\sigma_\theta}{\sigma_\theta} \quad \Leftrightarrow \quad \frac{d\sigma_{eq}}{\sigma_{eq}} = \frac{d\sigma_\theta}{\sigma_\theta} \tag{6.49}$$

e a eq.6.47 vem:

$$\frac{d\sigma_\theta}{\sigma_\theta} = \frac{d\sigma_{eq}}{\sigma_{eq}} = (1+\rho)d\varepsilon_\theta \tag{6.50}$$

As eqs. 6.32 podem reescrever-se:

$$\begin{aligned} d\varepsilon_\theta &= \frac{1}{\sigma_{eq}}\left(\sigma_\theta - \frac{1}{2}\alpha\,\sigma_\theta\right) d\varepsilon_{eq} = \frac{1}{\sigma_{eq}}\,\sigma_\theta\left(1-\frac{\alpha}{2}\right) d\varepsilon_{eq} \\ d\varepsilon_z &= \frac{1}{\sigma_{eq}}\left(\alpha\sigma_\theta - \frac{1}{2}\sigma_\theta\right) d\varepsilon_{eq} = \frac{1}{\sigma_{eq}}\,\sigma_\theta\left(\alpha-\frac{1}{2}\right) d\varepsilon_{eq} \end{aligned} \tag{6.51}$$

Resolvendo a equação 6.31 em ordem a σ_θ, temos:

$$\sigma_\theta = \frac{\sigma_{eq}}{\sqrt{1-\alpha+\alpha^2}} \tag{6.52}$$

que substituída nas equações 6.51 permite obter-se:

$$\begin{aligned} d\varepsilon_\theta &= \frac{2-\alpha}{2\sqrt{1-\alpha+\alpha^2}}\, d\varepsilon_{eq} \\ d\varepsilon_z &= \frac{2\alpha-1}{2\sqrt{1-\alpha+\alpha^2}}\, d\varepsilon_{eq} \end{aligned} \tag{6.53}$$

Tendo em conta a primeira destas equações, a equação 6.50 pode reescrever-se

$$\frac{d\sigma_{eq}}{\sigma_{eq}} = (1+\rho)\frac{2-\alpha}{2\sqrt{1-\alpha+\alpha^2}}\, d\varepsilon_{eq} \tag{6.54}$$

Para um material sujeito a encruamento (com relações de tensão-deformação do tipo

$$\sigma_{eq} = K{\varepsilon_{eq}}^n \quad e \quad \sigma_{eq} = K\left(\varepsilon_{eq} + \varepsilon_0\right)^n \tag{6.55}$$

derivando-se estas expressões, tem-se

$$\begin{aligned} d\sigma_{eq} &= n\,K{\varepsilon_{eq}}^{n-1}d\varepsilon_{eq} &= n\,K\frac{{\varepsilon_{eq}}^n}{\varepsilon_{eq}}d\varepsilon_{eq} \\ d\sigma_{eq} &= n\,K(\varepsilon_{eq} + \varepsilon_0)^{n-1}d\varepsilon_{eq} &= n\,K\frac{(\varepsilon_{eq} + \varepsilon_0)^n}{\varepsilon_{eq} + \varepsilon_0}d\varepsilon_{eq} \end{aligned} \tag{6.56}$$

Substituindo as eqs. 6.55 e 6.56 na equação 6.54, simplificando os termos e resolvendo em ordem a ε_{eq}, e tendo ainda em conta a equação 6.33, obtemos a expressão que nos permite determinar o valor da extensão efectiva, ε_{eq} no ponto de instabilidade plástica localizada:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{eq} &= \frac{2n\sqrt{1-\alpha+\alpha^2}}{1+\alpha} \\ \varepsilon_{eq} &= \frac{2n\sqrt{1-\alpha+\alpha^2}}{1+\alpha} - \varepsilon_0 \end{aligned} \tag{6.57}$$

[4]

Das equações 6.53 obtemos as componentes axial e tangencial do tensor das deformações:

$$\begin{aligned} \varepsilon_\theta &= \frac{2-\alpha}{2\sqrt{1-\alpha+\alpha^2}}\,\varepsilon_{eq} \\ \varepsilon_z &= \frac{2\alpha-1}{2\sqrt{1-\alpha+\alpha^2}}\,\varepsilon_{eq} \end{aligned} \tag{6.59}$$

Substituindo 6.57 em 6.59 obtém-se (considera-se apenas a relação $\sigma_{eq} = K\,.\,{\varepsilon_{eq}}^n$):

[4]Se o tubo não estiver sujeito à força axial F_z, então $\sigma_z = 0$, pelo que $\alpha = 0$. O valor da extensão efectiva para um tubo nestas condições será então:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{eq} &= 2n \\ \varepsilon_{eq} &= 2n - \varepsilon_0 \end{aligned} \tag{6.58}$$

$$
\begin{aligned}
\varepsilon_\theta &= \frac{(2-\alpha)\,n}{1+\alpha} \\
\varepsilon_z &= \frac{(2\,\alpha-1)\,n}{1+\alpha}
\end{aligned}
$$

Ou, considerando a equação 6.33:

$$
\begin{aligned}
\varepsilon_\theta &= \frac{n}{1+\rho} \\
\varepsilon_z &= \frac{n\,\rho}{1+\rho}
\end{aligned}
\tag{6.60}
$$

A componente radial, segundo a espessura da parede do tubo, obtém-se a partir da condição de incompressibilidade (equação 6.25):

$$
\varepsilon_r \;=\; -(\varepsilon_\theta + \varepsilon_z) \;=\; -(\frac{n}{1+\rho} + \frac{n\,\rho}{1+\rho}) \;=\; -n \tag{6.61}
$$

donde se conclui que a instabilidade plástica só tem início quando o valor da extensão radial ε_r atinge um valor igual ao do expoente n de encruamento do material do tubo. [5]

[5] (Adaptado de [30])

Capítulo 7

Cálculos do processo e do produto

Actualmente, os engenheiros e os projectistas que concebem a maioria dos produtos hidroconformados têm uma experiência considerável em estampagem e noutras tecnologias de fabrico. Certos detalhes de projecto (concepção) como por exemplo, raios muito pequenos, fabricados com facilidade por estampagem, exigem normalmente pressurização de hidroconformação muito elevadas, o que implica a utilização de intensificadores de pressão de hidroconformação e de prensas muito grandes: outras características do produto poderão exigir a utilização de materiais especiais, de lubrificantes e de tratamentos de recozido no decurso do processo, o que poderá fazer subir o custo dos componentes e os gastos em capital. Porém, com considerações adequadas de projecto durante a fase inicial do mesmo, as vantagens da hidroconformação poderão ser optimizadas. [4]

7.1 Cálculo da pressão de conformação, da tonelagem da prensa e da redução da espessura do material devida à dobragem

Os parâmetros mais importantes do processo de hidroconformação são a pressão máxima de hidroconformação e a tonelagem da prensa de modo a assegurar que o equipamento necessário para hidroconformar o componente está dentro do espaço disponível da instalação de fabrico. Se a peça a coformar tiver que ser sujeita a dobragem, é também importante nesta fase fazer os estudos de viabilidade da dobragem e estimar a quantidade de redução de material provocada pela dobragem. A redução de espessura do material em zonas críticas do componente pode também ter afectar o desempenho estrutural.

7.1.1 Cálculo da pressão de conformação

A pressão máxima necessária de hidroconformação é determinada pelo raio de menor dimensão que vai ser conformado no componente, por *estiramento* do material ele pode obter-se pela equação:

$$p = \frac{\sigma_u \, t}{r} \tag{7.1}$$

em que:

σ_u = tensão de rotura ou tensão máxima (MPa)
t = espessura do tubo (mm)
r = raio de aresta interior de menor valor (mm)
p = pressão de conformação do material (MPa)

Na hidroconformação PSH (*de pressurização sequenciada*), a acção de fecho da matriz contribui para empurrar e curvar o material da peça de encontro à aresta da cavidade da matriz, pelo que a pressão [do líquido] de conformação necessária é normalmente, neste caso, significativamente inferior à da equação 7.1.

Reescrevendo a equação 7.1 em termos de relações entre pressão e tensão máxima e entre raio de aresta e espessura do material, obtemos:

$$\frac{p}{\sigma_u} = \frac{t}{r} \tag{7.2}$$

7.1.2 Cálculo da tonelagem da prensa

A força que a prensa tem que exercer na matriz para manter as suas duas metades fechadas quando se atinge a pressão máxima durante a operação de hidroconformação é:

$$F_p = \frac{p}{9800} \, . \, A_{proj} \quad \text{(toneladas)} \tag{7.3}$$

em que

p é a pressão de hidroconformação, obtida na eq.7.1 (MPa)
A_{proj} é a área projectada da cavidade da matriz (mm^2).
A área projectada da cavidade pode obter-se facilmente pelo programa de CAD. Em alternativa, ela pode determinar-se aproximadamente pela fórmula:

$$A_{proj} = L \, . \, W \tag{7.4}$$

em que:

L = comprimento da linha de centro da peça a conformar, incluindo as zonas periféricas (addenda) (mm)
W = largura média estimada da área projectada da cavidade da matriz (mm)

7.1.3 Redução da espessura do material devida à dobragem

O raio mínimo de dobragem da linha de centro da peça que pode ser conformado depende do diâmetro do tubo e do alongamento percentual do material. Miller (2003) propõe a seguinte equação para determinar o raio mínimo de dobragem:

$$R = \frac{0,5\, D_{ext}}{L} \quad \text{(mm)} \tag{7.5}$$

em que $D_{ext.}$ é o diâmetro exterior do tubo (mm) e L é o alongamento percentual do material.

No decurso da dobragem, a espessura do material do lado exterior da dobragem reduz-se, enquanto a espessura do material do lado interior da dobragem aumenta. A redução aproximada do material pode calcular-se pela expressão:

$$\text{Redução percentual de espessura} = \frac{\frac{D}{2}}{R + \frac{D}{2}} \times 100\% \tag{7.6}$$

em que R é o raio de dobragem da linha de centro do tubo e D o diâmetro exterior do tubo. [4]

7.2 Expansão com alimentação axial

O perímetro da secção próxima da extremidade de uma peça a hidroconformar pode sofrer uma expansão de até cerca de 65%, o que depende do material do tubo, da forma da secção e do tipo de lubrificante utilizado. Esta expansão consegue-se com a *alimentação das extremidades*, ou seja, com uma acção de empurrar para dentro da matriz a extremidade do tubo a conformar. A alimentação das extremidades aumenta consideravelmente a conformabilidade do material. A quantidade de material que entra na matriz por acção da alimentação das extremidades é limitada, no decurso do processo de hidroconformação. A forma do componente modifica-se na matriz devido às expansões das secções da peça a conformar. Neste processo, desenvolve-se uma resistência de atrito que se opõe às forças de compressão ao longo do comprimento do tubo. Haverá um ponto a uma distância determinada das extremidades em que as forças de resistência totais igualam o limite de compressão ou de encurvadura da peça a conformar. Para além deste ponto, não é possível haver mais alimentação de material para o interior da matriz.

A força máxima de compressão, F_e, é:

$$F_e \;=\; \pi\,(D \;-\; t)\,.\,t\,.\,\sigma_u \qquad (N) \tag{7.7}$$

em que:

D = diâmetro do tubo (mm)
t = espessura do material (mm)
σ_u = tensão de rotura ou tensão máxima do material (MPa)

A força de atrito F_a devida à pressão interna de alimentação é dada por:

$$F_a \;=\; \pi\,.\,D\,.\,L\,.\,\mu\,.\,p_{al} \qquad (N) \tag{7.8}$$

em que:

L = distância do ponto à extremidade (mm)
p_{al} = pressão máxima de alimentação (MPa)
μ = coeficiente de atrito

Quando a força de alimentação e a força de atrito se equilibram, temos:

$$F_e \;=\; F_a \;\Leftrightarrow\; \pi\,(D \;-\; t)\,.\,t\,.\,\sigma_u \;=\; \pi\,.\,D\,.\,L\,.\,\mu\,.\,p_{al} \tag{7.9}$$

Simplificando e resolvendo esta equação em ordem a L, obtemos o comprimento máximo para além do qual não poderá haver alimentação de material [pela extremidade], L_{max}:

$$L_{max} \;=\; \frac{(1 \;-\; \frac{t}{D})\,.\,t\,.\,\sigma_u}{\mu\,.\,p_{al}} \tag{7.10}$$

Da eq. (7.10) vemos que o comprimento da zona de alimentação depende do coeficiente de atrito, μ, e da pressão de alimentação, p_{al}, para dadas espessura e diâmetro e tendo em conta a tensão máxima do material. Assim, diminuindo o coeficiente de atrito (por meio de uma lubrificação adequada) e mantendo a pressão de alimentação p_{al} com o valor mais baixo possível para evitar o enrugamento do material e um aumento excessivo da espessura próximo das extremidades, pode-se aumentar o comprimento de alimentação L.

Durante a etapa de alimentação axial, a pressão [de alimentação] para secções circulares é aproximada pela fórmula: [1]

$$p_{al} \;=\; \frac{2\,.\,t\,.\,(0,85\,\sigma_u)}{(D \;-\; t)} \tag{7.11}$$

[1] Esta fórmula corresponde à formula da tensão longitudinal em cilindros de paredes finas, resolvida em ordem a p:
$p \;=\; \frac{2\,.\,t\,.\,\sigma}{D\,-\,t} \;=\; \frac{2\,.\,t\,.\,\sigma}{r}$

Se as relações entre o diâmetro e a espessura do tubo, $\frac{D}{t}$, forem grandes, então $D - t \approx D$ e $1 - \frac{t}{D} = \frac{D-t}{D} \approx \frac{D}{D} = 1$. A equação 7.10 pode-se escrever então:

$$L_{max} = \frac{t \,.\, \sigma_u}{\mu \,.\, p_{al}} \tag{7.12}$$

Reescrevendo também a eq.(7.11)

$$p_{al} = \frac{2 \,.\, t \,.\, (0,85\, \sigma_u)}{D} \tag{7.13}$$

Substituindo-a na eq. (7.10) temos:

$$L_{max} = \frac{t \,.\, \sigma_u}{\mu \,.\, \frac{2 \,.\, t\, (0{,}85\, .\sigma_u)}{D}} \Leftrightarrow L_{max} = \frac{D}{1,7\, .\mu} \tag{7.14}$$

ou seja, o comprimento máximo de alimentação é agora função do diâmetro do tubo e do coeficiente de atrito. Por exemplo, para um coeficiente de atrito $\mu = 0,1$, o comprimento máximo de alimentação será:

$$L_{max.} = \frac{D}{0,1 \times 1,7} \approx 5,9\, D \tag{7.15}$$

Para calcular a quantidade aproximada de material de alimentação, devemos ter em consideração que os volumes de material do componente hidroconformado e da peça a conformar (*blank*) são iguais. Para componentes com formas geométricas simples, este volume é fácil de calcular; formas mais complexas exigem o recurso ao modelo de CAD ou CAE.

Um bom ponto de partida é considerar que o perfil tubular tem espessura constante. O cálculo será um pouco cauteloso mas poderá mais tarde ser optimizado pela simulação do processo e no ensaio do protótipo. Deste modo, com base no comprimento L_b, no diâmetro D e na espessura t da peça tubular a hidroconformar, obtemos o seu volume V_b e, por conseguinte, o volume do componente final, V_c.

$$V_c = V_b = \pi \,.\, D \,.\, t \,.\, L_b \tag{7.16}$$

ou

$$L_b = \frac{V_c}{\pi \,.\, D \,.\, t} = \frac{V_b}{\pi \,.\, D \,.\, t} \tag{7.17}$$

O comprimento L_a de material a alimentar será então:

$$L_a = L_b - L_c \tag{7.18}$$

onde

L_b é o comprimento da peça inicial a hidroconformar
L_c é o comprimento do componente final hidroconformado. [4]

7.3 Parâmetros da hidroconformação de chapas metálicas

Em qualquer processo de estampagem, a pressão máxima de conformação depende do menor raio da característica da peça que vai ser conformada. Como a pressão do fluído actua em toda a superfície do painel de chapa, a força necessária para a prensa manter as ferramentas fixas durante a operação de conformação é muito elevada.

Além do raio mínimo, as outras variáveis que determinam a pressão de conformação são a espessura do painel e as propriedades do material. Podemos optimizar estas variáveis para obtermos o projecto do componente mais eficaz em termos de custo. No projecto de componentes de chapa metálica hidroconformados, é uma boa ideia tomar para projecto a maior prensa disponível, calcular a pressão máxima e assim determinar o menor raio que pode ser fabricado nessa máquina (prensa).

A equação seguinte dá-nos a força na prensa, F_P (em N) em função da área projectada da superfície do componente na matriz, A_{proj} (em mm^2) e da pressão de conformação, p_f (em MPa):

$$F_P = A_{proj.} \cdot p_f \tag{7.19}$$

Conhecendo a força disponibilizada pela prensa, podemos então calcular a pressão de conformação. Numa chapa metálica de espessura t e feita de material com tensão máxima σ_u, a pressão de conformação dependerá ainda do menor raio interior (R_i) que vai ser conformado:

$$p_f = \frac{t \cdot \sigma_u}{R_i} \tag{7.20}$$

em que t e R_i são dados em mm e σ_u e p_f em MPa.
Logo, o raio menor que pode ser conformado será:

$$R_i = \frac{t \cdot \sigma_u}{p_f} \tag{7.21}$$

Se a peça a hidroconformar é formada por duas superfícies de chapa ligadas nos seus contornos por soldadura (a chamada *conformação de almofada*) essas duas superfícies deverão ser aproximadamente do mesmo tamanho, pois o componente a hidroconformar deverá ter formas com semi-perímetros (comprimentos da linha de secção) equilibrados. em ambas as superfícies. Se uma das chapas ligadas tiver um comprimento de secção demasiado pequeno, o material poderá sofrer ruptura ou sofrerá uma redução excessiva de espessura dessa superfície mais pequena. Por outro lado, a superfície com o comprimento da linha de secção demasiado grande em relação à outra poderá sofrer enrugamento do material [4].

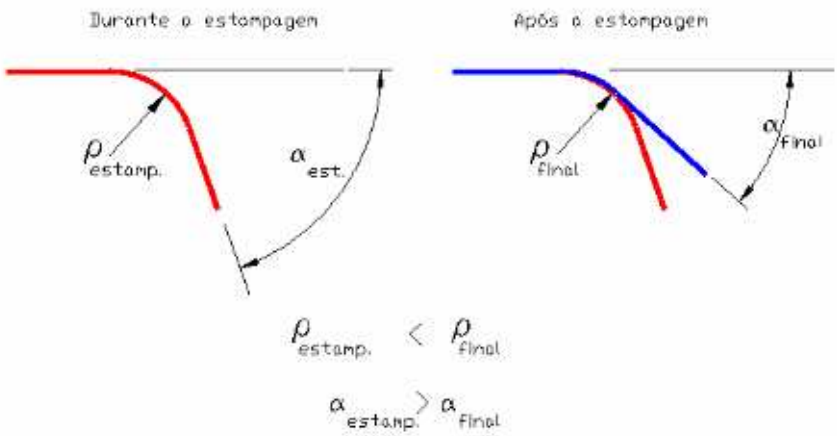


Figura 7.1: retorno elástico (adaptado de [17])

7.4 Retorno elástico

Quando um componente é conformado, a ferramenta de estampagem flecte o material num ângulo e com um raio de curvatura determinados. Quando a ferramenta de conformação é removida, o metal fará um retorno, abrindo o ângulo de curvatura e aumentando o raio desta. A relação de retorno elástico é definida como o ângulo final após o retorno elástico dividido pelo ângulo inicial de estampagem (Figura 7.1).

Para entender o retorno elástico, é necessário observar a curva de tensão-deformação de um material. Quando se está a formar uma dobragem, o material é sobretensionado deliberadamente para além da sua tensão de cedência de modo a induzir uma deformação permanente. Quando a carga é removida, a tensão regressará a zero, seguindo, no gráfico, uma trajectória paralela ao módulo de elasticidade (figura 7.2). Portanto, com algumas excepções, a deformação permanente será normalmente menor que a deformação que o projectista pretendia fazer ao material. O retorno elástico será igual à quantidade de deformação elástica recuperada quando a ferramenta de conformação é removida.

Também é importante observar que a tensão é máxima nas superfícies superior e inferior da chapa metálica e cai para zero nas fibras do material que se situam no plano da linha neutra da secção transversal da chapa flexionada, a meio da secção.

Portanto, a maior parte da tensão no interior da chapa é elástica e só as superfícies exteriores sofrem cedência. As fibras do interior da chapa tenderão a endireitar a curvatura quando a carga é removida ao passo que as fibras do exterior tendem a resistir ao endireitamento. A chapa dobrada não regressará a um estado de tensão nulo, retornando em vez disso elasticamente até um ponto em que se verifica um equilíbrio de todas as suas tensões

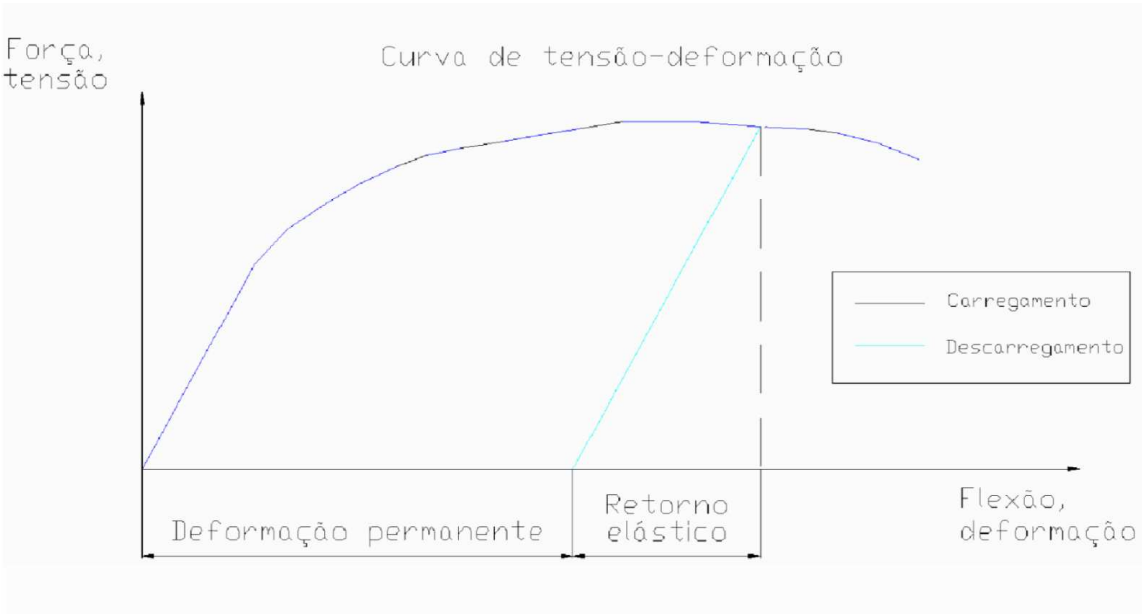


Figura 7.2: Tensão e deformação na operação de conformação

internas. É por isto que as operações de conformação induzem tensões residuais no material.

A quantidade de retorno elástico que se observa numa dobragem é influenciada por várias variáveis. Um material com uma tensão de cedência, σ_{ced}, mais elevada terá uma maior relação $\frac{\text{deformação elástica}}{\text{deformação plástica}}$ e apresentará maior retorno elástico que um material com menor tensão de cedência. Por outro lado, um material com um módulo de elasticidade E mais elevado apresentará menos retorno elástico que um material com com um módulo de elasticidade menor. A Figura 7.2 mostra que a curva de tensão-deformação na descarga seria deslocada para menos retorno elástico se ela tivesse um declive maior. Além disso, a relação $\frac{\rho}{t}$ da dobragem entrará em jogo. Uma dobragem fechada concentrará mais a tensão que uma dobragem gradual, mais suave, do que resulta maior deformação plástica. Portanto, relações $\frac{\rho}{t}$ mais pequenas resultarão em menos retorno elástico.

Há vários métodos de lidar com o retorno elástico. Um método é determinar experimentalmente quão apertada deverá ser a conformação de dobragem para permitir que o material retorne elasticamente ao ângulo de dobragem desejado. Outra solução mecânica é cunhar o exterior da dobragem de modo a introduzir tensão de compressão nas fibras exteriores, para contrabalançar as tensões de tracção criadas durante as operações de conformação. Em relações $\frac{\rho}{t}$ muito pequenas, isto poderá mesmo resultar em retorno elástico negativo, onde o ângulo final será mais fechado que o ângulo da estampagem. Porém, esta é uma operação de conformação muito severa, que poderá tornar a chapa mais susceptível a romper durante a

conformação.

Pode-se utilizar estas quatro variáveis que afectam o retorno elástico para se tentar controlá-lo. Por exemplo, um material com um módulo de elasticidade elevado poderá ser utilizado para reduzir o retorno elástico. Isto também resultará num aumento da força de contacto. Poder-se-á utilizar um material com uma tensão de cedência mais baixa, mas o material terá menor desempenho, porque a tensão de cedência mais baixa limitará a quantidade de tensão a que o material pode resistir. Poder-se-á variar a espessura da chapa. No entanto, uma chapa mais fina terá maior retorno elástico. Um raio de curvatura mais pequeno pode reduzir o retorno elástico; isto requer um material com melhor conformabilidade [17].

O retorno elástico aumenta	O retorno elástico diminui
E menos elevado	E mais elevado
σ_{ced} mais elevada	σ_{ced} menos elevada
menor espessura	maior espessura
ρ maior	ρ menor

Para algumas geometrias simples é possível tratar o fenómeno do retorno elástico com fórmulas analíticas. Tlusty [16] propõe um cálculo ângulo de retorno elástico e da sua quantidade em termos percentuais. O cálculo aplica-se a vigas estreitas. A largura da viga é b e a altura (espessura) é h. O material é sem encruamento.

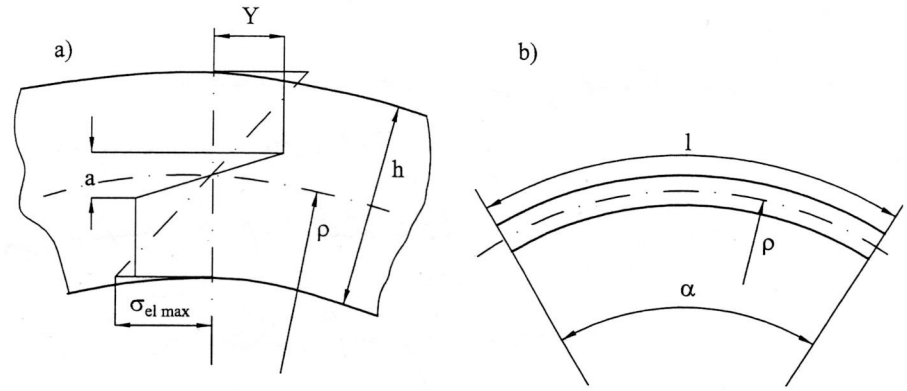


Figura 7.3: Raio de curvatura e retorno elástico de viga estreita

O raio de curvatura, ρ, relaciona-se com a tensão de cedência pela expressão:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{2 \,.\, \sigma_{ced}}{E \,.\, a} \tag{7.22}$$

Os momentos elástico e plástico originados pelo esforço de flexão são:

$$M = M_{el.} + M_{pl.} = \sigma_{ced} \,.\, b \,(\frac{h^2}{4} - \frac{a^2}{12}) \tag{7.23}$$

Combinado as duas equações e resolvendo em ordem a M, obtemos o momento na flexão da viga como função do raio de curvatura ρ:

$$M = b\,(\frac{\sigma_{ced}\,.\,h^2}{4} - \frac{\sigma_{ced}^3\,.\,\rho^2}{3\,E^2}) \tag{7.24}$$

Ao retirar-se a carga, ocorre um momento de tensão elástica da mesma grandeza, o qual por si só produziria a curvatura:

$$\frac{1}{\rho_{el}} = \frac{M}{E\,I} = \frac{12\,M}{E\,b\,h^3} \quad (I = \frac{b\,.\,h^3}{12}) \tag{7.25}$$

Esta curvatura produzida elasticamente é o *retorno elástico*. A curvatura final é a diferença entre as curvaturas total e elástica, ou seja, entre a curvatura total e o retorno elástico:

$$\frac{1}{\rho_{final}} = \frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho_{el}} \tag{7.26}$$

A relação entre o raio de curvatura produzido pela solicitação de flexão e o raio de curvatura final que permanece após ser retirada a carga é:

$$\frac{\rho}{\rho_{final}} = 1 + 4(\frac{\sigma_{ced}\,\rho}{E\,h})^3 - 3(\frac{\sigma_{ced}\,\rho}{E\,h}) \tag{7.27}$$

e

$$\text{retorno elástico} = \frac{\rho_{final} - \rho}{\rho_{final}} \tag{7.28}$$

O ângulo de dobragem de um comprimento L da viga L e raio de curvatura ρ será:

$$\alpha = \frac{L}{\rho} \tag{7.29}$$

Como o comprimento do plano da linha neutra da viga se mantém constante com a dobragem, o ângulo α é proporcional à curvatura:

$$\frac{\alpha_{final}}{\alpha} = \frac{\rho}{\rho_{final}} \tag{7.30}$$

Capítulo 8

Análise do comportamento mecânico de peças tubulares hidroconformadas

8.1 O programa de simulação por elementos finitos Abaqus

Para a realização do presente trabalho, utiliza-se a aplicação de cálculo por elementos finitos Abaqus/Standard. Com este *software* realiza-se as simulações de hidroconformação de várias peças tubulares soldadas à medida (twts).

Uma análise completa do Abaqus consiste normalmente em três etapas distintas: pré-processamento, simulação e pós-processamento. Estas três etapas estão sequenciadas do modo seguinte:

No **pré-processamento** define-se o modelo do problema físico a simular, o que inclui a introdução dos nós das peças que constituem o modelo e a sua topologia (a geração da malha). Um modelo do Abaqus compõe-se d vários componentes diferentes que em conjunto descrevem o problema físico a analisar e os resultados que se querem obter. No mínimo, o modelo de análise consiste na informação seguinte: geometria discretizada (malha gerada), propriedades da secção do elemento, dados do material dos elementos, cargas e condições de fronteira, tipo de análise (linear ou não linear, por exemplo) e pedidos de informação de dados de saída. Grande parte desta informação da análise encontra-se no ficheiro de entrada *.inp. Este ficheiro pode ser criado no ambiente gráfico do Abaqus CAE ou, quando a análise a executar é relativamente simples, directamente num editor de texto. O ficheiro de entrada *.inp consta de duas secções principais:

- a secção de *definição do modelo*, que lista os nós, os elementos, as condições iniciais e outras condições de fronteira que se mantêm inalteráveis ao longo da análise; - a secção de *definição do "histórico"*, que lista as etapas (steps) de análise, incluindo as condições de fron-

teira que podem variar durante a análise, como por exemplo, forças, pressões.
Ambas as secções terminam normalmente com pedidos ("requests") para escrita de dados em ficheiros de saída.

A **simulação** é a fase em que o Abaqus resolve o problema numérico definido no modelo definido no modelo. Durante a simulação, os resultados da análise vão sendo armazenados em ficheiros binários de dados de saída, segundo as instruções fornecidas para o efeito no ficheiro *.inp. Alguns ficheiros, como o ficheiro *.sta, permitem ao utilizador acopanhar a evolução do processamento (a sequência de etapas, a sequência de incrementos em cada etapa, etc.) que vão sendo processadas durante a análise.

No **pós-processamento** podemos avaliar os resultados calculados na simulação: deslocamentos, tensões ou outras variáveis fundamentais. O módulo de Visualização do Abaqus/CAE permite geralmente uma avaliação interactiva destes resultados. Este módulo lê o ficheiro *.odb (neutral binary output database file) e tem várias opções de apresentação dos resultados (gráficos de contorno, animações, gráficos da deformada e gráficos X–Y).

8.1.1 Análise não linear

Num problema estrutural não linear, à medida que a estrutura se deforma, a sua rigidez modifica-se. Todas as estruturas físicas são não lineares. A análise linear é uma aproximação conveniente que é adequada muitas vezes aos objectivos de projecto. Ela nao é, obviamente, adequada a muitas simulações estruturais como é o caso de processos de fabrico como o forjamento, a estampagem, a hidroconformação, ou outras, como as análises de colisão e de componentes de borracha, como os pneus ou os apoios de motor.

Numa análise implícita não linear, a matriz de rigidez da estrutura tem que ser agregada e a sua matriz inversa tem que ser obtida muitas vezes no decurso da análise, tornando-a muito mais custosa de resolver do que uma análise implícita linear.
A resposta de um sistema não linear não é uma função linear do valor da carga aplicada, pelo que não é possível criar soluções para casos de carregamentos diferentes, por sobreposição. Cada carregamento tem que ser definido e resolvido como uma análise em separado.

Fontes de não linearidade

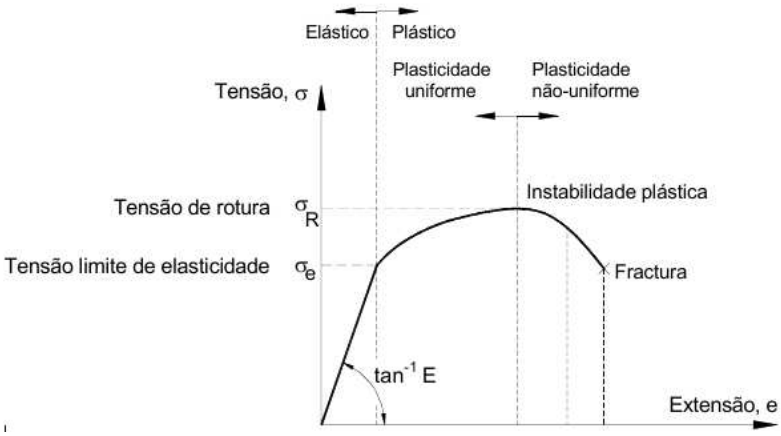
Há três fontes de não linearidade em simulações de mecanismos estruturais:

- não linearidade do material;
- não linearidade da fronteira;
- não linearidade geométrica.

Não linearidade do material

Como se observa nas curvas de tensão - deformação obtidas pelos ensaios de tracção uni-

axiais, a maioria dos metais tem uma relação tensão/deformação razoavelmente linear, para valores de deformação baixos; em deformações mais elevadas, no entanto, o material cede e nesse ponto de cedência, a sua resposta torna-se não linear e irreversível:



A não linearidade do material pode estar relacionada com outros factores que não a deformação. A ruptura e dados do material dependentes da velocidade de deformação são duas formas de não linearidade do material.

Não linearidade da fronteira

Ocorre não linearidade de fronteira se as condições da fronteira se alterarem durante a análise. Por exemplo, quando durante uma simulação ocorre o contacto, há uma mudança instantânea e grande na resposta da estrutura. As não linearidades da fronteira são extremamente descontínuas. Exemplos de não linearidade da fronteira são a sopragem de uma folha de material num molde ou a hidroconformação de tubos ou de chapas numa matriz. A folha (ou a chapa, ou o tubo) expande-se de um modo relativamente fácil sob a acção da pressão aplicada até começar a entrar em contacto com o molde. A partir daí, a pressão tem que ser aumentada para que a folha (a chapa, o molde) se continue a conformar, devido à alteração das condições de fronteira.

Não linearidade geométrica

A terceira fonte de não linearidade está relacionada com alterações na geometria do modelo, durante a análise. A não linearidade geométrica ocorre sempre que o valor dos deslocamentos afecta a resposta da estrutura. Isto pode ser provocado por: - grandes flechas ou rotações. - "snap through." - tensões iniciais ou stiffening da carga.

O Abaqus/Standard utiliza o método de Newton-Raphson para obter soluções para problemas não lineares. A solução é encontrada aplicando-se gradualmente cargas definidas e

trabalhando de modo incremental em direcção à solução final. O Abaqus/Standard divide a simulação num número de incrementos de carga e encontra a configuração de equilíbrio aproximada no fim de cada um desses incrementos. São muitas vezes necessárias várias iterações para determinar uma solução aceitável para um determinado incremento de carga. A soma de todas as respostas incrementais é a solução aproximada para a análise não linear. Assim, o Abaqus/Standard combina procedimentos incrementais e iterativos para resolver problemas não lineares.
Para cada iteração numa análise não linear, o Abaqus/Standard forma a matriz de rigidez do modelo e resolve um sistema de equações. Isto significa que cada iteração é equivalente, em custo computacional, a executar uma análise linear completa. O custo computacional de uma análise não linear no Abaqus/Standard poderá ser assim ser muito maior que o custo de uma análise linear.

Etapas, incrementos e iterações

Os processos de simulação consistem normalmente em uma ou mais *etapas* (steps), definidas pelo utilizador. Elas consistem em geral numa opção de procedimento de análise, em opções de carregamento e em opções de pedido de saída de dados. Várias cargas, condições de fronteira, opções de procedimento de análise e pedidos de saída podem ser utilizados em cada etapa. Por exemplo:

Etapa 1: Manter uma placa entre garras rígidas.
Etapa 2: Adicionar cargas para deformar a placa.
Etapa 3: Determinar as frequências naturais da placa deformada.

Os processos de simulação da hidroconformação dos tubos soldados à medida (TWTs) objecto do presente trabalho consistem em nove etapas (steps).

Um *incremento* é uma parte de uma etapa. Nas análises não lineares, a carga total aplicada numa etapa é dividida em incrementos mais pequenos de modo que se possa seguir a trajectória da solução não linear.
No final de cada incremento, a estrutura estará em equilíbrio (aproximado) e os resultados estão disponíveis para escrita nos ficheiros da base de dados de saída, de recomeço, de dados ou de resultados. Os incrementos dos quais se seleccionam esses resultados chamam-se *frames*.

Uma *iteração* é uma tentativa de encontrar uma solução de equilíbrio num incremento quando se faz a resolução com um método implícito. Se o modelo não estiver em equilíbrio no final da iteração, o Abaqus/Standard experimenta outra iteração. Com cada iteração, a solução que o Abaqus/Standard obtém deverá ficar mais próxima do equilíbrio; por vezes, poderão ser necessárias muitas iterações para obter uma solução de equilíbrio.
Uma vez obtida obtida esta solução, o incremento estará completo. Os resultados podem então ser pedidos.

Para cada iteração numa análise não linear, o Abaqus/Standard forma a matriz de rigidez do modelo e resolve um sistema de equações. Isto significa que cada iteração é equivalente, em custo computacional, a executar uma análise linear completa.

8.2 Apresentação do problema

Os modelos cujo comportamento mecânico queremos analisar são tubos soldados à medida (*tubular welded tubes, TWT*). Cada um dos TWT utilizados na simulação é formado por dois tubos de diâmetro exterior igual e diâmetros interiores (e portanto, de espessuras) iguais ou diferentes. Os dois tubos são justapostos nos seus topos e soldados um ao outro por soldadura topo a topo, como mostra a figura seguinte.

Os TWT utilizados têm duas características principais: as espessuras dos tubos seus componentes variam entre si, bem como os seus comprimentos (ou seja, a posição da linha de soldadura também varia). Para cada posição da linha de soldadura dos tubos, são portanto utilizadas várias diferenças de espessuras dos mesmos.

A simulação divide-se em duas partes: a primeira parte, constituída por 7 etapas, representa o processo de hidroconformação dos TWTs. As etapas seguintes representam ensaios mecânicos efectuados aos componentes obtidos da hidroconformação dos TWTs, nas etapas anteriores.
Nas etapas de simulação da hidroconformação, os tubos são inseridos na cavidade da matriz de conformação e preenchidos em seguida com um fluído incompressível. A peça vai ser sujeita à pressão interna que é imposta ao fluído e a um deslocamento axial mecânico imposto no seu topo superior. A linha de soldadura da peça é também representada no modelo.

Da hidroconformação resulta um tubo cilíndrico com um bojo (saliência) axissimétrica.

Na simulação da hidroconformação pode-se analisar então a influência dos dois parâmetros principais (pressão interna do fluído e deslocamento (alimentação) axial) bem como a influência das variações de espessuras e da posição da linha de soldadura na conformação dos TWT.
O fluído, o tubo e a matriz de hidroconformação são os três componentes fundamentais da simulação. Cada um destes componentes foi modelado numa malha de elementos finitos.
Os elementos finitos utilizados são os elementos C3D8 (C - elemento sólido ou contínuo - 3D - tridimensional - 8 - de oito nós)

8.2.1 Sequência das etapas (*steps*) da simulação

Primeira fase da simulação - processo da hidroconformação

O controle da actuação dos parâmetros principais do processo de hidroconformação (a pressão interna do fluído de conformação e o deslocamento axial (força de alimentação axial) exercida

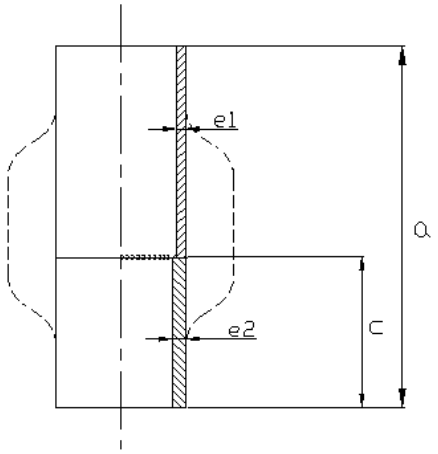
no topo do tubo) registam uma evolução ao longo da sequência de 7 etapas da análise por elementos finitos que simulam este processo.

1ª etapa - pequeno incremento da pressão interna (5,0).
2ª etapa - imposição ao topo do tubo de um deslocamento vertical descendente (alimentação axial) de -5,5
3ª etapa - incremento da pressão interior para um valor de 16; manutenção de um deslocamento axial de alimentação de -5,5
4ª etapa - aumento significativo da pressão interna para o valor de 45; aumento do deslocamento axial para um valor de -8,0
5ª etapa - novo aumento significativo da pressão interna, para o valor de 75; aumento significativo do deslocamento axial para -12,0.
6ª etapa - é retirada a pressão interna (o seu valor passa a zero); mantém-se a alimentação axial de -12,0.
7ª etapa - o fluído está despressurizado e cessa a carga de alimentação axial.

Segunda fase da simulação - ensaios mecânicos

As etapas 8 e 9 são etapas pós-hidroconformação. A peça final está hidroconformada, apresentando um bojo (saliência) de contornos ditados pela matriz de conformação.

8ª etapa - As condições de contacto entre a peça final e a matriz são alteradas (na prática, a matriz é desactivada e passa-se a trabalhar apenas com a peça, a qual no nosso caso será submetida a um ensaio mecânico.
9ª etapa - impõe-se um deslocamento prescrito de 1 mm no topo da peça para além da sua dimensão original. Esta fica deste modo submetida a um efeito de tracção.



(a) Cotas

Tubos (mm)	a (mm)	e_1 (mm)	e_2 (mm)	c (mm)
1,2 x 1,2	155,1	1,2	1,2	47,7
				57,4
1,2 x 1,8			1,8	47,7
				61,8
1,2 x 2,4			2,4	47,7
				57,4
1,8 x 1,8		1,8	1,8	47,7
				57,4
2,4 x 2,4		2,4	1,8	47,7
				57,4

(b) Tabela

Figura 8.1: Dimensões dos tubos e posição inicial do cordão de soldadura

8.3 Análise de resultados

A tabela 2 da página 89 contém os valores da distância do cordão de soldadura (coordenada c da figura 8.1a) no início da simulação (tubo ainda não deformado) e nas etapas 7, 8 (final da hidroconformação) e 9 (ensaio de tracção).

Nas figuras 8.3 a 8.20, as peças tubulares são apresentadas em corte longitudinal. Na espessura de cada tubo, definida pelo corte longitudinal, consideram-se os nós interiores (associados ao interior da parede do tubo) e os nós exteriores (associados ao exterior da parede).

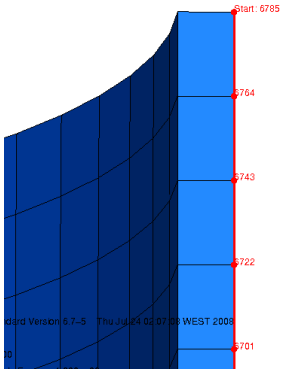


Figura 8.2: Nós da parede exterior das peças (corte longitudinal)

A figura 8.2 representa alguns dos nós considerados. Os valores das grandezas medidas (tensões, deformações, variaçoes de espessura) são valores médios dos nós interiores e exteriores. Os gráficos representam assim o andamento destas grandezas ao longo do tubo: o eixo das abcissas (Y) dos gráficos representa o comprimento do tubo e o eixo das ordenadas os valores das grandezas medidas.

Tabela 2 - Posição do cordão de soldadura (mm) após as etapas 7, 8 e 9

Espessuras (mm)	Posição inicial	Posição após a etapa 7	Posição após a etapa 8	Posição após a etapa 9
1,2 x 1,2		43,76 (Y = 99,35)	43,74	50,82 (Y = 105,28)
1,2 x 1,8		44,75 (Y = 98,53)	44,75	46,96 (Y = 109,14)
1,2 x 2,4	47,7	44,80 (Y = 98,47)	4,80	46,25 (Y = 109,85)
1,8 x 1,8	(Y = 107,4)	43,68 (Y = 99,6)	43,66	50,57 (Y = 105,53)
2,4 x 2,4		43,6 (Y = 99,68)	43,59	50,94 (Y = 105,16)
1,2 x 1,2		57,26 (Y = 86,02)	57,25	65,08 (Y = 91,02)
1,2 x 2,4	57,4	57,84 (Y = 85,41)	57,86	58,04 (Y = 98,06)
1,8 x 1,8	(Y = 97,7)	56,87 (Y = 86,41)	56,86	64,53 (Y = 91,57)
2,4 x 2,4		56,53 (Y = 86,25)	56,53	64,09 (Y = 92,01)

8.3.1 Análise da variação percentual de espessuras das peças hidroconformadas

i) Variação de espessura - final da etapa 7

Cordão de soldadura a 47,7 mm

Observa-se no gráfico 1 (pág. 108) que as peças hidroconformadas apresentam variação de espessura da parede ao longo do seu comprimento. A variação de espessura é grande na zona do bojo de conformação, o que se explica pela expansão do material que foi conformado de encontro à cavidade da matriz. A variação percentual máxima de espessura é de -30,75 % (redução) e ocorre na peça com maior relação de espessuras (1,2 x 2,4 mm), no seu semi-tubo mais fino (de 1,2 mm para 0,83 mm). As curvas de variação de espessura das peças seguem um padrão semelhante, embora os tubos de espessuras iguais (1,2 x 1,2, 1,8 x 1,8 e 2,4 x 2,4) apresentem variações menos intensas. As variações de espessuras aumentam com o aumento da razão de espessuras das peças. Desde o topo dos semi-tubos superiores até ao início do bojo de conformação (aprox. $Y \in [0, 50]$) há variações positivas (aumento) de espessuras, com tendência a serem maiores nos tubos mais finos (1,2 mm) (variação máxima de +8,6%). Este aumento de espessuras poderá explicar-se pelo facto de os topos das peças terem estado sujeitos, durante a hidroconformação (da 2ª à 6ª etapa) à força (compressiva) axial de alimentação. Entre $Y \approx 85,8$ mm e $Y \approx 94,3$ mm, observa-se uma inflexão com aumento de espessura em todos os tubos. As variações de espessura nos vários tubos são menores a

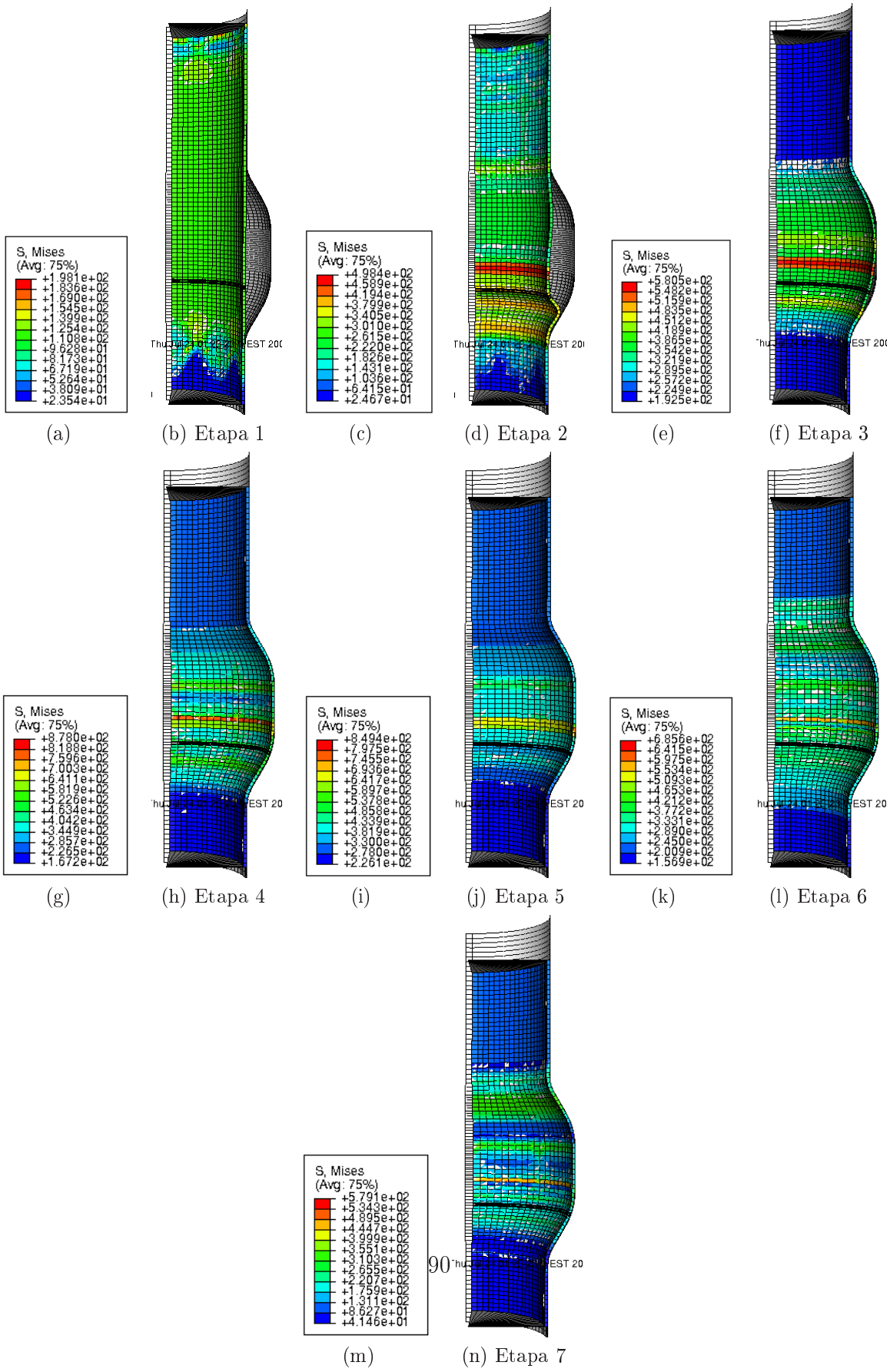
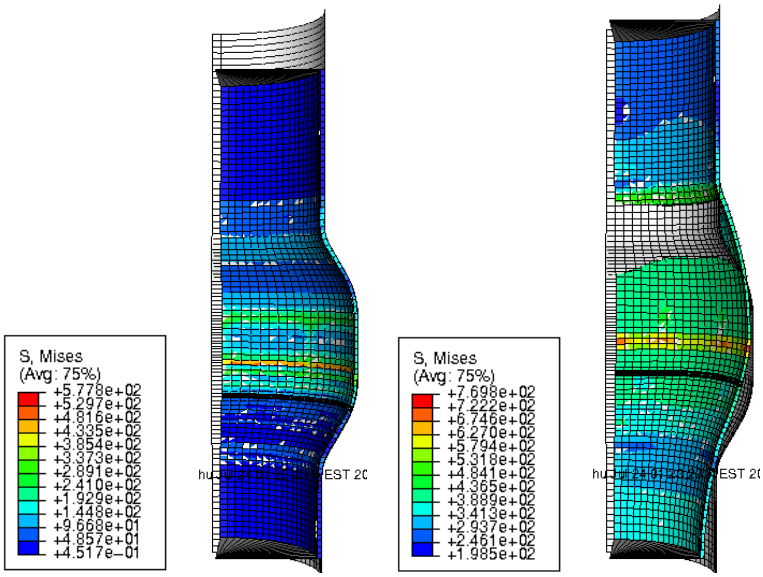


Figura 8.3: Etapas da simulação do processo de hidroconformação) de um twt de espessuras iguais ($rr = 1$). Espessuras = 1,2 mm; altura inicial do cordão de soldadura: 47,7 mm



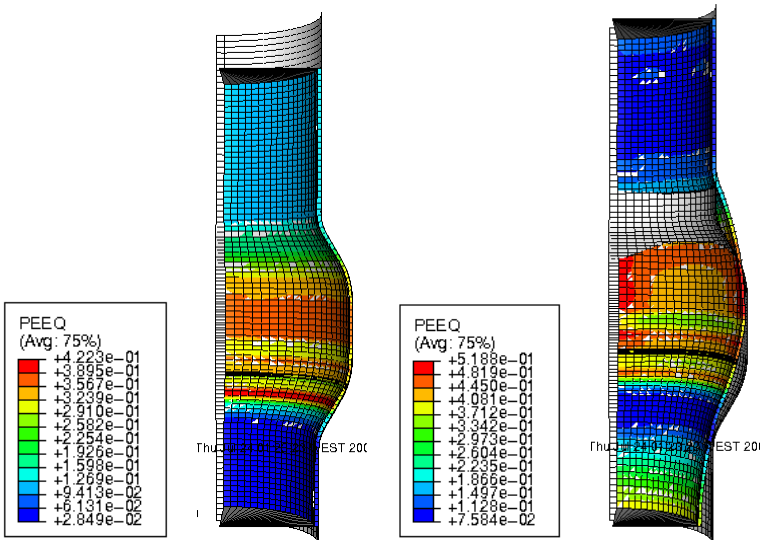
(a) Etapa 8 (b) Etapa 8 (c) Etapa 9 (d) Etapa 9

Figura 8.4: Etapas 8 e 9 (ensaio de tracção) de um twt de espessuras iguais ($r = 1$). Espessuras = 1,2 mm; altura inicial do c.s.: 47,7 mm; Tensões de Von Mises

partir do final do bojo. Passada a zona de transição entre o bojo e os semi-tubos inferiores, as variações tendem a ser nulas.
Observa-se uma ligeira diminuição da variação de espessuras na zona em que se encontram os cordões de soldadura dos tubos após a hidroconformação (pontos Y = 98,65 mm (1,2 x 2,4 mm) e Y = 99,7 mm (2,4 x 2,4 mm). Estes pontos correspondem à altura média dos cordões de soldadura.

Cordão de soldadura a 57,4 mm

No gráfico 2 (pág. 108) observa-se que o padrão de variação de espessuras destas peças não é muito diferente do das peças anteriores. As variações positivas de espessuras registam-se de igual modo no tubo superior das peças até ao início do bojo, tendendo também a ser maiores nos tubos mais finos (variação máx. de +8,66%). As maiores variações de espessuras verificam-se no bojo, como seria de esperar. Relativamente ao caso anterior, a variação percentual máxima da espessura das peças é inferior: é de -25,83 % (redução de 1,2 mm para 0,89 mm) e ocorre na peça de semi-tubos mais finos (1,2 x 1,2 mm).
Observa-se também uma zona de inflexão de redução de espessura em todos os tubos (entre $Y \approx 84$ mm e $Y \approx 89$ mm). Os cordões de soldadura de todos os tubos encontram-se dentro deste intervalo.
Também neste caso as variações de espessura nos vários tubos são menores no tubo inferior das peças, tendendo a ser nulas no tubo de 1,2 x 2,4 mm e ligeiramente superiores (entre 0,9 e 1%) nos tubos de razão de espessuras r = 1.



(a) Etapa 8 (b) Etapa 8 (c) Etapa 9 (d) Etapa 9

Figura 8.5: Etapas 8 e 9 (ensaio de tracção) de um twt de espessuras iguais (rel. de esp. = 1) Espessuras = 1,2 mm; altura do cordão de soldadura: 47,7 mm; Deformações plásticas equivalentes

A peça de 1,2 x 2,4 mm tem, a meio do bojo e na zona do cordão de soldadura, menor redução de espessura que no caso anterior.

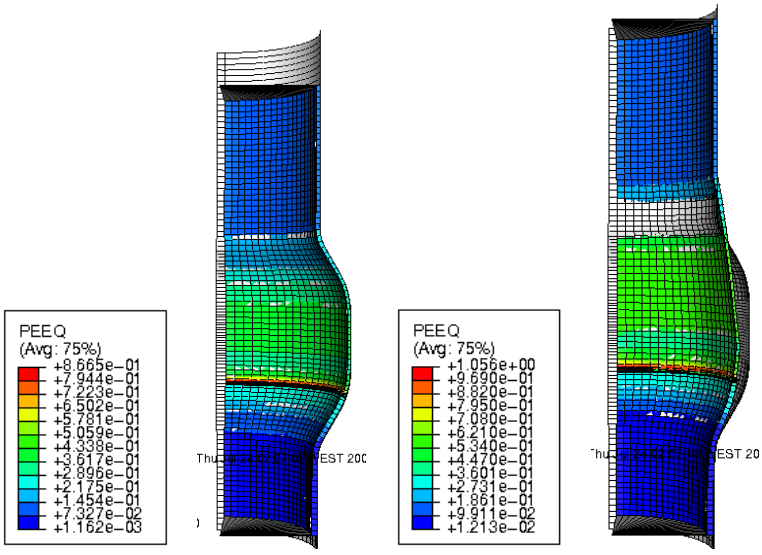
ii) Variação percentual de espessura - final da etapa 9

Cordão de soldadura a 47,7 mm

Na primeira parte do gráfico 7 (pág. 111), até $Y \simeq 50$ mm, a curva da variação de espessura tem um andamento semelhante ao da curva obtida nas etapas 7/8, com valores semelhantes, embora com um ligeiro declive (peça de 1,2 x 2,4 mm de espessura). Na zona do bojo o andamento das curvas é também semelhante ao obtido nas etapas 7/8, embora haja uma variação percentual maior (de redução), devido ao efeito de tracção, em especial nas peças de $r > 1$. Após o bojo, para $Y > 117$ mm, observa-se que as peças de razão de espessuras $r = 1$ mm começam a sofrer uma variação forte (redução) das suas espessuras, enquanto nas peças de $r > 1$ continua a diminuir a variação de espessuras até que as curvas começam a estabilizar em torno de valores nulos (sem variação percentual da sua espessura). A figura 8.15a permite observar que o deslocamento relativo dos nós foi maior no tubo mais fino (1,2 mm) que nos nós do tubo de 2,4 mm ((nós 1 a 29). As reduções percentuais de espessura no final ($Y = 156,1$ mm) são de -17,22 % (twt 1,8 x 1,8 mm), -18,71 % (twt 2,4 x 2,4 mm) e -19,25 % (twt 1,2 x 1,2 mm).

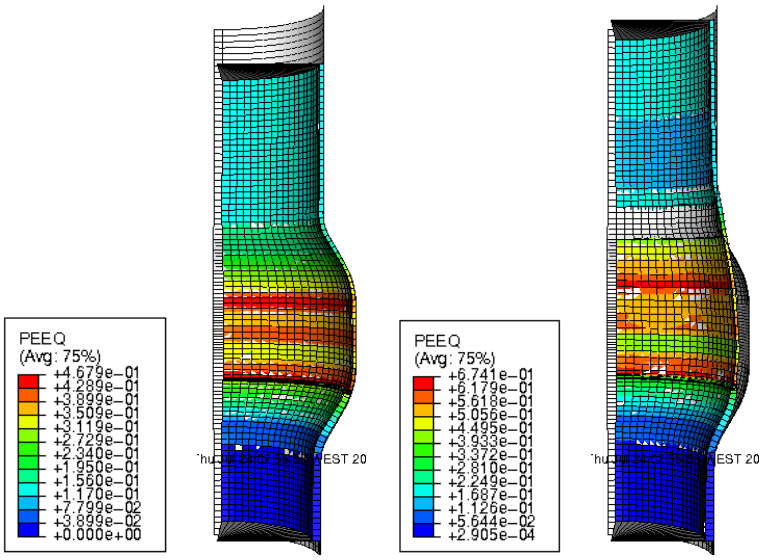
Cordão de soldadura a 57,4 mm

Para as peças de espessuras iguais ($r = 1$) o andamento das curvas do gráfico 8 (pág. 111)é



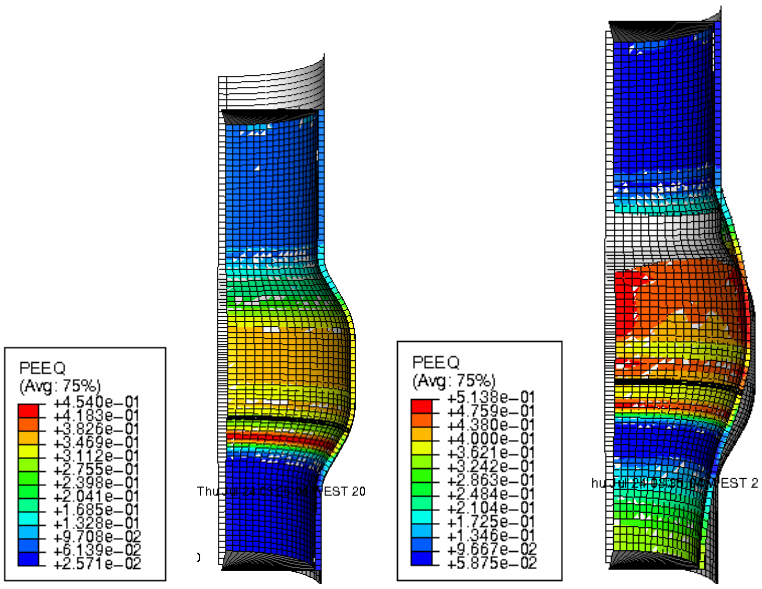
(a) Etapa 8 (b) Etapa 8 (c) Etapa 9 (d) Etapa 9

Figura 8.6: Etapas 8 e 9 (ensaio de tracção) de um twt de espessuras diferentes (1,2 x 1,8 mm) (rel. de esp. = 0,67); altura do cordão de soldadura: 47,7 mm; Deformações plásticas equivalentes



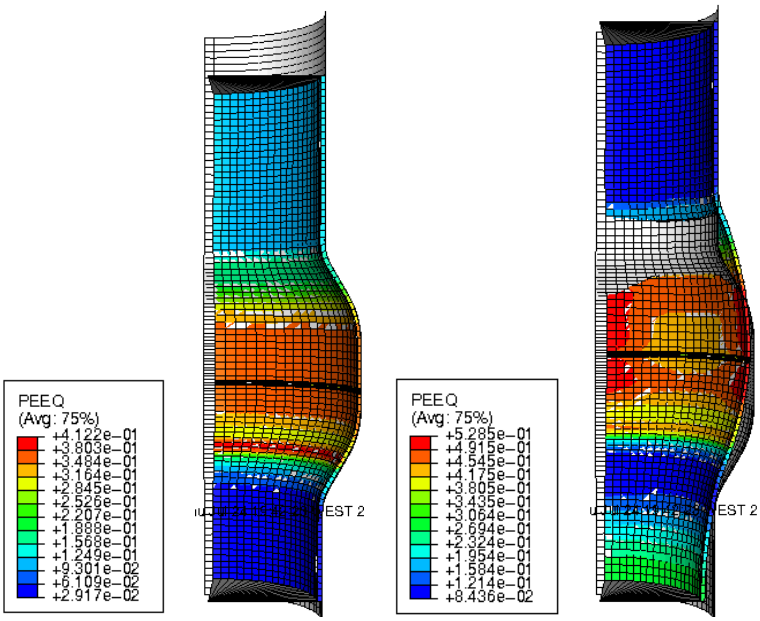
(a) Etapa 8 (b) Etapa 8 (c) Etapa 9 (d) Etapa 9

Figura 8.7: Etapas 8 e 9 (ensaio de tracção) de um twt de espessuras diferentes (1,2 x 2,4 mm) (rel. de esp. = 0,5); altura do cordão de soldadura: 47,7 mm; Deformações plásticas equivalentes



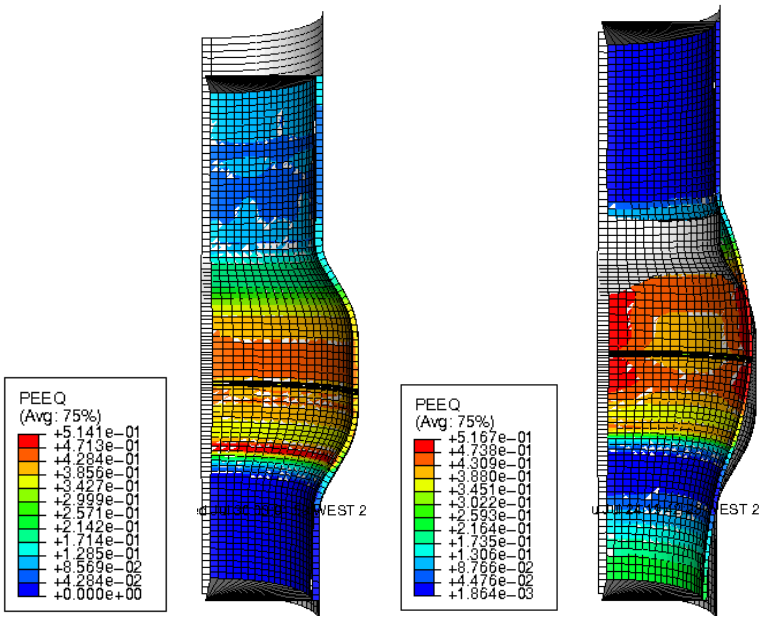
(a) Etapa 8 (b) Etapa 8 (c) Etapa 9 (d) Etapa 9

Figura 8.8: Etapas 8 e 9 (ensaio de tracção) de um twt de espessuras iguais (1,8 x 1,8 mm) (rel. de esp. = 1); altura do cordão de soldadura: 47,7 mm; Deformações plásticas equivalentes



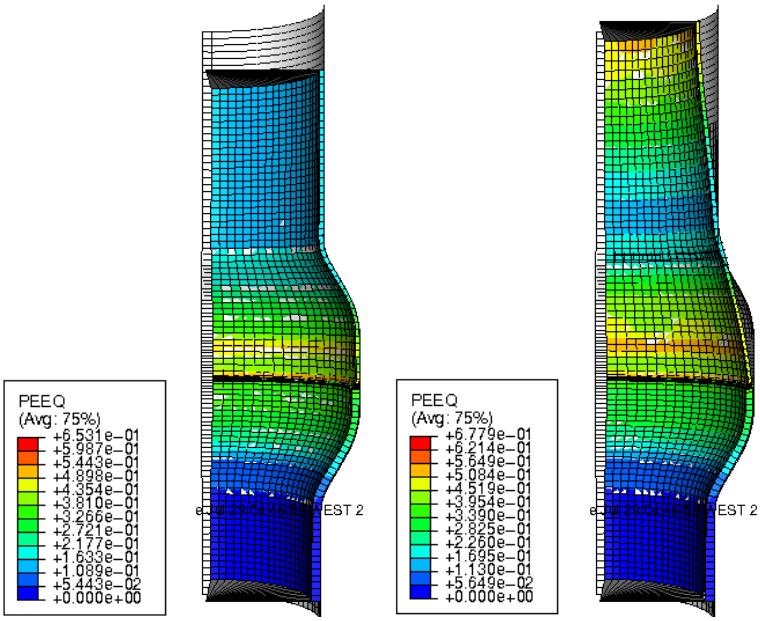
(a) Etapa 8 (b) Etapa 8 (c) Etapa 9 (d) Etapa 9

Figura 8.9: Etapas 8 e 9 (ensaio de tracção) de um twt de espessuras iguais (1,2 x 1,2 mm) (rel. de esp. = 1); altura do cordão de soldadura: 57,4 mm; Deformações plásticas equivalentes



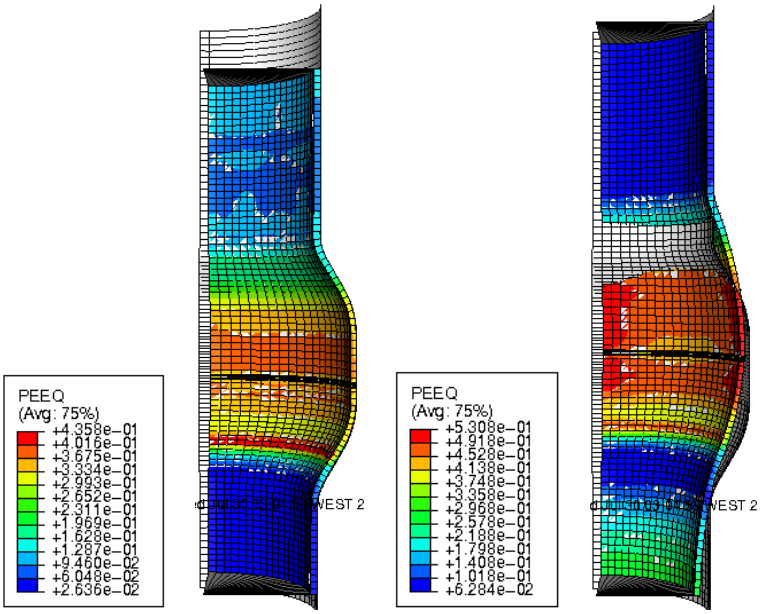
(a) Etapa 8 (b) Etapa 8 (c) Etapa 9 (d) Etapa 9

Figura 8.10: Etapas 8 e 9 (ensaio de tracção) de um twt de espessuras diferentes (1,2 x 1,8 mm) (rel. de esp. = 0,67); altura do cordão de soldadura: 57,4 mm; Deformações plásticas equivalentes



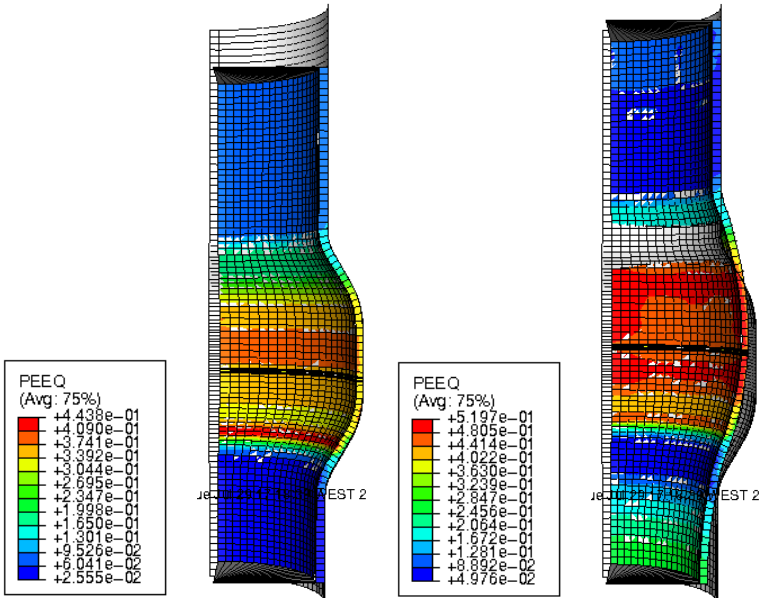
(a) Etapa 8 (b) Etapa 8 (c) Etapa 9 (d) Etapa 9

Figura 8.11: Etapas 8 e 9 (ensaio de tracção) de um twt de espessuras diferentes (1,2 x 2,4 mm) (rel. de esp. = 0,5); altura do cordão de soldadura: 57,4 mm; Deformações plásticas equivalentes



(a) Etapa 8 (b) Etapa 8 (c) Etapa 9 (d) Etapa 9

Figura 8.12: Etapas 8 e 9 (ensaio de tracção) de um twt de espessuras iguais (1,8 x 1,8 mm) (rel. de esp. = 1); altura do cordão de soldadura: 57,4 mm; Deformações plásticas equivalentes



(a) Etapa 8 (b) Etapa 8 (c) Etapa 9 (d) Etapa 9

Figura 8.13: Etapas 8 e 9 (ensaio de tracção) de um twt de espessuras iguais (2,4 x 2,4 mm) (rel. de esp. = 1); altura do cordão de soldadura: 57,4 mm; Deformações plásticas equivalentes

semelhante ao das curvas nos gráficos anteriores. Nas peças de $r > 1$, há diferenças significativas: ao serem sujeitos à tracção, logo no início dos semi-tubos do topo há uma redução acentuada de espessura (de cerca de -13,5%, na peça de 1,2 x 2,4 mm, e de -21,45 % na peça de 1,2 x 1,8. [1]; o declive positivo das curvas, no entanto, revela que estas peças rapidamente vão no sentido de recuperar a espessura inicial; entre $Y \simeq 33,5$ mm e $Y \simeq 61,2$ mm, a variação é positiva, tal como nos casos anteriores. Na peça de 1,2 x 1,8 mm, a variação aproxima-se de 0, mas ainda é negativa ($\simeq -2,5$ %, para $Y \simeq 57,1$ mm).
Os cordões de soldadura das peças de $r = 1$ situam-se na zona de inflexão com aumento de espessura (esta inflexão está presente em todos os casos considerados, como mostram os gráficos 1, 2, 7 e 8). Nas peças de $r > 1$, esta inflexão é mais distendida. Os cordões de soldadura destas peças situam-se logo à direita e "travam" a redução de espessura. O andamento das curvas, na parte final do gráfico 8 ($Y = 156,1$ mm), é semelhante ao do caso anterior (gráfico 7) mas as peças de $r = 1$ têm uma redução de espessura cerca de 5,3 % menor, em média (-12,04 % (twt 2,4 x 2,4 m), -13 % (twt 1,8 x 1,8 mm) e -14,25 % (twt 1,2 x 1,2 mm)).

Neste caso, há diminuição da variação (redução) percentual máxima das espessuras. Nos tubos de $r = 1$, essa diminuição é pequena (entre -0,5 % (twt 2,4 x 2,4 mm) e -1,75 % (twt 1,2 x 1,2 mm). Nos tubos de $r > 1$, a diminuição já é significativa: -12,08 %, para o twt 1,2 x 2,4 mm.

8.3.2 Análise de tensões nas peças hidroconformadas

i) Tensões - final da etapa 7

Cordão de soldadura a 47,7 mm

Pode-se observar no gráfico 3 (pág. 109) que o nível de tensões residuais se mantém aproximadamente constante na zona correspondente a quase todo o semi-tubo superior das peças, com valores de tensão equivalente (Von Mises) em torno dos 100 MPa.
Próximo da zona do bojo, o valor das tensões aumenta e, em toda a zona do bojo, observam-se grandes oscilações dos valores de tensões, em torno de um valor médio de cerca de 200 MPa. As amplitudes de oscilação mais pequenas registam-se nas peças de espessuras iguais (razão de espessuras = 1) e aumentam com o aumento da razão de espessura das peças, atingindo valores máximos de σ_{eq} superiores a 500 MPa (twts de 1,2 x 1,8 mm e 1,2 x 2,4 mm).
A figura 8.14a, na pág. 99, mostra-nos que estes picos de tensão são localizados em nós e podem ultrapassar os 900 MPa (942,3 MPa, no tubo de espessuras 1,2 x 2,4 mm).
A presença do cordão de soldadura não parece afectar muito o andamento das tensões, embora se observe um aumento significativo de tensões localizado radialmente na face interior do cordão e na sua vizinhança (no tubo de maior espessura (fig. 8.14a).
Na parte inferior da peça (lado direito do gráfico) observa-se de novo uma estabilização das tensões em valores abaixo de 100 MPa.

[1] a peça de 1,2 x 1,8 mm tinha o cordão de soldadura inicialmente a 61,8 mm da extremidade

Cordão de soldadura a 57,4 mm

O andamento das tensões residuais que se observa no gráfico 4 (pág. 109) é semelhante ao das peças com o cordão de soldadura inicialmente a 47,7 mm da extremidade inferior (gráfico 3). As amplitudes de oscilação seguem um modelo semelhante ao que se observa no caso anterior, atingindo o tubo de espessuras 1,2 x 2,4 neste caso um pico de 629,28 MPa [2]. Estas oscilações observam-se para valores de Y semelhantes aos do caso anterior.
Os cordões de soldadura situam-se nesta zona de oscilações máximas. A figura 8.14b, na página 99, mostra que estes valores máximos se localizam no cordão, no interior do twt (tubo de espessuras 1,2 x 2,4) com alguma variação de intensidade na sua distribuição radial.
A posição do cordão de soldadura não parece ser directamente responsável pelo aparecimento destes picos de tensões, que se situam em ambos os casos - gráficos 3 e 4 - no intervalo entre $Y \simeq 85$ mm e $Y \simeq 95$ mm. No entanto, ele faz com que os valores de tensão do pico máximo sejam mais elevados. Há uma distribuição radial destas tensões pelo cordão. Também há um aumento significativo de tensões na sua vizinhança (no tubo de maior espessura), tal como no caso anterior, como mostra a figura 8.14b. A descontinuidade geométrica provocada pelo cordão, nos dois casos, pode resultar nesta concentração de tensões.

ii) Tensões - final da etapa 8

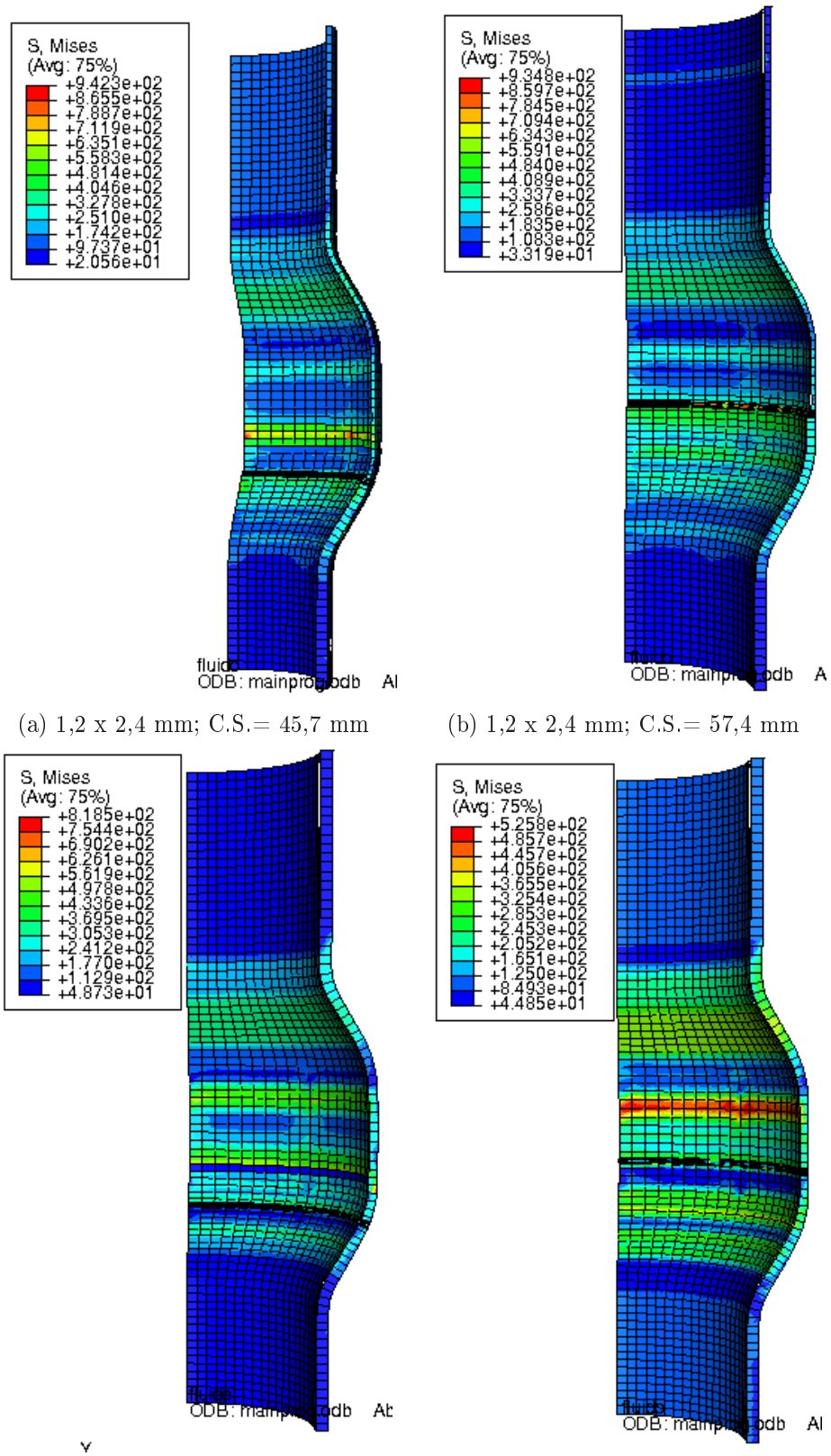
Cordão de soldadura a 47,7 mm

No final da etapa 8, a peça já não está colocada na matriz, encontrando-se livre. O gráfico 14, na pág. 114, permite-nos observar que há uma diminuição significativa do valor das tensões residuais da peça, quando passa da etapa 7 para a 8. Esta diminuição é significativa sobretudo no semi-tubo de menor espessura (fora do bojo) e nas inflexões de início e final do bojo. Tal facto poderá estar associado à libertação da peça dos constrangimentos que lhe são impostos pela matriz. A zona sujeita a menos deformação plástica (zona fora do bojo) tem valores de tensão residual bastante baixos, próximos de zero. Como podemos também observar no gráfico 14 A (pág. 115), o andamento da curva de tensões é em geral semelhante no final das duas etapas, mas de menor amplitude, na etapa 8, para a peça de 1,2 x 1,2 ($r = 1$). Na peça de $r = 2$, as curvas de tensões nas duas etapas, para valores de $Y \simeq 71$ mm e superiores, têm andamentos muito próximos um do outro e diferentes de zero (portanto, neste intervalo as tensões residuais nesta peça variam muito pouco de uma etapa para a outra).

Cordão de soldadura a 57,4 mm

O andamento das curvas de tensão para estas peças é análogo ao das curvas de tensão das peças do caso anterior, como podemos observar no gráfico 14 B (na pág. 115). Observa-se de

[2] valor médio obtido de 4 valores em 2 nós do cordão de soldadura: 2 valores num nó da parede interior e 2 valores no nó correspondente exterior



(a) 1,2 x 2,4 mm; C.S.= 45,7 mm

(b) 1,2 x 2,4 mm; C.S.= 57,4 mm

(c) 2,4 x 2,4 mm; C.S.= 45,7 mm

(d) 2,4 x 2,4 mm; C.S.= 57,4 mm

Figura 8.14: Etapa 7 - twt de razões de espessuras $r = 1$ e $r = 2$. Alturas do cordão de soldadura: 47,7 mm e 57,4 mm; Tensões equivalentes (Von Mises)

novo que na peça de $r = 2$, no tubo de maior espessura, neste caso logo a partir do cordão de soldadura, as curvas de tensão têm andamentos muito próximos um do outro e tendem a estabilizar em valores pouco superiores a 70 MPa, a partir de $Y \simeq 120$ mm.

iii) Tensões - final da etapa 9

Cordão de soldadura a 47,7 mm

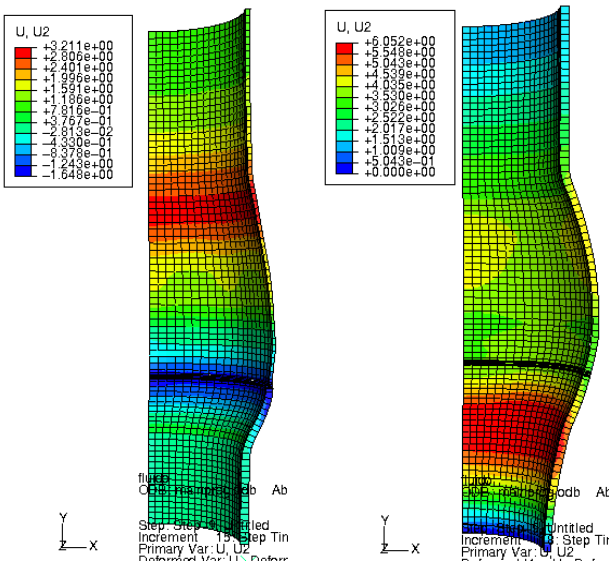
No final da etapa 8, as peças hidroconformadas têm um comprimento médio de 143,27 mm, o que corresponde a uma recuperação elástica média do material na sua direcção longitudinal de 0,27 mm. Na etapa 9, as peças são submetidas à tracção até ao valor de 1 mm para além do seu comprimento original de 155,1 mm (pré-hidroconformação), pelo que o seu alongamento elástico médio é de 12,83 mm.

Na zona à esquerda do gráfico 9 (pág. 112), correspondente ao tubo superior das peças, os valores de tensão mantêm-se tendencialmente constantes, com valores médios de tensão nas peças entre cerca de 240 MPa (no tubo de 1,2 x 1,2 mm) e cerca de 320 MPa (no tubo de 1,2 x 2,4 mm). Os nós da vizinhança da primeira inflexão da peça (início do bojo) deslocaram-se no sentido da força de tracção aplicada, o que se reflecte em oscilações de tensão.
Um segundo pico de tensões, de valor médio mais elevado, situa-se nos nós da vizinhança da 2ª inflexão do bojo. Para além desta inflexão há de novo uma tendência de estabilização das tensões (parte do bojo com perímetro cnstante da secção exterior). O pico de tensão que se observa a pouco mais de metade do bojo é bem localizado. Neste pico atingem-se as tensões máximas. Nos nós correspondentes, verificou-se a maior redução percentual de espessura.
A zona correspondente à parte inferior do bojo (à direita, no gráfico) tem alguma simetria relativamente à da parte superior, embora as oscilações de tensões sejam maiores, em especial nas peças com maiores diferenças de espessuras. Os cordões de soldadura dos tubos de maiores razões de espessuras provocam nestes maiores oscilações de tensão. Relativamente à sua posição final após a hidroconformação (final da etapa 7), os cordões dos tubos de espessuras iguais ($r = 1$) sofreram um deslocamento maior que os dos tubos de razões de espessuras $r > 1$. Nestes últimos, o alongamento maior verificou-se nos semi-tubos de menor espessura. Estes resultados podem-se observar nas figuras 8.15 a) e b).

Após as oscilações na zona da ligação do bojo ao semi-tubo inferior, as distribuições de tensões no semi-tubo têm dois comportamentos distintos: nas peças de razão de espessuras $r > 1$, os valores de tensão tendem a estabilizar nos 177 MPa (twt 1,2 x 2,4 mm) e nos 229 MPa (twt de 1,2 x 1,8 mm); nas peças de $r = 1$, as tensões vão subindo até atingirem valores em torno dos 370 MPa: 373,94 (1,2 x 1,2 mm), 369,26 MPa (peça de 1,8 x 1,8 mm) e 375,16 MPa (peças de 2,4 x 2,4 mm).

Cordão de soldadura a 57,4 mm

Nas peças com o cordão inicialmente a 57,4 mm, os tubos inferiores aumentaram o seu ta-

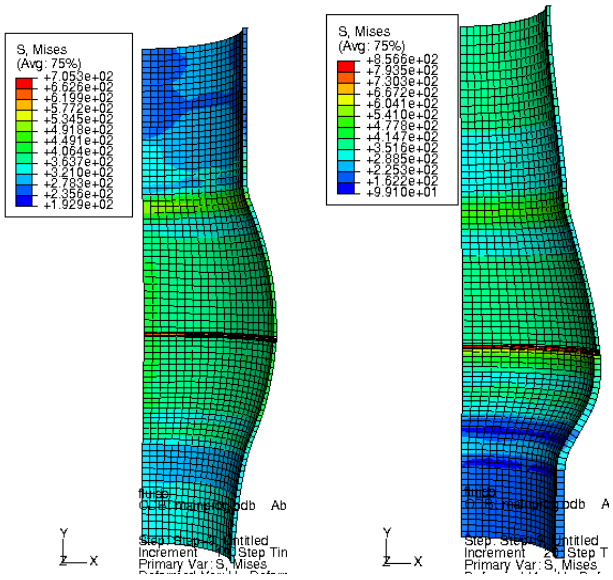


(a) twt esp. 1,2 x 2,4 mm (b) twt esp. 2,4 x 2,4 mm

Figura 8.15: Etapa 9 (ensaio de tracção) dos twt de espessuras 1,2 x 2,4 mm e 2,4 x 2,4 mm; altura do cordão de soldadura: 44,7 mm; Deslocamento longitudinal (U2)

manho em relação aos tubos superiores. No gráfico 10 (pág. 112), na peça de razão de espessurabs $r = 2$, observa-se que a tensão equivalente no tubo superior (antes do bojo) aumenta sensivelmente em relação ao caso anterior (para $Y = 0$, $\sigma_{eq.}$ passa de 329 MPa para 394 MPa).
A distribuição de tensões ao longo do corte longitudinal das peças segue neste caso um padrão genericamente semelhante ao do caso anterior (oscilações nas inflexões do bojo e pico máximo de tensão aproximadamente a meio do bojo). Observa-se no gráfico 10 que estes picos de tensão máxima em cada peça coincidem com os respectivos cordões de soldadura. As figuras 8.16 a) e b) mostram este facto.
As peças de espessura constante ($r = 1$) têm um andamento semelhante das curvas de tensão.

Observa-se uma relação entre o andamento (intensidade) das tensões e a variação de espessura. Nos tubos superiores das peças, que sofreram variação positiva da espessura pelo efeito da alimentação axial, as tensões de tracção nelas aplicadas são menores, devido à maior área resistente. Com a redução de espessura no bojo (saliência) obtido por hidroconformação, a intensidade das tensões é maior.



(a) twt esp. 1,2 x 1,2 mm (b) twt esp. 1,2 x 2,4 mm

Figura 8.16: Etapa 9 (ensaio de tracção) dos twt de espessuras 1,2 x 1,2 mm e 1,2 x 2,4 mm; altura inicial do cordão de soldadura: 57,4 mm. Tensão equivalente (Von Mises)

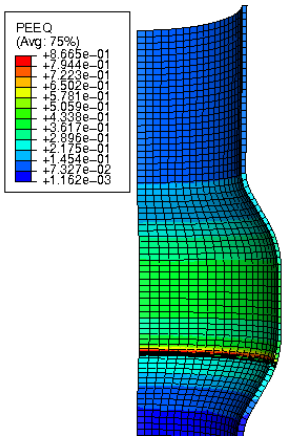
8.3.3 Análise das deformações plásticas (PEEQ) nas peças hidroconformadas

i) Deformações plásticas - final das etapas 7 e 8

Cordão de soldadura a 47,7 mm

Os gráficos 1 e 5 (de variação de espessura e de deformação plástica equivalente), nas páginas 108 e 110, permitem observar-se uma relação estreita entre as deformações plásticas do material e a variação da sua espessura. Até à coordenada $Y \simeq 45$ mm, há uma deformação plástica do material, estabilizada em torno de 0,1 (entre valores médios de $PEEQ \simeq 0,08$, na peça de espessura 2,4 x 2,4 mm e $PEEQ \simeq 0,13$, na peça de espessuras 1,2 x 2,4 mm). Nesta zona faz-se sentir o efeito da força compressiva de alimentação axial. Observa-se nos dois gráficos a fase de transição com oscilações, correspondentes à primeira inflexão do bojo. A partir daqui, observa-se que os andamentos das curvas permitem distinguir-se um tipo para as peças de $r > 1$ e outro para as peças de $r = 1$. Até $Y \simeq 85$ mm, o aumento de deformação plástica do material acompanha a sua redução de espessura.

Entre $Y \simeq 85$ mm e $Y \simeq 95$ mm, há uma inflexão em todas as curvas (com redução de deformação plástica e aumento de espessura). Observa-se um pico de deformação plástica, na curva da peça de 1,2 x 1,8 mm de espessura, situado no topo do seu cordão de soldadura. Na figura 8.17 observa-se que se trata de deformação plástica localizada na parede interior da peça, na vizinhança do cordão com o tubo mais fino.



(a) twt esp. 1,2 x 1,8 mm

Figura 8.17: Deformações plásticas localizadas no topo do cordão de soldadura; altura original do cordão: 44,7 mm

Nas peças de razão de espessuras $r = 1$ não se observam estes picos de deformação plástica. Note-se que os cordões se situam numa inflexão do bojo. Caminhando para a direita do gráfico, os valores de PEEQ vão diminuindo, assim como diminui a variação de espessura das peças. Para além do bojo da peça, tanto a deformação plástica como a variação de espessura das peças começam a estabilizar: as peças de razão de espessuras $r > 1$ aproximam-se de zero; as de $r = 1$ estabilizam em valores de PEEQ em torno de 0,03.

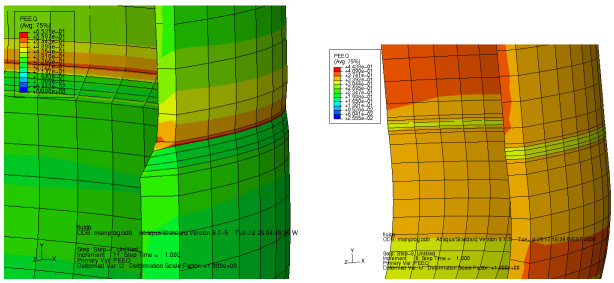
É importante observar que não há variação de deformação plástica nas peças entre o final da etapa 7 e o final da etapa 8. As curvas apresentadas no gráfico 16, na página 116, relativas às duas etapas da mesma peça, são coincidentes. O facto de o valor de tensões residuais ser superior na etapa 7, relativamente à 8, indica que no final desta última etapa a redução de tensão residual terá sido acompanhada da eliminação de deformação elástica, portanto, houve recuperação elástica.

Cordão de soldadura a 57,4 mm

O andamento das curvas de deformação plástica equivalente nestas peças (gráfico 6, página 110) é semelhante ao das peças com o cordão inicialmente a 47,7mm. Observa-se, na peça de $r = 2$, um pico de deformação plástica de 0,653 [3]. A figura 8.18a, da análise do Abaqus, confirma que este pico de deformação plástica se distribui radialmente pelos nós das paredes interior e exterior na vizinhança do topo do cordão; a meia espessura, o valor médio de deformação é de ($PEEQ \simeq 0,544$) [4].

[3] num nó abaixo dos nós do topo do cordão, de ligação ao tubo de menor espessura

[4] valor médio entre um nó interior e um nó exterior do topo do cordão, no corte longitudinal que



(a) twt esp. 1,2 x 2,4 mm (b) twt esp. 2,4 x 2,4 mm

Figura 8.18: Deformações plásticas equivalentes após as etapas 7/8; altura original do cordão: 57,4 mm

Nos nós intermédios dos cordões de soldadura das peças, há uma redução ligeira do valor de deformação (o que se observa nas inflexões das curvas do gráfico 6, entre $Y \simeq 85,4$ mm e $Y \simeq 86,7$ mm (zona dos pontos médios dos cordões de soldadura das peças). Nas peças de $r = 1$, esta redução estende-se a todo o cordão, como se observa na figura 8.18b.
As peças de razão de espessuras $r = 1$ têm curvas de deformação plástica muito semelhantes. A ausência de descontinuidades de espessura na zona do cordão traduz-se na ausência de picos de deformação, como se observa no gráfico 6 e na figura 8.18b Tal como no caso anterior, nas peças de relações de espessuras r $>$ 1, o tubo de menor espessura tem maior deformação plástica que o tubo de maior espessura.

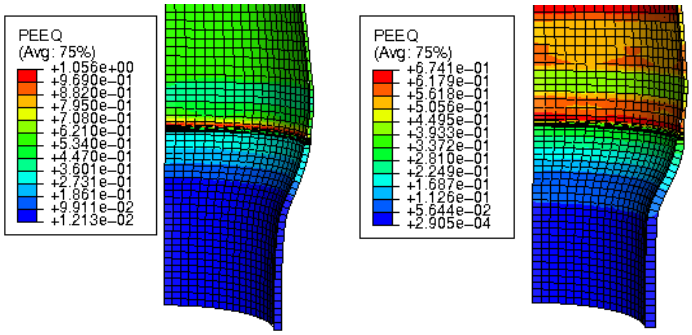
ii) Deformações plásticas - final da etapa 9

Cordão de soldadura a 47,7 mm

Analisando o gráfico 11 (pág. 113), observamos dois tipos de curvas: as curvas das peças de razão de espessuras $r = 1$ e as curvas das peças de $r > 1$. Em cada tipo, os andamentos das curvas são semelhantes. Os dois tipos têm entre si algumas semelhanças.
Até ao início da primeira inflexão do bojo, o andamento das curvas de deformação plástica equivalente é semelhante aos observado nas etapas 7/8, estabilizando em valores semelhantes. Isto verifica-se sobretudo nas peças de razão de espessuras $r = 1$. Para $r > 1$, os valores das deformações plásticas são mais elevados: na peça de 1,2 x 2,4 mm, ele é, no início do tubo do topo (de esp. = 1,2 mm) de $\simeq 0,194$ mas aproxima-se dos valores das restantes peças, na vizinhança da 1ª inflexão do bojo. Passada esta inflexão (onde se verifica oscilação dos valores) a deformação plástica começa a aumentar. De novo, as curvas de deformação das peças de r $>$ 1 afastam-se das curvas das peças de espessura constante.

Os maiores valores de deformação situam-se na zona do bojo, para todas as peças. Nesta

temos considerado nas peças.



(a) Etapa 8 ; twt 1,2 x 1,8 mm

(b) Etapa 9 ; twt 1,2 x 2,4 mm

Figura 8.19: Deformações plásticas equivalentes na vizinhança do (e no) cordão de soldadura. Ensaio de tracção - etapa 9

zona, os valores tendem para $PEEQ \simeq 0,6$, nas peças de $r > 1$, e para $PEEQ \simeq 0,5$, nas peças de $r = 1$. Nos tubos de $r > 1$, observa-se a presença de deformações plásticas localizadas na vizinhança dos (e nos) nós do topo do cordão de soldadura, na parede interior, como mostram as figuras 8.19 a) e b). É o caso do valor máximo na peça de $r = 1,5$ ($PEEQ = 0,707$ [5]. No tubo de $r = 2$, há também valores de pico mais acima do cordão de soldadura, (PEEQ $\simeq 0,584$ [6], para $Y_{medio} = 93,95$ mm).

Na vizinhança dos cordões de soldadura e para além deles, sobretudo nas peças de $r > 1$, observa-se uma redução dos valores de PEEQ. Atingida a inflexão do bojo com ligação ao tubo inferior, os valores da deformação das peças de r > 1 tendem a estabilizar, aproximando-se de zero (PEEQ médio $\simeq 0,03$, na peça de $r = 1,5$ e $< 0,003$, na peça de $r = 2$). Já nos tubos de r $= 1$ observa-se um aumento da deformação plástica, que sobe progressivamente até atingir valores de $PEEQ \simeq 0,373$ na peça de 1,2 x 1,2 mm e de $\simeq 0,38$ na peça de 2,4 x

[5] valor médio obtido dos valores 1,056 e 0,357, respectivamente nos nós interior e exterior do topo do cordão de soldadura, para $Y_{med} = 108,34$ mm

[6] valor médio obtido dos valores 0,5912 e 0,5776, respectivamente nos nós interior e exterior do topo do cordão de soldadura

2,4 mm).
Nas peças de espessuras diferentes, a deformação manifesta-se sobretudo nos tubos de menor espessura, por oposição à menor deformação dos tubos de maior espessura. Nas peças da mesma espessura, embora as curvas de deformação sejam semelhantes até ao final do bojo, os valores de deformação são menos elevados. O aumento da deformação nos tubos inferiores destas peças parece compensar os menores valores observados no bojo.

Comparando os gráficos 11 (pág. 113) e 7, pode-se observar uma relação entre o aumento de deformação plástica e a variação percentual de espessura.

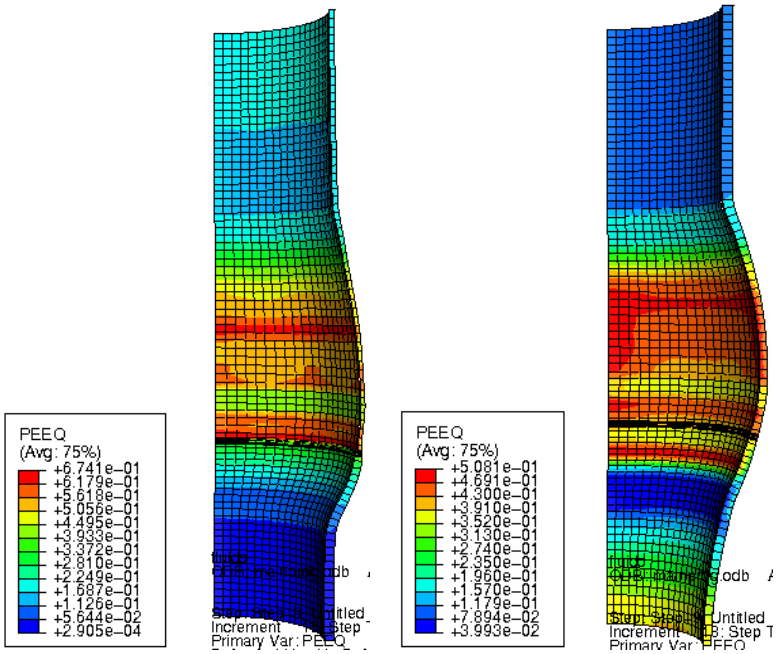
Cordão de soldadura a 57,4 mm

Como se observa do gráfico 12 (pág. 113), os valores mais elevados da deformação plástica equivalente situam-se na zona do bojo. O andamento das curvas de deformação plástica tem semelhanças com o das curvas do caso anterior. Os valores médios máximos de PEEQ são no entanto mais baixos, estabilizando na zona do bojo em torno de 0,5 para as peças de $r = 1$ (0,513 para as peças de 1,2 x 1,2 mm e 1,8 x 1,8 mm; 0,491 para a peça de 2,4 x 2,4 mm). Observa-se que nas peças de $r = 1$ o aumento da espessura se traduz numa ligeira diminuição da deformação plástica equivalente; no entanto, o andamento das suas curvas é muito semelhante.

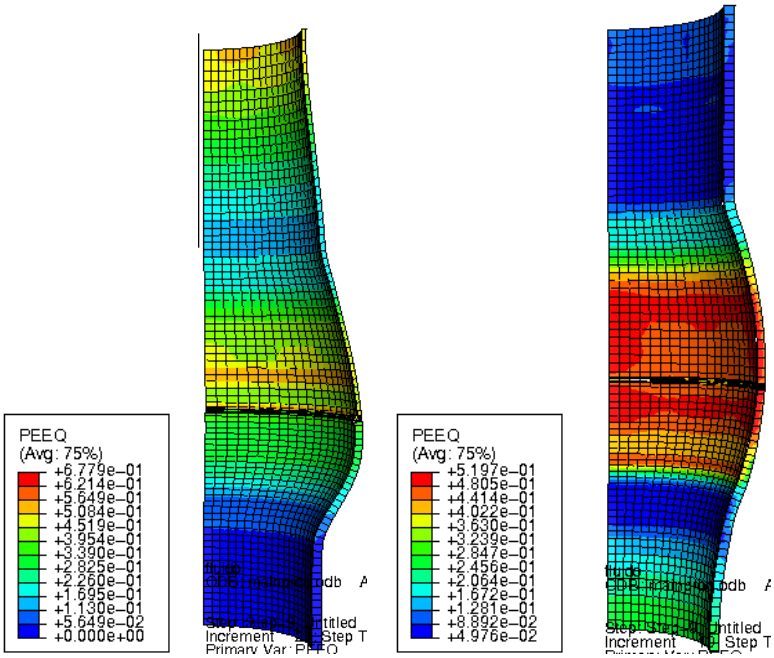
A peça de razão de espessuras $r = 2$ tem uma curva de PEEQ semelhante à que ela tem no caso anterior (cordão a 47,7 mm) (exceptuando a fase inicial e na vizinhança do cordão) embora com valores de PEEQ menores.
Fora da zona do bojo, a curva de PEEQ desta peça afasta-se das restantes curvas. Para $Y = 0$, o seu valor de PEEQ é de $\simeq 0,49$ (bastante maior que no caso anterior, onde se tem $PEEQ \simeq 0,194$). Entre $Y > 5,7$ mm e $Y \simeq 51,7$ mm, o valor de PEEQ vai descendo quase linearmente até um valor médio mínimo de 0,141 ($Y \simeq 51,74$ mm).
Ainda nesta peça, na vizinhança do cordão observa-se um pico de deformação plástica de cerca de 0,57, para $Y \simeq 96,5$ mm. A figura 8.20f permite ver que esta deformação se localiza na vizinhança dos nós superiores do cordão de soldadura, distribuindo-se radialmente pelos mesmos. No cordão de soldadura, a descida relativamente ao pico de deformação plástica referido é acentuada, com um mínimo relativo de $PEEQ \simeq 0,326$, para $Y \simeq 98,3$ mm.

O andamento das curvas de deformação para valores superiores de Y é semelhante - tanto nas curvas das peças de $r = 1$ como nas peças de $r > 1$ - ao das curvas do caso anterior (c.s. inicialmente a 47,7 mm).

Observa-se de novo uma relação entre a variação da deformação plástica e a variação da espessura dos tubos, comparando os gráficos 8 e 12.



(a) CS = 47,7 mm (b) 1,2 x 2,4 mm (c) CS = 47,7 mm (d) 2,4 x 2,4 mm



(e) CS = 57,4 mm (f) 1,2x2,4 mm (g) CS = 57,4 mm (h) 2,4x2,4 mm

Figura 8.20: Deformação plástica equivalente após a etapa 9. Twt de espessuras 1,2 x 2,4 mm e 2,4 x 2,4 mm; cordões de soldadura originalmente a 47,7 mm e a 57,4 mm

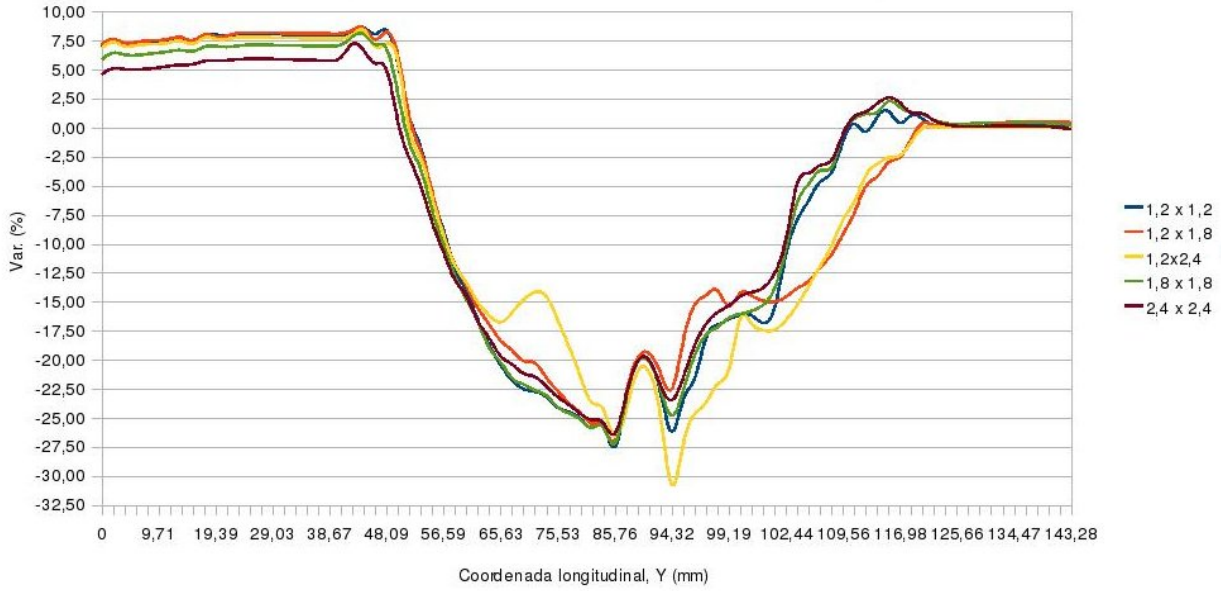


Figura 8.21: Gráfico 1 - Variação percentual de espessuras dos tubos hidroconformados (etapa 7). Nós de corte longitudinal - cordão de soldadura inicialmente a 47,7 mm)

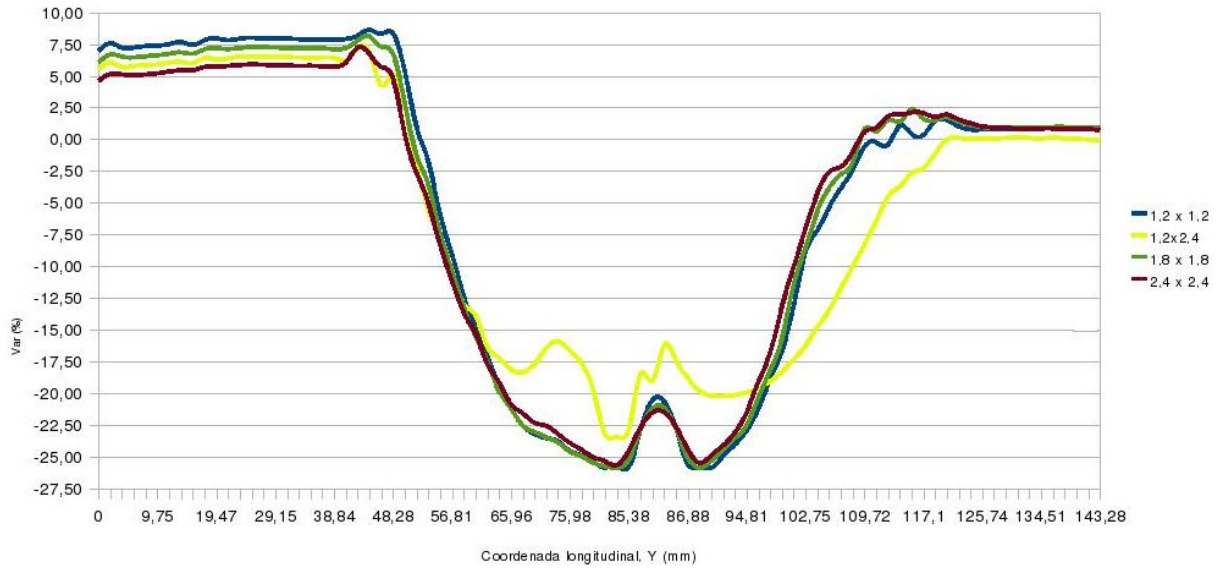


Figura 8.22: Gráfico 2 - Variação percentual de espessuras dos tubos hidroconformados (etapa 7). Nós de corte longitudinal - cordão de soldadura inicialmente a 57,4 mm)

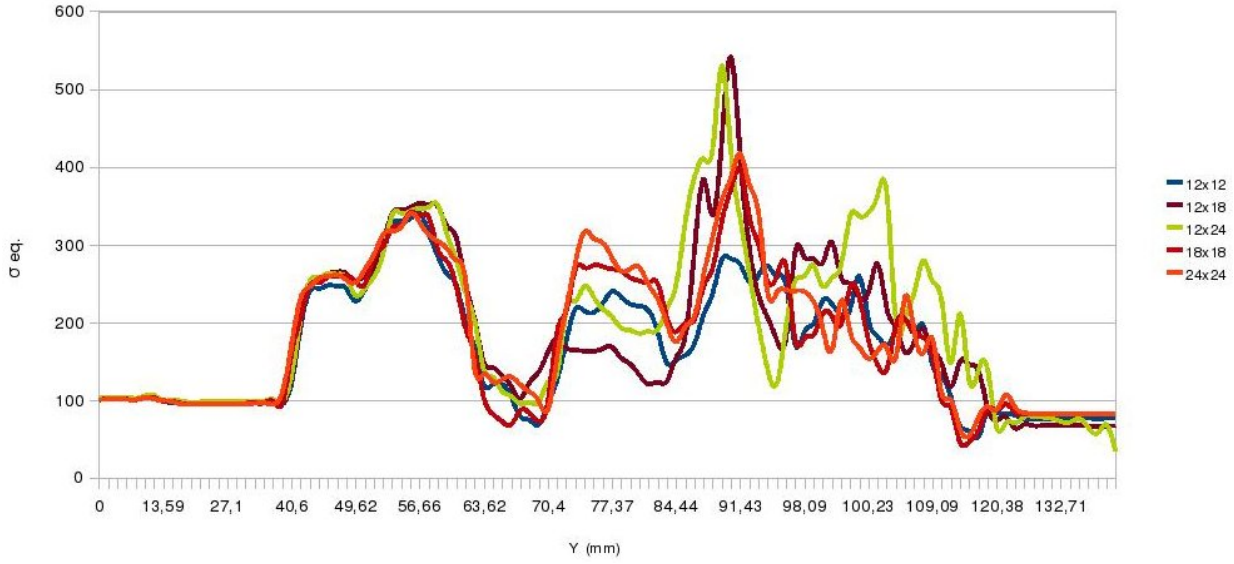


Figura 8.23: Gráfico 3 - Tensões equivalentes (Von Mises) na espessura média dos tubos, após hidroconformação (etapa 7). Nós de corte longitudinal - cordão de soldadura inicialmente a a 47,7 mm)

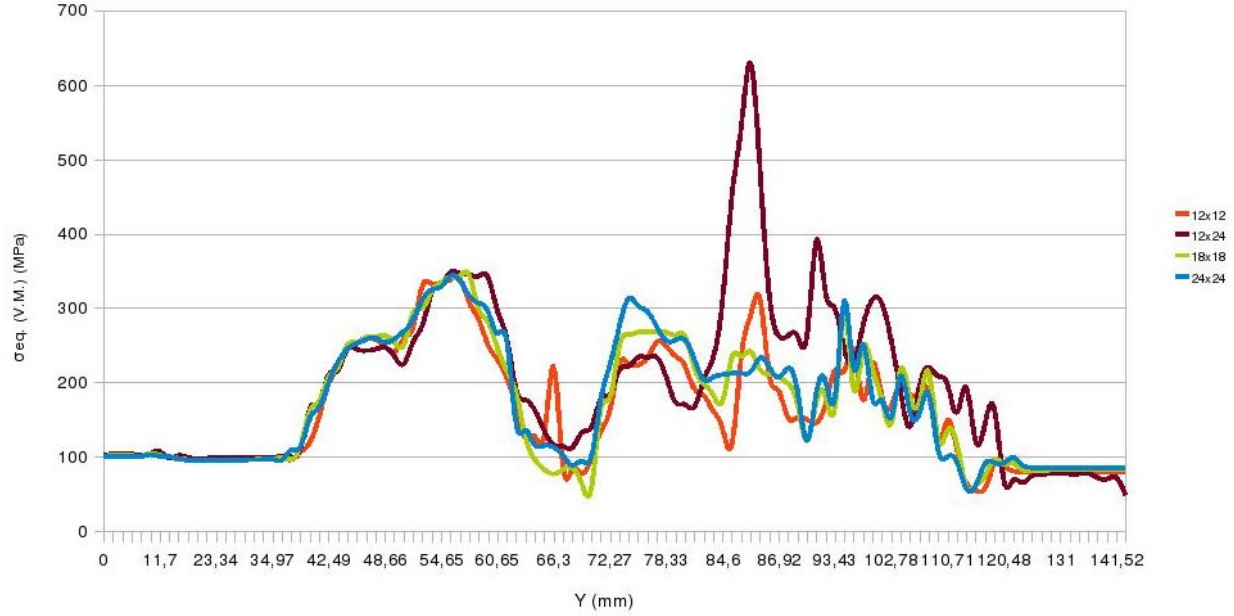


Figura 8.24: Gráfico 4 - Tensões equivalentes (Von Mises) na espessura média dos tubos (etapa 7). Nós de corte longitudinal - cordão de soldadura inicialmente a 57,4 mm)

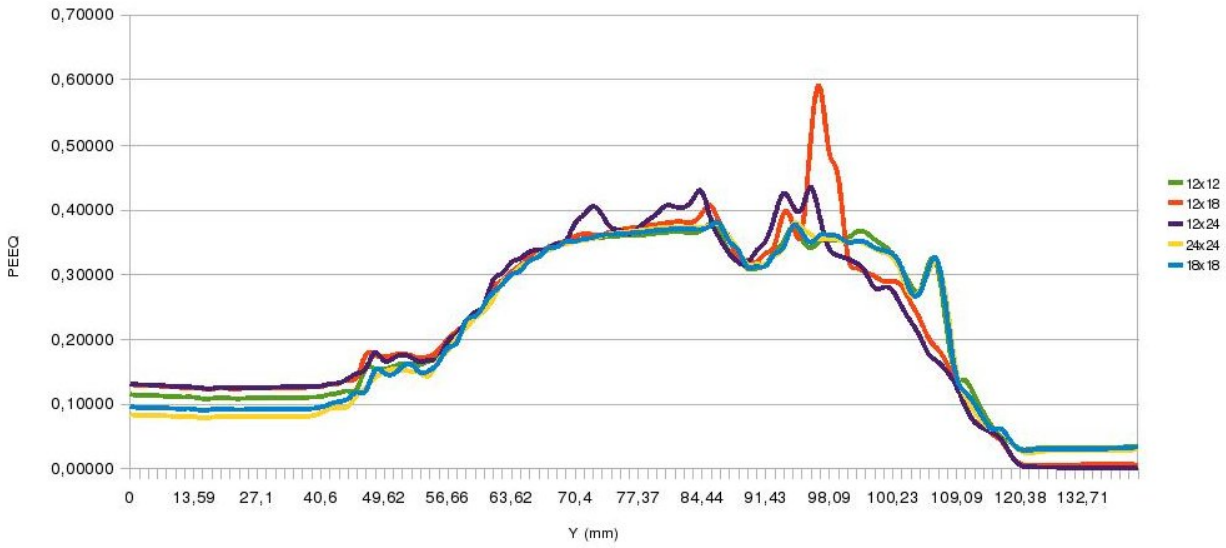


Figura 8.25: Gráfico 5 - Deformação plástica equivalente (PEEQ) - etapa 7. Nós de corte longitudinal - cordão de soldadura a 47,7 mm)

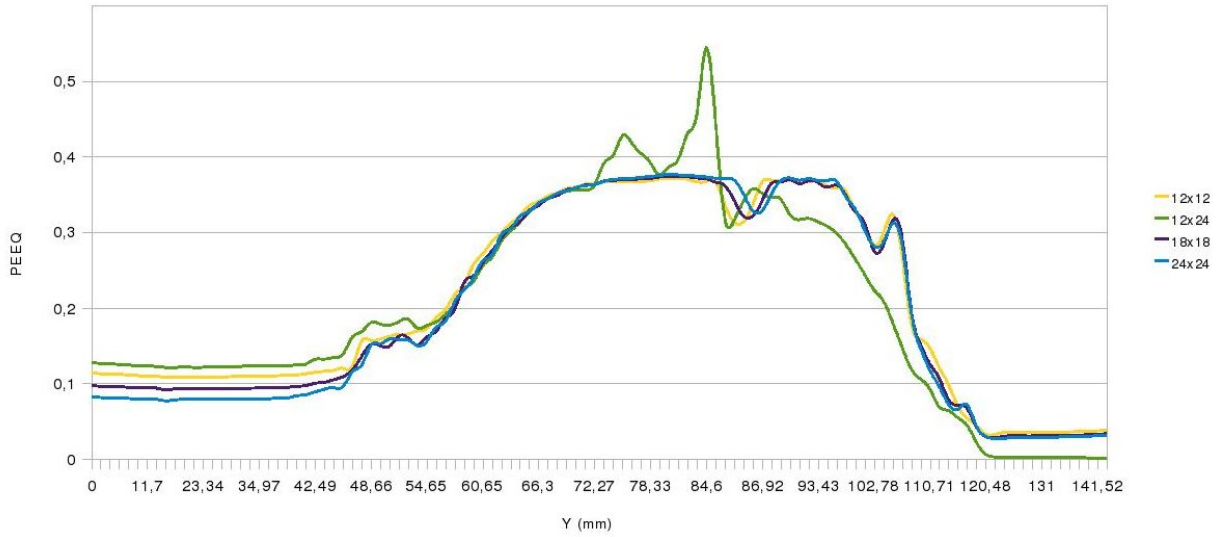


Figura 8.26: Gráfico 6 - Deformação plástica equivalente (PEEQ) - etapa 7. Nós de corte longitudinal - cordão de soldadura a 57,4 mm)

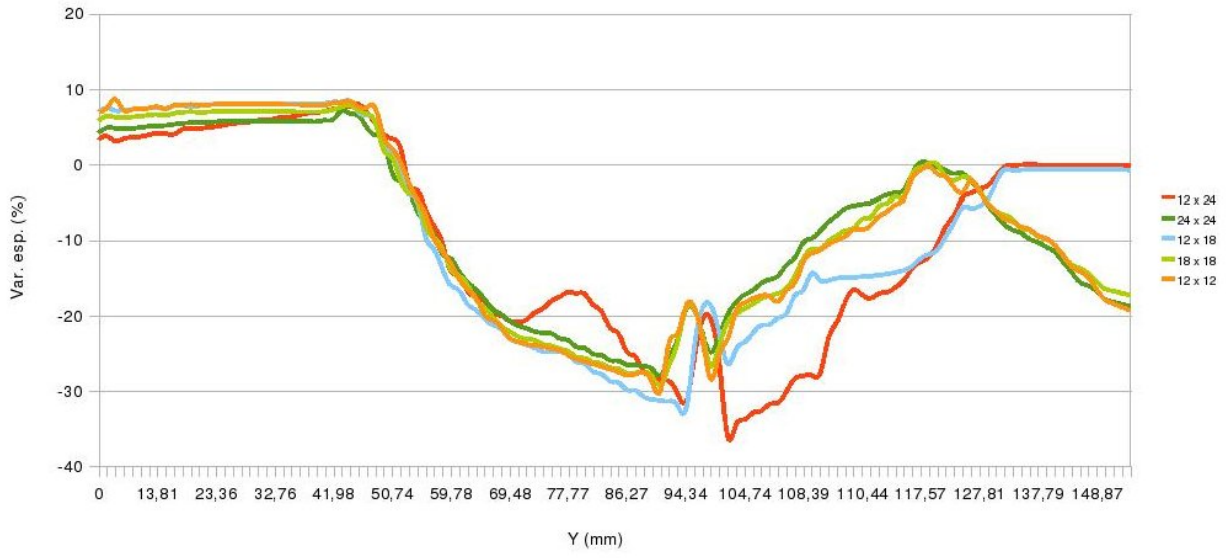


Figura 8.27: Gráfico 7 - Variação percentual de espessuras - etapa 9. Nós de corte longitudinal - cordão de soldadura inicialmente a 47,7 mm)

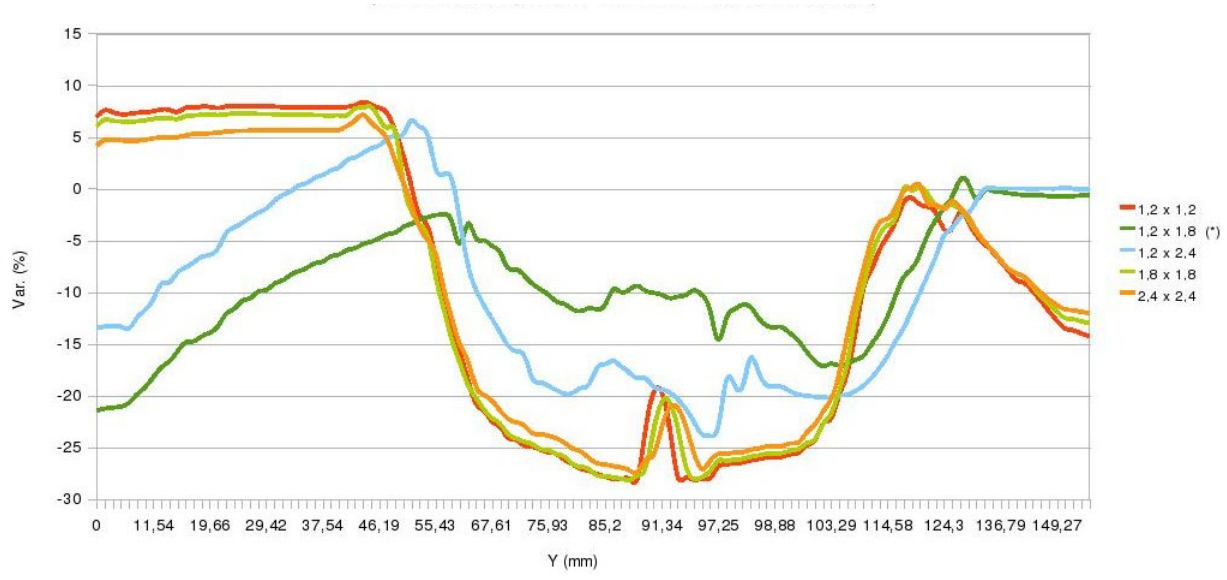


Figura 8.28: Gráfico 8 - Variação percentual de espessuras - etapa 9. Nós de corte longitudinal - cordão de soldadura inicialmente a 57,4 mm)

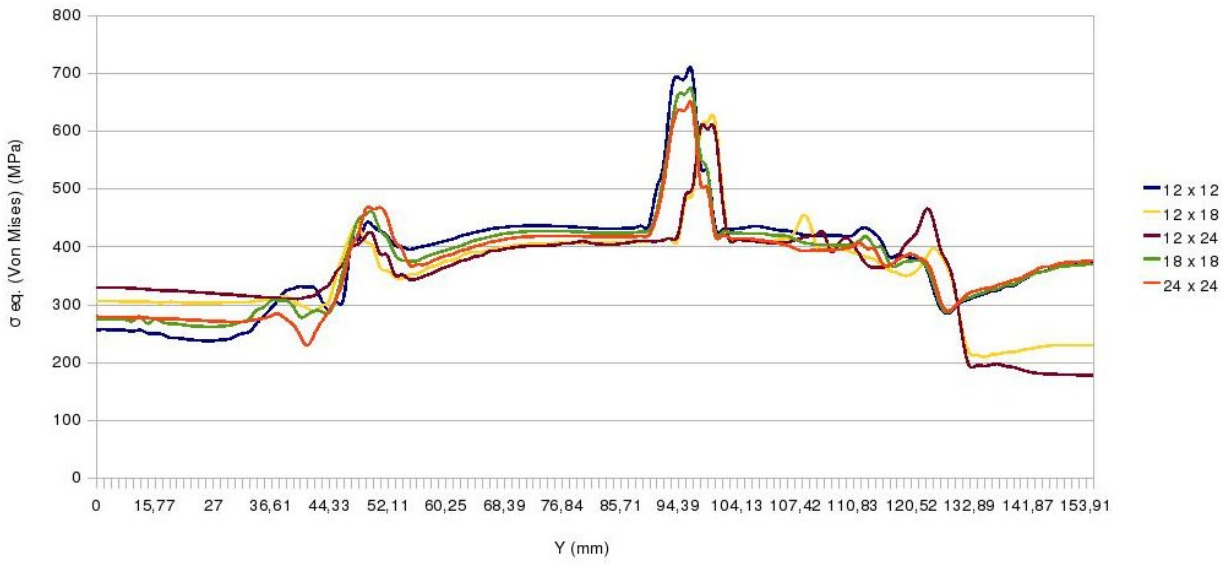


Figura 8.29: Gráfico 9 - Tensões equivalentes (Von Mises) - etapa 9. Nós de corte longitudinal - cordão de soldadura inicialmente a 47,7 mm)

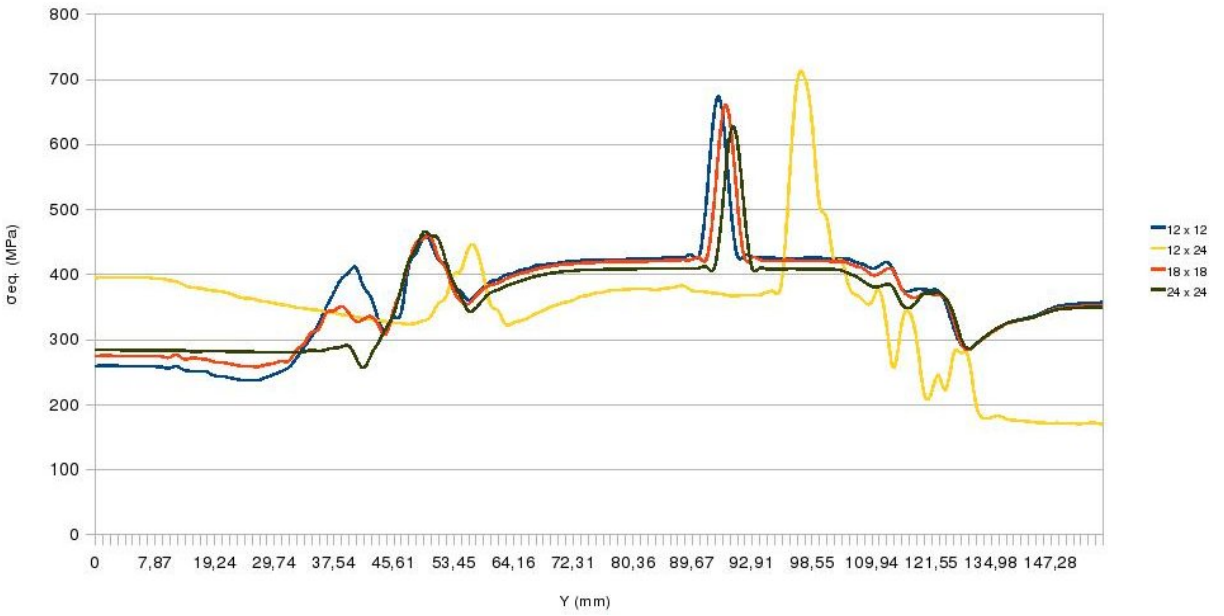


Figura 8.30: Gráfico 10 - Tensões equivalentes (Von Mises) - etapa 9. Nós de corte longitudinal - cordão de soldadura inicialmente a 57,4 mm)

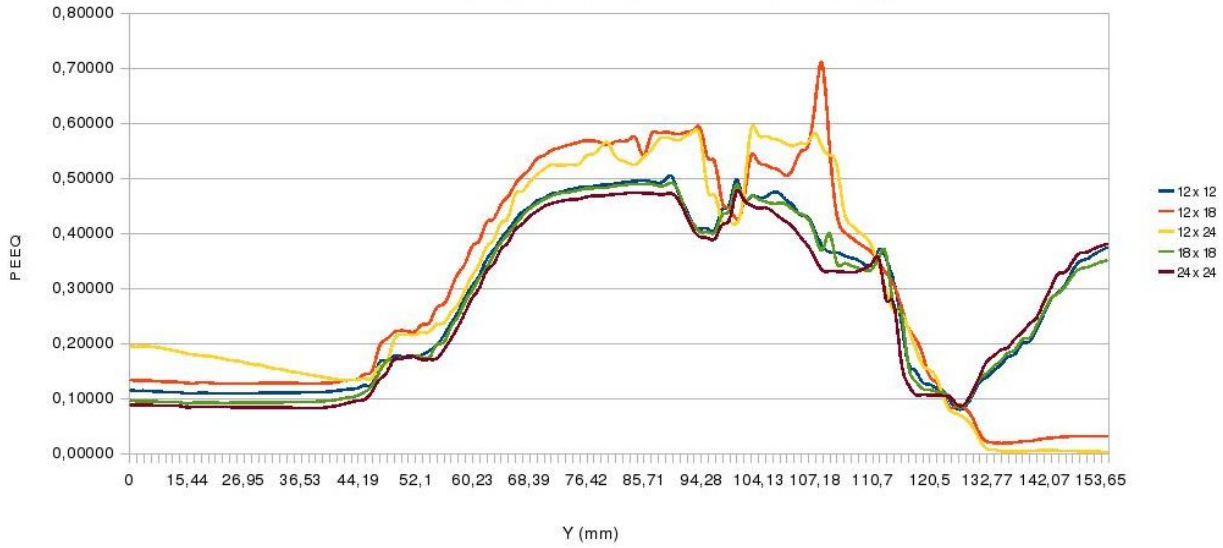


Figura 8.31: Gráfico 11 - Deformação plástica equivalente (PEEQ) - etapa 9. Nós de corte longitudinal - cordão de soldadura inicialmente a 47,7 mm)

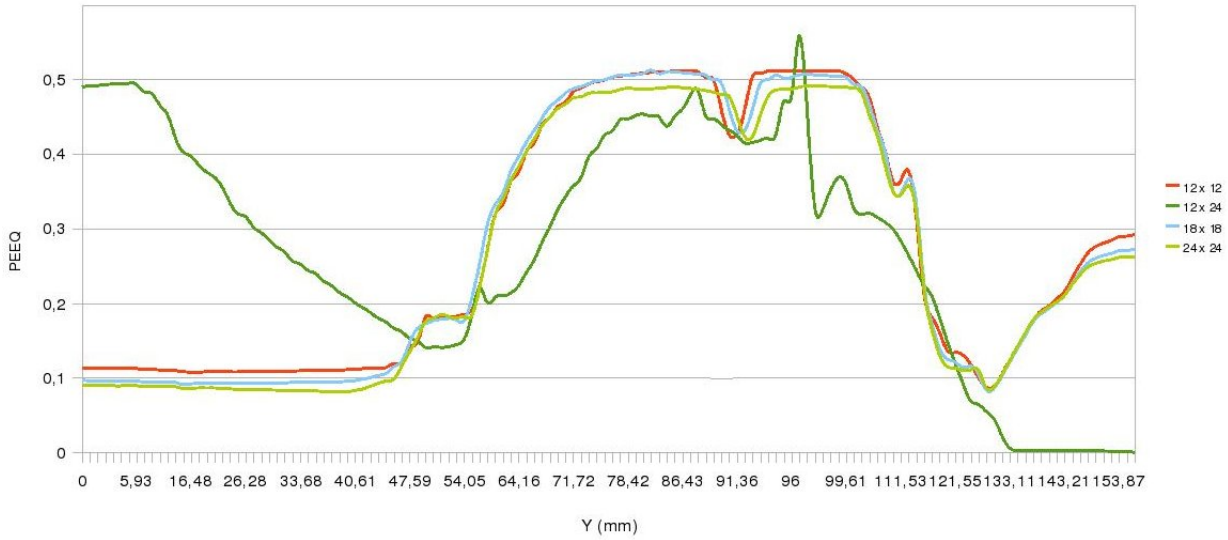


Figura 8.32: Gráfico 12 - Deformação plástica equivalente (PEEQ) - etapa 9. Nós de corte longitudinal - cordão de soldadura inicialmente a 57,4 mm)

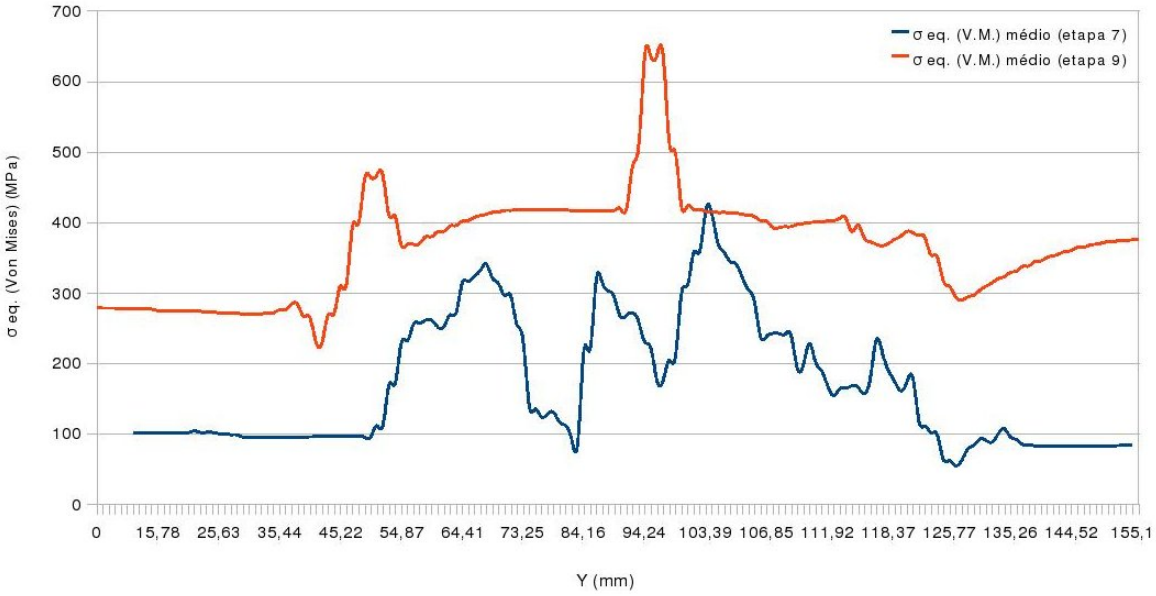


Figura 8.33: Gráfico 13 - Tensões equivalentes (Von Mises) - etapas 7 e 9. Nós de corte longitudinal - peça 2,4 x 2,4 mm - cordão de soldadura inicialmente a 47,7 mm)

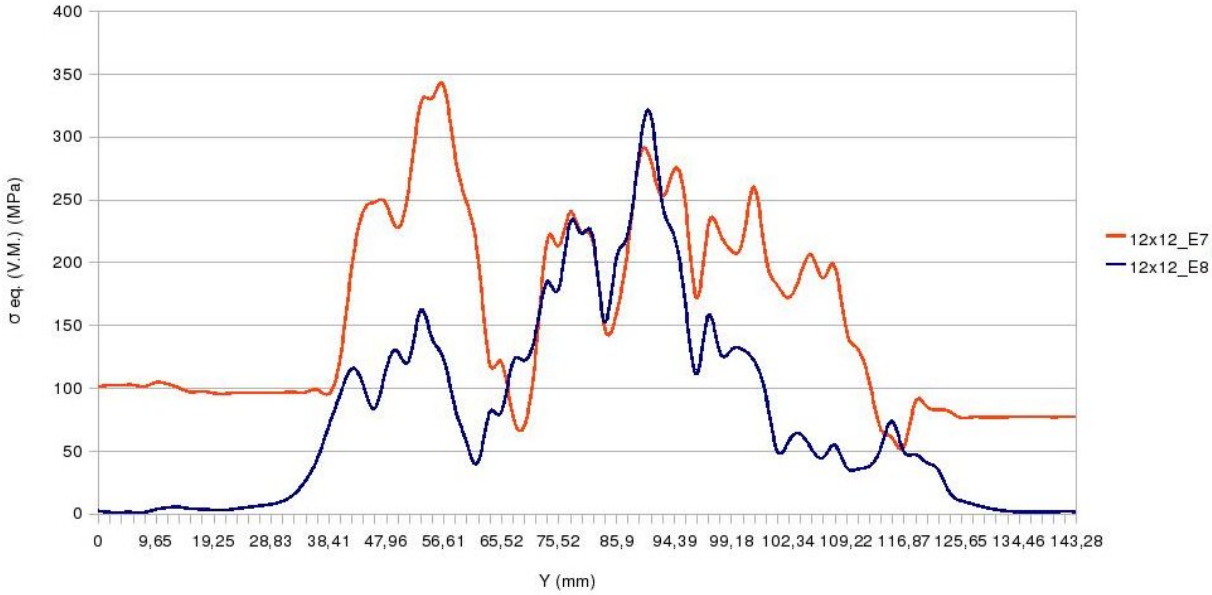


Figura 8.34: Gráfico 14 - Tensões equivalentes (Von Mises) - comparação entre as etapas 7 e 8. Nós de corte longitudinal - peça 1,2 x 1,2 mm - cordão de soldadura inicialmente a 47,7 mm)

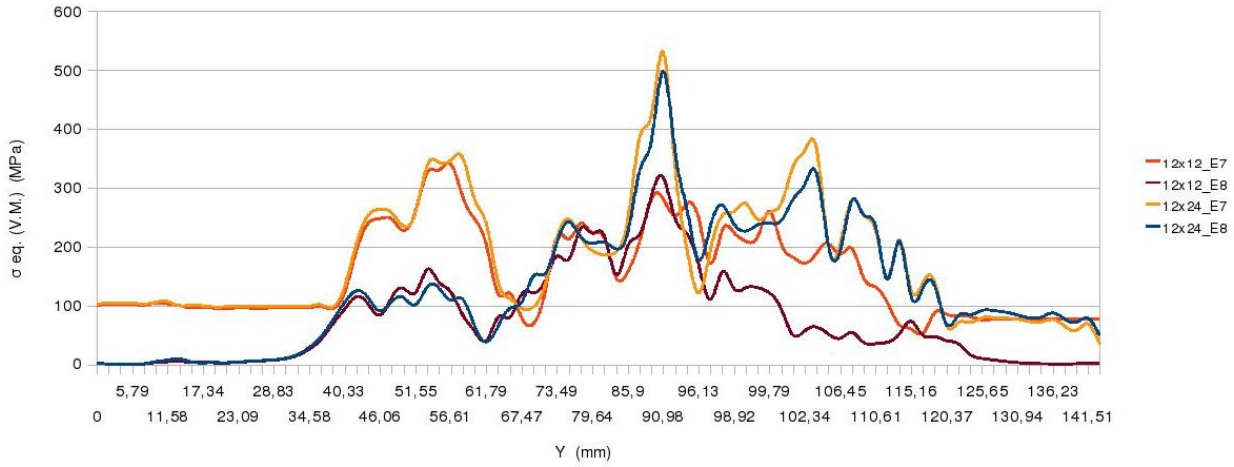


Figura 8.35: Gráfico 14 A - Tensões equivalentes (Von Mises) - comparação entre as etapas 7 e 8. Nós de corte longitudinal - peças de 1,2 x 1,2 mm e 1,2 x 2,4 mm - cordão de soldadura inicialmente a 47,7 mm)

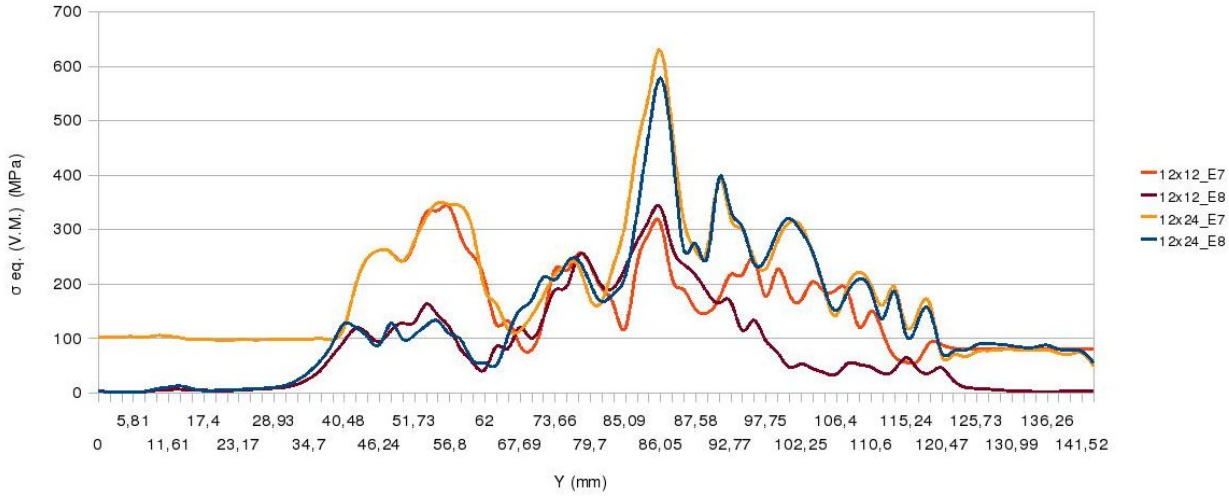


Figura 8.36: Gráfico 14 B - Tensões equivalentes (Von Mises) - comparação entre as etapas 7 e 8. Nós de corte longitudinal - peças de 1,2 x 1,2 mm e 1,2 x 2,4 mm - cordão de soldadura inicialmente a 57,4 mm)

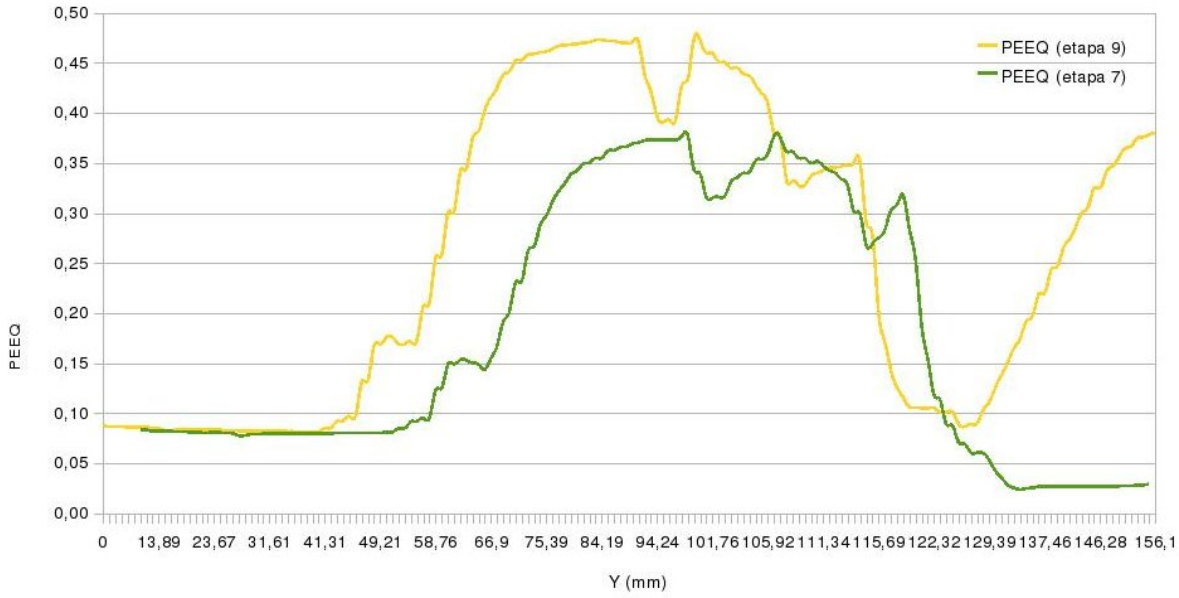


Figura 8.37: Gráfico 15 - Deformações plásticas equivalentes (PEEQ) - comparação entre as etapas 8 e 9. Nós de corte longitudinal - peça 2,4 x 2,4 mm - cordão de soldadura inicialmente a 47,7 mm)

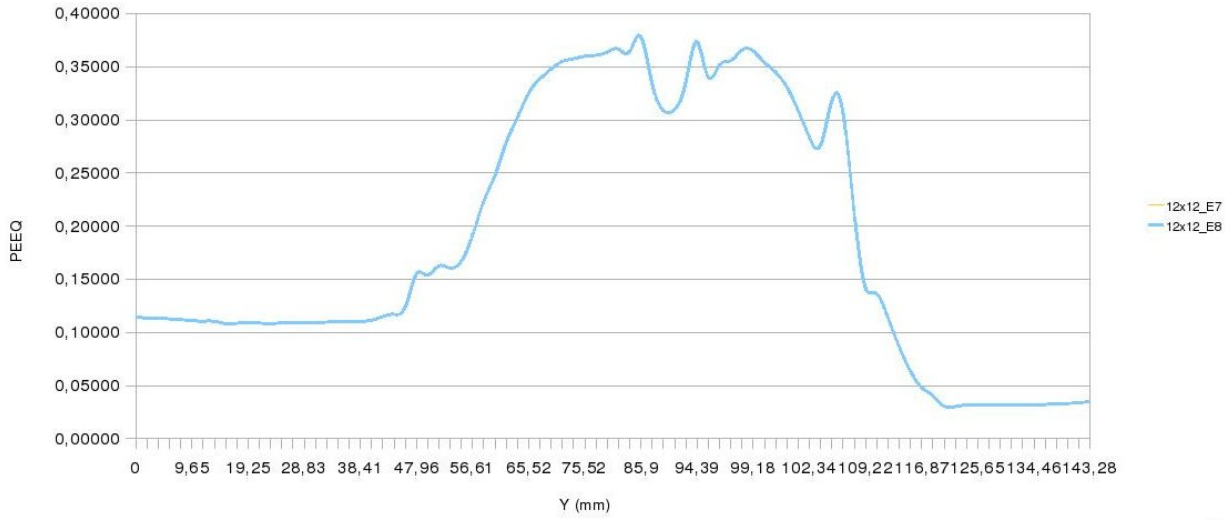
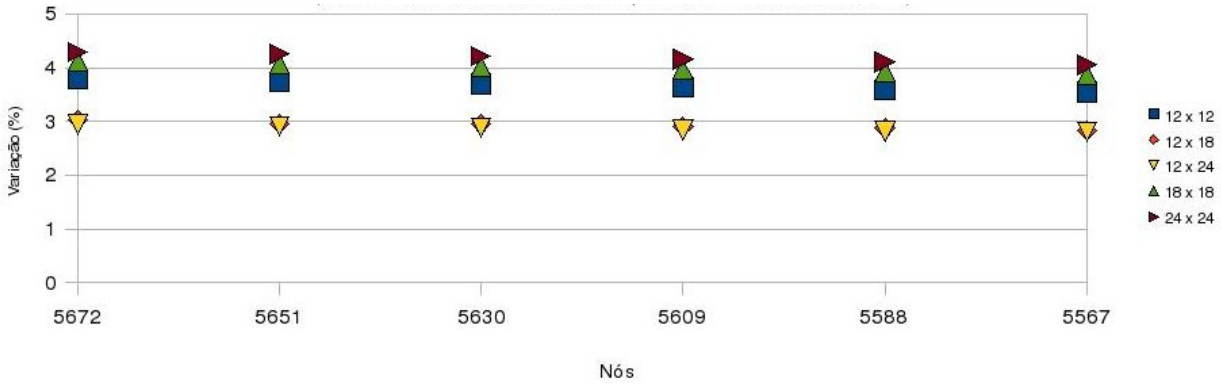
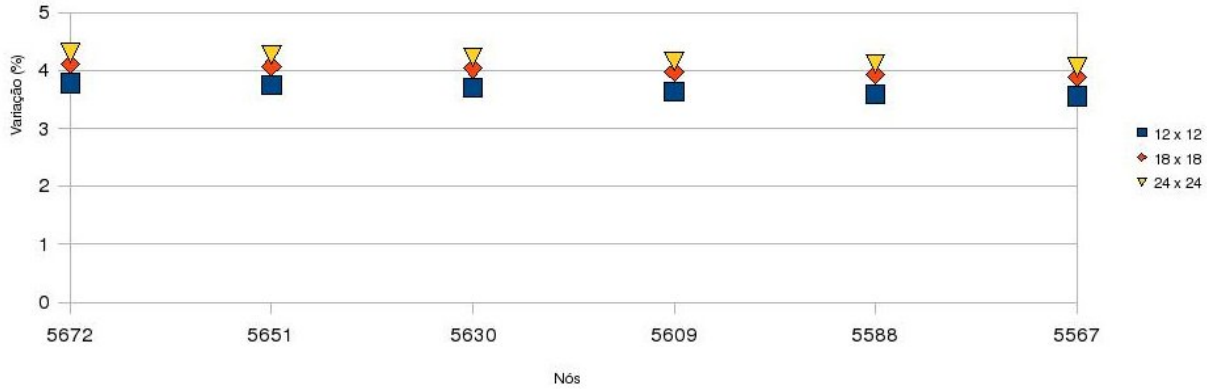


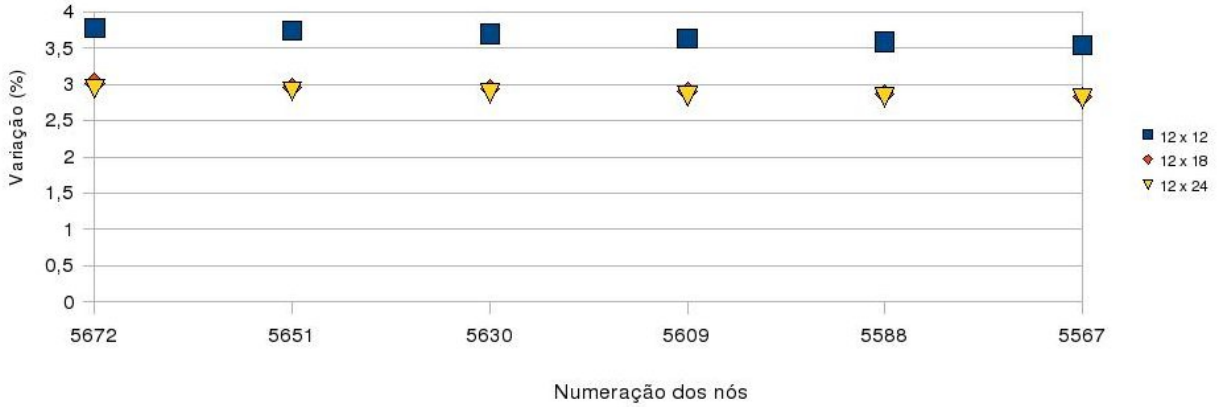
Figura 8.38: Gráfico 16 - Deformações plásticas equivalentes (PEEQ) - comparação entre as etapas 7 e 8. Nós de corte longitudinal - peça 1,2 x 1,2 mm - cordão de soldadura inicialmente a 47,7 mm)



(a) todos os nós



(b) nós de $r = 1$



(c) nós de $r \geq 1$

Figura 8.39: Gráficos 17 - Variação da posição da posição dos nós do cordão de soldadura no final da etapa 7 - cordão inicialmente a 47,7 mm)

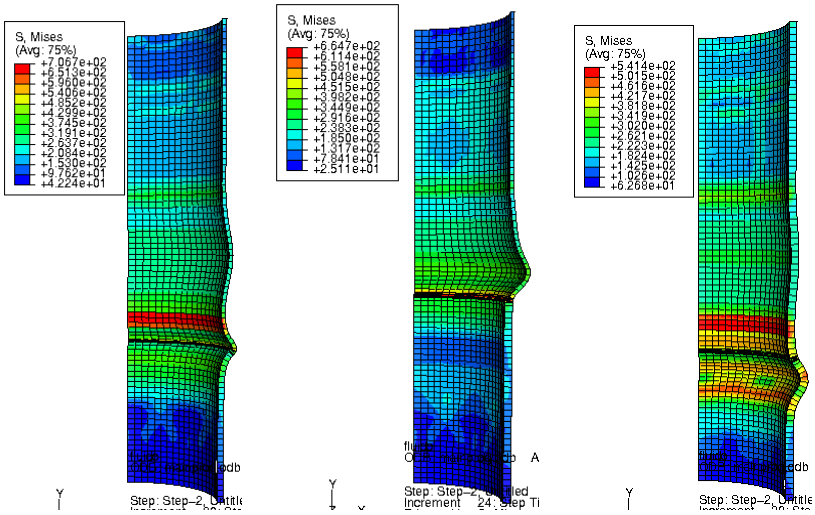
8.3.4 Conclusão

Comentário à análise efectuada

Toda a parte experimental do presente trabalho foi feita com recurso à simulação computacional. Com o programa Abaqus, estudou-se a operação de hidroconformação de *tailor-welded blanks* de razões de espessura $r = 1$, $r = 1,5$ e $r = 2$, com o mesmo comprimento e diâmetro exterior. Cada peça simulada tinha ainda duas variantes de comprimentos relativos dos tubos que as compunham, e portanto, duas posições distintas dos seus cordões de soldadura. Pretendeu-se observar a evolução das tensões equivalentes (Von Mises), das deformações plásticas equivalentes (PEEQ), associadas ao efeito da variação de espessura, e ainda o efeito do cordão de soldadura nas peças hidroconformadas (etapas 7/8) e no ensaio de tracção (etapa 9).
Evitando-se o recurso à fabricação de protótipos reais, a simulação revela-se de grande eficiência, pela possibilidade que dá de se estudarem e compararem as diversas variantes das peças estudadas.

Os resultados obtidos indicam que todas estas hipóteses construtivas dos twt são exequíveis. As variáveis estudadas (tensão, deformação) como funções das espessuras e dos comprimentos relativos dos tubos componentes, da presença do bojo conformado e do cordão de soldadura, e ainda da solicitação de tracção aplicada (deslocamento prescrito na etapa 9) foram caracterizadas em curvas e comparadas entre si.
A presença do bojo (saliência) hidroconformado é o factor determinante que influencia o comportamento das peças, pelo seu efeito de descontinuidade geométrica e associação às maiores variações de espessuras. Como factor de variação destas, a alimentação axial ocorrida no processo tem responsabilidade. A presença do cordão de soldadura, por si só, tem influência pelo facto de induzir concentração de tensões, na descontinuidade geométrica que ele constitui no material (em especial nas peças de $r > 1$), mas não se revela problemática para o comportamento global das peças. A posição relativa do cordão em relação aos topos dos tubos componentes traduz uma variação relativa dos comprimentos destes. Mais determinante no comportamento mecânico das peças (no ensaio de tracção - a etapa 9) parece ser a variação das razões de espessuras: ela influencia as variáveis *tensão* e *deformação plástica* (e, por associação, a variação percentual de espessuras) na zona do bojo de hidroconformação e particularmente fora dela.

O cordão de soldadura parece ter uma utilidade suplementar à de ligação das peças. Ele poderá ser um indutor da realização da operação de hidroconformação. Observando a figura 8.3d (2ª etapa do processo de hidroconformação, na página 90) vemos que o cordão parece influenciar a formação da prega, a qual favorece a propagação da expansão do material. Isto verifica-se não só nas peças de $r > 1$, onde são relevantes as diferenças físicas do material de soldadura e o seu efeito "absorçor" da descontinuidade geométrica resultante da diferença de espessuras dos materiais que ele liga, mas também em peças de $r = 1$ (de que é exemplo a figura 8.40a, na página 119 onde a descontinuidade geométrica não é relevante. A indução da expansão na hidroconformação é um aspecto muito importante do processo.



(a) twt, r=1,5 ; c.s.=47,7 mm (b) twt, r=2 ; c.s.=57,4 mm (c) twt, r=1 (esp.=2,4 mm) ; c.s.=47,7 mm

Figura 8.40: Formação de prega de início da expansão, junto ao cordão de soldadura. Etapa 2 do processo de simulação da hidroconformação dos twt

Sugestões para trabalhos futuros

Para avaliar de um modo mais geral o desempenho estrutural destas peças, alguns temas que poderão ser objecto de trabalhos futuros na área da simulação poderão incluir:

i) numa fase anterior à operação de hidroconformação:

- ensaio de flexão, para analisar o desempenho do twt à operação de dobragem e investigar alguns dos parâmetros de pré-dobragem para o processo de hidroconformação (material, lubrificante e velocidade de dobragem);

ii) durante a operação de hidroconformação:

- estudo dos efeitos do atrito entre as superfícies da matriz e da peça. Também a zona do cordão de soldadura e a zona afectada pelo calor (da soldadura) deverão ser caracterizadas com mais detalhe, tendo em conta a diferença de propriedades mecânicas entre os metais de base e a ligação soldada, para tornar o modelo da simulação o mais realista possível.

iii) na pós-hidroconformação:

Tendo em conta a aplicação potencial dos tubos soldados à medida (twt) como peças estru-

turais de veículos automóveis, torna-se útil fazer um estudo do comportamento destas peças aos esforços mecânicos que actuam constantemente nas carroçarias dos veículos, quando em serviço, e ainda à deformação provocada por pequenos choques, impactos maiores e colisões. Assim, será de grande utilidade fazer-se a simulação de:

- ensaios de tracção: prossecução de ensaio de tracção com deslocamentos mais elevados que os que foram executados neste trabalho, para avaliar o comportamento das peças à rotura: analisar a ocorrência de estricção com fissuração localizada, e as zonas da peça em que as fissuras se localizam, observar o comportamento da zona do cordão de soldadura;

- ensaio de compressão, com a aplicação eventual de pressão interior no tubo ensaiado (para analisar as fases da deformação plástica a que o tubo fica sujeito: fase de deformação uniforme e fase de instabilidade plástica, com deformação localizada. O ensaio poderá ser prosseguido até se obter a fissuração da parede da peça tubular hidroconformada, permitindo deste modo analisar-se a ocorrência de fissuração na peça e o mecanismo de estricção localizada que lhe está associado, bem como as zonas onde ela ocorre; também se poderá analisar o comportamento do cordão de soldadura. Em peças de grande relação comprimento/diâmetro, será interessante analisar o seu comportamento à encurvadura.

- ensaios de torção, que permitam avaliar a rigidez torcional das peças twt hidroconformadas;

- ensaios de fadiga.

Os resultados obtidos com os twt nestes ensaios poderão ser posteriormente comparados com os resultados obtidos com peças de secções transversais diferentes (perfis rectangulares, perfis abertos, por exemplo, em U, etc.) quer obtidas por hidroconformação ou estampagem de twb, quer por hidroconformação de tubos clássicos.

Nota final

Concluído este relatório, ficamos com uma percepção mais alargada da importância que tem na indústria actual esta área específica da conformação mecânica que é a hidroconformação, um tema para nós inédito, no início deste trabalho. Ele contribuiu ainda para aumentar a nossa percepção da importância actual da simulação computacional de modelos físicos. Tendo em conta a rapidez e a quantidade de dados que permite analisar com eficiência e rigor, a economia de tempo de projecto e de custos que proporciona, e ainda a possibilidade de desenvolver modelos cuja utilização na prática é ainda em grande medida potencial - como é o caso dos tubos soldados à medida hidroconformados - a simulação computacional de modelos tornou-se assim uma ferramenta de que o engenheiro não pode prescindir.

Bibliografia

[1] Luís Miguel Lima Teixeira. *Simulação do Processo de Hidroformagem.* FEUP, Novembro de 2005.

[2] Ivan Lairton Thön. *Desenvolvimento de um sistema de hidroconformação em tubos de aço. Trabalho de conclusão de Curso.* UNIJUI, DETEC, Dezembro de 2006.

[3] Aline Szabo Ponce, *Modelagem Experimental e Controle do Processo de Hidroconformação de Tubos. Dissertação de Mestrado*, Escola Politécnica da Universidade de S. Paulo, 2006

[4] Harjinder Singh, *Fundamentals of Hydroforming*, Society of Manufacturing Engineers, Dearborn, Michigan, 2003.

[5] www.schulergroup.com/pool/10_Anlagen_Verfahren/09_Hydroforming/01_Verfahren/01_Innenhochdruckumformung_Rohre/

[6] B. Kinsey, V. Viswanathan, J. Cao, *Forming of aluminum tailor-welded blanks*, Journal of Materials and Manufacturing, Vol.110, Section 5, pp. 673-679, 2001 artigo disponível em www.mech.northwestern.edu/ampl/papers/bk_vv_jc_jmm2001.pdf

[7] Gang Liu, Shijian Yuan, Guannan Chu, *FEA on deformation behavior of tailor welded tube in hydroforming*, Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Journal of Materials Processing Technology

[8] Gary Morphy *The Evolution of Tube Hydroforming – 10 de Outubro de 2006* www.thefabricator.com/Hydroforming

[9] Gary Morphy, *Introduction to tube Hydroforming*, Exclusive to thefabricator.com - 13 de Junho de 2006 www.thefabricator.com/Hydroforming_Article.cfm?ID=1369

[10] Gary Morphy, *The Evolution of Tube Hydroforming – 10 de Outubro de 2006*, www.thefabricator.com/Hydroforming/Hydroforming_Article.cfm?ID=1462

[11] Gary Morphy, *Tube Hydroforming Design Flexibility - Part I*, The Tube and Pipe Journal - 16 de Maio de 2002, www.thefabricator.com/Hydroforming/Hydroforming_Article.cfm?ID=1462

[12] Warren C. Young, *Roark's Formulas for Stress & Strain – 10 de Outubro de 2006*, McGraw-Hill International Editions - 1989

[13] Ferdinand P. Beer, E. Russel Johnston, *Resistência dos Materiais*, McGraw-Hill do Brasil, 1982

[14] Renato Natal Jorge et al., *Numerical Simulation of Hydroforming Process Involving a Tubular Blank with Dissimilar Thickness*, Materials and Manufacturing Processes, 22: 286–291, 20073

[15] Joakim Lundqvist, *Tese*, Suécia, 2005

[16] Jiri Tlusty *Manufacturing Process and Equipment* Prentice Hall, 2000

[17] Mike Gedeon, *Elastic Springback*, Technical Tidbits - Engineered Materials - Brush Wellman, Inc., Maio de 2000, www.brushwellman.com/alloy/tech-lit/may00.pdf

Por Mike Gedeon

[18] Gary Morphy *The Evolution of Tube Hydroforming – 16 de Maio de 2002* www.thefabricator.com/Hydroforming

[19] George Weimer *Hydroforming Comes of Age – Fevereiro de 1999* Automotive Embraces Technology - Metal Forming Magazine archive.metalformingmagazine.com/1999/02/hydrof/hydro.com

[20] Richard A. Marando, *Understanding Tubular Hydroforming Process Variables-Part 1*, Dana Corporation, Parish Light Vehicle Structures Division, Reading, PA, Metal Forming Magazine - 7/1998 archive.metalformingmagazine.com/1998/07/hydrofrm/hydro.htm

[21] Blair Longhouse, Tube Hydroforming: Advantages Using Sequenced Forming Pressures, *Tube/Pipe Fabrication Conference*, Rockford, IL: Tube and Pipe Association, International and Columbus, OH: The Ohio state University, Setembro de 1997

[22] Klaus Siegert, Markus Haeussermann e Bruno Losch, *Hydroforming of tubes, extrusions and sheet*, TPJ - The Tube & Pipe Journal, 15 de Maio de 2001 www.thefabricator.com/Hydroforming/HydroformingArticle.cfm

[23] Klaus Siegert e Matthias Aust, *A survey of presses for hydroforming tubes, extrusions - Presses, accessories offer options for hydroformers"*, TPJ - The Tube & Pipe Journal, 9 de Outubro de 2003, www.thefabricator.com/Hydroforming/Hydroforming-Article.cfm

[24] Art Hedrick, *Controlling flow and obtaining stretch in deep draw operations*, TPJ - Stamping Journal, 19 de Fevereiro de 2001 www.thefabricator.com/ToolandDie/ToolandDieArticle.cfm

[25] Mustafa Ahmetoglu, *The basic elements of tubular hydroforming*, Thefabricator.com, 5 de Março de 2001, www.thefabricator.com/ToolandDie/ToolandDie_Article.cfm?ID=28

[26] Fritz Dohmann, Universidade de Paderborn, Alemanha, *Tube hydroforming research and Practical Applications*, Tube/Pipe Fabricating Conference, Rockford, IL: Tube and Pipe Associationn and Columbus, OH: The Ohio state University

[27] Davies, R.W.; Grant, G.J.; Oliver, H. Eddie; Khaleel, M.A.; Smith, M.T., *Forming-Limit Diagrams of Aluminum Tailor-Welded Blank Weld Material*, Metallurgical and Materials Transactions A, Volume 32, Number 2, 1 February 2001 , pp. 275-283(9), Publisher: Springer

[28] Auto-Steel Partnership, *Tailor Welded Blank Applications and Manufacturing - A State-of-the-Art Survey*, The Auto/Steel Partnership -Tailor Welded Blank Project Team - June 2001

[29] S. M. Chan, L. C. Chan and T. C. Lee, *Tailor-welded blanks of different thickness ratios effects on forming limit diagrams*, Journal of Materials Processing Technology, Volume 132, Issues 1-3, 10 January 2003, Pages 95-101

Industrial and Systems Engineering Department, The Hong Kong Polytechnic University, Hung Hom, Kowloon, Hong Kong

Available online 16 November 2002.

[30] Jorge Rodrigues, Paulo Martins, *Tecnologia mecânica - Tecnologia da Deformação Plástica - Vol. I Fundamentos teóricos*, Escolar Editora, 2005

[31] Renato Caldin, *Estudo da Conformabilidade na Hidroconformação de Recortes de Chapas de Aço Soldados a Laser*, Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas - Brasil, 2006
Tese disponível para descarga no endereço de internet
libdigi.unicamp.br/document/?code=vtls000388555

[32] Amit Mukund Joshi, *Strain Studies in Sheet Metal Stampings*,
disponível para descarga no endereço de internet
www.metalwebnews.com/howto/sheet-metal/sheetmetal-study.pdf

[33] Dan Davis, Editor in Chief, *Forming a new approach. Hydroforming is no longer a brand new technology, but it may be the solution for new applications*, The FABRICATOR, 6 de Novembro de 2007, thefabricator.com, disponível em
www.thefabricator.com/Hydroforming/Hydroforming_Article.cfm?ID=1789

[34] Abaqus version 6.7 Documentation, *Getting Started with Abaqus: Interactive Edition*, disponível em
abaqusdocs.ecn.purdue.edu:2080/v6.7/books/gsa/default.htm?startat=ch08s01.html

[35] Cliflex Bellows Corp., disponível em
www.cliflex.com/manufacture.html

[36] ITW Drawform, disponível em www.drawform.com/glossary.html

[37] European Patent EP1435268, *Tailor welded blank for fluid forming operation and method of producing and fluid forming such a blank*, General Motors Corporation disponível em, www.freepatentsonline.com/EP1435268.html

[38] Keeler, S.P. e Brazier, W.G., newblock*"Relationship between Material Characterization andProcess-Shop formability". In "Proceedings of Microalloy 75, 517-530. Union Carbide (1975)*

[39] Levy, B.S. *Using Forming Limit Curves for Hydroforming Steel Tube*, Hydroforming Journal (A Supplement to The Tube and Pipe Journal, 18 de Março de 2000

[40] Steel University.org *Steel University.org* Site desenvolvido em parceria entre o International Iron and Steel Institute and MATTER, 2002-2007 MATTER, The University of Liverpool, disponível em www.steeluniversity.org/content/html/eng/default.asp?catid=18&pageid=2081271360

[41] J. Slota, E.Spisák, Faculty of Mechanical Engineering Technical University of Kosice, Kosice, Slovakia

Comparison of the Forming - Limit Diagram (FLD) Models for Drawing Quality (DQ) Steel Sheets, METALURGIJA 44 (2005) ISSN 0543-5846