



UNIVERSIDADE D
COIMBRA

Carlos Eduardo Nunes da Costa

**ANÁLISE ROBUSTA DA HIDROFORMAÇÃO DE
TUBOS NUMA MATRIZ COM SECÇÃO
TRANSVERSAL QUADRADA**

**Dissertação no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica na
especialidade de Produção e Projeto orientada pelo Professor Doutor José
Valdemar Fernandes e pelo Professor Doutor Ali Khalfallah e apresentada ao
Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Ciências e Tecnologia da
Universidade de Coimbra**

Julho de 2021

1 2



9 0

FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE
COIMBRA

Análise robusta da Hidroformação de tubos numa matriz com secção transversal quadrada

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia
Mecânica na Especialidade de Produção e Projeto

Robust analysis of tube hydroforming in a square cross- section die

Autor

Carlos Eduardo Nunes da Costa

Orientadores

José Valdemar Fernandes

Ali Khalfallah

Júri

Presidente	Professora Doutora Nataliya Sakharova Investigadora Doutorada da Universidade de Coimbra
Orientador	Professor Doutor Ali Khalfallah Investigador Doutorado da Universidade de Coimbra Professor Doutor Pedro André Dias Prates Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro
Vogais	Professor Doutor André Filipe Gomes Pereira Investigador Doutorado da Universidade de Coimbra

Coimbra, julho, 2021

“Every single thing you do matters. You have been created as one of a kind. You have been created in order to make a difference. You have within you the power to change the world.”

Andy Andrews, no livro *Butterfly Effect: How Your Life Matters*, 2010

Ao avô Carlos, o mais importante na variabilidade da vida

Agradecimentos

O trabalho realizado, só foi possível graças ao apoio e contributo de diversas pessoas, às quais quero mostrar o meu agradecimento.

Ao professor Doutor José Valdemar Fernandes e ao professor Doutor Ali Khalfallah, pelos seus conhecimentos, orientação e pela disponibilidade e paciência, em me explicarem um mesmo assunto diversas vezes.

Aos meus pais pelo carinho, dedicação e confiança nas minhas decisões.

À Tia Carla pelo carinho, paciência e por me ensinar a viver no presente.

À avó Ilda pela companhia e apoio desde que nasci.

À Dra. Sílvia, por me ensinar que o impossível é 100% possível, a partir do momento em que começamos a acreditar em nós.

Ao Tio João por me dizer “arranja-me outro problema” quando estive com incertezas se seria capaz de realizar esta tese. Esta frase foi a chave para reduzir a variabilidade dos meus pensamentos.

E finalmente ao poker, por me ajudar a estar mais confiante nas minhas decisões e com mais determinação para os desafios, que surgem nesta vida incerta e imprevisível.

Esta dissertação foi realizada no âmbito dos projetos RDFORMING (PTCD/EME-EME/31243/2017) e EZ-SHEET (PTCD/EME-EME/31216/2017), cofinanciados pelo Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER), através do programa Portugal-2020 (PT2020), no âmbito do Programa Operacional Competividade e Internacionalização (POCI-01-0145-FEDER-031243, POCI-01-0145-FEDER-031216) e pela Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) através de fundos nacionais (PIDDAC).



UNIÃO EUROPEIA

Fundo Europeu
de Desenvolvimento Regional

FCT

Fundação para a Ciência e a Tecnologia
MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E ENSINO SUPERIOR

Resumo

Esta dissertação, que consiste numa análise estatística da hidroformação de tubos numa matriz de secção quadrada, tem como objetivo avaliar a influência da variabilidade dos parâmetros do material e do processo de hidroformação na redução de espessura e na altura de pólo. Para tal, o processo foi simulado numericamente recorrendo à lei de encruamento de Swift e ao critério de plasticidade anisotrópico de Hill´48, para descrever o comportamento plástico dos materiais. Foi realizado um estudo estatístico que teve em consideração a incerteza dos valores dos parâmetros de entrada, que são os parâmetros da lei de encruamento de Swift (Y_0, K, n), os coeficientes de anisotropia no plano da chapa (r_0, r_{45}, r_{90}) e os parâmetros relacionados com o processo (pressão máxima, P , e coeficiente de atrito, COF), além da espessura inicial da chapa (Esp_i), nas respostas do processo, no que diz respeito à redução máxima de espessura (RedEsp) e altura máxima de pólo (AltPolo). Os resultados mostram que o parâmetro de entrada mais influente na redução de espessura é a espessura inicial e o parâmetro mais influente na altura de pólo é o parâmetro K da Lei de Swift. Os softwares usados foram o DD3IMP, para a simulação numérica, o Excel para realizar o tratamento estatístico dos resultados, o Minitab para realizar a análise de sensibilidade, e o pós-processador GID para a visualização do tubo após conformação. Os resultados da simulação permitiram obter os valores dos parâmetros de resposta do processo, para as 97 experiências realizadas, que foram escolhidas de acordo com o desenho de experiências (*Design of experiments: DOE*), inicialmente definido. A análise de sensibilidade subsequente, consistiu na construção das superfícies de resposta para os dois parâmetros de saída do processo analisados e na identificação dos parâmetros de entrada que mais os influenciam. Para se avaliar a influência da distribuição de probabilidade dos parâmetros de entrada nos de saída, usou-se o Método Monte Carlo, que se baseia na geração de valores aleatórios para cada parâmetro de entrada.

Palavras-chave: Hidroformação, Tubos Metálicos, Variabilidade, Simulação Numérica, Análise de Sensibilidade, Método Monte Carlo.

Abstract

This dissertation, which consists of a statistical analysis of the hydroforming of tubes in a square cross-section die, aims to evaluate the influence of the variability of the parameters of the material and the hydroforming process on the reduction of the thickness and height of the pole. For this purpose, the process was numerically simulated using the Swift work hardening law and the Hill'48 criterion for anisotropic plasticity, to describe the plastic behaviour of the materials. A statistical study was carried out that took into account the uncertainty of the values of the input parameters, which are the parameters of Swift's hardening law (Y_0, K, n), the anisotropy coefficients in the sheet plane (r_0, r_{45}, r_{90}) and the parameters related to the process (maximum pressure, P , and coefficient of friction, COF), in addition to the initial thickness of the sheet (Esp_i), in the process responses, with respect to the maximum thickness reduction (RedEsp) and maximum pole height (AltPolo). The results show that the most influential *input* parameter on thickness reduction is the initial thickness and the most influential parameter on the pole height is the K parameter of the Swift Law. The software used was DD3IMP, for numerical simulation, Excel to perform the statistical treatment of the results, Minitab to perform the sensitivity analysis, and the GID post-processor to visualize the tube after forming. Other software, such as Paint.net were used for the correct presentation of figures and images in this thesis. The simulation results allowed obtaining the values of the process response parameters for the 97 experiments carried out, which were chosen according to the design of experiments (*Design of Experiments: DOE*), initially defined. The subsequent sensitivity analysis consisted of constructing the response surfaces for the two analyzed process *output* parameters and identifying the *input* parameters that most influence them. To evaluate the influence of the probability distribution of *input* parameters on output parameters, the Monte Carlo Method was used, which is based on the generation of random values for each *input* parameter.

Keywords Hydroforming, Metallic Tubes, Variability, Numerical Simulation, Sensitivity Analysis, Monte Carlo Method.

Índice

Índice de Figuras	ix
Índice de Tabelas	xi
Simbologia e Siglas	xiii
Simbologia.....	xiii
Siglas	xiii
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. ESTADO DA ARTE	5
2.1. Hidroformação de tubos.....	6
2.2. Tipos de Hidroformação de tubos.....	9
2.3. Aplicações da hidroformação de tubos	11
2.4. Vantagens da hidroformação	12
2.5. Problemas do processo de hidroformação	13
3. PLASTICIDADE DOS MATERIAIS.....	17
3.1. Leis Constitutivas	17
3.2. Modelo numérico	21
4. ENSAIOS NUMÉRICOS.....	23
4.1. Parâmetros de entrada e de saída	24
4.2. Valores dos parâmetros de <i>input</i> e <i>output</i> do processo de Hidroformação.....	26
4.3. Pontos críticos de Redução de Espessura	27
4.4. Pressão em função da Altura de Pólo	30
5. SUPERFÍCIE DE RESPOSTA	33
5.1. Redução de Espessura.....	34
5.2. Altura de Pólo	36
5.3. Modelo Simplificado para RedEsp e AltPolo.....	38
5.4. Conclusões da Análise de Sensibilidade.....	40
5.5. Comparação entre DD3IMP e RSM	41
6. MÉTODO MONTE CARLO	43
6.1. Distribuição Normal	44
6.2. Valores aleatórios da RedEsp	46
6.3. Valores aleatórios da AltPolo	48
6.4. Resumo de resultados	50
7. CONCLUSÕES E PERSPETIVAS	51
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	53
ANEXO – ENSAIOS REALIZADOS	57

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Diversas etapas do processo de hidroformação de um tubo.	6
Figura 2.2. Tubo hidroformado em s-rail. Figura 2.3. Tubo hidroformado em Y.	7
Figura 2.4. Equipamento de hidroformação	9
Figura 2.5. Etapas da hidroformação com pressão sequencial.	10
Figura 2.6. Prensa hidráulica de hidroformação.....	10
Figura 2.7. Berço do motor. Figura 2.8. Chassis de automóvel.....	11
Figura 2.9. Tubo de escape. Figura 2.10. Pilar de automóvel.....	11
Figura 2.11. Encaixe de tubulação em T. Figura 2.12. Torneira de cozinha.	11
Figura 2.13. Cadeira de rodas. Figura 2.14. Quadro de bicicleta.....	11
Figura 3.1. Malha de elementos finitos do processo de hidroformação	21
Figura 4.1. Parâmetros de entrada, do material e do processo.	24
Figura 4.2. Localização dos pontos críticos de redução de espessura.....	27
Figura 4.3. Redução de espessura em função da posição dos nós para 3 experiências.....	28
Figura 4.4. Deformação plástica equivalente. Figura 4.5. Tensão equivalente	29
Figura 4.6. Corte de uma secção do tubo que inclui a definição de altura de pólo	30
Figura 4.7. Pressão em função da altura de pólo para 3 ensaios diferentes.	31
Figura 5.1. Figura mostrando a influência dos parâmetros <i>input</i> na RedEsp.....	35
Figura 5.2. Figura mostrando a influência dos parâmetros <i>input</i> na AltPolo.....	37
Figura 5.3. Influência dos parâmetros <i>input</i> no modelo simplificado da RedEsp.....	38
Figura 5.4. Influência dos parâmetros <i>input</i> no modelo simplificado da AltPolo.....	39
Figura 5.5. RedEsp do meta-modelo em função da RedEsp dos elementos finitos.	41
Figura 5.6. AltPolo do meta-modelo em função da AltPolo dos elementos finitos	41
Figura 6.1. Distribuição Normal de Probabilidade.....	45
Figura 6.2. Frequência de ocorrência em função dos intervalos de redução máxima de espessura, para 100 valores.	46
Figura 6.3. Frequência de ocorrência em função dos intervalos de redução máxima de espessura, para 500 valores.	46
Figura 6.4. Frequência de ocorrência em função dos intervalos de redução máxima de espessura, para 1 000 valores.	47
Figura 6.5. Frequência de ocorrência em função dos intervalos de redução máxima de espessura, para 10 000 valores.	47
Figura 6.6. Frequência de ocorrência em função dos intervalos de altura máxima de pólo, para 100 valores.....	48

Figura 6.7. Frequência de ocorrência em função dos intervalos de altura máxima de pólo para 500 valores.	48
Figura 6.8. Frequência de ocorrência em função dos intervalos de altura máxima de pólo para 1 000 valores.	49
Figura 6.9. Frequência de ocorrência em função dos intervalos de altura máxima de pólo para 10 000 valores.	49

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 4.1. Valores mínimo, médio e máximo dos parâmetros de entrada do material e do processo.	25
Tabela 4.2. Exemplos dos parâmetros de entrada e respectivas respostas para algumas das 97 experiências realizadas.	26
Tabela 5.1. Parâmetros de <i>input</i> influentes na redução máxima de espessura	35
Tabela 5.2. Parâmetros de <i>input</i> mais influentes na altura máxima de pólo.	37
Tabela 6.1. Valores de μ e σ relativos à redução máxima de espessura para 100, 500, 1000, 10000 valores gerados.	50
Tabela 6.2. Valores de μ e σ relativos à altura máxima de pólo para 100, 500, 1000 e 10000 valores gerados.	50
Tabela A.1. Parâmetros de entrada e respectivas respostas para a totalidade das 97 experiências realizadas.....	57

SIMBOLOGIA E SIGLAS

Simbologia

E – Módulo de Elasticidade/Young

ν – Coeficiente de Poisson

Y_0 - Tensão limite de elasticidade

K – Parâmetro da Lei de Swift

n – Coeficiente de Encruamento (lei de Swift)

r_0, r_{45}, r_{90} – Coeficientes de anisotropia a 0° , 45° e 90° com a direção de laminagem

F, G, H, L, M, N – Parâmetros do Critério de Hill'48

P – Pressão máxima de hidroformação

COF – Coeficiente de Atrito

Esp_i – Espessura Inicial

Siglas

RedEsp – Redução máxima de espessura

AltPolo – Altura máxima de pólo

DD3IMP – Deep-Drawing 3D IMPLICIT code

MEF - Método dos Elementos Finitos

DOE – Design of Experiments

RNG – Random Number Generation

RSM – Response Surface Methodology

HF – Hidroformação

HFT – Hidroformação de tubos

HTBP – Hidroformação de tubos a baixa pressão

HTAP – Hidroformação de tubos a alta pressão

HSP – Hidroformação de sequência de pressão

MC – Monte Carlo

1. INTRODUÇÃO

A hidroformação (HF) é uma tecnologia com utilização crescente desde os anos 90 e tem grande aplicabilidade nas indústrias automóvel e aeroespacial. Define-se como um processo de conformação, em que o material é expandido devido à pressão aplicada a um fluido, até se atingir a forma desejada por imposição da geometria da matriz. A hidroformação é um processo versátil, uma vez que permite a conformação de diversos materiais, como por exemplo o alumínio e o aço, em diversos formatos de peça (chapa, e tubo) e, no caso de tubos, com diferentes tipos de secção (quadrada, circular, etc.). Além disso, é uma excelente alternativa a outras técnicas de conformação, visto que possibilita a fabricação de componentes complexos numa só etapa, com elevada resistência, baixo peso e bom acabamento superficial. No entanto, existem algumas dificuldades para a hidroformação se integrar no mercado de produção de componentes como, por exemplo, o conhecimento incompleto do comportamento do material durante a conformação, dada a dificuldade da caracterização mecânica no caso de tubos, e a complexidade de planeamento do projeto e de design do processo de hidroformação.

A variabilidade é uma característica inerente aos processos e produtos, visto existir sempre uma dispersão de valores de uma propriedade ou característica do material, em torno de um valor nominal. No processo de hidroformação estamos condicionados à variabilidade dos parâmetros do material (lei de Swift e coeficientes de anisotropia a 0, 45 e 90° com a direção de laminagem) e do processo (pressão, coeficiente de atrito e espessura inicial). Por esta razão, é importante atender aos parâmetros e condições iniciais de um processo de fabrico que afetam o produto final. Neste contexto, para estudar a variabilidade a que um material tubular se encontra realmente sujeito, fizeram-se variar todos os parâmetros de entrada, acima referidos, numa gama de valores mínimo, médio e máximo, e considerou-se para cada propriedade uma tolerância de 10% ou 5%. O estudo estatístico realizado após a simulação numérica permitiu estudar a variabilidade, na deformação e na geometria, do tubo após hidroformação.

O software de simulação numérica DD3IMP foi utilizado para a realização das experiências necessárias de hidroformação de um tubo, numa matriz de secção quadrada. A utilização de um método adequado para gerar os ensaios (*DOE – Design of experiments*) depende do número de fatores que podem ser utilizados para definir o processo. A definição das experiências a realizar no processo de hidroformação desta tese, foi realizada, usando o método *Box Behnken*.

Também o método da superfície de resposta (RSM) foi utilizado nesta tese, com base no software Minitab. Este método é uma ferramenta estatística, que permite modelar matematicamente os resultados de um processo de conformação em função das variáveis de entrada. O modelo RSM tem diversas aplicações no campo da engenharia e é especialmente usado com a combinação de modelos de elementos finitos ([Lekou, 2013](#)). A partir de um conjunto estatístico de dados de entrada e de saída, relativos às experiências realizadas, é possível a construção de uma equação de regressão que, por exemplo, que permita prever os resultados de qualquer processo de hidroformação. Além disso, mediante uma análise de sensibilidade, é possível otimizar a resposta e simplificar o modelo, tendo em conta o peso/efeito que cada parâmetro *input* tem nas propriedades finais. Ou seja, esta metodologia permite identificar os parâmetros e interações que mais afetam a resposta do processo. Desta forma, é possível um maior conhecimento de quais são os parâmetros críticos do processo, permitindo controlar situações críticas, como evitar a fratura ou definir a dimensão máxima de secção final.

O método Monte Carlo, consiste em gerar um grande número de simulações com variações aleatórias nos parâmetros de entrada, a fim de avaliar o efeito dessas variações na solução final do modelo RSM. É geralmente utilizado em física e em matemática, mas também pode ser aplicado em áreas como a Engenharia, a Medicina e a Computação gráfica. É um método que permite obter aproximações numéricas de funções complexas, que são praticamente impossíveis de se resolver analiticamente ([Wikipédia, Monte Carlo](#)).

A combinação do método superfície de resposta com o método Monte Carlo, permite otimizar a análise do processo de hidroformação de tubos. Deste modo, foi possível prever a percentagem de casos em que aparecem pontos críticos de redução máxima de espessura (RedEsp) e também conhecer as gamas mais prováveis de valores de altura máxima de pólo (AltPolo) do tubo.

O presente trabalho está organizado nas seguintes secções:

- Neste capítulo 1 é efetuado o enquadramento do tema desta dissertação, referindo-se o processo de hidroformação e aspetos como a variabilidade, o método superfície de resposta e o método Monte Carlo.
- No capítulo 2 apresenta-se o estado da arte, as vantagens e problemas da hidroformação, os tipos de hidroformação de tubos e suas aplicações.
- No capítulo 3 apresenta-se o modelo constitutivo e o modelo numérico usados nesta dissertação.
- No capítulo 4 referem-se os parâmetros de entrada e de saída considerados, mostram-se alguns ensaios realizados e apresentam-se as análises relativas aos pontos críticos de redução de espessura e à evolução da pressão em função da altura de pólo.
- No capítulo 5 determinam-se as superfícies de resposta e efetuam-se o tratamento estatístico e a análise de sensibilidade.
- No capítulo 6 recorre-se ao Método Monte Carlo para completar o estudo estatístico.
- No capítulo 7 mostram-se as conclusões finais deste trabalho e perspetivas que abre.

2. ESTADO DA ARTE

Novas tecnologias têm sido procuradas, de forma a melhorar as características das peças, a desenvolver novos produtos de peso reduzido, a otimizar os processos e a reduzir custos de produção. A hidroformação surge no mercado para dar resposta a este problema e tem a capacidade de competir com outras tecnologias convencionais, devido às suas diversas vantagens e aplicações. Atualmente, a hidroformação permite a fabricação em massa de uma grande diversidade de peças a nível mundial. As elevadas pressões internas aplicadas a um fluido e a versatilidade do processo permitem que seja possível e viável a produção de componentes complexos, com um pequeno número de operações, a baixo custo, que fabricados por outras tecnologias seriam muito difíceis ou impossíveis de realizar com os mesmos requisitos ([Bell et al., 2019](#)). Contudo, comparativamente à estampagem convencional, a hidroformação é ainda relativamente recente, e por isso não existe uma grande base de conhecimento para o design das ferramentas e do processo. Portanto, a viabilidade de hidroformação versus estampagem convencional + soldadura deve ser investigada mecanicamente e economicamente para cada peça separadamente ([Ahmetoglu et al., 2000](#)). A hidroformação de tubos é uma vertente muito interessante da hidroformação e o seu desenvolvimento foi sobretudo impulsionado pela indústria automóvel, com o objetivo de melhorar os processos de fabricação de diversos componentes. A hidroformação de tubos, permite alterar a forma de um tubo circular para qualquer tipo de secção transversal sem necessidade de operações secundárias, como a soldadura. Ou seja, a partir de tubos de secção circular, é possível mudar a sua forma para obter uma peça em quase qualquer formato pretendido.

2.1. Hidroformação de tubos

A hidroformação de tubos (HFT) é a vertente mais interessante e motivadora da hidroformação, definindo-se como um processo que permite a produção de várias formas de secção transversal, a partir de tubos de secção inicial circular. Para realizar o processo de hidroformação de tubos são necessários diversos passos, sendo que alguns deles, são exemplificados na Figura 2.1 ([Bortolussi & Button, 2001](#)). O tubo pode ser previamente deformado, para auxiliar nas operações subsequentes, ou seja, podem fazer-se pré-conformações ou pré-dobragens, antes de se iniciar o processo de hidroformação propriamente dito, para se obter mais facilmente a forma pretendida. Em seguida, coloca-se o tubo dentro da matriz que se fecha nos topos. Posteriormente, insere-se um fluido dentro do tubo e, devido à pressão exercida pelo fluido, ocorre expansão do material até preencher a cavidade da matriz. Ou seja, a expansão radial faz com que o material se vá deformando até o tubo a atingir a forma desejada ao entrar em contacto com a matriz, eventualmente com o auxílio de alimentação axial e/ou contra pressão.

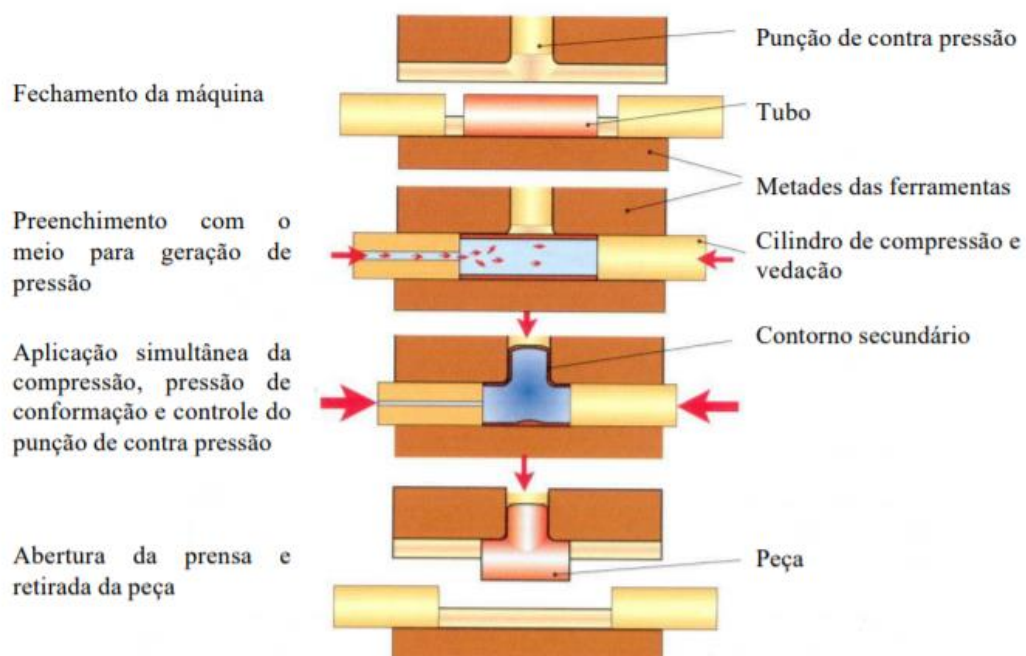


Figura 2.1. Diversas etapas do processo de hidroformação de um tubo ([Bortolussi & Button, 2001](#)).

O processo de hidroformação de tubos, geralmente, é realizado a frio, ou seja, à temperatura ambiente. As pressões podem ir de algumas dezenas de Megapascal até valores acima de 600 MPa em determinadas aplicações. Os principais materiais usados na hidroformação de tubos são os aços ao carbono, os aços inoxidáveis e o alumínio, visto que são materiais que apresentam excelentes propriedades mecânicas. As matrizes podem ter diversas formas de secção transversal, de modo a obterem-se os formatos pretendidos. Devido às pressões a que estão sujeitas, as matrizes devem ser fabricadas em aço com determinadas características de dureza e revestidas ([Ahmetoglu et al., 2000](#)). Os punções axiais introduzem esforço axial de compressão, possibilitando o movimento das extremidades do tubo. O punção de contra pressão permite introduzir esforço contrário à expansão do material. A bomba hidráulica permite exercer pressão no fluido de trabalho. O lubrificante deve ter resistência adequada para aguentar as altas pressões e as temperaturas geradas no contacto do material com a matriz. As Figuras 2.2 e 2.3 mostram exemplos de tubos obtidos por hidroformação.



Figura 2.2. Tubo hidroformado em s-rail ([A](#)).



Figura 2.3. Tubo hidroformado em Y ([B](#)).

A formabilidade dos aços e dos alumínio deve ser avaliada, de forma a dispor no projeto da maior informação possível sobre como os materiais vão responder à conformação. Existem diversos ensaios na indústria para caracterizar as propriedades mecânicas de um material e o mais usado é o ensaio de tração. De um modo geral, as propriedades dos tubos são identificadas por ensaios de tração, que são realizados em amostras cortadas de chapas antes da laminagem por rolos (“*roll forming*”) e das operações de soldadura para obtenção dos tubos e em amostras aplanadas depois de cortadas dos tubos ([Song et al., 2007](#) e [Song et al., 2010](#)). Porém, a tensão de escoamento e a formabilidade dos tubos produzidos por laminagem são diferentes dos das chapas antes de serem laminadas (“*roll forming*”) ou após aplanadas. Isto porque, estas operações envolvem deformação plástica.

Para a caracterização mecânica dos tubos, efetuam-se ensaios de tração em amostras cortadas de um tubo ao longo da direção axial. Contudo, nestes ensaios, a identificação das propriedades mecânicas fica limitada à direção longitudinal, sendo necessários outros ensaios para descrever melhor o comportamento plástico dos tubos, visto que no processo de hidroformação, os esforços são essencialmente biaxiais. Para uma mais adequada caracterização de um material tubular, recorre-se geralmente ao ensaio de pressão hidráulica com bordo livre (*“free bulge test”*), realizado em condições de alongamento biaxial. Neste ensaio, que simula as condições de carregamento do processo de hidroformação, um tubo é fixo em ambas as extremidades e de seguida é expandido livremente (não há matriz), através da pressão interna aplicada por um fluido ([Khalfallah, et al., 2015a](#)). De forma a identificar as propriedades do tubo no ensaio biaxial com bordo livre, a curva de pressão em função da altura de pólo necessita de ser traçada ([Fuchizawa & Narazaki, 1993](#)). Além disso, existem diversos modelos analíticos baseados na teoria da membrana, no equilíbrio de forças e na consideração de determinados perfis geométricos neste ensaio, para a determinação da curva tensão-deformação de materiais tubulares. Porém, foram feitas simplificações nestes modelos analíticos, e como tal apresentam limitações na determinação de curvas de tensão-deformação ([Khalfallah et al., 2015a](#)). Para solucionar este problema, vários métodos inversos foram desenvolvidos para a identificação dos parâmetros constitutivos. Alguns deles, consistem na identificação da lei de encruamento e dos parâmetros de anisotropia, usando um método numérico-experimental baseado no *“free bulge test”* e nos ensaios de tração uniaxial ([Zribi et al., 2013](#)). Foi também sugerida uma abordagem energética inversa para determinar a tensão de escoamento de materiais tubulares, assumindo comportamento isotrópico ([Strano & Altan, 2004](#)). E foi ainda proposto um método inverso recorrendo a elementos finitos para materiais tubulares ([Xu et al., 2008](#)). Além disso, a utilização de critérios de plasticidade avançados como o CB2001, permite melhorar os resultados das simulações, caracterizando melhor a anisotropia do material tubular. Deste modo, a partir de modelos constitutivos mais fiáveis, é possível uma simulação numérica de elevada precisão. ([Khalfallah, et al., 2015b](#)).

2.2. Tipos de Hidroformação de tubos

A hidroformação de tubos, pode ser realizada a baixa pressão (HTBP), em pressão sequencial (HSP) e a alta pressão (HTAP). Na hidroformação de tubos a baixa pressão, as pressões envolvidas são inferiores a 100 MPa. Com a utilização de pressões pequenas, não são necessários equipamentos de grande dimensão ([Nikhare et al., 2009](#)) e existem vantagens relacionadas com, o consumo de energia, as etapas do processo, o tempo de ciclo, e o espaço ocupado pelos equipamentos (Morphy et al., 1998). A Figura 2.4 mostra um equipamento de hidroformação de tubos, que utiliza pressões até 100 MPa. Neste tipo de equipamento, o tubo é colocado entre as duas metades da matriz e os atuadores impedem o movimento da matriz. Além disso, existem furos nos cilindros da ferramenta para que o fluido possa ser introduzido pela bomba hidráulica, permitindo criar a pressão necessária dentro do tubo ([Khalfallah, et al., 2015a](#)).



Figura 2.4. Equipamento de hidroformação ([Khalfallah, et al., 2015a](#)).

De um modo geral, a utilização de baixa pressão é mais vantajosa do que alta pressão, visto que conduz a uma distribuição de espessura mais uniforme, menores variações de tensão, e o atrito não é um parâmetro significativo. ([Alaswad et al., 2012](#)) ([Nikhare et al., 2009](#)).

Na hidroformação com pressão sequencial (70-170 MPa), a matriz é gradualmente fechada e preenchida com o fluido de baixa pressão ([Morphy, 2001](#)). A força compressiva da matriz associada com a baixa pressão aplicada no interior do tubo permitem diminuir o atrito gerado e evitar a utilização de lubrificantes. Em seguida, o fluido de alta pressão é forçado para dentro do tubo, fazendo com que este se expanda e preencha completamente a matriz (2 estágios de pressão). Este processo é exemplificado na Figura 2.5.



Figura 2.5. Etapas da hidroformação com pressão sequencial ([Morphy, 2001](#)).

A hidroformação de tubos a alta pressão (100-600 MPa), é geralmente utilizada para aplicações de elevada responsabilidade. Pressões mais elevadas permitem maior expansão do material, mas implicam um aumento da redução de espessura ([Bell et al., 2019](#)). A Figura 2.6 mostra uma prensa hidráulica de hidroformação da empresa Lien Chien Machinery, que faz uso de altas pressões.



Figura 2.6. Prensa hidráulica de hidroformação ([C](#)).

2.3. Aplicações da hidroformação de tubos

A hidroformação de tubos pode ser utilizada na indústria automóvel, aeronáutica, sanitária, e de saneamento. As Figuras 2.7. a 2.14. mostram exemplos de componentes e estruturas tubulares fabricados pelo processo hidroformação de tubos.



Figura 2.7. Berço do motor (D).



Figura 2.8. Chassis de automóvel (E).



Figura 2.9. Tubo de escape (F).



Figura 2.10. Pilar de automóvel (G).



Figura 2.11. Encaixe de tubulação em T (H).



Figura 2.12. Torneira de cozinha (I).



Figura 2.13. Cadeira de rodas (J).



Figura 2.14. Quadro de bicicleta (K).

2.4. Vantagens da hidroformação

O processo de hidroformação é uma excelente alternativa a outras técnicas de conformação, como a estampagem e a soldadura e tem diversas aplicações nas indústrias de produção de componentes. As principais vantagens do processo de hidroformação são:

- Atenuação da localização da redução de espessura e distribuição de tensões de forma mais uniforme em toda a peça, em comparação com outros métodos convencionais;
- Produção de peças com forma complexa e existência de diversas possibilidades para o design das peças;
- Menor número de etapas de processo comparativamente a outras tecnologias, o que leva a um número reduzido ou nulo de componentes soldados;
- Elevada resistência e rigidez estrutural dos componentes;
- Elevada precisão dimensional, springback reduzido e bom acabamento superficial da peça, devido ao diminuto contacto com as ferramentas;
- Fabricação de peças a baixo custo, em grandes séries;
- Peso reduzido das peças hidroformadas, permite diminuir o peso de automóveis e, consequentemente reduzir o consumo de combustível;
- Elevada automatização do processo e redução de custos com pessoal.

Todas estas vantagens ([Bell et al., 2019](#)) devem-se, principalmente, ao fluido exercer uma pressão uniforme em toda a superfície do material e ao equipamento permitir que a pressão seja controlável ao longo do processo de hidroformação.

2.5. Problemas do processo de hidroformação

Os principais entraves do processo de hidroformação atualmente são:

- A dificuldade da caracterização mecânica de um material tubular altamente anisotrópico, provém da complexidade de fazer ensaios de tração que não sejam paralelos ou perpendiculares ao eixo do tubo ([Khalfallah et al., 2020](#)). Para a caracterização ser convenientemente feita, isto é, lei de encruamento e critério de plasticidade, seria preciso efetuar ensaios de tração a diferentes ângulos, como por exemplo 15, 30, 45, 60, 75° com a direção do eixo do tubo. Isto exige cortar provetes de tração inclinados relativamente ao eixo do tubo, o que é de difícil execução. Ora, isto tem consequências na qualidade das simulações numéricas deste processo.
- A falta de base de conhecimento para o design/projeto das ferramentas e do processo. De forma a resolver este problema, diversas instituições realizaram pesquisas sobre a seleção de materiais, condições de lubrificação (atrimento), geometria das pré-formas e design das ferramentas e dos processos ([Ahmetoglu et al., 2000](#)). Outros estudos, como a identificação dos diversos modos de falha ([Alaswad et al., 2012](#)) e dos fatores que afetam o processo de hidroformação também foram realizados ([Khalfallah et al., 2021](#)). Devido a não haver uma grande base de conhecimento no projeto, a utilização e a viabilidade da hidroformação é questionada, ou seja, até que ponto não seria mais vantajoso fazer estampagem seguida de soldadura em vez de hidroformação. Além disso, caso fosse necessário soldar peças hidroformadas, à partida não se sabe que tipo de soldadura utilizar. Por esta razão, é necessário utilizar uma técnica de soldadura apropriada, como o Taylor Welded Blanks ([Teixeira, 2007](#)). Esta técnica pode ser integrada na hidroformação, de forma a agilizar todas as etapas do processo e a obterem-se os resultados pretendidos.

- A incapacidade de convencer o meio industrial/empresarial que a utilização do processo de hidroformação é uma tecnologia muito interessante, devido às suas vantagens e aplicações, comparativamente a outros métodos convencionais.
- O atrito entre o material e as paredes da matriz durante a conformação, diminui a capacidade de deformação do material, o que dificulta o escoamento/fluxo de material dentro da matriz. Num processo que envolva muito atrito de contacto na interface matriz-material, o próprio atrito pode provocar a localização da deformação, nas zonas onde esses atritos se fazem sentir. A localização da deformação leva ao estiramento/estrição e conseqüentemente à rejeição do componente. O atrito gerado no contacto, leva ao aquecimento do material e da matriz. Deste modo, é fundamental a introdução de um lubrificante adequado nas paredes da matriz, de modo a facilitar a expansão do material no seu interior. Além disso, na hidroformação de tubos, se a alimentação axial for demasiado rápida relativamente à evolução da pressão interna de expansão, poderá também acontecer enrugamento. Assim, é conveniente haver uma sintonia perfeita entre a alimentação axial e a pressão interna e eventualmente introduzir um lubrificante que facilite a operação de deslocamento axial.
- A eventual existência de empenamento é influenciada por diversos fatores, como o desenho e a sequência de etapas do processo, a pré-conformação (dobragens) e o retorno elástico. Se o empenamento for devido à recuperação elástica, quanto menor for o módulo de elasticidade, maior é a recuperação elástica e maior será o empenamento. Nos processos de estampagem ou hidroformação, a deformação não é idêntica em todos os pontos do material e a recuperação também não é igual em todos os pontos, o que faz com que haja empenamento. No caso de aços macios, o springback é um problema relativamente menor. Contudo, com o aumento da utilização de aços de alta resistência na hidroformação de tubos, o springback torna-se importante e pode causar problemas de montagem significativos.

- A dificuldade de prever o comportamento mecânico do material durante a conformação, de forma a obterem-se as propriedades e geometria pretendidas, pode ser resolvido, utilizando um sistema de controlo independente de 3 pressões ([Jain et al., 2004](#)). Ou seja, a combinação de alimentação axial, contra pressão e pressão interna permite fazer ajustes na pressão, para diminuir a probabilidade de enrugamento ou empenamento e de aparecimento fissura.

3. PLASTICIDADE DOS MATERIAIS

Muitos materiais metálicos apresentam boas propriedades mecânicas, como elevada resistência à tração e excelente ductilidade. A ductilidade é uma característica importante de um processo de conformação plástica, em que se exige ao material que apresente boa capacidade de deformação. Em termos genéricos, a conformação por deformação plástica pode ser feita a quente, em que é possível utilizar esforços relativamente pequenos, e a frio, que permite obter peças com melhor acabamento superficial. Existem diversos processos de conformação, mas os mais clássicos, que continuam a ser usados atualmente na indústria são, a laminagem, o forjamento, a trefilagem, a extrusão e a estampagem de chapas. A hidroformação tem vindo a ser usada como alternativa às tecnologias convencionais, devido às suas diversas vantagens e aplicações. O conhecimento do comportamento plástico de chapas ou tubos metálicos é essencial quando se pretende fazer a simulação numérica de um processo de fabrico como o de hidroformação. Assim, além da construção do modelo de elementos finitos é necessário conhecer as leis e respetivos parâmetros que estão por detrás do comportamento do material. Estas leis, designadas genericamente por leis constitutivas, traduzem o comportamento linear elástico, e o comportamento plástico, não linear.

3.1. Leis Constitutivas

O comportamento mecânico de materiais metálicos pode ser descrito por leis constitutivas, isto é, modelos matemáticos que descrevem o comportamento elasto-plástico (Fernandes, 2020). As leis constitutivas consideradas neste trabalho, são a lei de Hooke generalizada, o critério de plasticidade anisotrópico de Hill'48, a lei de encruamento de Swift e a lei da normalidade.

LEI DE HOOKE GENERALIZADA

A lei de Hooke generalizada consiste em relações finitas que relacionam a parte elástica dos componentes do tensor da deformação com as componentes do tensor das tensões. Dada a sua simplicidade, dispensamos a sua escrita. Porém interessa saber que o material usado na simulação do processo de hidroformação é o aço S235, cujo módulo de elasticidade é 210 GPa e o coeficiente de Poisson é 0.3, ou seja, $E = 210 \text{ GPa}$ e $\nu = 0.3$.

CRITÉRIO ANISOTRÓPICO DE HILL '48

Devido aos processos de fabrico a que estão sujeitos, os tubos apresentam anisotropia plástica ortotrópica, ou seja, as propriedades variam com a direção. Para descrever esta anisotropia, recorre-se a critérios de plasticidade, como por exemplo o critério de Hill ([Hill, 1948](#)). A expressão genérica deste critério, no sistema de eixos de ortotropia, Oxyz, é dada pela equação:

$$F(\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 + G(\sigma_{zz} - \sigma_{xx})^2 + H(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + 2L\tau_{yz}^2 + 2M\tau_{xz}^2 + 2N\tau_{xy}^2 = Y^2 \quad (3.1)$$

Em que σ_{xx} , σ_{yy} , σ_{zz} , τ_{xy} , τ_{yz} , τ_{xz} são as componentes do tensor das tensões de Cauchy, F , G , H , L , M e N são os parâmetros de anisotropia do critério de Hill e $Y=Y(\bar{\epsilon}^p)$ representa a lei de encruamento isotrópico, sendo $\bar{\epsilon}^p$ a deformação plástica equivalente.

Geralmente considera-se $G + H = 1$. Esta condição implica que a lei de encruamento, $Y(\bar{\epsilon}^p)$, é representada pela curva de tração segundo a direção de laminagem.

O coeficiente de anisotropia $r(\alpha)$ é dado pela Equação 3.3 e define-se como a razão entre o incremento de deformação plástica em largura $d\varepsilon_{y'}$, e o incremento de deformação plástica em espessura $d\varepsilon_{z'}$, durante um ensaio de tração na direção Ox' fazendo um ângulo α com a direção de laminagem.

$$r(\alpha) = \frac{d\varepsilon_{y'}}{d\varepsilon_{z'}} \quad (3.2)$$

Conhecendo os valores dos parâmetros do critério de Hill, é possível calcular o coeficiente de anisotropia para qualquer ângulo α :

$$r(\alpha) = \frac{H + (2N - F - G - 4H) \sin^2(\alpha) \cos^2(\alpha)}{F \sin^2(\alpha) + G \cos^2(\alpha)} \quad (3.3)$$

Inversamente, conhecendo os coeficientes de anisotropia, é possível determinar os parâmetros F , G , H e N do critério de Hill, tal como se mostra nas equações (no pressuposto de que $G + H = 1$):

$$F = \frac{r_0}{(1 + r_0) \times r_{90}} \quad (3.4)$$

$$G = \frac{1}{(1 + r_0)} \quad (3.5)$$

$$H = \frac{r_0}{(1 + r_0)} \quad (3.6)$$

$$N = \frac{(r_0 + r_{90}) \times (2 \times r_{45} + 1)}{2 \times r_{90} \times (1 + r_0)} \quad (3.7)$$

A identificação dos parâmetros de anisotropia que envolvem as componentes de corte, L e M , necessitaria de ensaios de corte perpendiculares à superfície do tubo. Por esta razão, é comum considerar os valores isotrópicos para estes parâmetros ($L = M = 1.5$).

LEI DE ENCRUAMENTO DE SWIFT

Durante a deformação plástica, a tensão aplicada aumenta, ou seja, o material encrua à medida que vai sendo deformado. A este comportamento dá-se o nome de encruamento ([Callister, 2008](#)). A lei de encruamento de Swift, válida no domínio plástico, descreve a evolução da tensão limite de elasticidade, Y , com a deformação plástica equivalente, $\bar{\varepsilon}^p$ ($Y=Y(\bar{\varepsilon}^p)$):

$$Y = K(\varepsilon_0 + \bar{\varepsilon}^p)^n \quad (3.8)$$

Em que, K , ε_0 e n são parâmetros da lei de Swift. A tensão limite de elasticidade inicial é dada por:

$$Y_0 = Y(\bar{\varepsilon}^p = 0) = K(\varepsilon_0)^n \quad (3.9)$$

LEI DA NORMALIDADE

A lei da normalidade, também designada de plasticidade associada, relaciona as componentes do tensor das tensões com o tensor incremento de deformação plástica e enuncia-se da seguinte forma:

$$d\varepsilon^p_{ij} = d\lambda \frac{\partial F(\sigma_{ij})}{\partial(\sigma_{ij})} \quad (3.10)$$

Em que $d\varepsilon^p_{ij}$ é o tensor incremento de deformação plástica, $\partial F(\sigma_{ij})/\partial(\sigma_{ij})$ é o gradiente (ou seja, a normal) à superfície de plasticidade que é definida pela função $F(\sigma_{ij})$ e $d\lambda$ é um fator escalar incremental que define a magnitude do tensor incremento de deformação plástica.

3.2. Modelo numérico

A análise de elementos finitos foi realizada usando o código de elementos finitos DD3IMP (Menezes & Teodosiu, 2000) (Oliveira et al., 2008). Tendo em conta as simetrias geométricas, de carregamento e de material, um oitavo de toda a peça foi simulada, de forma a reduzir o tempo computacional. O modelo numérico consta, no essencial, de duas partes: o tubo a deformar e a matriz mais o sistema de guiamento (Khalfallah et al., 2020). A discretização do tubo combina dois tamanhos de elementos finitos. A área central é discretizada com um tamanho de elemento de 1 mm x 1.3 mm ao longo das direções circunferencial e axial, respetivamente. Uma malha mais grosseira é usada para discretizar a parte restante do tubo. São utilizados elementos sólidos hexaédricos tri-lineares de 8 nós, com duas camadas de elementos através da espessura. O diâmetro externo do tubo é de 50 mm e o seu comprimento total é 260 mm. A hidroformação do tubo foi realizada com auxílio de uma matriz de secção transversal quadrada, com o comprimento de 50 mm (total), e um sistema de guiamento do tubo durante a deformação, com o comprimento de 90 mm (de cada lado), retendo as extremidades do tubo e controlando o tamanho da área abaulada. As ferramentas são modeladas como um corpo rígido. A Figura 3.1 mostra a malha de elementos finitos do modelo numérico, que representa $1/8$ do processo de hidroformação do tubo numa matriz de secção quadrada.

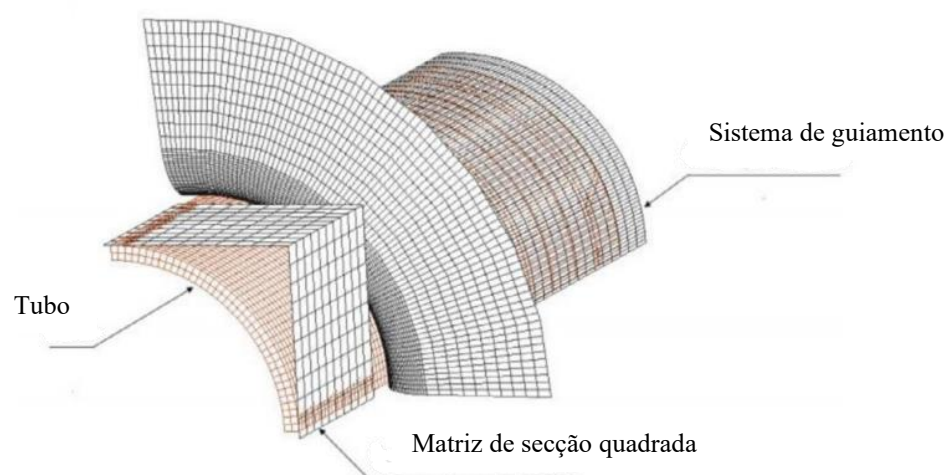


Figura 3.1. Malha de elementos finitos do modelo numérico processo de hidroformação (Khalfallah et al., 2020).

4. ENSAIOS NUMÉRICOS

O método de elementos finitos (MEF) é uma ferramenta que permite simular com precisão problemas complexos do mundo real, como por exemplo a conformação de metais. As simulações numéricas são muito usadas na indústria, como uma ferramenta eficiente de forma a otimizar e desenvolver os processos de conformação metálica ([Alaswad et al., 2012](#)). O software DD3IMP, é um código de elementos finitos que se encontra otimizado para a simulação de processos de conformação metálica, e é geralmente usado para simular a estampagem de chapas metálicas ([Menezes & Teodosiu, 2000](#)) ([Oliveira et al., 2008](#)).

Todas as experiências de hidroformação de tubos numa matriz de secção quadrada, foram realizadas por simulação numérica, usando o software de elementos finitos DD3IMP. Utilizou-se o software Minitab para gerar um plano de experiências (*Design of experiments: DOE*), usando o método Box Behnken que é um procedimento estatístico para definir o número e as experiências a realizar, de acordo com o número de parâmetros de entrada a considerar e dos níveis de cada um. Na presente tese, consideraram-se 9 parâmetros de entrada e 3 níveis para os parâmetros, isto é, 3 valores possíveis para cada um deles (mínimo, médio e máximo). Assim sendo, o método Box Behnken define 97 experiências a realizar, em alternativa a todas as combinações possíveis (plano fatorial completo) que consistiria em 19 683 ($= 3^9$) experiências. Para todas as experiências foram analisados 2 parâmetros de *output*, a redução máxima de espessura (RedEsp) e a altura máxima de pólo (AltPolo).

4.1. Parâmetros de entrada e de saída

Os parâmetros de entrada (*input*) considerados nas simulações dividem-se em parâmetros do material (lei de Swift e coeficientes de anisotropia) e em parâmetros do processo, como se indica na figura a seguir:

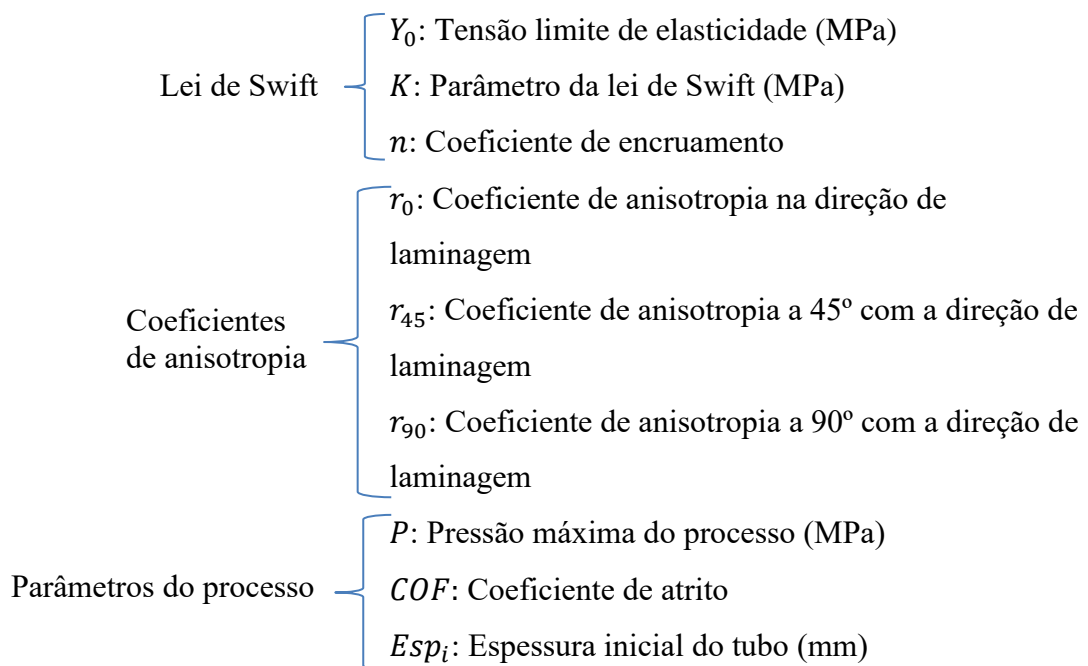


Figura 4.1. Parâmetros de entrada, do material e do processo.

Para cada um dos 9 parâmetros de entrada são considerados três valores, mínimo, médio e máximo, tal como se mostra na Tabela 4.1. Admitiu-se que todos os parâmetros variam $\pm 10\%$ em torno do valor médio, com exceção da pressão máxima atingida no processo que varia $\pm 5\%$. Os parâmetros utilizados resultaram de uma comunicação pessoal (Khalfallah, 2021). No caso dos parâmetros do material, os valores médios correspondem a um aço macio S235 (Zribi et al., 2013).

Tabela 4.1. Valores mínimo, médio e máximo dos parâmetros de entrada do material e do processo.

	min	med	max
Y_0 (MPa)	331.2	368.0	404.8
K (MPa)	702.3	780.4	858.4
n	0.3294	0.3660	0.4026
r_0	1.332	1.480	1.628
r_{45}	0.828	0.920	1.012
r_{90}	1.359	1.510	1.661
P (MPa)	47.5	50.0	52.5
COF	0.108	0.120	0.132
Esp_i (mm)	0.963	1.070	1.177

Os parâmetros de resposta (*output*) analisados são a redução máxima de espessura (*RedEsp*), que está relacionada com o aparecimento da fratura, e a altura máxima de pólo (*AltPolo*), que está relacionada com a geometria pretendida para a peça.

4.2. Valores dos parâmetros de *input* e *output* do processo de Hidroformação

Na Tabela 4.2, exemplificam-se os valores de parâmetros de entrada e de saída do processo de hidroformação de tubos numa matriz de secção quadrada, para algumas experiências. Os valores para todas as experiências realizadas (97), no software DD3IMP encontram-se em ANEXO.

Tabela 4.2. Exemplos dos parâmetros de entrada e respetivas respostas para algumas das 97 experiências realizadas.

Nº Exp	Y_0 (MPa)	K (MPa)	n	r_0	r_{45}	r_{90}	P (MPa)	COF	Esp_i (mm)	RedEsp	AltPolo (mm)
1	368.0	780.4	0.3660	1.628	1.012	1.359	50.0	0.120	1.070	0.162	5.735
2	368.0	858.4	0.3660	1.332	0.920	1.510	50.0	0.120	0.963	0.052	5.164
3	404.8	780.4	0.3660	1.332	0.920	1.510	52.5	0.120	1.070	0.157	5.484
4	331.2	858.4	0.3294	1.480	0.920	1.510	50.0	0.120	1.070	0.148	5.267
5	368.0	702.3	0.3660	1.480	0.920	1.359	52.5	0.120	1.070	0.174	6.182
...
97	368.0	780.4	0.3660	1.480	0.920	1.510	52.5	0.132	0.963	0.069	5.735

4.3. Pontos críticos de Redução de Espessura

Neste capítulo, avaliaram-se os pontos críticos de redução de espessura e traçaram-se gráficos de redução de espessura em função da posição dos nós, nas zonas mais deformadas do tubo. No presente trabalho simulou-se apenas $1/8$ da peça devido à existência de simetria geométrica e material. Os pontos críticos de redução de espessura, são os pontos que se encontram nas zonas mais deformadas (zonas críticas da peça), onde previsivelmente irá aparecer a fissura. A redução máxima de espessura pode acontecer num desses pontos. De forma a exemplificar visualmente a localização dos pontos críticos encontra-se na Figura 4.2, que ilustra um corte do tubo ($1/2$ de tubo) após hidroformação numa matriz de secção quadrada, realizada por simulação numérica (Khalfallah et al., 2020). As setas apontam para a posição habitual dos pontos críticos referentes à redução máxima de espessura, que geralmente ocorre próxima dos pontos 10 e 30 da zona mais deformada do tubo.

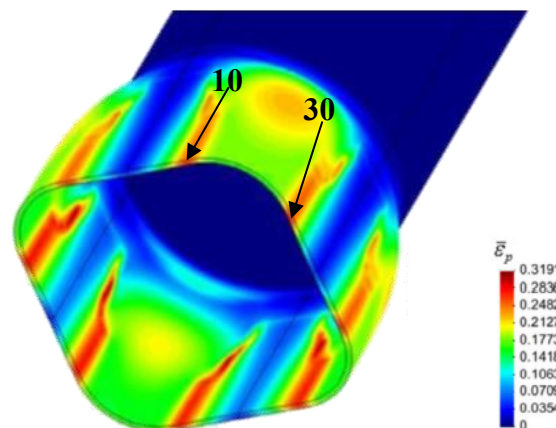


Figura 4.2. Localização dos pontos críticos de redução de espessura (Khalfallah et al., 2020).

A espessura final foi avaliada com base nas coordenadas dos nós das superfícies exterior e interior, após deformação; estas coordenadas foram determinadas a partir das coordenadas iniciais desses nós e dos respetivos deslocamentos.

A redução de espessura foi determinada com base nos valores de espessura final (Esp_{final}) e de espessura inicial ($Esp_{inicial}$), de cada ensaio. A redução de espessura é assim determinada:

$$RedEsp = \frac{Esp_{inicial} - Esp_{final}}{Esp_{inicial}} \quad (4.1)$$

Na Figura 4.3, mostram-se exemplos da distribuição de redução de espessura em função da posição dos nós na zona crítica da peça (ver corte na Figura 4.2), para 3 espessuras iniciais distintas (0.963, 1.070 e 1.177 mm), ou seja, para 3 ensaios diferentes.

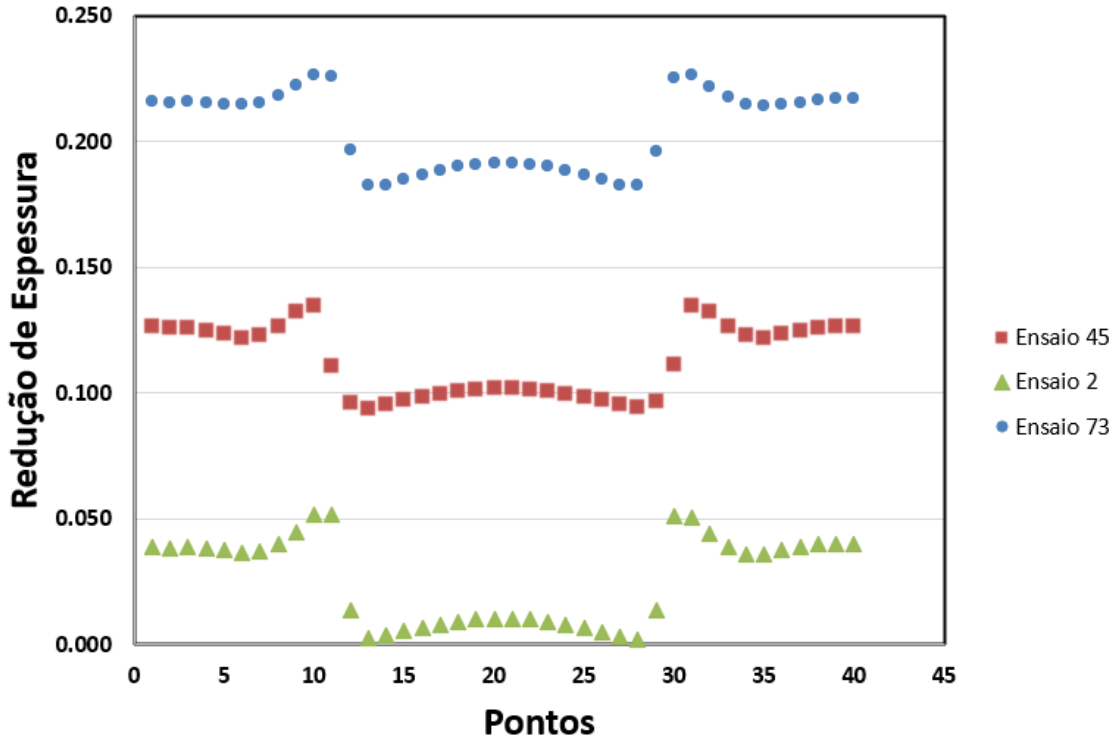


Figura 4.3. Redução de espessura em função da posição dos nós para 3 experiências diferentes.

Os resultados mostram que de um modo geral, quanto maior for a espessura inicial, maior é a redução de espessura.

A distribuição a verde corresponde ao ensaio 2, que tem o valor de espessura inicial de 0.963 mm. O valor máximo de redução de espessura obtido foi de 5.19%, ocorrendo no ponto 11 (nó 4743). Também existe outro valor elevado de redução de espessura (5.13%), que ocorre no ponto crítico 30 (nó 4882).

A distribuição a vermelho refere-se ao ensaio 45, que tem o valor de espessura inicial de 1.070 mm. O valor máximo de redução de espessura obtido foi de 13.50%, ocorrendo no ponto 31 (nó 4888). Outro valor elevado de redução de espessura (13.46%) ocorre no ponto crítico 10 (nó 4738).

A distribuição a azul corresponde ao ensaio 73, que tem o valor de espessura inicial de 1.177 mm. O valor máximo de redução de espessura obtido foi de 22.69%, ocorrendo no ponto 10 (nó 4738). Outro valor elevado de redução de espessura (22.64%) acontece no ponto crítico 31 (nó 4888).

Nas Figuras 4.4 e 4.5 mostram-se respetivamente as distribuições de deformação plástica equivalente e tensão equivalente ao longo do tubo hidroformado, referentes ao ensaio 73.

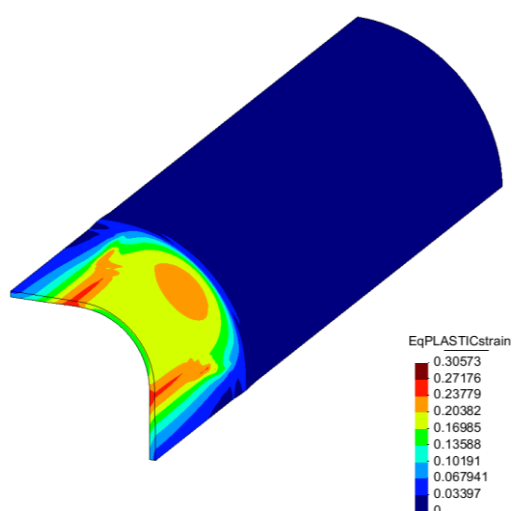


Figura 4.4. Deformação plástica equivalente.

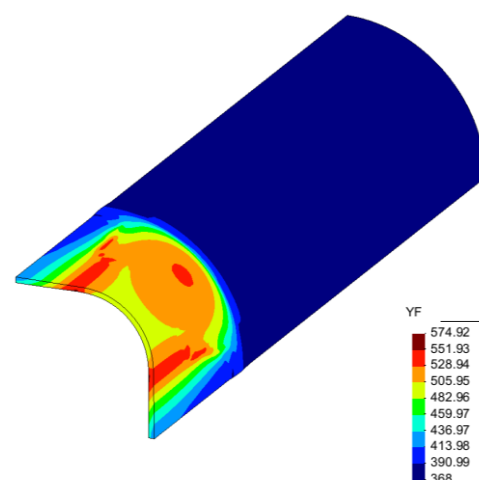


Figura 4.5. Tensão equivalente.

4.4. Pressão em função da Altura de Pólo

A Figura 4.6 ([Khalfallah et al., 2020](#)) mostra esquematicamente uma secção do tubo (a mesma que se visualiza nas Figuras 4.4 e 4.5) antes e após deformação. Inicialmente o contacto do tubo com a matriz apenas ocorre nos pontos A e A'. Durante a deformação, o contacto ocorre ao longo das linhas AB e A'B'. A altura de pólo corresponde à distância entre o ponto O (antes da deformação) e o ponto O' (após a deformação). Tal como a redução máxima de espessura, também a altura de pólo varia de experiência para experiência. A altura de pólo é determinada a partir das coordenadas do ponto O, iniciais e após deformação (O').

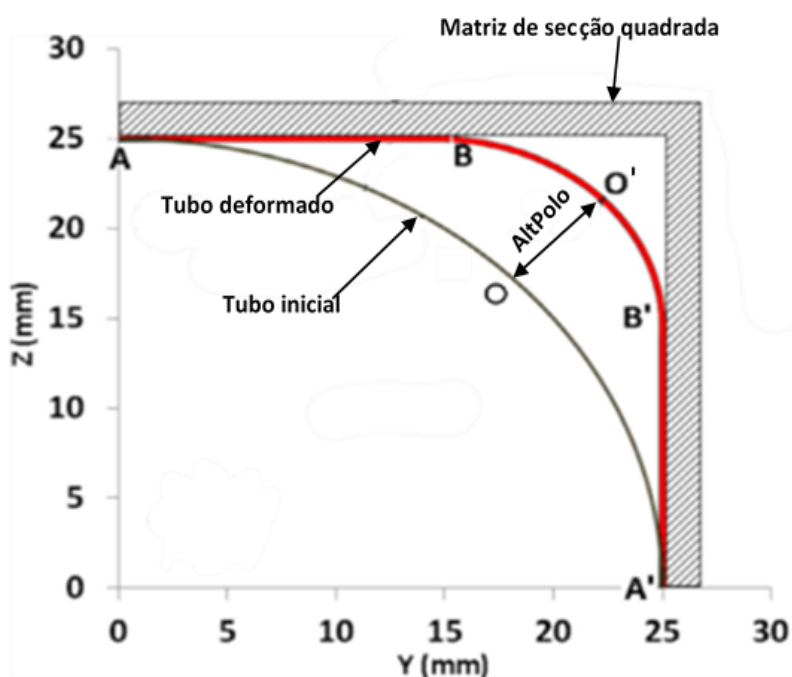


Figura 4.6. Corte de uma secção do tubo que inclui a definição de altura de pólo ([Khalfallah et al., 2020](#)).

Na Figura 4.7, mostram-se exemplos de resultados referentes à evolução da pressão em função da altura de pólo, para 3 ensaios distintos, que foram escolhidos tendo em conta o valor do parâmetro de entrada, K da lei de Swift.

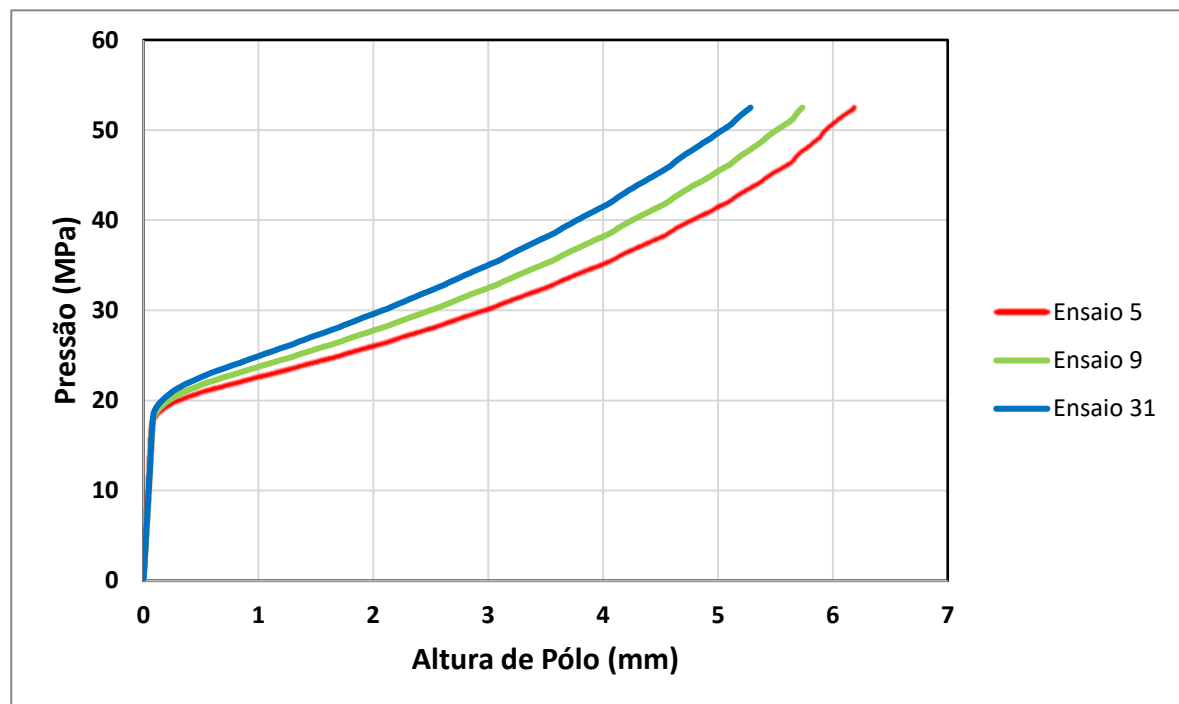


Figura 4.7. Pressão em função da altura de pólo para 3 ensaios diferentes.

Nesta figura observa-se que, nos primeiros momentos do processo de hidroformação, a pressão aumenta muito rapidamente (até cerca de 20 MPa), com uma pequena variação da altura de pólo, correspondente à deformação inicial, puramente elástica. A partir de cerca de 20MPa, o material entra no domínio plástico (+ elástico) e a altura de pólo cresce mais rapidamente, até a peça chegar à forma final, que é imposta pela geometria da matriz. Os resultados mostram que, de um modo geral, quanto menor for o valor de K, maior será a altura de pólo no final da operação de hidroformação.

A curva a vermelho corresponde ao ensaio 5, cujo valor do parâmetro K da Lei de Swift é 702.3 MPa. O valor máximo de altura de pólo é de 6.18mm, quando se atinge uma pressão de 52.5 MPa.

A curva a verde corresponde ao ensaio 9, em que o parâmetro K da Lei de Swift tem valor de 780.4 MPa. O valor máximo de altura de pólo é de 5.74mm, quando se atinge uma pressão de 52.5 MPa.

A curva a azul corresponde ao ensaio 31, em que o parâmetro K da Lei de Swift tem valor de 858.4 MPa. O valor máximo de altura de pólo é de 5.28mm, quando se atinge uma pressão de 52.5 MPa.

5. SUPERFÍCIE DE RESPOSTA

Para cada um dos parâmetros *output*, utilizou-se o *software* Minitab para se determinar, a equação da superfície de resposta (*response surface methodology* - RSM), que traduz uma aproximação dos resultados obtidos por um polinómio de 2º grau (Khalfallah et al. 2021). Ou seja, os resultados dos 97 ensaios realizados, foram ajustados por um polinómio, que relaciona cada uma das variáveis de *output* com os valores das 9 variáveis *input*. O polinómio é definido pela equação seguinte:

$$\left\{ \begin{array}{l} F(x) = \beta_0 + \sum_{i=1}^9 \beta_i x_i + \sum_{i=1}^9 \sum_{j>i}^9 \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^9 \beta_{ii} x_i^2 \quad (5.1) \\ x_1 = Y_0, x_2 = K, x_3 = n, x_4 = r_0, x_5 = r_{45}, x_6 = r_{90}, x_7 = P, x_8 = COF, x_9 = Esp_i \end{array} \right.$$

Onde, $F(x)$ é a redução máxima de espessura (*RedEsp*) ou a altura máxima de pólo (*AltPolo*), β_0 , β_i , β_{ij} e β_{ii} são os coeficientes de regressão e x_i e x_j são os valores de cada parâmetro *input*. Ou seja, a equação anterior consiste num modelo polinomial de segunda ordem (*Full Quadratic Model*).

Neste capítulo, são apresentadas as equações gerais e simplificadas de RSM de cada parâmetro de *output*. Em seguida, procede-se à análise de sensibilidade, com o objetivo de perceber o efeito que os parâmetros de *input* têm na redução máxima de espessura e na altura máxima de pólo.

5.1. Redução de Espessura

A equação da superfície de resposta, obtida para o *output* redução máxima de espessura, é dada pela Equação 5.2. É uma expressão extensa, com um elevado número de termos lineares e quadráticos, mas que pode ser simplificada recorrendo a uma análise de sensibilidade.

$$\begin{aligned}
 \text{redução de espessura} = & -1,449 - 0,000209 Y_0 - 0,000324 K - 0,199 n + 0,0087 r_0 + 0,010 r_{45} \\
 & - 0,1615 r_{90} + 0,00969 P - 0,10 \text{COF} + 2,367 \text{Thick} + 0,000000 Y_0*Y_0 \\
 & - 0,000000 K*K - 0,037 n*n + 0,0050 r_0*r_0 - 0,0033 r_{45}*r_{45} \\
 & + 0,0191 r_{90}*r_{90} - 0,000029 P*P + 0,29 \text{COF}*\text{COF} - 0,7481 \text{Thick}*\text{Thick} \\
 & - 0,000000 Y_0*K - 0,000298 Y_0*n + 0,000229 Y_0*r_0 + 0,000017 Y_0*r_{45} \\
 & + 0,000012 Y_0*r_{90} - 0,000001 Y_0*P + 0,000042 Y_0*\text{COF} \\
 & + 0,000102 Y_0*\text{Thick} + 0,000379 K*n - 0,000006 K*r_0 - 0,000005 K*r_{45} \\
 & - 0,000051 K*r_{90} + 0,000003 K*P + 0,000063 K*\text{COF} + 0,000102 K*\text{Thick} \\
 & + 0,0326 n*r_0 + 0,016 n*r_{45} + 0,0879 n*r_{90} - 0,00201 n*P - 0,008 n*\text{COF} \\
 & - 0,0224 n*\text{Thick} + 0,0000 r_0*r_{45} + 0,0179 r_0*r_{90} - 0,00254 r_0*P \\
 & - 0,020 r_0*\text{COF} - 0,0044 r_0*\text{Thick} - 0,0035 r_{45}*r_{90} - 0,00005 r_{45}*P \\
 & + 0,006 r_{45}*\text{COF} - 0,0038 r_{45}*\text{Thick} + 0,000322 r_{90}*P - 0,006 r_{90}*\text{COF} \\
 & + 0,0331 r_{90}*\text{Thick} + 0,0005 P*\text{COF} - 0,00233 P*\text{Thick} - 0,011 \text{COF}*\text{Thick}
 \end{aligned} \tag{5.2}$$

O coeficiente de correlação, R^2 define o erro do modelo previsto (RSM) relativamente aos resultados numéricos (DD3IMP). O seu valor para a equação 5.2, é relativamente elevado: $R^2 = 99,98\%$.

A análise de sensibilidade foi realizada, recorrendo também ao software Minitab, que permitiu traçar o diagrama de Pareto que se mostra na Figura 5.1, indicando quais os parâmetros e suas interações com maior influência no valor do *output* que se está a considerar, neste caso a redução máxima de espessura.

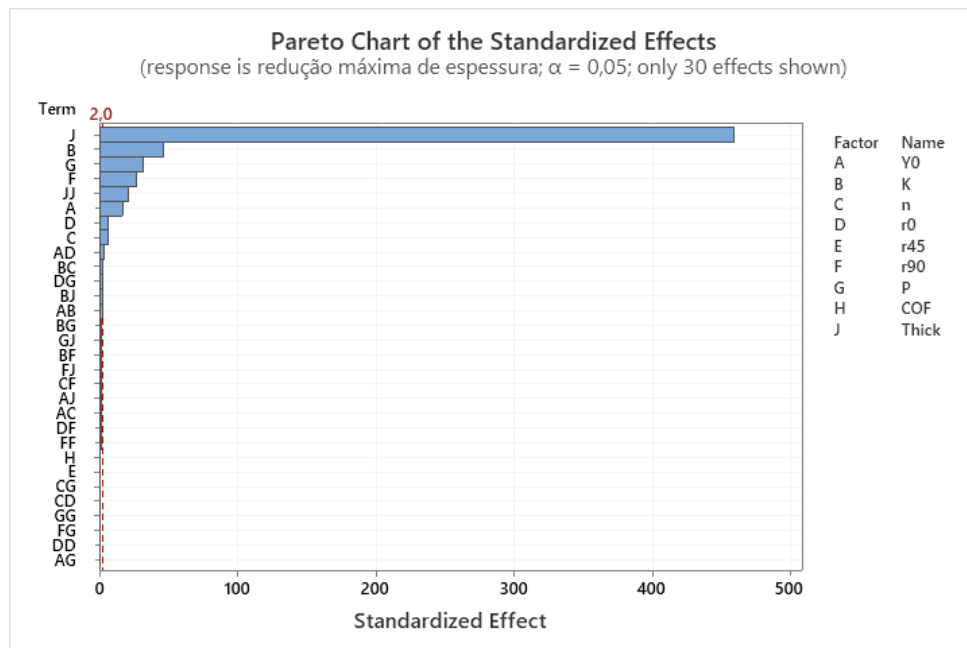


Figura 5.1. Figura mostrando a influência dos parâmetros *input* na RedEsp.

Na Figura 5.1, a linha vermelha vertical, igual a 2.0, representa o valor abaixo do qual a influência é considerada desprezável. Os parâmetros, ou os seus produtos (interações), que têm maior influência na resposta, isto é, na redução máxima de espessura, vão do J (espessura inicial - Esp_i) ao DG ($r_0 \times P$), tal como se resume na Tabela 5.1.

Tabela 5.1. Parâmetros de *input* por ordem de influência na redução máxima de espessura, de acordo com a Figura 5.1.

Fatores importantes	Esp_i	K	P	r_{90}	Esp_i^2	Y_0	r_0	n	$Y_0 \times r_0$	$K \times n$	$r_0 \times P$
---------------------	---------	-----	-----	----------	-----------	-------	-------	-----	------------------	--------------	----------------

O parâmetro que tem maior efeito na redução de espessura, é a espessura inicial (Esp_i), portanto, uma pequena variação de espessura inicial pode provocar uma grande variação de redução máxima de espessura. Além disso, efeitos importantes são também devidos ao coeficiente da lei de Swift, K , à pressão máxima, P , e ao coeficiente de anisotropia, r_{90} , entre outros; note-se que a influência da espessura inicial faz-se sentir linearmente e quadraticamente (Esp_i^2).

5.2. Altura de Pólo

A equação da superfície de resposta para o *output* altura máxima de pólo, é uma expressão extensa, mas tal como para a redução de espessura, esta pode ser simplificada com base na análise de sensibilidade. Portanto, a partir dos valores de entrada do material e do processo, pode-se calcular pela Equação 5.3, o valor máximo da altura de pólo para qualquer ensaio.

$$\begin{aligned}
 \text{altura de pólo} = & -6,2 - 0,0039 Y_0 - 0,00625 K + 6,3 n + 1,95 r_0 + 1,86 r_{45} - 3,70 r_{90} \\
 & + 0,425 P + 50,1 \text{COF} + 1,69 \text{Thick} + 0,000000 Y_0*Y_0 - 0,000003 K*K - 10,7 n*n \\
 & + 0,016 r_0*r_0 - 1,04 r_{45}*r_{45} + 0,747 r_{90}*r_{90} - 0,00180 P*P + 32 \text{COF*COF} \\
 & - 0,81 \text{Thick*Thick} + 0,000003 Y_0*K - 0,0136 Y_0*n + 0,00728 Y_0*r_0 \\
 & + 0,00015 Y_0*r_{45} + 0,00442 Y_0*r_{90} - 0,000132 Y_0*P - 0,0797 Y_0*\text{COF} \\
 & - 0,00001 Y_0*\text{Thick} + 0,01042 K*n + 0,00006 K*r_0 + 0,00008 K*r_{45} \\
 & - 0,00137 K*r_{90} + 0,000070 K*P + 0,0002 K*\text{COF} - 0,00000 K*\text{Thick} + 0,71 n*r_0 \\
 & - 0,04 n*r_{45} + 2,17 n*r_{90} - 0,086 n*P + 0,2 n*\text{COF} + 0,08 n*\text{Thick} \\
 & - 0,00 r_0*r_{45} + 0,248 r_0*r_{90} - 0,0995 r_0*P + 0,01 r_0*\text{COF} - 0,001 r_0*\text{Thick} \\
 & + 0,01 r_{45}*r_{90} - 0,0020 r_{45}*P + 0,2 r_{45}*\text{COF} + 0,01 r_{45}*\text{Thick} + 0,0170 r_{90}*P \\
 & - 19,45 r_{90}*\text{COF} + 0,019 r_{90}*\text{Thick} - 0,003 P*\text{COF} + 0,0000 P*\text{Thick} \\
 & + 0,0 \text{COF*Thick}
 \end{aligned} \tag{5.3}$$

Para a altura máxima de pólo obteve-se um coeficiente de correlação $R^2 = 99.06 \%$. Em comparação com a equação RSM da redução máxima de espessura, o ajuste da equação RSM da altura máxima de pólo é de qualidade ligeiramente inferior.

Na Figura 5.2, mostra-se quais são os parâmetros e suas interações que têm maior influência na altura de pólo. Estes, encontram-se acima da linha vermelha 2,02 e vão do B (parâmetro da Lei de encruamento de Swift, K) ao AH ($Y_0 \times COF$), tal como indicado na Tabela 5.2.

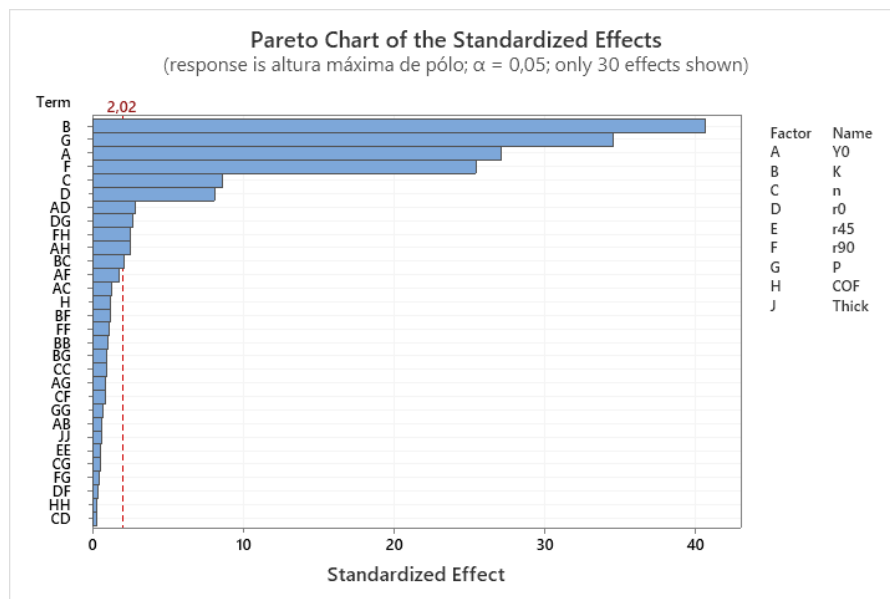


Figura 5.2. Figura mostrando a influência dos parâmetros *input* na AltPolo.

Tabela 5.2. Parâmetros de *input* por ordem de influência na altura máxima de pólo, de acordo com a Figura 5.2.

Fatores importantes	K	P	Y_0	r_{90}	n	r_0	$Y_0 \times r_0$	$r_0 \times P$	$r_{90} \times COF$	$Y_0 \times COF$
---------------------	-----	-----	-------	----------	-----	-------	------------------	----------------	---------------------	------------------

A altura de pólo é muito sensível à variação do parâmetro K . A pressão, P , assim como os parâmetros Y_0 e o r_{90} também têm bastante influência na resposta da altura de pólo. A interação mais importante é $A * D$ ($Y_0 \times r_0$), embora existam outras também significativas.

5.3. Modelo Simplificado para RedEsp e AltPolo

Tendo em conta que alguns parâmetros são desprezáveis, isto é, não têm influência significativa na resposta, o ajuste da equação de RSM pode fazer-se sem os considerar, ou seja fazendo intervir apenas as variáveis de *input* consideradas importantes. Assim, o software Minitab, foi utilizado para obter uma equação mais simplificada para a redução máxima de espessura. O modelo RSM simplificado para a redução de máxima de espessura é dado pela Equação 5.4. O coeficiente de correlação do modelo RSM simplificado da redução máxima de espessura tem o valor $R^2 = 99,97\%$, e é praticamente igual ao do modelo sem simplificação.

$$\begin{aligned} \text{redução de espessura} = & -1,4862 - 0,000424 Y0 - 0,000249 K - 0,2654 n + 0,0502 r0 \\ & - 0,03297 r90 + 0,00614 P + 2,4042 \text{Thick} - 0,7510 \text{Thick*Thick} \\ & + 0,000229 Y0*r0 + 0,000379 K*n - 0,002539 r0*P \end{aligned} \quad (5.4)$$

O diagrama de Pareto correspondente mostra-se na Figura 5.3. Ao considerar apenas os parâmetros mais influentes na redução máxima de espessura, obtém-se um histograma com diferenças qualitativas em relação ao diagrama de Pareto original. Em particular, o parâmetro J*J (Esp^2) subiu de lugar na hierarquia, e ganhou um pouco de mais importância.

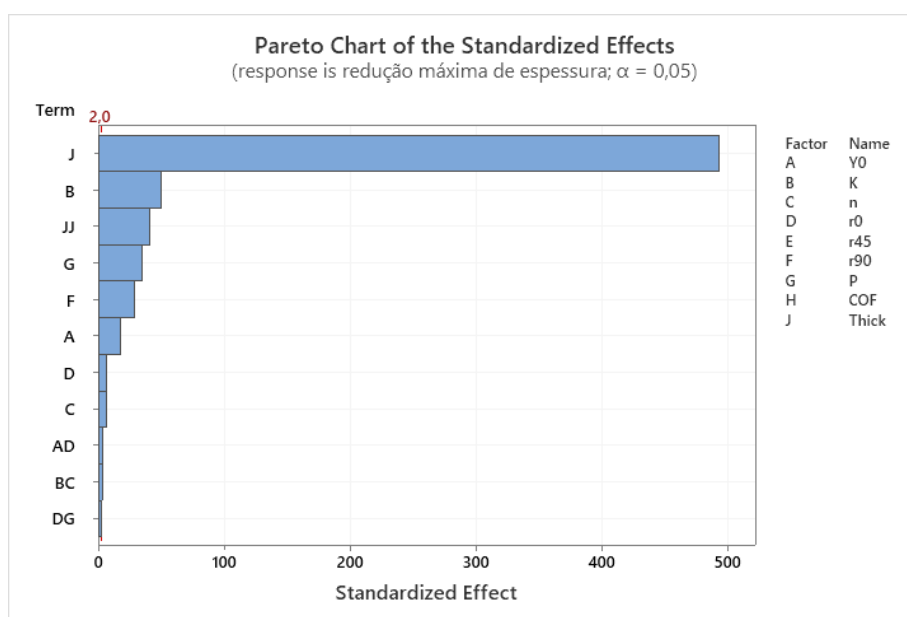


Figura 5.3. Influência dos parâmetros *input* no modelo simplificado da RedEsp.

O modelo simplificado para a altura máxima de pólo foi obtido da mesma forma. Isto é, identificaram-se os parâmetros mais influentes na resposta, desprezando aqueles que são menos significativos. A equação da superfície de resposta, para o modelo simplificado da altura máxima de pólo, é dada pela equação:

$$\begin{aligned} \text{altura de pólo} = & -4,34 - 0,00633 Y_0 - 0,003626 K + 1,642 n + 2,68 r_0 + 1,161 r_{90} + 0,2434 P \\ & + 58,0 \text{COF} + 0,00728 Y_0 * r_0 - 0,0797 Y_0 * \text{COF} - 0,0995 r_0 * P - 19,45 r_{90} * \text{COF} \end{aligned} \quad (5.5)$$

Neste modelo simplificado da altura de pólo, obteve-se um coeficiente de correlação $R^2 = 98.43\%$. Em comparação com o modelo inicial da altura de pólo, verifica-se que R^2 é ligeiramente inferior. Mas, esta diferença não é significativa, tendo em conta o que se ganha, ao se construir um modelo simplificado, com menos termos.

A Figura 5.4 mostra o correspondente diagrama de Pareto que, ao simplificar o modelo da altura de pólo, não altera qualitativamente o resultado.

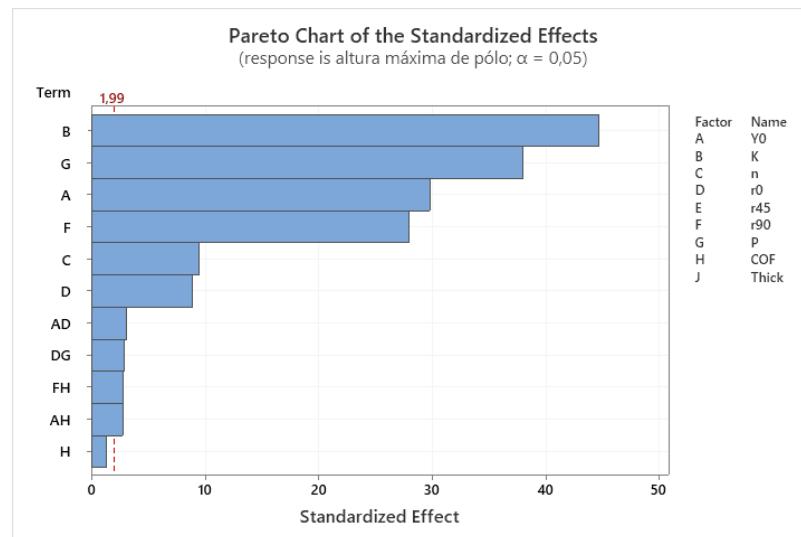


Figura 5.4. Influência dos parâmetros *input* no modelo simplificado da AltPolo.

5.4. Conclusões da Análise de Sensibilidade

A equação da superfície de resposta é um modelo matemático que define, para todas as 97 experiências realizadas, a relação entre *inputs* e cada um dos *outputs*. Na sua definição consideraram-se inicialmente todos os parâmetros de *input* e suas interações. A análise de sensibilidade permitiu identificar os parâmetros mais influentes na altura máxima de pólo e na redução máxima de espessura, o que conduziu à simplificação do modelo, por eliminação dos parâmetros de *input* menos influentes. No modelo simplificado, apenas a interação Esp_i^2 mudou de lugar na análise de redução máxima de espessura.

A espessura inicial é o parâmetro que tem maior influência na redução máxima de espessura, isto é, quanto maior a Esp_i , maior a redução máxima de espessura e conseqüentemente maior a probabilidade de fratura. O parâmetro K da lei de Swift, é o parâmetro que tem o maior efeito na altura máxima de pólo, ou seja, quanto menor for K , maior será a altura máxima de pólo e conseqüentemente maior será a dimensão correspondente da secção do tubo. Logo, como estes são os parâmetros que mais afetam o resultado final, devem ser tidos em conta no projeto e na escolha do material. A redução de espessura está relacionada com o aparecimento da fissura e a altura de pólo com a geometria do tubo.

Na determinação da equação RSM foi considerado o Full Quadratic Model, visto existirem termos quadráticos importantes no modelo superfície de resposta, tanto respeitante à altura máxima de pólo como à redução máxima de espessura. Logo, quando se pretende descrever com precisão a relação entre *inputs* e *outputs*, tem de se ter em conta todos os termos que influenciam a resposta, isto é, os parâmetros e as suas interações. Os resultados numéricos foram ajustados por polinómios, que apresentam coeficientes de correlação elevados. No caso do modelo simplificado, a equação RSM para a redução máxima de espessura é a de melhor aproximação, visto que tem o maior coeficiente de correlação ($R^2 = 99.97\%$), em comparação com a equação RSM da altura máxima de pólo, que tem um coeficiente de correlação $R^2 = 98.43\%$.

5.5. Comparação entre DD3IMP e RSM

Para melhor avaliar a correspondência entre os resultados numéricos dados pelo DD3IMP e os previstos pelas equações de RSM simplificadas, nas Figuras 5.5 e 5.6 traçam-se, respetivamente, a redução máxima de espessura e a altura máxima de pólo, obtidas por estas equações em função dos respetivos resultados numéricos, para os 97 casos ensaiados.

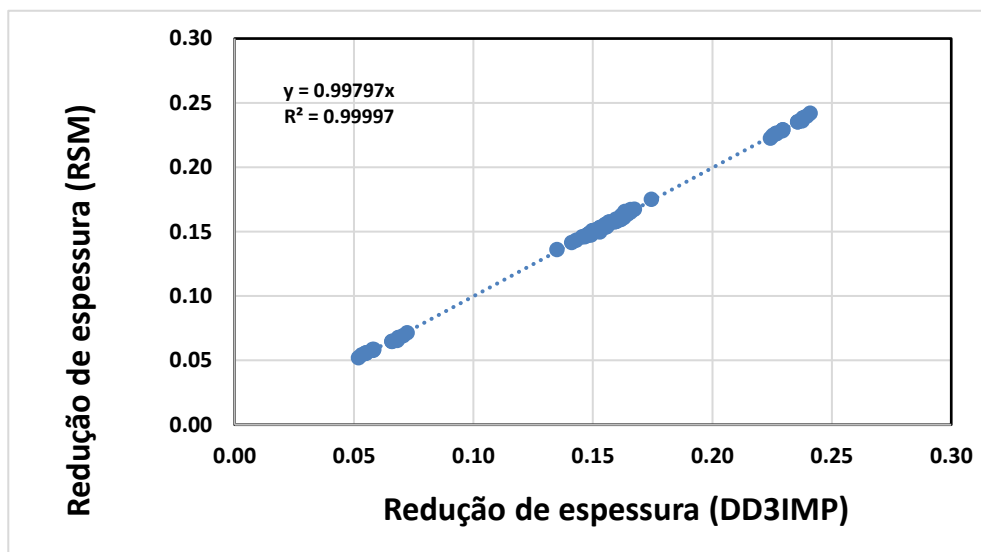


Figura 5.5. RedEsp do meta-modelo em função da RedEsp dos elementos finitos.

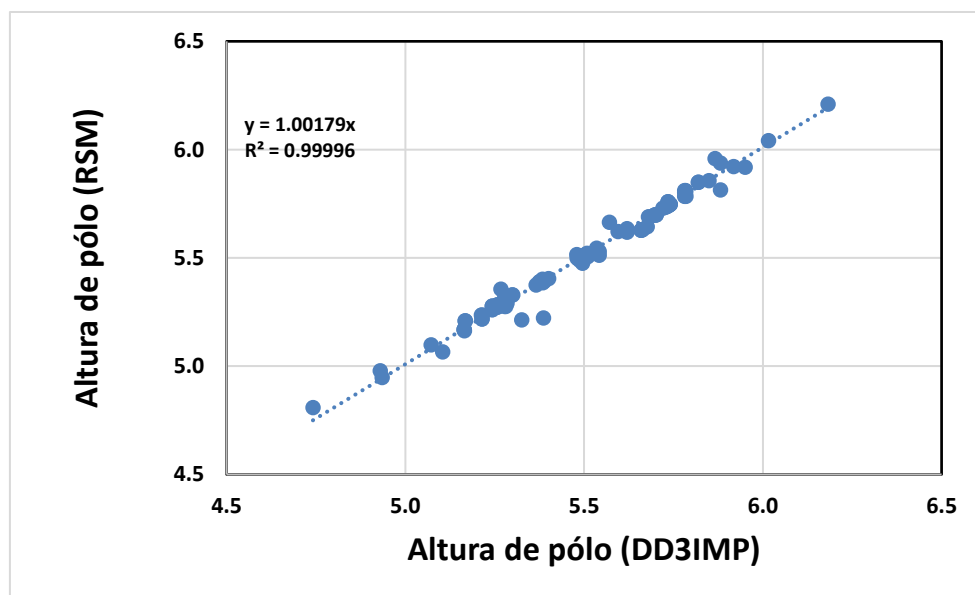


Figura 5.6. AltPolo do meta-modelo em função da AltPolo dos elementos finitos.

Esta análise constitui assim mais um teste à superfície de resposta, pois permitiu avaliar o grau de precisão na aproximação do meta-modelo aos resultados dos ensaios numéricos. O ajuste de uma reta a passar pela origem mostra que, em ambos os casos, a sua inclinação é próxima de 1 e o coeficiente de correlação apresenta quatro nove. Ou seja, o meta-modelo constitui uma excelente aproximação aos 97 ensaios realizados.

6. MÉTODO MONTE CARLO

A simulação Monte Carlo (MC) é baseada na geração de valores aleatórios de *input*. No caso presente, os valores gerados seguem uma distribuição normal, que é definida por um valor médio e um desvio padrão. Com este método, é possível gerar um grande número de valores aleatórios das variáveis de *input*, de forma a avaliar-se a variabilidade das variáveis de *output*, através da sua distribuição de probabilidade. Para gerar os valores de *input* usou-se o método *Data Analysis RNG (Random Number Generation)*, disponível no Excel e assumiu-se um valor médio, μ , e um desvio padrão σ para cada parâmetro de *input*. Os valores de *output* foram determinados utilizando as equações de RSM.

Após gerar os valores aleatórios para cada parâmetro de *input*, utilizou-se a equação superfície de resposta, para gerar os *outputs* correspondentes e analisar a sua distribuição de probabilidade. Neste capítulo analisam-se as distribuições de frequências da redução máxima de espessura e da altura máxima de pólo no tubo após hidroformação, para 100, 500, 1000 e 10000 valores aleatórios *input*. Este método, pode ser usado para se determinar a incerteza ou risco de um componente falhar. Por exemplo, a partir da distribuição de probabilidade da redução máxima de espessura, é possível identificar com que frequência poderão surgir pontos críticos de redução de espessura na peça. Ou, a partir da distribuição de probabilidade da altura máxima de pólo, poderão conhecer-se os valores mais prováveis, para perceber que percentagem de casos poderá estar fora da gama tamanhos admissíveis da secção do tubo a hidroformar.

6.1. Distribuição Normal

Os valores gerados pelo método Monte Carlo, seguem uma distribuição normal. A distribuição normal, foi investigada por matemáticos como Laplace e Gauss, para explicar diversos fenómenos naturais, como o movimento browniano e também no estudo de probabilidades nos jogos de fortuna ou azar ([Wikipédia, Distribuição Normal](#)).

Os valores dos parâmetros gerados podem ser caracterizados pela média, μ , e pelo desvio padrão, σ . A equação de densidade de probabilidade da distribuição normal é dada por:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (6.1)$$

A média e o desvio padrão são dados, respetivamente, pelas equações seguintes, em que n é o número total de valores:

$$\mu = \frac{\sum x_i}{n} \quad (6.2)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \mu)^2}{n}} \quad (6.3)$$

Numa distribuição normal, aproximadamente 68% dos valores estão no intervalo $[\mu - \sigma; \mu + \sigma]$, 95% dos valores estão no intervalo $[\mu - 2\sigma; \mu + 2\sigma]$ e 99,7% dos valores estão no intervalo $[\mu - 3\sigma; \mu + 3\sigma]$, como se mostra na Figura 6.1 (Amma, 2011).

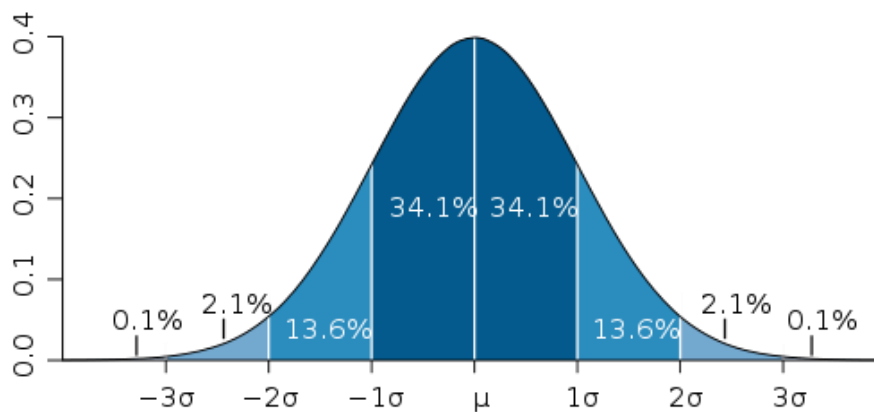


Figura 6.1. Distribuição Normal de Probabilidade (Amma, 2011).

De forma a obter uma proporção de 95% dos valores de *input* dentro de um determinado intervalo $[\mu - 2\sigma; \mu + 2\sigma]$ e apenas 5% de valores fora do intervalo (2,5% de cada lado), considerou-se o desvio padrão igual ao intervalo a dividir por quatro ($\sigma = \frac{int}{4}$), ou seja, nestas condições 95% dos valores de *input* ficam no intervalo $[\mu - \frac{int}{2}; \mu + \frac{int}{2}]$. O intervalo de variação corresponde à gama de valores que um determinado parâmetro de *input* foi considerado variar (10% ou 5% - ver Tabela 4.1). Deste modo, foram gerados, 100, 500, 1000 e 10000 valores *input* aleatórios (*RNG: Random Number Generation*), que obedecem a uma distribuição normal.

6.2. Valores aleatórios da RedEsp

Nas Figuras 6.2 a 6.5 mostram-se os histogramas relativos à redução máxima de espessura, obtidos gerando aleatoriamente 100, 500, 1000 e 10000 valores de cada variável de *input*, respetivamente.

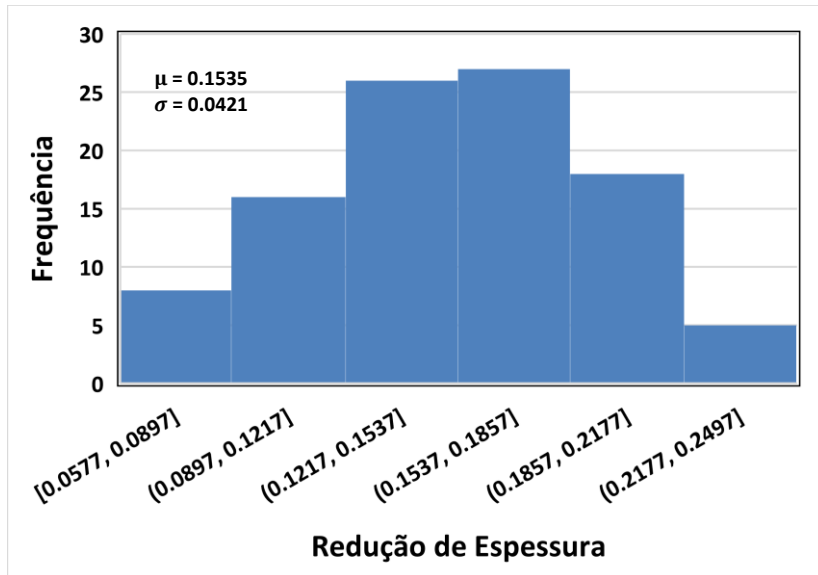


Figura 6.2. Frequência de ocorrência em função dos intervalos de redução máxima de espessura, para 100 valores.

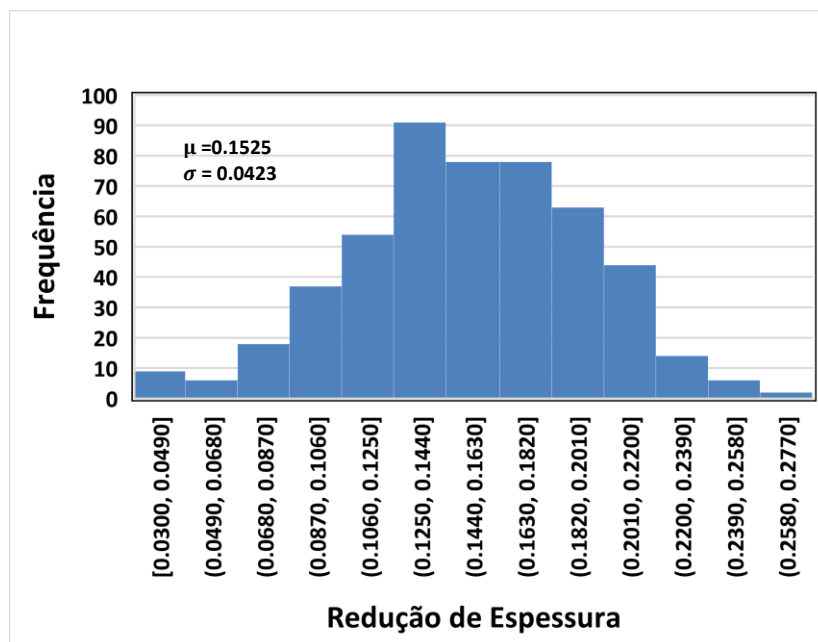


Figura 6.3. Frequência de ocorrência em função dos intervalos de redução máxima de espessura, para 500 valores.

6.3. Valores aleatórios da AltPolo

Nas Figuras 6.6 a 6.9, mostram-se os histogramas relativos à altura máxima de pólo, gerando aleatoriamente para 100, 500, 1000 e 10000 valores de cada variável de *input*, respetivamente.

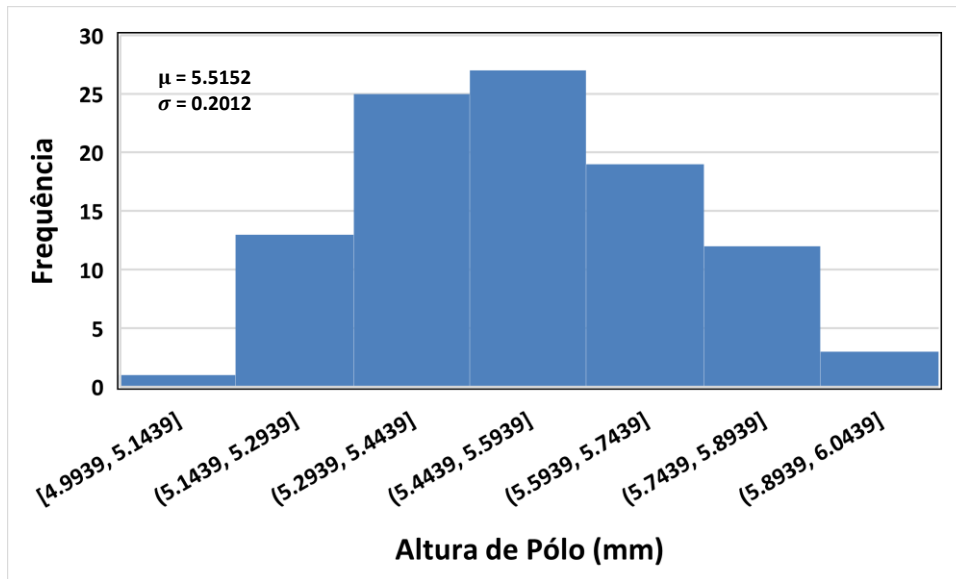


Figura 6.6. Frequência de ocorrência em função dos intervalos de altura máxima de pólo, para 100 valores.

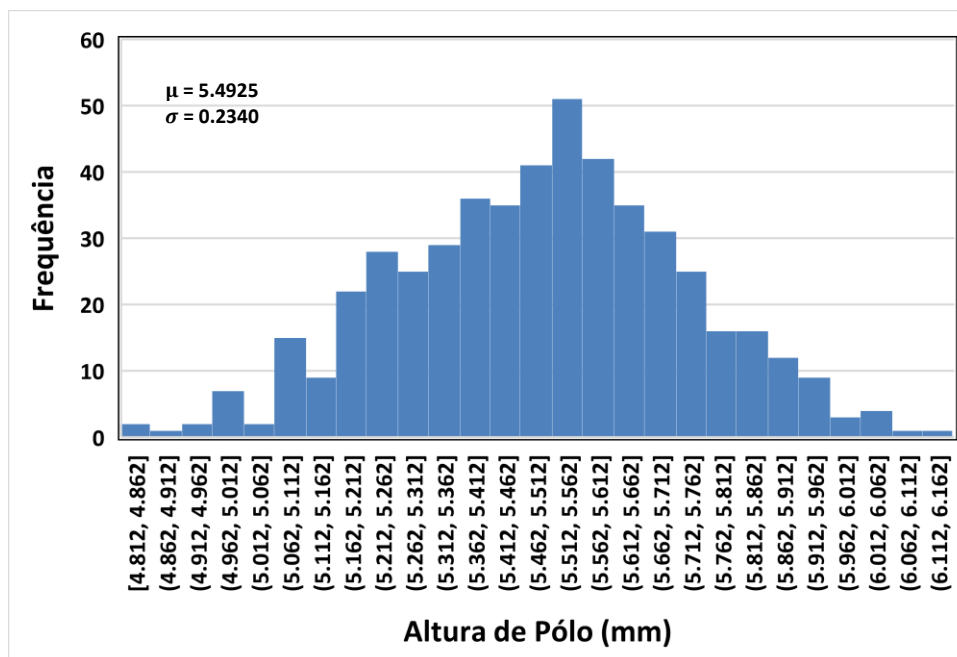


Figura 6.7. Frequência de ocorrência em função dos intervalos de altura máxima de pólo para 500 valores.

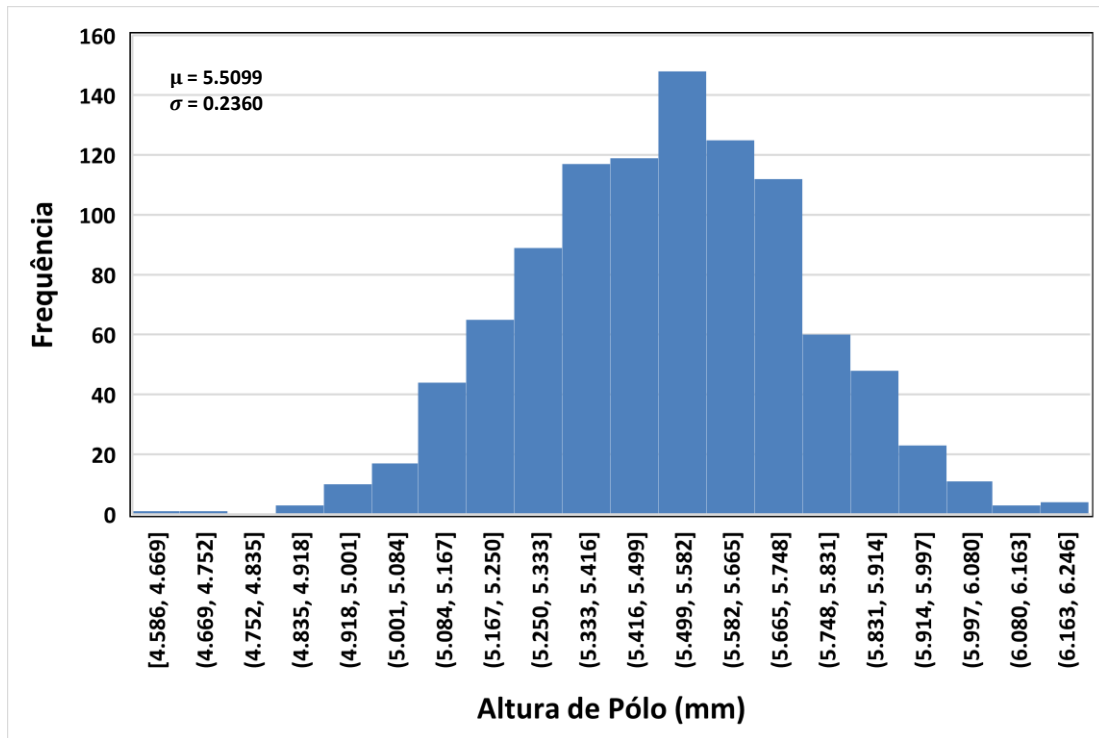


Figura 6.8. Frequência de ocorrência em função dos intervalos de altura máxima de pólo para 1 000 valores.

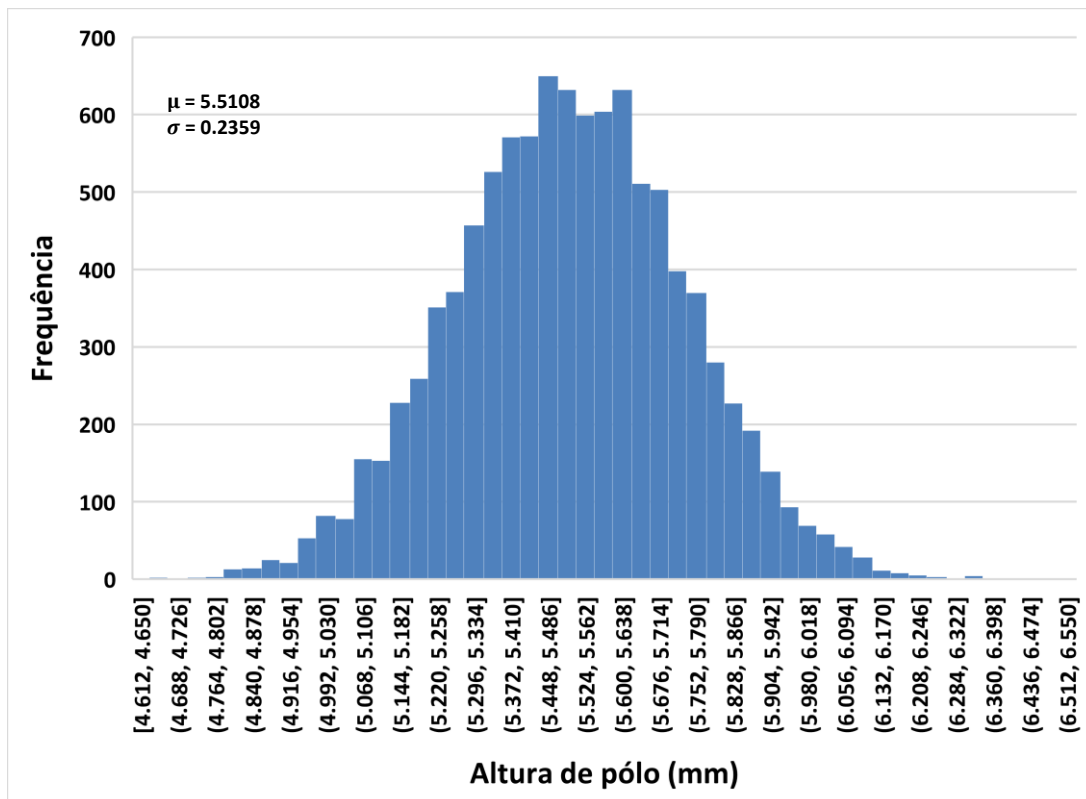


Figura 6.9. Frequência de ocorrência em função dos intervalos de altura máxima de pólo para 10 000 valores.

6.4. Resumo de resultados

A partir da geração de valores aleatórios de *input* foi possível obter os parâmetros de *output*, utilizando as respetivas equações de RSM. Nas Tabelas 6.1 e 6.2 apresentam-se os valores de média e desvio padrão respeitantes à redução de espessura e à altura de pólo, respetivamente, para os diversos valores aleatórios gerados. Os valores da média, μ , e do desvio padrão, σ , da distribuição dos parâmetros de *output* quase não dependem do número de valores aleatórios escolhido, desde 100 até 10 000 valores. Isto justifica que as 97 experiências realizadas no DD3IMP e o uso da superfície de resposta, são suficientes para a conveniente análise da simulação numérica da hidroformação de um tubo de matriz de secção quadrada. Deste modo, pôde avaliar-se a distribuição de probabilidade da redução de espessura, para averiguar como a espessura final mínima se vai distribuir nos tubos após conformação. Também é possível ter-se uma ideia no projeto das perdas que vão ocorrer para não se ultrapassar determinada gama de reduções de espessura, e assim evitar fratura. A partir da distribuição da altura de pólo, é também possível, o controlo da geometria final da peça no que diz respeito à dimensão relacionada com a altura máxima de pólo.

Tabela 6.1. Valores de μ e σ relativos à redução máxima de espessura para 100, 500, 1000, 10000 valores gerados.

	Redução máxima de espessura			
Nº de valores	100	500	1000	10000
Média	0.1535	0.1525	0.1540	0.1528
Desvio padrão	0.0421	0.0423	0.0424	0.0429

Tabela 6.2. Valores de μ e σ relativos à altura máxima de pólo para 100, 500, 1000 e 10000 valores gerados.

	Altura máxima de pólo			
Nº de valores	100	500	1000	10000
Média (mm)	5.5152	5.4925	5.5099	5.5108
Desvio padrão (mm)	0.2012	0.2340	0.2360	0.2359

7. CONCLUSÕES E PERSPETIVAS

Neste trabalho foi realizado um estudo sobre a influência da variabilidade dos parâmetros do material e do processo de hidroformação na redução máxima de espessura e na altura máxima de pólo, durante o processo de hidroformação de um tubo. Para tal, desenharam-se 97 experiências de hidroformação, recorrendo ao método *Box Behnken*. As experiências de hidroformação de tubos numa matriz de secção quadrada, foram realizadas por simulação numérica, utilizando o software DD3IMP. O seu número revelou-se suficiente para a análise de variabilidade pretendida, apesar do elevado número de variáveis de entrada consideradas. A aplicação do método da superfície de resposta possibilitou o enquadramento analítico dos resultados e a análise de sensibilidade possibilitou a simplificação da resposta e a otimização do modelo. Além disso, a análise de sensibilidade tornou possível conhecer os parâmetros de entrada que mais influenciam os resultados. Constatou-se, que o parâmetro que mais influencia a redução máxima de espessura é a espessura inicial, e o que mais influencia a altura máxima de pólo é o parâmetro K da lei de Swift. Assim, na fase de projeto, deve dar-se especial atenção a estes parâmetros críticos e a todos os outros que também têm um peso relativo na resposta do material durante o processo de hidroformação. Finalmente, o método Monte Carlo, permitiu completar um estudo robusto e aprofundado da hidroformação de tubos, constituindo uma base estatística importante de informação do projeto, no que diz respeito à percentagem de casos em que aparecem pontos críticos de redução máxima de espessura e também às gamas mais prováveis de valores de altura máxima de pólo do tubo.

Este trabalho foi realizado considerando algumas simplificações. Por exemplo, para realizar as simulações admitiu-se que todos os parâmetros de entrada variam $\pm 10\%$ em torno do valor médio, com exceção da pressão máxima atingida no processo que varia $\pm 5\%$, e na análise relativa ao método de Monte Carlo, considerou-se que os parâmetros de entrada seguem uma distribuição normal. Estudos experimentais permitiriam validar esta opção ou sugerir intervalos de análise e distribuições de probabilidade alternativas, a aplicar a situações reais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alaswad, A., Benyounis, K. Y., & Olabi, A. G. (2012). “Tube hydroforming process: A reference guide”, *Materials & Design*, 33, 328-339. doi.org/10.1016/j.matdes.2011.07.052

AMMA (2011). “Distribuição Normal”, *A Casinha da Matemática*, Novembro 2011. <https://www.acasinhadamatematica.pt/?p=7162>

Ahmetoglu, M., Sutter, K., Li, X. J., & Altan, T. (2000). “Tube hydroforming: current research, applications and need for training”, *Journal of Materials Processing Technology*, 98(2), 224-231. [doi.org/10.1016/S0924-0136\(99\)00203-4](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(99)00203-4)

Bell, C., Corney, J., Zuelli, N., & Savings, D. (2019). “A state of the art review of hydroforming technology”, *International Journal of Material Forming*, 13, 789–828. doi.org/10.1007/s12289-019-01507-1

Bortolussi, R., & Button, S. (2001). “Simulação do Processo de Hidroconformação de Tubos”.

Callister, W. (2008). “Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução”, 7ª Ed., LTC.

Fernandes, J. V. (2020). Apontamentos da disciplina de Elasticidade e Plasticidade.

Fuchizawa, S., & Narazaki, M. (1993). “Bulge test for determining stress–strain characteristics of thin tubes”, *Proceedings of the fourth ICTP advanced technology of plasticity*, 488-493.

Hill, R. (1948). “A theory of yielding and plastic flow of anisotropic metals”, *Proceedings of the Royal Society of London*, 193^a, 281-297. doi.org/10.1098/rspa.1948.0045

Jain, N., Wang, J., & Alexander, R. (2004). “Finite element analysis of dual hydroforming processes”, *Journal of Materials Processing Technology*, 145(1), 59-65. [doi.org/10.1016/S0924-0136\(03\)00862-8](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(03)00862-8)

Khalfallah, A., Oliveira, M. C., Alves, J. L., Zribi, T., Belhadjsalah, H., & Menezes, L. F. (2015a). “Mechanical characterization and constitutive parameter identification of anisotropic tubular materials for hydroforming applications”, *International Journal of Mechanical Sciences*, 104, 91-103. doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2015.09.017

Khalfallah, A., Alves, J. L., Oliveira, M. C., & Menezes, L. F. (2015b). “Influence of the characteristics of the experimental data set used to identify anisotropy parameters”, *Simulation Modelling Practice and Theory*, 53, 15-44. doi.org/10.1016/j.simpat.2015.02.007

Khalfallah, A., Oliveira, M. C., Alves, J. L., & Menezes, L. F. (2020). “Constitutive parameter identification of CB2001 yield function and its experimental verification using tube hydroforming tests”, *International Journal of Mechanical Sciences*, 185, 105868. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2020.105868>

Khalfallah, A. (2021). Comunicação pessoal

Khalfallah, A., Prates, P. A., & Fernandes, J. V. (2021). “Effect of input variables uncertainty in free tube hydroforming process”, 24th International Conference on Material Forming. <https://popups.uliege.be/esaform21/index.php?id=2364>

Lekou, D. J. (2013). “Advances in Wind Turbine Blade Design and Materials”, Woodhead Publishing Series in Energy, Chapter 10 – Probabilistic design of wind turbine blades, 325-359. doi.org/10.1533/9780857097286.2.325

Morphy, G. (1998). "Tube hydroforming: dimensional capability analysis of a high volume automotive. In *SAE Conference Proceedings P. Soc Automotive Engineers*.

Morphy, G. (2001). “Pressure-sequence and high-pressure hydroforming: Knowing the processes can mean boosting profits”, *The Tube & Pipe Journal*, February, 2001.

Menezes, L. F., & Teodosiu, C. (2000). “Three-dimensional numerical simulation of the deep-drawing process using solid finite elements”, *Journal of Materials Processing Technology*, 97(1-3), 100-106. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(99\)00345-3](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(99)00345-3)

Nikhare, C., Weiss, M., & Hodgson, P.D. (2009). “FEA comparison of high and low pressure tube hydroforming of TRIP steel”, *Computational Materials Science* 47(1), 146-152. doi.org/10.1016/j.commatsci.2009.06.024

Oliveira, M. C., Alves, J. L., & Menezes, L. F. (2008). “Algorithms and Strategies for Treatment of Large Deformation Frictional Contact in the Numerical Simulation of Deep Drawing Process”, *Archives of Computational Methods in Engineering*, 15, 113-162. <https://doi.org/10.1007/s11831-008-9018-x>

Song, W. J., Kim, J., & Kang, B. S. (2007). “Experimental and analytical evaluation on flow stress of tubular material for tube hydroforming simulation”, *Journal of Materials Processing Technology*, 191(1-3), 368-371. doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.03.034

Song, W. J., Heo, S. C., Ku, T. W., Kim, J., & Kang, B. S. (2010). “Evaluation of effect of flow stress characteristics of tubular material on forming limit in tube hydroforming process”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 50(9), 753-764. doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2010.05.010

Strano, M., & Altan T. (2004). “An inverse energy approach to determine the flow stress of tubular materials for hydroforming applications”, *Journal of Materials Processing Technology*, 146(1), 92-96. doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2003.07.016

Teixeira, L. M. L. (2007). “SIMULAÇÃO DO PROCESSO DE HIDROFORMAGEM”. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Wikipédia, Monte Carlo:

https://pt.wikipedia.org/wiki/M%C3%A9todo_de_Monte_Carlo

Wikipédia, Distribuição normal:

https://pt.wikipedia.org/wiki/Distribui%C3%A7%C3%A3o_normal

Xu, Y., Chan, L. C., Tsien, Y. C., Gao, L., & Zheng, P. F. (2008). “Prediction of work-hardening coefficient and exponential by adaptive inverse finite element method for tubular material”, *Journal of Materials Processing Technology*, 201(1-3), 413-418. doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.11.269

Zribi, T., Khalfallah, A., Belhadjsalah, H. (2013). “Experimental characterization and inverse constitutive parameters identification of tubular materials for tube hydroforming process”, *Materials & Design*, 49, 866-877. doi.org/10.1016/j.matdes.2013.02.077

ENDEREÇOS INTERNET:

- (A) - https://www.researchgate.net/figure/Comparison-of-a-a-non-hydroformed-s-rail-and-b-a-hydroformed-s-rail_fig15_238676883
- (B) - <https://www.fischer-group.com/en/processes/hydroforming>
- (C) - <https://www.hydraulic-press-lienchieh.com/hydroforming-press.html>
- (D) - <https://formingworld.com/springback-in-tube-hydroformed-parts/>
- (E) - <https://www.consultaauto.com.br/blog/informativo/o-que-e-o-chassi>
- (F) - <https://www.fischer-group.com/en/applications/automotive-1#ac-0>
- (G) - <https://www.fischer-group.com/en/applications/automotive-1#ac-1>
- (H) - <https://www.thefabricator.com/tubepipejournal/article/hydroforming/introduction-to-tube-hydroforming>
- (I) - <http://www.h-htube.com/hydroformed-spout.html>
- (J) - <https://kuschall.com/international-en/products/k-series/>
- (K) - <https://www.bike-advisor.com/what-is-hydroforming/>

ANEXO – ENSAIOS REALIZADOS

Na tabela A.1 mostram-se todos os 97 casos simulados, indicando os valores dos parâmetros de entrada e respetivos parâmetros de saída do processo de hidroformação de tubos numa matriz de secção quadrada.

Tabela A.1. Parâmetros de entrada e respetivas respostas para a totalidade das 97 experiências realizadas.

Nº exp	Y0 (MPa)	K (MPa)	n	r0	r45	r90	P (MPa)	COF	Esp _i (mm)	RedEsp	AltPolo (mm)
1	368.0	780.4	0.366	1.628	1.012	1.359	50.00	0.120	1.070	0.1620	5.735
2	368.0	858.4	0.366	1.332	0.920	1.510	50.00	0.120	0.963	0.0519	5.164
3	404.8	780.4	0.366	1.332	0.920	1.510	52.50	0.120	1.070	0.1566	5.484
4	331.2	858.4	0.329	1.480	0.920	1.510	50.00	0.120	1.070	0.1482	5.267
5	368.0	702.3	0.366	1.480	0.920	1.359	52.50	0.120	1.070	0.1744	6.182
6	368.0	780.4	0.366	1.628	1.012	1.661	50.00	0.120	1.070	0.1518	5.374
7	404.8	780.4	0.366	1.480	0.828	1.510	50.00	0.120	0.963	0.0578	5.280
8	368.0	858.4	0.366	1.480	0.828	1.510	50.00	0.108	1.070	0.1472	5.214
9	368.0	780.4	0.366	1.480	0.920	1.510	52.50	0.108	0.963	0.0685	5.735
10	331.2	780.4	0.366	1.628	0.920	1.510	47.50	0.120	1.070	0.1544	5.500
11	368.0	780.4	0.366	1.480	0.920	1.510	50.00	0.120	1.070	0.1558	5.512
12	368.0	702.3	0.366	1.480	1.012	1.510	50.00	0.132	1.070	0.1645	5.781
13	368.0	780.4	0.403	1.480	0.920	1.359	50.00	0.120	0.963	0.0689	5.741
14	368.0	780.4	0.329	1.628	0.920	1.510	50.00	0.108	1.070	0.1550	5.479
15	404.8	780.4	0.366	1.480	1.012	1.510	50.00	0.120	0.963	0.0582	5.278

16	331.2	780.4	0.366	1.332	0.920	1.510	47.50	0.120	1.070	0.1525	5.401
17	404.8	780.4	0.366	1.480	0.920	1.359	50.00	0.108	1.070	0.1567	5.486
18	331.2	780.4	0.366	1.480	0.920	1.359	50.00	0.108	1.070	0.1634	5.881
19	368.0	858.4	0.366	1.480	1.012	1.510	50.00	0.132	1.070	0.1476	5.214
20	368.0	780.4	0.403	1.332	0.920	1.510	50.00	0.108	1.070	0.1561	5.508
21	331.2	780.4	0.366	1.480	0.828	1.510	50.00	0.120	1.177	0.2356	5.702
22	404.8	780.4	0.366	1.332	0.920	1.510	47.50	0.120	1.070	0.1430	4.935
23	331.2	780.4	0.366	1.332	0.920	1.510	52.50	0.120	1.070	0.1634	5.866
24	368.0	780.4	0.403	1.480	0.920	1.661	50.00	0.120	1.177	0.2293	5.388
25	368.0	780.4	0.329	1.480	0.920	1.661	50.00	0.120	0.963	0.0551	5.257
26	368.0	702.3	0.366	1.480	0.920	1.359	47.50	0.120	1.070	0.1636	5.720
27	331.2	780.4	0.366	1.480	0.920	1.359	50.00	0.132	1.070	0.1637	5.881
28	368.0	702.3	0.366	1.480	1.012	1.510	50.00	0.108	1.070	0.1645	5.781
29	331.2	780.4	0.366	1.628	0.920	1.510	52.50	0.120	1.070	0.1646	5.950
30	368.0	702.3	0.366	1.480	0.920	1.661	47.50	0.120	1.070	0.1544	5.366
31	368.0	858.4	0.366	1.480	0.920	1.661	52.50	0.120	1.070	0.1487	5.284
32	368.0	780.4	0.366	1.480	0.920	1.510	52.50	0.108	1.177	0.2378	5.735
33	404.8	702.3	0.403	1.480	0.920	1.510	50.00	0.120	1.070	0.1618	5.570
34	368.0	702.3	0.366	1.628	0.920	1.510	50.00	0.120	0.963	0.0722	5.820
35	331.2	702.3	0.329	1.480	0.920	1.510	50.00	0.120	1.070	0.1657	5.918
36	368.0	780.4	0.403	1.480	1.012	1.510	47.50	0.120	1.070	0.1501	5.298

37	368.0	780.4	0.329	1.480	0.920	1.661	50.00	0.120	1.177	0.2269	5.257
38	368.0	858.4	0.366	1.480	0.920	1.359	52.50	0.120	1.070	0.1598	5.677
39	368.0	702.3	0.366	1.332	0.920	1.510	50.00	0.120	1.177	0.2396	5.729
40	368.0	780.4	0.403	1.480	0.920	1.661	50.00	0.120	0.963	0.0581	5.386
41	404.8	780.4	0.366	1.480	0.920	1.661	50.00	0.108	1.070	0.1490	5.386
42	368.0	702.3	0.366	1.628	0.920	1.510	50.00	0.120	1.177	0.2409	5.820
43	368.0	780.4	0.366	1.480	0.920	1.510	47.50	0.132	0.963	0.0550	5.243
44	368.0	858.4	0.366	1.480	1.012	1.510	50.00	0.108	1.070	0.1473	5.213
45	368.0	858.4	0.366	1.480	0.920	1.661	47.50	0.120	1.070	0.1350	4.741
46	368.0	780.4	0.329	1.480	0.920	1.359	50.00	0.120	1.177	0.2375	5.659
47	368.0	780.4	0.366	1.480	0.920	1.510	47.50	0.108	0.963	0.0547	5.242
48	368.0	702.3	0.366	1.480	0.828	1.510	50.00	0.108	1.070	0.1643	5.784
49	368.0	858.4	0.366	1.480	0.828	1.510	50.00	0.132	1.070	0.1475	5.214
50	368.0	858.4	0.366	1.628	0.920	1.510	50.00	0.120	0.963	0.0532	5.257
51	368.0	702.3	0.366	1.480	0.920	1.661	52.50	0.120	1.070	0.1657	5.849
52	368.0	702.3	0.366	1.480	0.828	1.510	50.00	0.132	1.070	0.1643	5.784
53	368.0	702.3	0.366	1.332	0.920	1.510	50.00	0.120	0.963	0.0706	5.729
54	331.2	780.4	0.366	1.480	0.828	1.510	50.00	0.120	0.963	0.0658	5.702
55	368.0	780.4	0.403	1.480	0.828	1.510	52.50	0.120	1.070	0.1620	5.784
56	331.2	780.4	0.366	1.480	0.920	1.661	50.00	0.132	1.070	0.1556	5.542
57	368.0	780.4	0.329	1.480	0.828	1.510	47.50	0.120	1.070	0.1484	5.167

58	331.2	780.4	0.366	1.480	1.012	1.510	50.00	0.120	1.177	0.2357	5.698
59	404.8	702.3	0.329	1.480	0.920	1.510	50.00	0.120	1.070	0.1629	5.534
60	368.0	780.4	0.403	1.480	0.920	1.359	50.00	0.120	1.177	0.2382	5.741
61	368.0	780.4	0.403	1.480	1.012	1.510	52.50	0.120	1.070	0.1623	5.781
62	368.0	858.4	0.366	1.628	0.920	1.510	50.00	0.120	1.177	0.2253	5.257
63	368.0	858.4	0.366	1.480	0.920	1.359	47.50	0.120	1.070	0.1465	5.165
64	404.8	858.4	0.329	1.480	0.920	1.510	50.00	0.120	1.070	0.1411	4.929
65	404.8	780.4	0.366	1.480	0.920	1.359	50.00	0.132	1.070	0.1571	5.487
66	331.2	780.4	0.366	1.480	0.920	1.661	50.00	0.108	1.070	0.1554	5.541
67	368.0	780.4	0.403	1.332	0.920	1.510	50.00	0.132	1.070	0.1565	5.509
68	368.0	780.4	0.329	1.480	1.012	1.510	47.50	0.120	1.070	0.1486	5.166
69	331.2	780.4	0.366	1.480	1.012	1.510	50.00	0.120	0.963	0.0659	5.698
70	368.0	858.4	0.366	1.332	0.920	1.510	50.00	0.120	1.177	0.2243	5.164
71	368.0	780.4	0.329	1.332	0.920	1.510	50.00	0.132	1.070	0.1532	5.384
72	404.8	780.4	0.366	1.628	0.920	1.510	47.50	0.120	1.070	0.1529	5.325
73	368.0	780.4	0.366	1.480	0.920	1.510	47.50	0.132	1.177	0.2269	5.243
74	331.2	858.4	0.403	1.480	0.920	1.510	50.00	0.120	1.070	0.1530	5.495
75	331.2	702.3	0.403	1.480	0.920	1.510	50.00	0.120	1.070	0.1674	6.015
76	404.8	780.4	0.366	1.628	0.920	1.510	52.50	0.120	1.070	0.1596	5.595
77	368.0	780.4	0.403	1.628	0.920	1.510	50.00	0.132	1.070	0.1593	5.620
78	368.0	780.4	0.366	1.628	0.828	1.359	50.00	0.120	1.070	0.1617	5.738

79	368.0	780.4	0.366	1.480	0.920	1.510	47.50	0.108	1.177	0.2266	5.242
80	368.0	780.4	0.366	1.332	0.828	1.661	50.00	0.120	1.070	0.1498	5.280
81	368.0	780.4	0.366	1.332	0.828	1.359	50.00	0.120	1.070	0.1614	5.663
82	368.0	780.4	0.366	1.332	1.012	1.359	50.00	0.120	1.070	0.1618	5.661
83	368.0	780.4	0.403	1.480	0.828	1.510	47.50	0.120	1.070	0.1497	5.300
84	404.8	780.4	0.366	1.480	0.828	1.510	50.00	0.120	1.177	0.2293	5.279
85	404.8	780.4	0.366	1.480	0.920	1.661	50.00	0.132	1.070	0.1492	5.104
86	368.0	780.4	0.329	1.480	1.012	1.510	52.50	0.120	1.070	0.1615	5.680
87	404.8	858.4	0.403	1.480	0.920	1.510	50.00	0.120	1.070	0.1455	5.072
88	368.0	780.4	0.366	1.480	0.920	1.510	52.50	0.132	1.177	0.2381	5.735
89	368.0	780.4	0.329	1.480	0.828	1.510	52.50	0.120	1.070	0.1614	5.683
90	368.0	780.4	0.403	1.628	0.920	1.510	50.00	0.108	1.070	0.1591	5.619
91	404.8	780.4	0.366	1.480	1.012	1.510	50.00	0.120	1.177	0.2295	5.278
92	368.0	780.4	0.329	1.628	0.920	1.510	50.00	0.132	1.070	0.1553	5.480
93	368.0	780.4	0.366	1.332	1.012	1.661	50.00	0.120	1.070	0.1500	5.278
94	368.0	780.4	0.366	1.628	0.828	1.661	50.00	0.120	1.070	0.1517	5.377
95	368.0	780.4	0.329	1.332	0.920	1.510	50.00	0.108	1.070	0.1528	5.384
96	368.0	780.4	0.329	1.480	0.920	1.359	50.00	0.120	0.963	0.0681	5.659
97	368.0	780.4	0.366	1.480	0.920	1.510	52.50	0.132	0.963	0.0688	5.735