



Universidade do Porto
FEUP Faculdade de
Engenharia



Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais

Análise técnica e económica do processo de estampagem a quente com aços microligados ao boro

- Aplicação da simulação numérica nos estudos de factibilidade e estimativa de custos do processo de estampagem a quente em relação ao convencional a frio -

Tiago José Martinho Soares

Dissertação para Mestrado Integrado em
Engenharia Metalúrgica e de Materiais

Trabalho realizado sob a orientação de
Professor Doutor Manuel Vieira
Engenheiro Fernando Ribeiro
Doutor Engenheiro António Baptista

PORTO
2008

<i>CANDIDATO</i>	Tiago José Martinho Soares		<i>Código</i>	070508006
<i>TÍTULO</i>	Análise técnica e económica do processo de estampagem a quente com aços microligados ao Boro			
<i>DATA</i>	3 de Novembro de 2008			
<i>LOCAL</i>	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto - Sala C-603 - 9h00			
<i>JÚRI</i>	<i>Presidente</i>	Professor Doutor Luís Filipe Malheiros Freitas Ferreira	DEMM/FEUP	
	<i>Arguente</i>	Professor Doutor Aníbal José Reis Guedes	DEM/EEUM	
	<i>Orientador</i>	Professor Doutor Manuel Fernando Gonçalves Vieira	DEMM/FEUP	
	<i>Co-Orientador</i>	Doutor António Baptista	SODECIA	

Agradecimentos

As palavras com que vou compor as frases desta página não conseguirão jamais exprimir a admiração, estima e profundo sentimento de gratidão que guardo para com as pessoas que estão, directa ou indirectamente, aqui citadas. Contudo, elas visam traduzir que este trabalho está muito longe de poder ser considerado como pessoal. Na verdade, ele representa a contribuição generosa de todos os que, quer de forma profissional, quer pessoal, me auxiliaram a cumprir esta missão.

Em primeiro lugar agradeço ao Prof. Doutor Manuel Vieira, orientador deste trabalho, pela possibilidade de realização de um trabalho na área de estampagem a quente, pela sua total entrega e disponibilidade no acompanhamento e aconselhamento prestado, baseado na sua elevada experiência profissional e científica, sem a qual não seria possível a realização deste trabalho.

Tenho a exprimir o meu agradecimento ao Engenheiro Fernando Ribeiro, pelo desafio de investigação que me lançou, pelos seus elevados conhecimentos e competências que possui e que procurou transmitir ao longo de todo este trabalho. A sua inteira disponibilidade, o seu companheirismo, a sua motivação, o seu incentivo, a sua confiança e o seu apoio contribuíram para o trabalho de investigação reportado na presente dissertação.

Ao excelente companheiro de trabalho e amigo o Doutor Engenheiro António Baptista, um muito especial agradecimento por me ter orientado e ter proporcionado aprender, bem como o auxílio, os estímulos e a pronta e inteira disponibilidade para melhor desenvolver e responder às minhas solicitações deste trabalho. Os meus sinceros agradecimentos.

A todos os meus colegas de trabalho da SODECIA Centro Tecnológico, que me ofereceram camaradagem e disponibilizaram os seus conhecimentos e recursos para a realização deste trabalho, os meus sinceros agradecimentos. A amizade e boa disposição pelo excelente ambiente de trabalho e companheirismo proporcionado, um grande bem-haja aos colegas:

*Eng. Joubert Prado (Director do Centro Tecnológico SODECIA)
Eng. Paulo Gomes (CostEstimator)
Eng. Nuno Merendeiro (Engenheiro de Produto)
Eng. José Silva (Gestor de Projectos)
ao projectista Vítor Caló (Desenhador CAD)*

Um gesto de gratidão para com a entidade AUTOFORM, pela disponibilidade do software utilizado no desenvolvimento do estudo em questão – módulo “Hotforming” (versão “alfa 2”).

Finalmente, a todos e a cada um, que directa ou indirectamente contribuíram com o seu apoio incondicional para a concretização deste objectivo profissional e pessoal, aqui encontrem a minha sincera e inteira gratidão,

Com os meus agradecimentos e cumprimentos.

A toda a minha família e amigos, em especial aos meus Pais e à minha “cara-metade” Cláudia Ferreira expresso um profundo agradecimento pelo apoio incondicional, incentivo e compreensão pela minha ausência em momentos de extrema importância,

Um muito obrigado.

RESUMO

Os objectivos deste trabalho enquadram-se num alargamento do conhecimento da tecnologia do processo de estampagem a quente, com a aplicação de aços microligados ao boro. A parte introdutória apresenta o enquadramento entre as necessidades da indústria automóvel associada à evolução dos materiais metálicos ferrosos, em especial a dos aços de alto limite elástico, e fenómenos associados à sua transformação. Este capítulo foca em particular a tecnologia de estampagem a quente descrevendo todo o método de processamento. Procede-se igualmente a uma resenha global sobre os aços microligados ao boro indicados para o processo em estudo, nomeadamente os aspectos metalúrgicos, a descrição das transformações microestruturais e às suas implicações na recristalização dinâmica. Em particular, são analisadas as características específicas do elemento boro na temperabilidade a quente dos aços de baixo carbono e alguns exemplos de aplicações práticas. No segundo capítulo são referidas as potencialidades de um popular programa comercial de simulação numérica para efectuar estudos de factibilidade; são estudadas diferentes abordagens no desenvolvimento de métodos de fabrico, desde a evolução dos materiais às evoluções dos próprios processos de transformação, isto em dois exemplos de peças estruturais de carroçaria automóvel (barra de impacto da porta frontal e um pilar B). As simulações do processo de estampagem a frio foram efectuadas com o módulo Autoform™-Incremental V4.1.1, enquanto que nas simulações de estampagem a quente foi utilizado o módulo Autoform™-Hotforming. Os estudos de análise da factibilidade através da simulação do processo de estampagem a quente foram efectuados utilizando o sistema directo e/ou indirecto, para o intervalo de temperaturas de 850 a 1200°C. No terceiro capítulo é realizada uma análise económica ao nível da estimativa de custos, que visa comparar os custos de investimento associados ao processo convencional (frio) e à estampagem a quente, apresentando-se uma análise de custos detalhada e respectivo preço peça para os dois casos de peças estruturais. Assim, os elementos essenciais para melhor analisar os custos associados à tecnologia são alvo de uma avaliação, como meio de preparação de uma possível aplicação industrial a médio/longo prazo.

PALAVRAS-CHAVE

Estampagem a Quente; Aços “nova geração”; Aços microligados ao boro;
Simulação Numérica de Estampagem; Módulo “Hotforming”; Análise Económica

ABSTRACT

The objectives of this work are within the purpose of increasing the knowledge on the field of the hot stamping process making use of boron steels. The introduction of this thesis presents the framework between the development of automotive industry and the evolution of metallic materials, namely the high strength steels, and their specific stamping process characteristics. The chapter highlights specially the hot stamping process; and presents a global review on the boron steels, passing by their metallurgic characteristics, micro-structural transformations and the dynamic recrystallization. In particular, the specific characteristic of the boron element on the hot hardenability of the low carbon steels and described the some examples of practical applications. The second chapter makes the link between the theoretical and more practical aspects of the applied analysis, by using the capabilities of a commercial numerical simulation code of deep-drawing to perform feasibility studies. For that purpose two different approaches were used in the fabrication method, also analysing different material grades and process development, applied to different parts of an automotive body (front lateral impact beam and B-pillar). The simulations of the standard (cold) process were performed with the Autoform™ - Incremental V4.1.1 module, whereas the hot stamping processes were performed with Autoform™-Hotforming (alpha version module). The feasibility tests were carried out in the hot-forming process applying the direct and indirect systems, within the temperature range of 850-1200°C. In the third chapter is presented an economical analysis which describes extensively the costs related to the mass production of each structural part, comparing the standard (cold) process with the hot stamping process. With this, the essential elements to analyse the costs associated to the hot stamping technology are evaluated in order to prepare one possible industrial application in the mid/long term future.

KEYWORDS

Hot stamping; “New generation” steels; Micro-alloy boron steels;
Sheet metal forming simulation; Economical analysis

ÍNDICE

Capítulo 1 - Introdução	1
1.1 - Enquadramento.....	1
1.1.1 - Evolução dos Aços.....	3
1.1.2 - Classificação dos aços na área automóvel.....	4
1.2 - Processo de estampagem a quente (Hot stamping)	4
1.2.1 - Descrição do processo de estampagem a quente	4
1.2.2 - Tipos de processos de estampagem a quente - Sistema directo e indirecto	6
1.3 - Aspectos Metalúrgicos	8
1.3.1 - Transformação não isotérmica da austenite não eutectóide	8
1.3.2 - Domínio da fase martensítica	9
1.3.3 - Processos de recuperação - recristalização dinâmica (R.D.)	10
1.3.4 - Mecanismo de temperabilidade a quente dos aços microligados ao boro	11
1.4 - Aplicações actuais e tendências do mercado	14
1.5 - Objectivos do trabalho	16
Capítulo 2 - Estudos de factibilidade de peças estampadas	17
2.1 - Enquadramento.....	17
2.2 - Programa de simulação numérica de elementos finitos: AUTOFORM.....	18
2.2.1 - Simulação do processo de estampagem	18
2.2.2 - Simulação do processo de estampagem a quente - Módulo “Hotforming”	20
2.3 - Características dos materiais utilizados nas simulações.....	21
2.4 - Simulações de estampagem a frio	22
2.4.1 - Caracterização das simulações para a barra de impacto (caso 1)	22
2.4.2 - Resultados das simulações para a barra de impacto (caso 1)	24
2.4.3 - Caracterização das simulações para o pilar B (caso 2)	27
2.4.4 - Resultados das simulações para o pilar B (caso 2)	28
2.5 - Simulações de estampagem a quente	31
2.5.1 - Caracterização das simulações para a barra de impacto (caso 1)	32
2.5.2 - Resultados das simulações para a barra de impacto (caso 1)	34
2.5.3 - Caracterização das simulações para o pilar B (caso 2)	39
2.5.4 - Resultados das simulações para o pilar B (caso 2)	41

ÍNDICE

Capítulo 3 - Análise económica de peças estampadas	43
3.1 - Enquadramento.....	43
3.1.1 - Análise económica da produção de peças estampadas	44
3.1.2 - Disposição do sistema completo orçamentado de estampagem a quente	44
3.1.3 - Tecnologia de transformação considerada para a estampagem a quente	45
3.1.4 - Tempos de ciclo de produção (cadência).....	45
3.2 - Caracterização dos processos e métodos de análise	46
3.2.1 - Definição dos processos de estampagem da barra de impacto (caso 1)	46
3.2.2 - Definição dos processos de estampagem do pilar B (caso 2)	47
3.3 - Análise de equipamentos associados ao processo de estampagem	47
3.3.1 - Equipamentos considerados na análise do processo de estampagem a frio	47
3.3.2 - Equipamentos considerados na análise do processo de estampagem a quente....	48
3.4 - Ferramenta de cálculo utilizada na análise de custos	49
3.5 - Análise dos resultados obtidos na estimativa de custos	50
3.5.1 - Resultado da análise comparativa de custos para a barra de impacto (caso 1) ...	50
3.5.2 - Resultado da análise comparativa de custos para o pilar B (caso 2)	53
Capítulo 4 - Conclusões e considerações finais	57
4.1 - Sumário	57
4.2 - Conclusões	57
4.3 - Considerações finais	59
Referências Bibliográficas.....	61
ANEXO A.....	64
ANEXO B.....	67
ANEXO C.....	68
ANEXO D.....	72
ANEXO E.....	75
ANEXO F.....	77
ANEXO G	78

Capítulo 1 - Introdução

Neste capítulo faz-se o enquadramento global do trabalho, no âmbito dos actuais desafios da indústria automóvel ao nível dos materiais metálicos ferrosos. Dá-se especial ênfase à descrição da tecnologia de estampagem a quente. Referem-se os aspectos metalúrgicos associados aos aços ao boro, e suas características específicas. Apresentam-se alguns exemplos de aplicações concretas na indústria e descrevem-se os objectivos estabelecidos para o estudo.

1.1 - Enquadramento

O crescimento mundial, os seus catalizadores e suas contrariedades, têm tido impacto em todas as áreas relacionadas com um veículo automóvel, nomeadamente nas áreas industriais e ambientais, como também nas restrições de segurança passiva. Assim, todas estas áreas directa ou indirectamente impulsionaram marcantes desenvolvimentos no sector automóvel e seus adjacentes. Com efeito, o objectivo crescente de reduzir o peso dos veículos e incrementar os níveis de segurança tem impulsionado a indústria automóvel na incessante procura e/ou melhoria de soluções tecnológicas para aplicar nos componentes que constituem um veículo automóvel. Os responsáveis e representantes das grandes marcas mundiais (“OEM’s”), em conjunto com as maiores siderurgias, tiveram e continuam a ter um papel extremamente importante no desenvolvimento da tecnologia de materiais para fazer face às exigências do mercado. Neste contexto, o automóvel continua a mostrar-se um dos meios de transporte mais populares e versáteis, o qual garante a mobilidade de milhões de pessoas no mundo, contudo, deparamo-nos cada vez mais com obstáculos que podem tornar a nossa mobilidade limitada, como é exemplo a actual crise petrolífera. Com a preocupação constante, e necessária, na redução de emissões de CO₂ em todos os sectores da economia, e com a pressão generalizada na redução dos custos, o aumento da segurança passiva, a investigação e desenvolvimento de conceitos “lightweight” é um dos caminhos possíveis para a redução do peso dos veículos automóveis, minimizando o consumo de combustível. Assim, as modernas evoluções dos automóveis apresentam soluções construtivas mais leves, mais confortáveis e seguras. Este é um bom indicador para os vários desenvolvimentos que se têm evidenciado nas partes estruturais das viaturas. [1-3]

Novos conceitos, materiais e processos tecnológicos têm de ser desenvolvidos assegurando requisitos como a rigidez, resistência ao choque e absorção de energia. Assim sendo, a indústria automóvel estabeleceu como meta a procura de estruturas leves, para fazer face à crescente utilização de outros materiais metálicos, como é o caso do alumínio, despontou a

realização de vários estudos. Como exemplo destes estudos é o programa ULSAB (Ultra light steel automotive body) no domínio dos aços, que conta com quatro grandes projectos (ver figura 1.1), como prova do grande esforço do sector para atingir estas metas. [1,5]



Figura 1.1 - Exemplo dos 4 projectos do programa ULSAB. [1]

Os quatro programas integrados no ULSAB focaram os seus esforços no desenvolvimento da estrutura da carroçaria, na construção de portas, no desenvolvimento de suspensões completas e conceitos de veículos avançados, apresentando propostas na construção de chassis. Estes trabalhos têm em conta a análise do comportamento dos novos materiais, suas limitações derivadas do processo e as soluções para ultrapassar estas barreiras recentes. [1,5]

A consistente evolução na indústria automóvel tem vindo a ser apresentada de diversas formas. Uma das mais importantes é o resultado dos “crash-tests”, onde os resultados reais dos novos processos são combinados com a aplicação dos novos materiais de ultra-alta resistência que constituem boa parte da estrutura da carroçaria automóvel. Nestes testes verificam-se resultados extremamente importantes ao nível da resistência e absorção de energia, como é possível ver através da comparação da figura seguinte (figura 1.2). [4]

Modelo	Resultado EuroNCAP – Modelo 2002		Resultado EuroNCAP – Modelo 2007																	
FIAT Panda 500		<table border="1"> <tr><th>RATING</th><th>SCORE</th></tr> <tr><td>ADULT OCCUPANT</td><td>20 Front: 10 Side: 10</td></tr> <tr><td>CHILD OCCUPANT</td><td>21</td></tr> <tr><td>PEDESTRIAN</td><td>6 (2004)</td></tr> </table>	RATING	SCORE	ADULT OCCUPANT	20 Front: 10 Side: 10	CHILD OCCUPANT	21	PEDESTRIAN	6 (2004)		<table border="1"> <tr><th>RATING</th><th>SCORE</th></tr> <tr><td>ADULT OCCUPANT</td><td>35 Front: 15 Side: 16</td></tr> <tr><td>CHILD OCCUPANT</td><td>28</td></tr> <tr><td>PEDESTRIAN</td><td>14</td></tr> </table>	RATING	SCORE	ADULT OCCUPANT	35 Front: 15 Side: 16	CHILD OCCUPANT	28	PEDESTRIAN	14
RATING	SCORE																			
ADULT OCCUPANT	20 Front: 10 Side: 10																			
CHILD OCCUPANT	21																			
PEDESTRIAN	6 (2004)																			
RATING	SCORE																			
ADULT OCCUPANT	35 Front: 15 Side: 16																			
CHILD OCCUPANT	28																			
PEDESTRIAN	14																			
FORD Mondeo		<table border="1"> <tr><th>RATING</th><th>SCORE</th></tr> <tr><td>ADULT OCCUPANT</td><td>28 Front: 10 Side: 16</td></tr> <tr><td>PEDESTRIAN</td><td>13 Pre 2002 rating</td></tr> </table>	RATING	SCORE	ADULT OCCUPANT	28 Front: 10 Side: 16	PEDESTRIAN	13 Pre 2002 rating		<table border="1"> <tr><th>RATING</th><th>SCORE</th></tr> <tr><td>ADULT OCCUPANT</td><td>35 Front: 15 Side: 16</td></tr> <tr><td>CHILD OCCUPANT</td><td>39</td></tr> <tr><td>PEDESTRIAN</td><td>18</td></tr> </table>	RATING	SCORE	ADULT OCCUPANT	35 Front: 15 Side: 16	CHILD OCCUPANT	39	PEDESTRIAN	18		
RATING	SCORE																			
ADULT OCCUPANT	28 Front: 10 Side: 16																			
PEDESTRIAN	13 Pre 2002 rating																			
RATING	SCORE																			
ADULT OCCUPANT	35 Front: 15 Side: 16																			
CHILD OCCUPANT	39																			
PEDESTRIAN	18																			
RENAULT Laguna		<table border="1"> <tr><th>RATING</th><th>SCORE</th></tr> <tr><td>ADULT OCCUPANT</td><td>34 Front: 15 Side: 16</td></tr> <tr><td>PEDESTRIAN</td><td>12 Pre 2002 rating</td></tr> </table>	RATING	SCORE	ADULT OCCUPANT	34 Front: 15 Side: 16	PEDESTRIAN	12 Pre 2002 rating		<table border="1"> <tr><th>RATING</th><th>SCORE</th></tr> <tr><td>ADULT OCCUPANT</td><td>36 Front: 16 Side: 15</td></tr> <tr><td>CHILD OCCUPANT</td><td>41</td></tr> <tr><td>PEDESTRIAN</td><td>10</td></tr> </table>	RATING	SCORE	ADULT OCCUPANT	36 Front: 16 Side: 15	CHILD OCCUPANT	41	PEDESTRIAN	10		
RATING	SCORE																			
ADULT OCCUPANT	34 Front: 15 Side: 16																			
PEDESTRIAN	12 Pre 2002 rating																			
RATING	SCORE																			
ADULT OCCUPANT	36 Front: 16 Side: 15																			
CHILD OCCUPANT	41																			
PEDESTRIAN	10																			
Mercedes Benz Classe C		<table border="1"> <tr><th>RATING</th><th>SCORE</th></tr> <tr><td>ADULT OCCUPANT</td><td>33 Front: 14 Side: 16</td></tr> <tr><td>PEDESTRIAN</td><td>0 Pre 2002 rating</td></tr> </table>	RATING	SCORE	ADULT OCCUPANT	33 Front: 14 Side: 16	PEDESTRIAN	0 Pre 2002 rating		<table border="1"> <tr><th>RATING</th><th>SCORE</th></tr> <tr><td>ADULT OCCUPANT</td><td>36 Front: 15 Side: 16</td></tr> <tr><td>CHILD OCCUPANT</td><td>32</td></tr> <tr><td>PEDESTRIAN</td><td>11</td></tr> </table>	RATING	SCORE	ADULT OCCUPANT	36 Front: 15 Side: 16	CHILD OCCUPANT	32	PEDESTRIAN	11		
RATING	SCORE																			
ADULT OCCUPANT	33 Front: 14 Side: 16																			
PEDESTRIAN	0 Pre 2002 rating																			
RATING	SCORE																			
ADULT OCCUPANT	36 Front: 15 Side: 16																			
CHILD OCCUPANT	32																			
PEDESTRIAN	11																			

Figura 1.2 - Evolução comparativa do resultado de “crash-tests” da EuroNCAP. [4]

Com o avanço da ciência dos materiais, novos processos produtivos foram desenvolvidos de forma a possibilitar a conformação mecânica. Estas inovações têm obrigatoriamente impactos

nos processos ditos convencionais, implicando desenvolvimentos de novos processos produtivos, o que torna imprescindível o uso de ferramentas de simulação numérica. Uma das possibilidades de transformação destes materiais que recorre a estas ferramentas é o processo de estampagem a quente. A aplicação desta tecnologia à indústria automóvel é uma solução inovadora, contudo esta é um processo tecnológico mais “complexo” que os convencionais a frio, pois implica a utilização de fornos de aquecimento e novas configurações de ferramentas de estampagem. Estes sistemas de ferramentas têm de integrar veios de circulação de líquidos (água ou nitrogénio) para promover o arrefecimento rápido após a estampagem a quente (promover a têmpera na ferramenta, fenómeno conhecido por: “quenching dies”). Aliadas ao desenvolvimento da tecnologia de materiais, as entidades que desenvolvem e trabalham com a engenharia assistida por computador (CAE) têm vindo a desenvolver softwares de simulação, não só pela real necessidade mas também cada vez mais como uma exigência das OEM’s, em particular nas aplicações automóveis que utilizam os aços de alta resistência. A utilização destes softwares é essencial para as peças estruturais devido à possibilidade e necessidade de analisar os materiais com elevadas resistências mecânicas. [5-7]

Na última década, grandes esforços foram realizados a nível científico nos materiais metálicos aplicados no processo de conformação mecânica, tema central do presente trabalho. [7-10]

1.1.1 - Evolução dos Aços

A evolução dos aços tem sido associada a um aumento da sua resistência mecânica, segundo exemplifica a figura abaixo apresentada (figura 1.3). Nesta figura, identifica-se como “Low” a classe de aços considerados convencionais e mais indicados para estampagem profunda, conhecidos por aços macios. A classe “Medium” enquadra os aços microligados com resistências superiores aos macios e conseqüentemente menos capacidade de alongamento; as classes “High” e “Ultra-High” tratam de aços com elevada resistência mecânica com menos ductilidade. Em suma, a tendência é evoluir no sentido de aumentar a resistência mecânica procurando manter as propriedades de conformação/alongamento, no entanto essa correlação não é fácil de conseguir. [7,9]

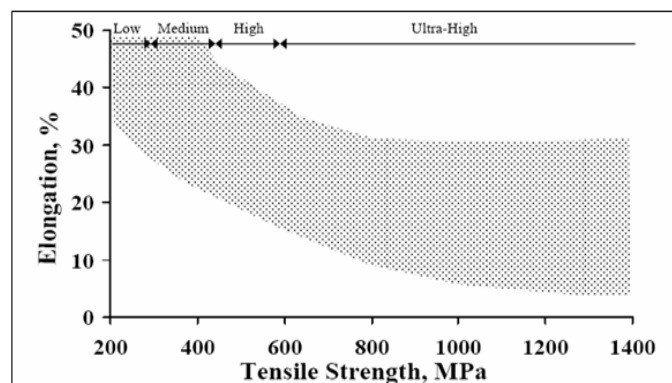


Figura 1.3 - Evolução dos aços, resistência vs extensão após rotura. [5]

1.1.2 - Classificação dos aços na área automóvel

Os aços aplicados na industrial automóvel, em especial na carroçaria, podem ser definidos de várias formas diferentes. A lista abaixo apresenta uma definição, por designação metalúrgica: (i) Aços de baixa resistência: aços macios de elevada ductilidade (Mild Steels) / (IF); (ii) Aços convencionais de alta resistência: aços carbono-manganês (CMn); aços “bake hardenable” (BH), aços microligados de alta resistência (HSLA); (iii) Aços de ultra-alta resistência (UHSS): aços bifásicos (DP), aços trifásicos (TRIP), aços ao boro, aços martensíticos. [5,7,10,11]

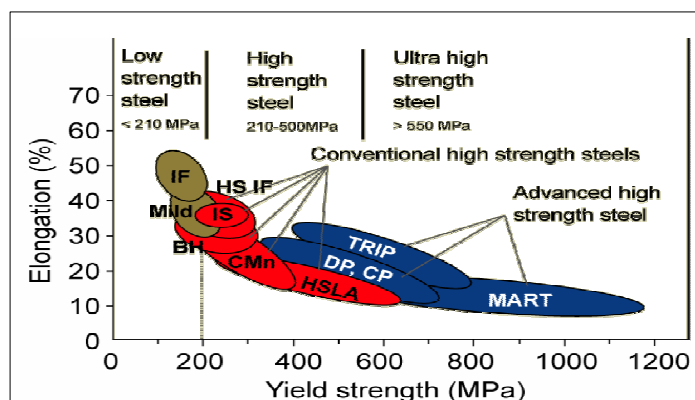


Figura 1.4 - Resistência vs alongamento (famílias de aços). [7]

Outra possibilidade é a classificação dos materiais segundo as suas propriedades mecânicas - tracção:

- Mild Steels - Aços macios (baixo carbono) - $R_m < 270$ MPa;
- HSLA - Aços de alta resistência baixa liga (microligados) - $R_m > 270$ MPa;
- AHSS - Aços avançados de alta resistência - $R_m > 600$ MPa;
- UHSS - Aços avançados de ultra-alta resistência - $R_m > 1000$ MPa

1.2 - Processo de estampagem a quente (Hot stamping)

1.2.1 - Descrição do processo de estampagem a quente

O processo de estampagem a quente apareceu no final da década de noventa devido às necessidades e às vantagens industriais que este apresenta, como solução inovadora para a produção de componentes de automóvel de ultra-alta resistência mecânica. Muitos fabricantes de automóveis e entidades de desenvolvimento tecnológico têm seguido com atenção esta tecnologia de forma a conhecer melhor as suas potencialidades e assim poder diminuir o peso, bem como aumentar a segurança dos automóveis. [12]

O processo foi particularmente desenvolvido para utilizar os designados aços ao boro, que são em primeiro lugar aquecidos a temperaturas de aproximadamente 900°C, “elevando” o aço à região austenítica com temperaturas mais elevadas que A_3 e, em seguida, é processado e

arrefecido rapidamente. A conformação plástica a temperaturas elevadas permite obter geometrias complexas devido à elevada conformabilidade a quente do material, proporcionada pela fase austenítica que se caracteriza por ser muito maleável. [13,14]

O aço mencionado tem uma aceitável temperabilidade e produz plenamente a microestrutura martensítica após estampagem a quente, como se encontra representado na figura 1.5. A tensão limite de elasticidade e resistência à tracção após estampagem a quente são de aproximadamente 1000MPa e 1500MPa, respectivamente. [15]

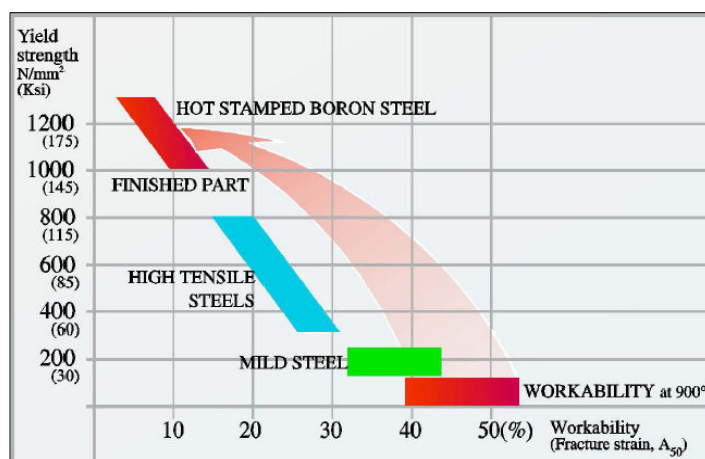


Figura 1.5 - Comportamento dos aços ao boro na estampagem a quente. [5]

A conformação e o tratamento térmico simultâneo das chapas a quente, após austenitização, resultam numa plena transformação em microestrutura martensítica dos produtos finais. Esta tecnologia utiliza uma linha de aquecimento para aquecer as chapas de aço até temperaturas de austenitização, onde a capacidade de alongamento é superior. De seguida as chapas são transferidas para as ferramentas dentro da prensa, através de robots, e assim se procede à estampagem das mesmas, seguido de um arrefecimento ainda dentro da ferramenta. [16]

O processo de estampagem a quente é composto por diferentes etapas, as quais passo a descrever:

1. Tratamento de austenitização - A chapa é aquecida a 900-950°C durante vários minutos (5 a 10). A altas temperaturas o aço é dúctil o que permite a obtenção de geometrias complexas. O aquecimento depende da espessura da chapa. É necessário controlar a atmosfera do forno para limitar problemas de descarboxação.

2. Transferência da chapa aquecida - A chapa aquecida é colocada, através de um sistema robótico, na ferramenta. A operação de transferência deve ser realizada o mais rápido possível para garantir as exigidas propriedades mecânicas. Uma temperatura da chapa abaixo de 780°C, dará origem a uma microestrutura bainítica e/ou ferrítica em vez da desejada, martensítica.

3. Estampagem a quente/arrefecimento - A chapa é estampada a quente e de seguida é arrefecida dentro da ferramenta. O tempo de arrefecimento na ferramenta é de aproximadamente 10 segundos. Este arrefecimento rápido provoca um tratamento térmico de têmpera no interior da ferramenta, proporcionando assim a transformação da austenite em martensite. É possível obter outro tipo de estruturas através de velocidades controladas. Em seguida, a peça é extraída da ferramenta, a uma temperatura mínima de cerca de 80°C para garantir uma boa geometria após o arrefecimento ao ar.

4. Corte da chapa conformada - As operações são realizadas por corte mecânico convencional, contudo, a alta dureza do aço após tratamento térmico nas ferramentas, leva a uma definição de materiais específicos adaptados para corte. (Em alguns casos, é usado o corte laser.) [17-20]

Esquema resumido do processo de estampagem a quente com tempos e temperaturas:

- 1º Passo - Aquecimento 5 a 10 minutos (~950°C); - Fase austenítica
- 2º Passo - Transformação - Estampagem a quente (~850°C);
- 3º Passo - Arrefecimento rápido na ferramenta (“quenching dies”) [21]

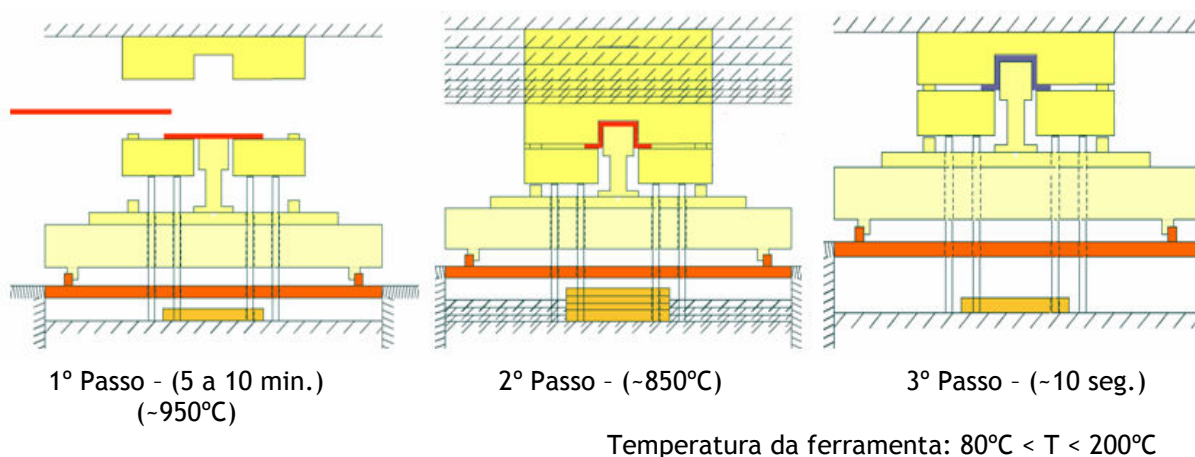


Figura 1.6 - Representação esquemática do processo de estampagem a quente. [21]

1.2.2 - Tipos de processos de estampagem a quente - Sistema directo e indirecto

Os princípios gerais da estampagem a quente serão descritos resumidamente nas vertentes técnica e financeira. Actualmente são conhecidos dois métodos de estampagem a quente que diferem no que respeita à sequência de processo, nomeadamente o processo directo e indirecto a quente. No que diz respeito ao processo directo na estampagem a quente, a chapa previamente definida é aquecida num forno até cerca de 900-950°C colocando a mesma em temperaturas de austenitização, de seguida são transferidas para as ferramentas na prensa onde são conformadas a quente e arrefecidas simultaneamente a velocidades elevadas, para

que seja atingido o endurecimento. Em contraste, no processo indirecto inicialmente os componentes são conformados a frio até aproximadamente 80% da sua forma definitiva num processo de estampagem convencional a frio. Seguidamente, os semi-produtos são pré-aquecidos até à temperatura de austenitização, seguindo os mesmos princípios descritos no processo directo de estampagem a quente. A intenção subjacente a este método é o de reduzir o desgaste nas ferramentas e de diminuir o adelgaçamento dos produtos finais estampados, devido à elevada fricção entre as mesmas. De referir que este processo não usa nem poderá usar lubrificação como o processo convencional a frio, devido às elevadas temperaturas de trabalho. Por exemplo, quando é utilizado um aço ao boro não revestido (22MnB5), com formas muito complexas, a relação entre os movimentos da chapa e ferramenta durante o processo a quente pode resultar em pesados efeitos de desgaste na superfície das ferramentas. [18,21,22,23]

A utilização de peças pré-conformadas reduz os movimentos relativos, logo, minimiza o desgaste das ferramentas e das próprias peças. [23]

Os processos referidos da estampagem a quente estão ilustrados nas figuras 1.7 e 1.8. As quais ilustram o processo em geral, que pode ser designado por directo ou indirecto.

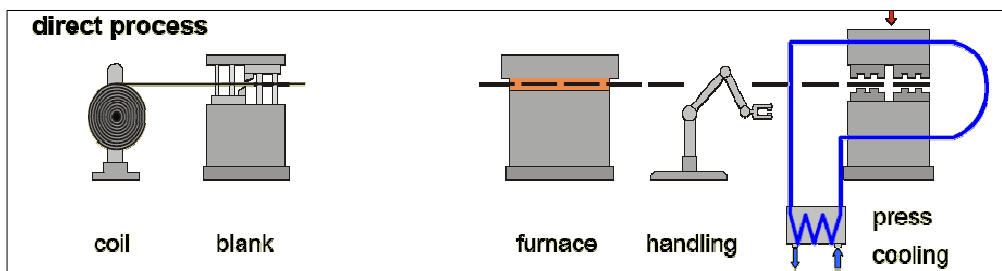


Figura 1.7 - Descrição esquemática do processo de estampagem a quente - Sistema directo. [5]

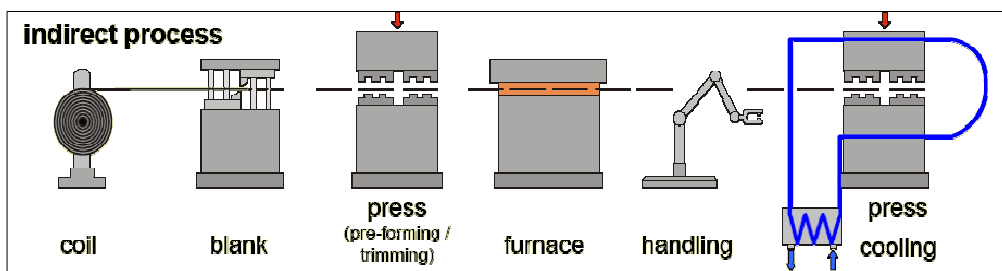


Figura 1.8 - Descrição esquemática do processo de estampagem a quente - Sistema indirecto. [5]

Recentemente no Japão, foi desenvolvido um novo método para aquecer a chapa directamente na ferramenta. A diminuição da temperatura da chapa antes da conformação é impedida neste processo, devido ao aquecimento directo da chapa em conjunto com a ferramenta por meio de resistência eléctrica. As velocidades de aquecimento são rápidas o suficiente para sincronizar com a estampagem, apresentando maior eficiência energética. [24]

1.3 - Aspectos Metalúrgicos

1.3.1 - Transformação não isotérmica da austenite não eutectóide

A observação do diagrama de equilíbrio Fe-C indica-nos que a transformação da austenite não eutectóide se inicia pela rejeição do constituinte dito pro-eutectóide (ferrite ou cementite, conforme o aço apresenta um teor em carbono inferior ou superior ao do ponto eutectóide).

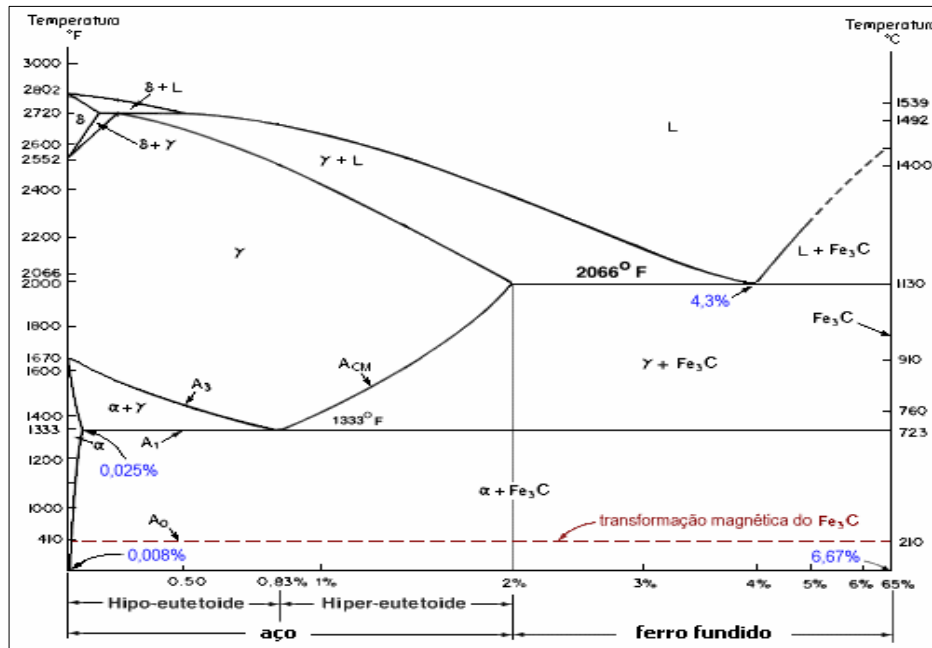


Figura 1.9 - O diagrama Fe-C traduz as transformações da austenite consoante a quantidade de carbono. [25]

A ferrite e a cementite pro-eutectóides de equilíbrio são formadas a temperaturas elevadas, superiores a A_1 , pelo que beneficiam de condições de difusão favoráveis. Ambos os constituintes irão nuclear e crescer nas fronteiras de grão da austenite, na medida em que estas são as regiões da microestrutura que apresentam maior nível de energia; a deposição do constituinte pro-eutectóide nessas regiões, substituindo-se-lhes, permite que ao acréscimo de energia devido às novas interfaces entre a austenite e o constituinte pro-eutectóide seja deduzida a energia da parcela de fronteira de grão austenítica entretanto ocupada pela nova fase - deste modo, a energia total do sistema será minimizada relativamente à de qualquer outra localização adoptada pelo constituinte pro-eutectóide, isto é, relativamente à deposição da fase pro-eutectóide na fronteira de grão austenítica, qualquer outra configuração alternativa é de mais elevada energia, instável energeticamente, logo efémera. A localização do constituinte pró-eutectóide pode ser alterada se a austenite for transformada com elevado sobre-arrefecimento, definindo-se este como a diferença entre a temperatura crítica superior da austenite e a sua temperatura de transformação. Neste caso, o constituinte pró-eutectóide pode nuclear nas fronteiras de grão austeníticas mas crescer em condições de não equilíbrio, devido à diminuição da difusividade do carbono provocada pelo abaixamento da temperatura,

estas condições originam cristais de constituinte pró-eutectóide que crescem no interior dos grãos austeníticos. [25]

Na generalidade dos processos industriais, os aços não sofrem transformações isotérmicas mas antes leis de arrefecimento contínuo. Os diagramas TTT deixam então de ter aplicação e a previsão da microestrutura obtida após a transformação da austenite em condições de arrefecimento contínuo exige a determinação de novos diagramas em que a austenite seja transformada também em arrefecimento contínuo, os diagramas TAC (abreviatura de transformação em arrefecimento contínuo, *continuous cooling transformation* ou CCT diagrams em anglo-saxónico). [25,26]

1.3.2 - Domínio da fase martensítica

Se um aço no estado austenítico for sujeito a uma velocidade de arrefecimento suficientemente elevada para impedir a difusão do carbono, ele apresentará à temperatura ambiente uma microestrutura martensítica, composta por uma solução sólida sobressaturada de carbono no ferro α . A martensite é um constituinte muito duro mas frágil, com elevada resistência à tracção e ao desgaste. Muitas aplicações de engenharia exigem componentes com este tipo de microestrutura, que maximizam a relação entre resistência e massa.

A martensite forma-se por um mecanismo de corte, movimentando-se os átomos segundo percursos curtos, de um modo coordenado e quase simultaneamente. Se a deformação plástica da austenite não acomodar a deformação de corte da martensite, poderá ocorrer separação entre as superfícies da austenite e da martensite, isto é, fissuração localizada, frequente nas martensites de alto carbono. Para teores de carbono inferiores a 0,6%, a martensite designa-se por massiva, sendo constituída por blocos separados por fronteiras de grão e cada bloco apresenta lamelas com orientações semelhantes, e com elevada densidade de deslocações, como é exemplo do aço analisado neste trabalho. Para teores de carbono superiores a 1,0% a martensite designa-se por acicular, pois é constituída por placas com forma acicular em secção transversal. Para valores intermédios esta é considerada mista. A formação da martensite é um processo atérmico, assim designado por ocorrer sem activação térmica, distinguindo-se das transformações com difusão activadas termicamente. Para cada composição química, existe uma temperatura à qual a austenite começa a transformar-se em martensite e uma outra, inferior, à qual toda a austenite se transformou; estas temperaturas designam-se respectivamente por M_s (martensite start) e M_f (martensite finish). [27]

1.3.3 - Processos de recuperação - recristalização dinâmica (R.D.)

O trabalho a quente de produtos metálicos foi ao longo de alguns anos um processo de transformação desenvolvido a temperaturas semelhantes às utilizadas no tratamento térmico de recristalização efectuado após a deformação a frio. Esta recristalização era então entendida como um mecanismo de recuperação que ocorria unicamente após a deformação mecânica, devido às elevadas temperaturas de trabalho. Este mecanismo, verificado após a deformação a quente ou no tratamento térmico de materiais deformados a frio, foi designado posteriormente por recristalização estática. Alguns trabalhos desenvolvidos ao longo do tempo evidenciam que a recristalização pode ocorrer também na deformação a quente, introduzindo a noção de R.D. e, mais genericamente a de recuperação dinâmica, em oposição ao termo estático aplicado aos processos de recuperação que tem lugar sem deformação simultânea. A recristalização dinâmica só foi detectada nos processos de trabalho a quente em que é imposta ao material uma grande deformação durante um curto espaço de tempo. Em condições de R.D. os materiais apresentam muito maior ductilidade do que a obtida a frio. [28]

- Características da recristalização dinâmica - Curva tensão-deformação

O melhor método para estudar a capacidade de um material ser deformado a quente é, sem dúvida, analisar o comportamento do material nas condições de deformação industriais em que tanto as variáveis inerentes ao processo (natureza do estado de tensão, velocidade de deformação, temperatura) como as inerentes ao material (composição química, forma e tamanho de grão) são simultaneamente importantes.

As curvas tensão-deformação, características dos materiais metálicos deformados a quente e obtidos para velocidade de deformação e temperaturas constantes, apresentam na fase inicial um declive menor do que o dos materiais deformados a frio. Na zona plástica a tensão cresce até um máximo, designada por tensão máxima ou tensão de pico (σ_p), depois os mecanismos de recuperação sobrepõe-se aos de encruamento e o valor médio de tensão diminui até se fixar num valor constante, independente da deformação e intermédio entre a tensão máxima e a tensão limite de proporcionalidade. Esta tensão média, designada por tensão de regime estacionário (σ_s), é a evidência mecânica de um equilíbrio dinâmico entre o encruamento e a recuperação. A R.D. pode ter lugar em duas formas diferentes: (a) curva uma única tensão de pico, para baixas temperaturas e elevadas taxas de deformação, e b) vários picos para altas temperaturas e baixas taxas de deformação. No caso particular de taxas relativamente elevadas de deformação a recristalização dinâmica pode ser inibida, sendo a restauração dinâmica o único mecanismo responsável pela ductilidade. Em geral a recristalização dinâmica contínua é o tipo de curva que corresponde aos processos industriais de enformação por deformação plástica. [28]

1.3.4 - Mecanismo de temperabilidade a quente dos aços microligados ao boro

O elemento boro na estampagem a quente é de todo relevante, nomeadamente na sua interação nas fronteiras de grão da austenite, isto porque influencia o fenómeno de recristalização da austenite. A segregação do boro nas fronteiras de grão da austenite provoca mudanças nas características termodinâmicas dessas mesmas fronteiras o que provoca efeitos importantes no comportamento de amaciamento da austenite durante a conformação a quente. O boro segregado nas fronteiras de grão da austenite atrasa a sua mobilidade, como também a cinética de recristalização, atrasando assim a recristalização dinâmica (R.D.) da austenite deformada, como mostra a seguinte figura. [29-30]

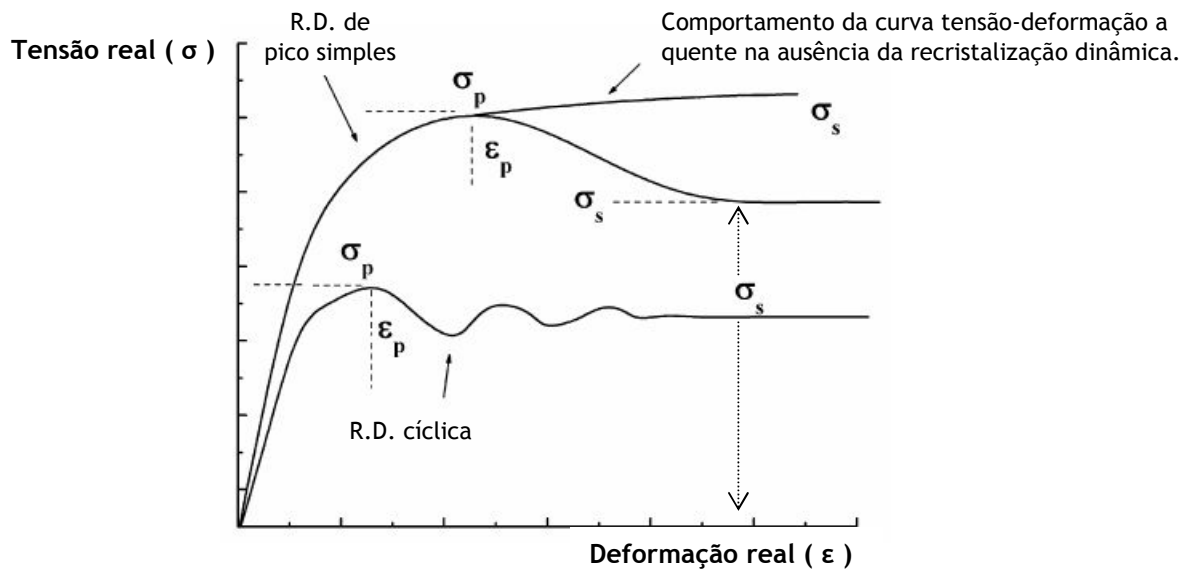


Figura 1.10 - Curvas σ - ϵ representativas do comportamento da austenite (Fe- γ) para condições de temperaturas elevadas, observadas em materiais que apresentam R.D.. [29]

No caso dos aços ligados ao boro e, como já foi referido, os átomos de boro tendem a migrar para as fronteiras de grão da austenite (segregação), esta característica pode estar relacionada com o não equilíbrio da segregação de átomos em solução sólida para a fronteira de grão. A recristalização dinâmica (R.D.) é um dos principais mecanismos de amaciamento de aços em alta temperatura, porque proporciona amaciamento adicional ao oferecido exclusivamente pela dinâmica de recuperação. A R.D. tem lugar depois de se atingir a tensão crítica. Do ponto de vista microestrutural, o fluxo das curvas a quente pode ser dividida em três fases sucessivas que são dependentes das taxas de temperatura. Em primeiro lugar, o trabalho de recuperação dinâmica e fase de endurecimento para tensões relativamente baixas. Esta fase caracteriza-se pelo alongamento dos grãos formando uma microestrutura fechada. Para grandes valores de deformação, é atingido um estado estacionário, devido ao processo de recristalização. As duas últimas fases são separadas por uma zona de transição caracterizada por uma queda real de tensões, como mencionado acima.

Resumidamente a adição de boro reforça a temperabilidade dos aços de baixa liga através da segregação de boro para as fronteiras de grão da austenite que atrasa a nucleação da ferrite pró-eutectóide. O boro presente nas fronteiras de grão da austenite baixa a energia de superfície atrasando assim a nucleação da ferrite originando partículas de carbonetos de boro $\text{Fe}_2\text{3}(\text{CB})_6$ presentes nas fronteiras que podem dificultar a nucleação de ferrite. [29-31]

- Análise da influência da quantidade em peso de boro na deformação a quente

Os estudos realizados por E. López-Chipres et al. [32], sobre o comportamento a quente dos aços com baixo teor em carbono (0,24% C) microligados ao boro, com conteúdos de 29 ppm (B1), 49 ppm (B2), 62 ppm (B3) e 105 ppm (B4) de B, para diferentes temperaturas e velocidades, evidenciam que nas curvas tensão-deformação as tensões de pico tendem a diminuir com o aumento do conteúdo de boro, o que indica que a adição de boro gera uma solução sólida com efeito de amaciamento. Relativamente à velocidade de deformação e temperaturas, as curvas apresentam um comportamento cíclico para baixas taxas de deformação e elevadas temperaturas (aço B1 deformado a $0,001\text{s}^{-1}$ e 1100°C), enquanto que para elevadas taxas de deformação e temperaturas mais baixas, as curvas apresentam apenas um pico simples (aço B4 deformado a $0,1\text{s}^{-1}$ e 950°C). Em suma, adições de boro neste tipo de aço promovem geralmente um pico simples nas condições da recristalização dinâmica a que está normalmente associado a um efeito de refinamento de grão. [30-32]

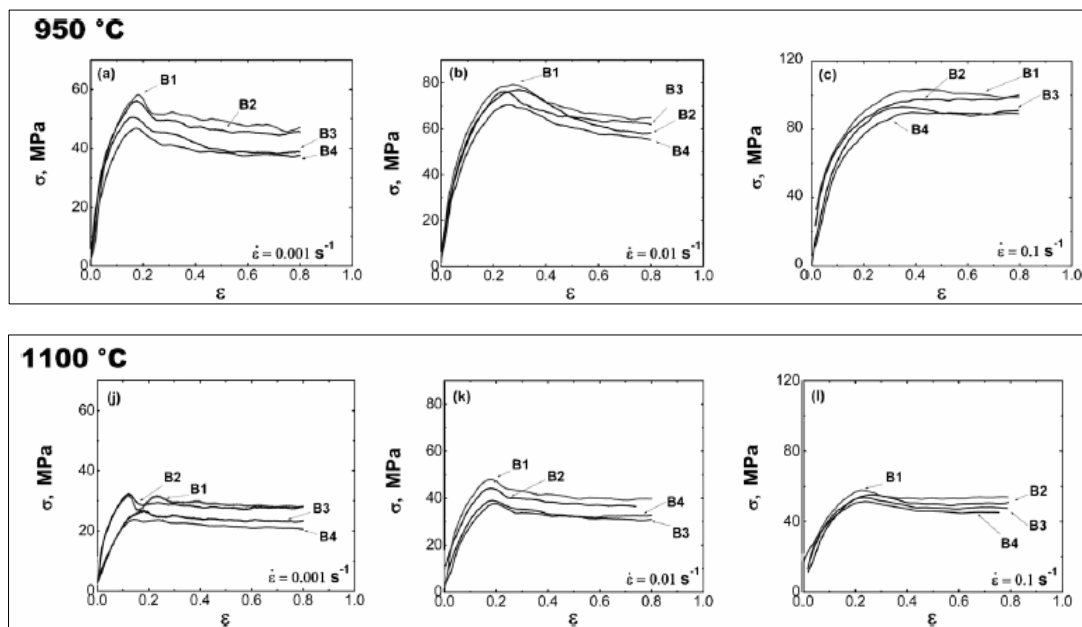


Figura 1.11 - Curvas de fluidez a quente em função do conteúdo de boro (B1, B2, B3, B4) para duas as temperaturas (950, 1100°C) e três velocidades de deformação ($0,001$, $0,01$, $0,1\text{s}^{-1}$). [29]

A elevada ductilidade observada a aproximadamente 950°C está associada à activação térmica de dois fenómenos que ocorrem em simultâneo, nomeadamente a movimentação das fronteiras

de grão e a recristalização dinâmica. Os resultados obtidos evidenciaram, uma vez mais, o efeito do boro na recristalização dinâmica e da sua segregação nas fronteiras de grão da austenite, o que pode atrasar a formação de ferrite pró-eutectóide e aumenta a coesão da fronteira de grão, como se pode observar através da figura 1.12. [32]

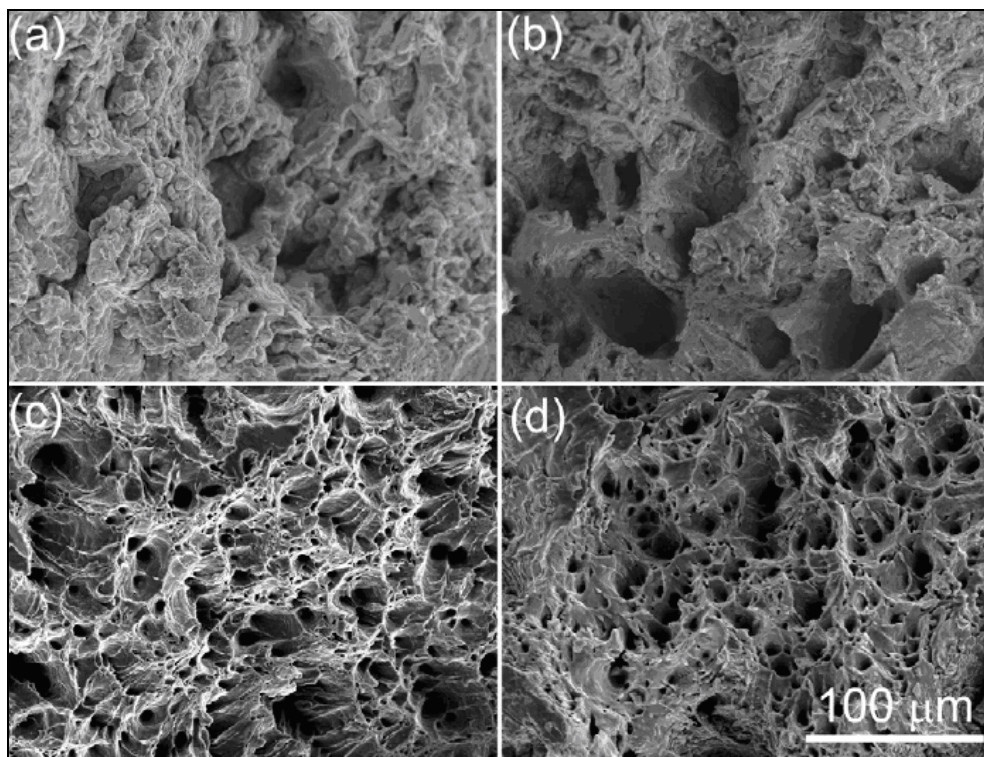


Figura 1.12 - Observação por SEM (Microscopia Electrónica de Varrimento) da zona de rotura dos testes de tracção sobre os aços ao boro a 950°C: (a) 29 ppm, (b) 49 ppm, (c) 62 ppm e (d) 105 ppm. [32]

- Efeito dos parâmetros de processo na transformação da martensite no aço 22MnB5

O processo de estampagem a quente é considerado não-isotérmico, pois conta, na sua fase inicial, com um período de aquecimento na região austenítica. Em seguida, através de um arrefecimento rápido verificam-se transformações que resultam na fase martensítica. As transformações mencionadas dependem de diversos factores, tais como períodos de austenitização, composição química, taxas de deformação plástica inicial e taxas de arrefecimento. Para um aquecimento à velocidade de 5°C/s, a primeira temperatura em que começa a aparecer a austenite é à temperatura (A_1) a 720°C, e o início da temperatura de transformação primária da ferrite para a austenite (A_3) é verificada aos 880°C. A transformação da martensite começa para temperaturas, M_s e M_f , o que correspondem os valores de 410 e 230°C, respectivamente. O aço 22MnB5, apresenta uma microestrutura no seu estado de fornecimento inicial que consiste em 78% (\pm 5%) ferrite e 22% (\pm 5%) perlite. Análises sobre este aço para diferentes temperaturas iniciais de deformação evidenciaram que para a maior temperatura inicial produziu um maior volume de fracção de martensite. Assim, a temperatura

inicial de deformação a 850°C resultou em 94% de martensite, ao mesmo tempo, diminuindo a temperatura para 700°C, foi produzido 77% de martensite. No que respeita às taxas de arrefecimento, amostras foram arrefecidas para diferentes taxas de arrefecimento entre 25 e 100°C/s, para analisar a influência da taxa de arrefecimento sobre as transformações de fase. Essas amostras foram austenitizadas até temperaturas na ordem dos 900°C por 5 minutos. Estes valores podem ser vistos a partir do diagrama TAC, figura 1.13, que mostra que para se obter uma microestrutura totalmente martensítica é necessário uma taxa de arrefecimento igual ou superior a 25°C/s. O estudo mostrou também que as temperaturas de início de transformação da martensite diminuem com o aumento da taxa de arrefecimento. [33-35]

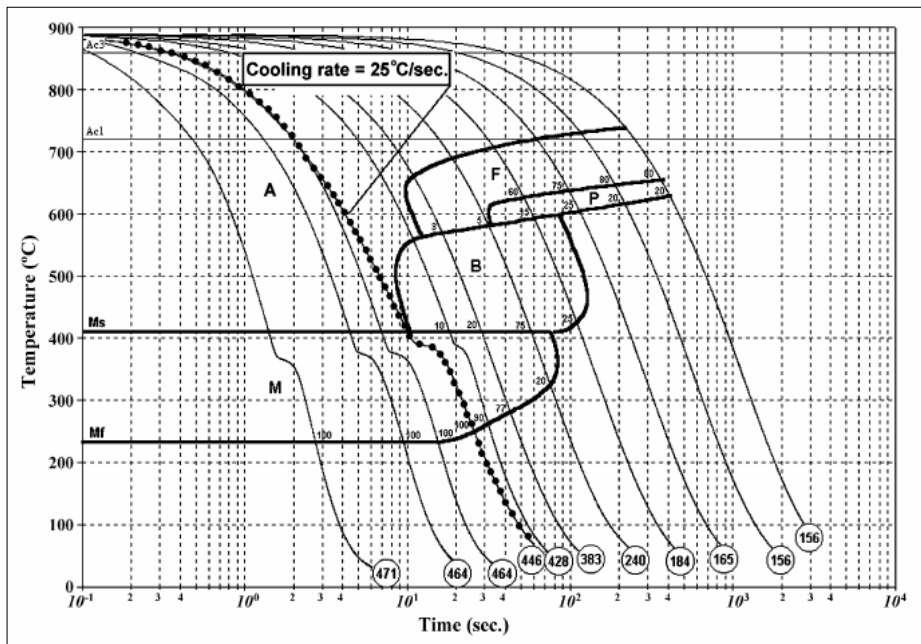


Figura 1.13 - Diagrama TAC para o aço ao boro 22MnB5 (aço hipo-eutóctico). Exemplo para um período de austenitização a 900°C durante 5 minutos. [35]

1.4 - Aplicações actuais e tendências do mercado

Os aços microligados ao boro podem ser usados e/ou têm aplicação em peças integrantes da carroçaria que exigem propriedades de resistência ao desgaste e elevada resistência mecânica. As principais aplicações para estes aços são, no que respeita à resistência ao desgaste, os elementos de máquinas agrícolas, como partes do arado, máquinas para obras públicas ou de mineração. Além disso, a aplicação de chapas de aço ao boro tem sido desenvolvida para componentes estruturais de anti-intrusão automóvel.

Actualmente, algumas empresas, já fabricam peças do automóvel como o exemplo de barras de impacto das portas, pilares A e B, reforços frontal e traseiro, pára-choques, reforços de colisão e os mais diversos componentes estruturais da carroçaria automóvel através da estampagem a quente com aços ao boro. [36-38]

Algumas aplicações de peças, de elevada resistência mecânica, estampadas a quente são apresentadas na figura 1.14. Onde se verifica que cerca de 6,5 por cento da estrutura da carroçaria é fabricada por este tipo de aços.

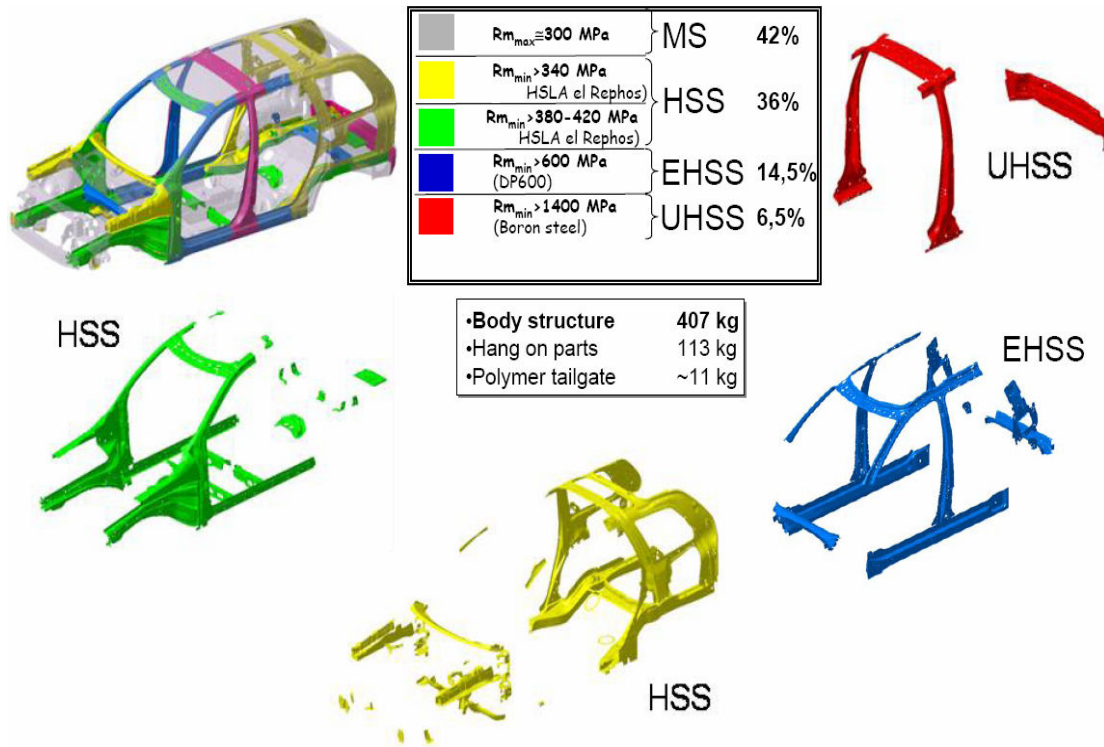


Figura 1.14 - Aplicação de aços de alta resistência mecânica na carroçaria do modelo XC90-Volvo. [39]

As vantagens do processo de estampagem a quente, utilizando aços microligados ao boro são resumidas nos seguintes pontos: Elevada conformabilidade durante a conformação a quente; Possibilidade de formação de geometrias muito complexas; Ultra alta resistência das peças após processo; Alta tenacidade; Elevado alongamento a quente; Propriedades específicas do material para conformações com elevada profundidade; Tolerâncias dimensionais aceitáveis; Boa soldabilidade; Boa adaptação para aplicações de “crash”. [38,39]

Devido às vantagens mencionadas, algumas empresas fabricantes de automóveis começam a especificar o processo de estampagem a quente e os aços microligados ao boro nas peças estruturais dos seus veículos. Assim, começam a aparecer no mercado novas linhas de estampagem a quente, construídas ao longo de todo o mundo. Estima-se que o consumo total de aços ao boro planos, para estampagem a quente e arrefecimento simultâneo na ferramenta, foi de cerca de 80.000 toneladas/ano na Europa em 2003. De 2008 a 2009, esse consumo irá aumentar fortemente na Europa até 300.000 toneladas/ano. A mesma tendência é observada na Ásia (Japão e China) e América do Norte. No ano de 2003 existiam 15 linhas de estampagem a quente na Europa, que segundo as novas evoluções, passará para 42 linhas em 2009. [40].

1.5 - Objectivos do trabalho

Os objectivos principais do trabalho enquadram-se nas temáticas anteriormente descritas sobre o processo de estampagem a quente, a avaliação de factibilidade recorrendo à simulação numérica, e a análise económica da produção de peças estampadas. Em particular, o trabalho assenta numa pesquisa que envolve uma análise técnica e económica centradas no estudo de um processo tecnológico de conformação de chapas de aço - estampagem a quente - cuja aplicação tem sido crescente nos últimos anos na Indústria automóvel.

A introdução visa enquadrar o processo de estampagem a quente, dando-se especial ênfase à descrição detalhada da tecnologia envolvida no processo. Descrevem-se também os aspectos metalúrgicos sobre os aços ao boro e suas características específicas. No final são apresentados alguns exemplos de aplicações práticas na indústria automóvel.

A vertente técnica do estudo procura evidenciar e comparar as principais diferenças entre o processo convencional de estampagem de chapas (a frio) e o processo de estampagem a quente. Foram estudadas diferentes abordagens no desenvolvimento de métodos de fabrico em dois exemplos de peças estruturais de uma carroçaria automóvel: uma barra de impacto e um pilar B. Para tal recorreu-se à simulação numérica de estampagem com a utilização do programa comercial AUTOFORM™ para o processo a frio e o módulo “*Hotforming*” do mesmo programa para o processo de estampagem a quente. O objectivo nestes casos passa por analisar a factibilidade das peças estudando a influência do nível de resistência mecânica da chapa no processo de fabrico (nº de passos ou tecnologia), não se procedendo a uma análise dos problemas que podem existir, em particular o caso do fenómeno do “springback”, ainda que seja um mecanismo importante e que cria fortes complicações na produção de peças em aços de alta resistência.

A análise económica tem como princípio uma estimativa de custos do preço peça, através da análise e comparação dos processos de transformação estudados. São avaliados diversos parâmetros, como o levantamento de equipamentos necessários, matéria-prima, consumíveis e sua valorização. Esta serve também, como um meio de informação e preparação para possíveis cenários de aplicação da tecnologia a médio ou longo prazo, conhecendo os custos envolvidos. O estudo visou sobretudo comparar os custos associados ao processo convencional e à estampagem a quente, apresentando-se uma estimativa detalhada dos custos de produção e preço das peças definidas.

Capítulo 2 - Estudos de factibilidade de peças estampadas

Apresentam-se estudos de factibilidade em dois exemplos de peças estruturais. Procede-se a uma análise comparativa com aços estampados a frio de diferentes níveis de resistência e aços ao boro para a estampagem a quente. Para avaliar a factibilidade recorreu-se a um programa comercial de simulação numérica de estampagem por elementos finitos.

2.1 - Enquadramento

A análise técnica tem em conta a evolução da tecnologia de materiais aplicada a peças estruturais e mais especificamente as solicitações de um cliente automóvel (OEM). O desenvolvimento de novos produtos estruturais da carroçaria automóvel tem que respeitar as actualizações das especificações do caderno de encargos do produto. Assim, para esta análise foram seleccionados dois dos exemplos mais representativos da aplicação de aços de ultra-alta resistência, são “eles” a barra de impacto da porta frontal e o pilar B (ver alguns desses mesmos exemplos na figura 2.1, a cor roxa). A selecção destes dois exemplos de peças estruturais deve-se também à disponibilidade das geometrias das mesmas, por anteriormente terem sido solicitados estudos semelhantes por parte de uma OEM. A base para a selecção dos materiais foi definida através da gama de materiais especificadas nas solicitações dos diferentes clientes, ao longo dos anos, em que os produtos estudados foram evoluindo para atender aos novos requisitos de peso e resistência.



Figura 2.1 - Exemplo de componentes estruturais que utilizam aços de ultra-alta resistência (VW - Passat 2005). [5]

Actualmente temos a possibilidade de reduzir tempo e custos no desenvolvimento dessas mesmas peças através da utilização de programas de simulação numérica por elementos finitos, evitando investimentos avultados de construção de ferramentas, para o desenvolvimento de peças e análise de factibilidade.

De forma resumida são apresentadas as principais especificações do cliente para o desenvolvimento destes exemplos de produtos, ao nível da resistência mecânica e da percentagem máxima de redução de espessura (adelgaçamento):

Caso 1 - Barra de impacto da porta frontal:

- Resistência mecânica mínima de 1400 MPa;
- Redução máxima admissível de espessura <28%;

Caso 2 - Reforço pilar B:

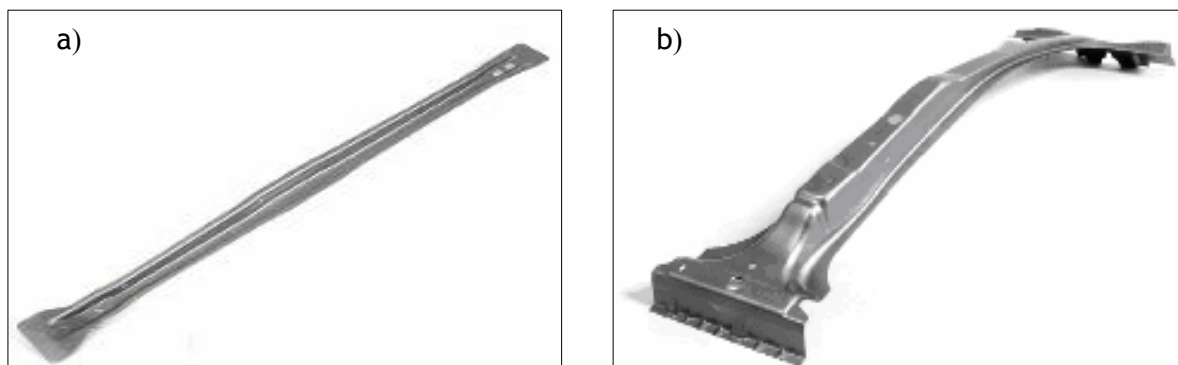


Figura 2.2 - Exemplo de geometrias de uma barra de impacto de porta frontal (a) e reforço pilar B (b).

2.2 - Programa de simulação numérica de elementos finitos: AUTOFORM

Tendo em conta que os custos associados à estampagem de componentes representam uma percentagem considerável dos investimentos totais de projecto/produção de um automóvel são exigidos tempos de resposta cada vez mais curtos, mesmo tendo em conta o aumento da complexidade geométrica das peças e a utilização crescente de novos materiais, menos dominados em termos do processo de estampagem. Para dar uma resposta eficaz a estes desafios tornou-se essencial utilizar programas de simulação do processo de estampagem, que estão englobados no que se designa por CAE - “Engenharia Assistida por Computador”. Entre as múltiplas vantagens da utilização de programas de simulação de estampagem, deve ser realçada a possibilidade de estudar e avaliar várias variáveis do processo, nomeadamente: a força de estampagem; a força de cerra-chapas; o adelgaçamento da chapa; o risco de rotura da chapa; a recuperação elástica do material; e a dimensão mínima para o “blank”. Além da fase de desenvolvimento de projecto, a simulação pode ainda ser útil na identificação de causas, e obtenção de soluções, durante a produção. [41]

2.2.1 - Simulação do processo de estampagem

A ferramenta de trabalho utilizada nos estudos de factibilidade que se apresentam foi o programa comercial Autoform™ na última versão actualizada à data (v4.1.1) disponível no Centro Tecnológico Sodecia S.A. A utilização deste programa é por ele ser uma das ferramentas

mais apropriadas para trabalhos de simulação numérica de elementos finitos de estampagem. O algoritmo do programa Autoform assenta numa formulação mecânica do tipo quasi-estática, na qual se desprezam os termos de inércia (aceleração). O esquema de integração temporal utilizado para resolver as equações características do problema é do tipo implícito e existem dois tipos de elemento finitos disponíveis para discretizar o corpo deformável (chapa): membrana ou casca com elementos triangulares. Ao longo da última década o programa Autoform™ tornou-se muito popular e o mais utilizado entre os construtores automóveis, pois reúne um bom nível de precisão de resultados associado a velocidades elevadas de cálculo. Em forma de resumo são apresentadas de seguida as características ou capacidades principais e disponíveis do programa Autoform™: a) Avaliação rápida da formabilidade (em poucos minutos) - ONE STEP; b) Obtenção rápida de esboços (blanks) - BLANK GENERATOR; c) Optimização do corte da chapa - NEST; d) Geração de ferramentas - DIEDESIGNER; e) Simulação completa da conformação - INCREMENTAL; f) Optimização da forma final do esboço (blank) - TRIM. [41]

Como meio principal de análise utilizado nos estudos de factibilidade, os resultados obtidos através da distribuição de pontos na curva limite de conformabilidade são calculados considerando vários critérios. As áreas que apresentam tendências para a falha do material, de acordo com os aspectos abaixo mencionados, são apresentadas pelas diferentes representações de cores no visor principal. Os critérios considerados no resultado e apresentados através de uma análise pormenorizada das diferentes áreas da FLD são:

- Fissuras/roturas - cor vermelha;
- Excessiva redução de espessura - cor laranja;
- Riscos de fissuras - cor amarela;
- Alongamento normal - cor verde;
- Alongamento insuficiente - cor cinza;
- Compressão de material - cor azul;
- Encalcamento - cor lilás;

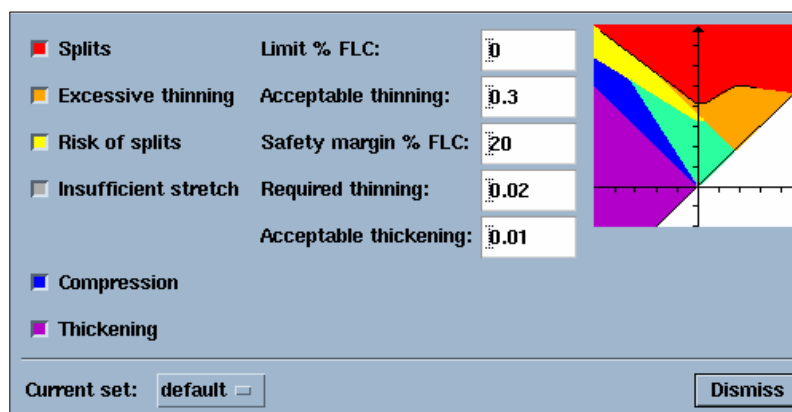


Figura 2.3 - Resultados obtidos segundo as cores da curva limite de conformabilidade. [41]

2.2.2 - Simulação do processo de estampagem a quente - Módulo “Hotforming”

O módulo “Hotforming” da AUTOFORM é um programa que permite simular o processo de estampagem a quente. Neste trabalho foi utilizada a versão “alfa 2” do programa, a qual conta com mais de dois anos de desenvolvimento e encontra-se actualmente em fase de testes junto dos parceiros industriais, entre os quais o Centro Tecnológico Sodecia também está integrado. Com esta ferramenta numérica é possível efectuar a simulação do processo de estampagem a quente propriamente dito, podendo ser ajustados as principais características/parâmetros do processo, tais como:

- a) a definição do material inicial, caracterizado para diferentes temperaturas e velocidades de deformação;
- b) a temperatura de aquecimento inicial da chapa;
- c) o coeficiente de dilatação da chapa;
- d) a temperatura de ferramentas e do meio ambiente (tidas como constantes);
- e) a velocidade de estampagem (que controla o arrefecimento durante a estampagem);
- f) o coeficiente de transferência de calor e a sua variação em função da pressão de contacto, e;
- g) o atrito entre a ferramenta e a peça. [42]

No anexo A encontram-se descritos em pormenor todos os parâmetros e o modo como são inseridos na fase de preparação da simulação.

A versão “alfa 2” só contempla um tipo de elemento finito - membrana - para discretizar a chapa, ainda que o elemento finito do tipo casca esteja previsto para a versão “release”, mas que não foi lançada no decurso deste trabalho.

A quantificação da velocidade de estampagem apenas serve de base para se poder modelar o arrefecimento em função do tempo, uma vez que a formulação mecânica do programa continua a assentar, tal como no módulo Incremental, no modelo quasi-estático, no qual se desprezam os termos de inércia associados à velocidade/aceleração.

Uma das limitações do módulo “alfa 2” utilizado consiste na não previsão/cálculo do efeito das transformações microestruturais que ocorrem no material no decurso da fase de arrefecimento, uma vez que estas não são contempladas nesta versão do programa. Assim, a avaliação das tensões internas e resistência do componente no final de todo o processo de estampagem a quente (conformação seguida de arrefecimento) não pôde ser quantificada. Está prevista a modelação da fase de arrefecimento e do correspondente tratamento térmico em versões futuras do programa, algo que já é previsto em alguns códigos de estampagem concorrentes, como o LS-Dyna e ABAQUS.

2.3 - Características dos materiais utilizados nas simulações

Os materiais utilizados nas simulações numéricas deste trabalho, quer as simulações de estampagem a frio quer as efectuadas simulando o processo de estampagem a quente, foram os presentes na base de dados da biblioteca de materiais do programa Autoform. Para os casos, como o aço microligado ao boro (22MnB5), este veio junto com o módulo “Hotforming” sendo o mesmo fornecido pela entidade ArcelorMittal. Assim, é apresentada uma tabela resumo com a caracterização base dos materiais estudados (tabela 2.1). A caracterização completa do aço ao boro segundo o programa Autofom, versão 4.1.1, encontra-se no anexo B, para melhor análise.

Tabela 2.1 - Características dos materiais utilizados na simulação de estampagem a frio, segundo a biblioteca de materiais do software - Autoform versão 4.1.1

Material	Aços macios (Mild Steel)		Aços de alta resistência microligados (HSLA)		Aços bifásicos “Dual Phase” (AHSS)			Aço microligado ao boro * (AHSS-UHSS)	Aço martensítico (UHSS)	
	<i>DC03</i>	<i>DC06</i>	<i>H300LA</i>	<i>H400LA</i>	<i>DP 500</i>	<i>DL 500</i>	<i>DP 800</i>	<i>22MnB5</i>	<i>M1400</i>	
<i>E - Módulo de Young [GPa]</i>	~210									
<i>v - Coeficiente de Poisson</i>	0.30									
<i>σ_0 - Tensão limite de elasticidade [MPa]</i>	231	167	308	405	367	254	498	400	1307	
<i>Rm - Tensão de rotura [MPa]</i>	347	301	391	540	590	524	861	600	1507	
<i>Coeficiente de Anisotropia</i>	<i>r_{0°}</i>	2.09	1.96	1.01	0.71	1.11	1.11	0.76	1.00	0.83
	<i>r_{45°}</i>	1.47	1.75	1.11	1.28	0.88	0.88	1.00	1.00	1.10
	<i>r_{90°}</i>	2.44	2.49	1.22	0.92	1.27	1.27	0.90	1.00	0.73
<i>Alongamento</i>	%	35	40	32	22	31	30	23	20	14
<i>Taxa de Encruamento</i>	<i>n</i>	0.15	0.21	0.12	0.14	0.16	0.24	0.13	0.17	0.07

* - No que respeita às características e dados comerciais sobre os aços microligados ao boro, os mesmos encontram-se disponíveis para melhor análise no anexo C, pois os mesmos dados não são considerados relevantes para o estudo em causa.

2.4 - Simulações de estampagem a frio

Na caracterização das simulações da estampagem a frio foram aplicados os seguintes parâmetros:

- Caracterização numérica:

- Elemento finito utilizado - elemento casca do tipo triangular;
- Nº de pontos de integração de Gauss ao longo da espessura: 5;
- Nível de precisão do solver: standard;
- Refinamento adaptativo da malha (adaptação à geometria local devido à deformação e critérios de distorção da malha). [14]

- Caracterização do material:

- Lei de encruamento: MISTA com uma componente lei de potência (Lei de Swift) associada a uma componente de saturação (Lei de Voce);

$$\sigma = (1 - \alpha) \left\{ C \cdot (\epsilon_{pl} + \epsilon_0)^m \right\} + \alpha \left\{ \sigma_{Sat} - (\sigma_{Sat} - \sigma_i) e^{-\alpha \epsilon_{pl}} \right\}$$

- Critério de plasticidade: Critério de Hill'48. [14]

2.4.1 - Caracterização das simulações para a barra de impacto (caso 1)

No modelo numérico utilizado nas simulações da barra de impacto foi usada sempre a mesma malha inicial de elementos finitos. A malha em questão é composta por 700 elementos triangulares e 399 nós (figura 2.4).

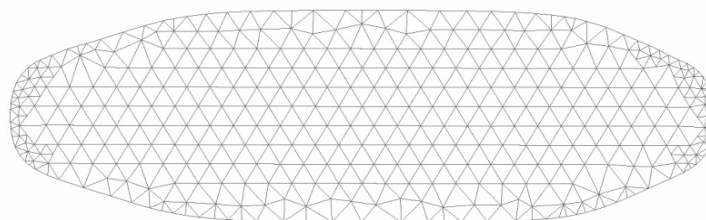


Figura 2.4 - Malha base de elementos finitos utilizada nas simulações da barra de impacto.

Na modelação do processo foram considerados os seguintes parâmetros:

- Coeficiente de lubrificação (atrito): 0.15
- Método (1) com 1 etapa - Força de aperto de cerra-chapas: 50 kN - método estampagem;

- Método (2) com 2 etapas:

- 1ª Etapa: Estampagem (“crashforming”, i.e., sem cerra-chapas)

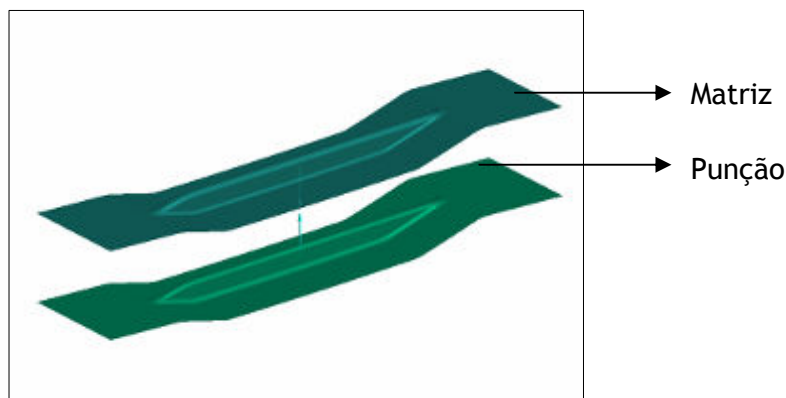


Figura 2.5 - Geometrias ferramentas virtuais - “crashforming”.

- 2ª Etapa: Estampagem/dobragem (com calcador - 50 kN);

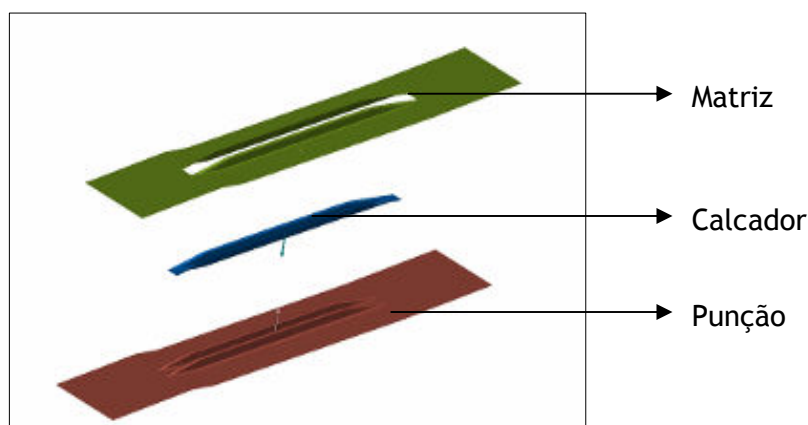


Figura 2.6 - Geometrias ferramentas virtuais - Aplicação de cerra-chapas.

Caso 1 - Barra de Impacto - Análise de factibilidade através de ferramentas de simulação.

Na análise tomou-se como ponto de partida uma geometria base de uma barra de impacto de uma porta frontal, representativa de um componente estrutural fundamental para a segurança, de utilização comum e obrigatória na construção automóvel. Foram simulados exemplos das várias classes de materiais, analisando os resultados das simulações e as suas implicações a nível do processo de conformação, e respectiva análise de factibilidade. A avaliação de condição de factibilidade foi feita através da combinação simultânea de duas variáveis: redução máxima de espessura; e posição dos pontos materiais relativamente à curva limite de embutidura (FLD). Os resultados de redução máxima de espessura são obtidos através da função “thinning” do programa de simulação, representados na tabela 2.2. De referir que a ausência de dados na mesma tabela, representada pelas letras “na”, significa que o resultado não é factível. Por essa razão não é representado um valor de redução máxima de espessura, pois os resultados apresentam rotura. Nesta mesma análise comparativa foram utilizados dois

métodos de simulação de estudo do processo de estampagem a frio: um em que apenas se utiliza um passo de estampagem, sem cerra-chapas (“crashforming”); e um segundo onde são utilizados dois passos de conformação representados acima como segundo método de análise, este apresentado como solução para problemas de rotura.

2.4.2 - Resultados das simulações para a barra de impacto (caso 1)

A tabela 2.2 apresenta a compilação de dados sobre a redução de espessura e força de estampagem, obtidos através dos estudos realizados sobre a barra de impacto, segundo as condições estabelecidas. A ausência de dados na tabela (representada por “na”) para a espessura e força deve-se ao resultado de rotura da peça na simulação. O estudo da simulação de estampagem com o aço macio, designado por DC06, apresenta resultados de factibilidade positivo, pois não se verifica rotura da peça e a redução de espessura (~26%) é inferior ao especificado. Contudo, em relação aos outros exemplos analisados com resultados factíveis é muito superior. Isto devido ao facto do processo de transformação da peça ser simulada em apenas um passo de estampagem, diferente dos outros exemplos simulados, onde foram usados dois passos na conformação. O valor da força de estampagem para o aço DC06 verifica-se superior ao primeiro valor apresentado na tabela seguinte para os restantes exemplos, isto porque neste caso verifica-se a completa conformação da geometria da peça através do processo de estampagem. As simulações com duas etapas de transformação apresentam dois valores de força visto serem representativas de duas etapas de conformação. Os resultados das simulações a frio, com duas etapas, evidenciam que os materiais caracterizados com um maior valor de resistência mecânica apresentam uma maior redução de espessura e uma maior força de estampagem. Os resultados, utilizando o método com duas etapas, apontam para a factibilidade da peça, apresentando reduções de espessuras muito inferiores ao especificado. Apenas o caso da aplicação do material “M1400”, existe algum risco de fissuras, no entanto estas estão presentes em zonas de recorte que não fazem parte da geometria final da peça.

Tabela 2.2 - Resultados associados a redução máxima de espessura e da força de estampagem para os materiais utilizados na simulação de estampagem a frio [Autoform versão 4.1.1]

Classe dos Materiais	Exemplo dos materiais	Nº Etapas de processo	Redução de espessura [%]	Força de estampagem [kN]
Aços macios - MILD STEEL	DC03	1 Etapa	na	na
	DC06	1 Etapa	26,9	783,3
Aços de alta resistência microligados - HSLA	H400LA	1 Etapa	na	na
	H400LA	2 Etapas	9,1	207,2 + 379,3 *
Aços bifásicos (Dual Phase) AHSS/UHSS	DP800	1 Etapa	na	na
	DP800	2 Etapas	9,5	328,1 + 522,2 *
Aço martensítico - UHSS	M1400	2 Etapas	10,1	527 + 769,6 *

* - Os valores representam o somatório de forças das duas etapas de estampagem consideradas.

No que respeita aos resultados da posição dos pontos materiais no diagrama (FLD), os mesmos são apresentados através da tabela resumo (tabela 2.3) ilustrando a factibilidade ou não factibilidade da peça para os diferentes materiais testados. As imagens representativas do resultado da factibilidade para os diferentes materiais simulados, para o estudo em análise, encontram-se em anexo (anexo D) como indicado na tabela 2.3.

- Discussão dos resultados obtidos - Simulação da barra de impacto (Estampagem a frio):

Através dos resultados obtidos nas simulações efectuadas para os diferentes exemplos de classes de materiais e processos de conformação da barra de impacto da porta frontal, verifica-se que, considerando apenas uma operação de estampagem, no que respeita aos materiais metálicos ferrosos convencionais para estampagem profunda, os aços macios, DC03 e DC06, apenas no segundo material, se verifica a factibilidade do produto devido à sua superior capacidade de alongamento.

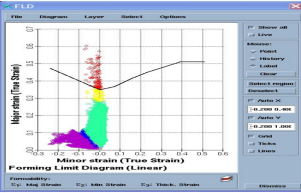
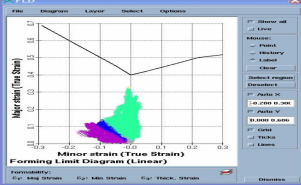
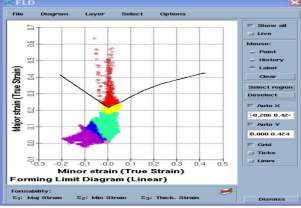
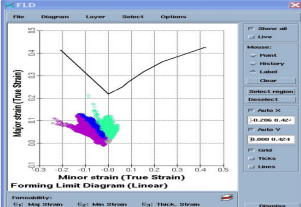
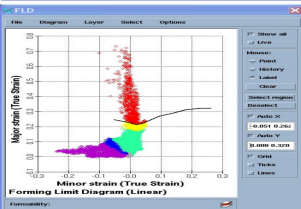
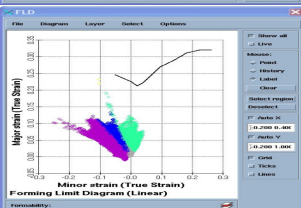
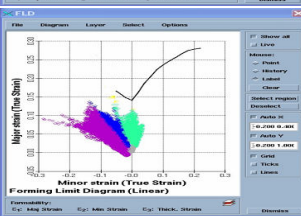
Tendo em conta a evolução da aplicação dos aços microligados testou-se um dos aços mais utilizados nesta classe, o H400LA. Através da simulação numérica foi possível verificar que o produto não é factível numa só etapa de estampagem, mas utilizando a configuração de processo com duas etapas de estampagem o produto torna-se factível, como é apresentado na tabela 2.3.

Com a utilização de materiais de resistência mecânica superior aos anteriores analisados, os aços do tipo “Dual Phase”, simulando o produto com o exemplo de aço DP800, os resultados obtidos são análogos às simulações executadas com o material H400LA, apresentando para dois passos de estampagem, uma redução de espessura e força de estampagem ligeiramente superiores às do H400LA. Os resultados destes aços reflectidos na curva limite de embutidura apresentam alguma similaridade devido às suas características muito idênticas, principalmente em termos de capacidade de alongamento.

Tendo em conta as especificações do produto em análise por parte do cliente, isto é, de o mesmo ter uma resistência que pressupõe a utilização de aços da classe dos materiais de ultra alta resistência (UHSS), foram então testadas duas tecnologias de processo, no entanto, tendo em conta os resultados obtidos para as classes de materiais anteriormente referidas, considerou-se de pronto a configuração do processo com duas etapas de estampagem.

O aço martensítico testado, com um nível de resistência à tracção de 1400 MPa, apresenta resultados satisfatórios de factibilidade, pois os pontos críticos estão presentes na zona de contorno da peça final. Contudo, tendo em conta a baixa capacidade de alongamento deste material, foi tido como importante a análise deste produto utilizando outras tecnologias para melhor analisar, em paralelo, a factibilidade do produto.

Tabela 2.3 - Resultados da distribuição de pontos da curva limite de embutadura (FLD) para os materiais simulados na estampagem a frio da barra de impacto [Autoform versão 4.1.1]

Materiais de estudo	Nº Etapas de Processo	Resistência [MPa]	Simulação [FLD] (ANEXO D)	Resultado Factibilidade (ANEXO D)
DC03	1 Etapa	270 - 350		<p style="color: red; text-align: center;">NOK</p> <p style="text-align: center;">Figura D.1</p>
DC06				<p style="color: green; text-align: center;">OK</p> <p style="text-align: center;">Figura D.2</p>
H400LA	1 Etapa	400 - 500		<p style="color: red; text-align: center;">NOK</p> <p style="text-align: center;">Figura D.3</p>
H400LA	2 Etapas			<p style="color: green; text-align: center;">OK</p> <p style="text-align: center;">Figura D.4</p>
DP800	1 Etapa	800 - 900		<p style="color: red; text-align: center;">NOK</p> <p style="text-align: center;">Figura D.5</p>
DP800	2 Etapas			<p style="color: green; text-align: center;">OK</p> <p style="text-align: center;">Figura D.6</p>
M1400	2 Etapas	1400 - 1500		<p style="color: green; text-align: center;">OK</p> <p style="text-align: center;">Figura D.7</p>

2.4.3 - Caracterização das simulações para o pilar B (caso 2)

No modelo numérico utilizado nas simulações pilar B do foi usada sempre a mesma malha inicial de elementos finitos. A malha em questão é composta por 1595 elementos triangulares e 917 nós (figura 2.7).

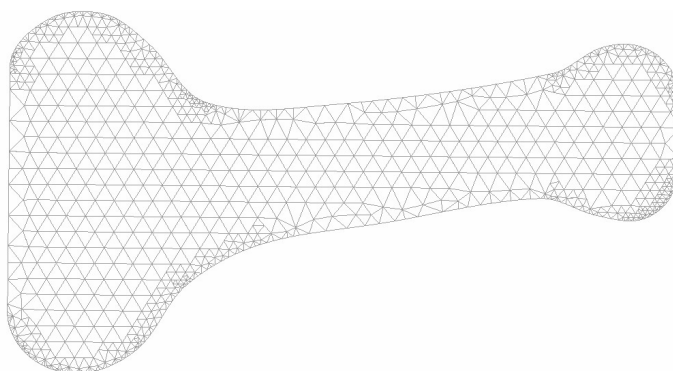


Figura 2.7 - Malha base de elementos finitos utilizada nas simulações do Pilar B.

Caracterização do Processo:

- Coeficiente de lubrificação: 0.15
- Método (1) com 1 etapa - força aperto de cerra-chapas: 20 kN - método estampagem;
 - Estampagem (“crashforming”)

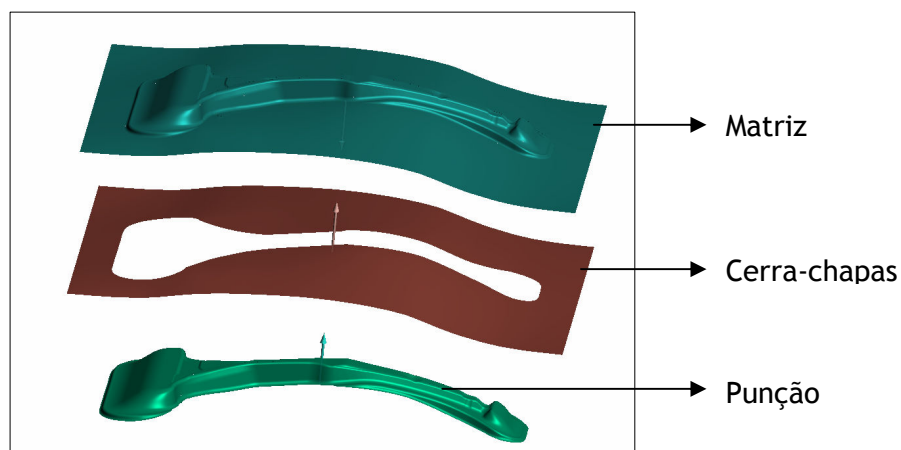


Figura 2.8 - Geometrias ferramentas virtuais - “Crashforming”

Caso 2 - Pilar B - Análise de factibilidade através de ferramentas de simulação.

No que respeita ao segundo caso, considerou-se como ponto de partida uma geometria base de um pilar B, representativa de um componente estrutural fundamental para a segurança, de utilização comum na construção automóvel. Como o caso anterior (1), foram simulados exemplos das várias classes de materiais, verificando-se as suas implicações a nível do processo de conformação e respectiva análise de factibilidade.

A avaliação de condição de factibilidade foi feita, tal como o caso da barra de impacto, através da combinação simultânea de duas variáveis: redução máxima de espessura e posição dos pontos relativamente à curva limite de embutidura (FLD) - (tabela 2.4 e 2.5).

A mesma justificação é usada para a ausência de dados na tabela, representada pelas letras “na”, significando assim que o resultado não é factível. Por essa razão não é representado um valor de redução máxima de espessura. Ao contrário da análise anterior, esta tem como objectivo estudar a evolução dos materiais, comparando os resultados obtidos utilizando apenas um método único de simulação de estudo para o processo de estampagem a frio. Isto prende-se com as dimensões e configuração da geometria da peça, pois a mesma apresenta uma considerável profundidade de embutidura que dificultará a conformação da peça num segundo passo de estampagem devido ao fenómeno de encruamento. Este fenómeno provoca um aumento da resistência mecânica e a diminuição da capacidade de alongamento, com a transformação da austenite residual. Esta pode também apresentar problemas de “rugos” utilizando uma segunda etapa de estampagem.

2.4.4 - Resultados das simulações para o pilar B (caso 2)

Os resultados das simulações do pilar B apresentados na tabela 2.4 evidenciam que os materiais presentes com um maior valor de resistência mecânica apresentam uma maior redução de espessura, menor capacidade de alongamento e uma maior força de estampagem, como seria de esperar. O caso particular do material DL500 apresenta uma resposta idêntica ao material DP500 no que respeita à resistência mecânica, contudo apresenta uma capacidade de alongamento bastante superior, pois através deste material a peça torna-se factível, como evidencia a tabela 2.4. Como referido, a ausência de dados na tabela deve-se ao resultado de rotura da peça na simulação. Estes resultados são possíveis verificar na íntegra através das figuras presentes no anexo E, como também através das figuras presentes na tabela 2.5.

Tabela 2.4 - Resultados associados a redução máxima de espessura e da força de estampagem para os materiais utilizados na simulação de estampagem a frio [Autoform versão 4.1.1]

Classe dos Materiais	Exemplo dos materiais	Redução de espessura [%]	Força de estampagem [kN]
Aço macio - MILD STEEL	DC06	15,6	1181,6
Aços de alta resistência - HSLA	H300LA	17,3	1240,7
	H400LA	na	2009,0 *
Aços bifásicos (“Dual Phase”) - AHSS	DP500	na	2352,5 *
	DL500	21,0	1971,1
Aço martensítico - UHSS	M1400	na	4704 *

* - Os valores das forças de estampagem são representativas dos processos simulados, contudo não “reais” devido ao facto da simulação de factibilidade apresentar rotura total da peça.

No que respeita aos resultados da posição dos pontos da curva limite de embutidura (FLD), os mesmos são apresentados através da tabela resumo (tabela 2.5) ilustrando a factibilidade ou não factibilidade da peça para os diferentes materiais testados.

- Discussão dos resultados obtidos - Simulação do pilar B (Estampagem a frio)

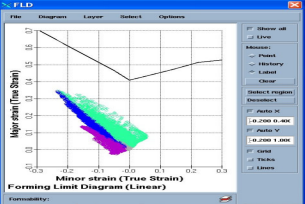
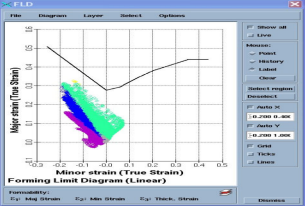
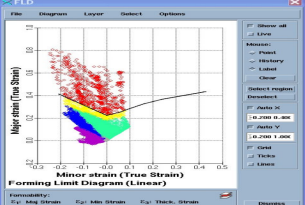
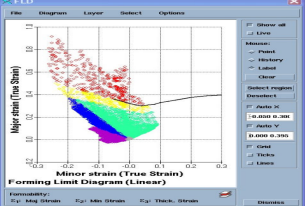
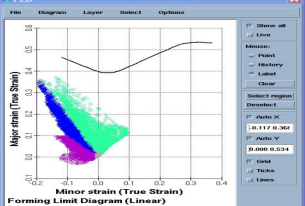
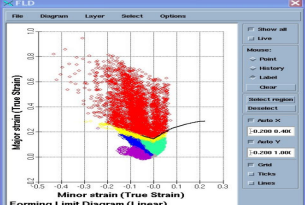
Os resultados das simulações efectuadas para os diferentes materiais usados para o pilar B evidenciam que, para um exemplo de material convencional, DC06, se verifica a factibilidade do produto utilizando o processo convencional de estampagem a frio. O bom comportamento do material prende-se com a sua elevada capacidade de alongamento, também por essa razão apresenta a menor força necessária para estampagem.

Seguindo os mesmos princípios de análise efectuada para o caso da barra de impacto, testaram-se dois exemplos de aços de alto limite elástico (microligados): o aço H300LA e o H400LA. No que respeita ao primeiro caso (H300LA), observa-se que a peça é factível. O mesmo não se observou com o caso do (H400LA), isto porque relativamente aos anteriores este apresenta menos capacidade de conformação.

A evolução dos materiais de “nova geração” visa associar a elevada capacidade de resistência mecânica a uma razoável capacidade de alongamento. Assim, na classe AHSS desta análise, foram simulados dois materiais que apresentam características de resistência mecânica muito próximas, no entanto, no que respeita à capacidade de alongamento, são diferentes. Explicitamente, o material DP500, com microestrutura bifásica (“Dual Phase”) apresenta capacidades de alongamento inferiores ao aço DL500 que também é definido e caracterizado como um aço “Dual Phase”, contudo com a particularidade “evolutiva” de apresentar menor percentagem de carbono. Assim, verificou-se a factibilidade de conformação da peça simulada com o aço DL500, ao contrário da simulada com o aço DP500.

Relativamente à estampagem convencional (estampagem a frio) foi testado um aço martensítico, da classe UHSS, com um nível de resistência na ordem de 1400 MPa. Analisando os resultados obtidos para as classes de materiais anteriormente estudadas, seria de esperar resultados de factibilidade não muito favoráveis utilizando apenas uma etapa de estampagem, isto porque a geometria da peça e o material em causa, com reduzida capacidade de alongamento, não são indicados para utilizar em duas ou mais etapas de embutimento, devido ao fenómeno de encruamento do material. Esta previsão foi comprovada pela simulação, pois não foi possível obter a factibilidade do produto.

Tabela 2.5 - Resultados da distribuição de pontos da curva limite de embutadura (FLD) para os materiais simulados na estampagem do pilar B [Autoform versão 4.1.1]

Materiais de estudo	Nº Etapas de Processo	Resistência [MPa]	Simulação [FLD] (ANEXO E)	Resultado Factibilidade (ANEXO E)
DC06	1 Etapa	270 - 300		OK (Figura E.1)
H300LA		300 - 400		OK (Figura E.2)
H400LA		400 - 500		NOK (Figura E.3)
DP500		500 - 600		NOK (Figura E.4)
DL500		450 - 550		OK (Figura E.5)
M1400		1400 - 1500		NOK (Figura E.6)

2.5 - Simulações de estampagem a quente

Os estudos realizados sobre as peças em termos de simulação de estampagem a quente foram caracterizados através de alguns parâmetros muito importantes. Estes foram baseados em trabalhos práticos já realizados, na informação presente na parte introdutória e em dados fornecidos pelo centro de desenvolvimento do fornecedor do software, em conjunto com a formação recebida sobre o módulo específico utilizado para simular este processo (o módulo “Hotfoming”). Alguns dos parâmetros mais importantes para melhor caracterizar o processo de estampagem a quente são: a caracterização numérica, esta através da definição do elemento finito utilizado - elemento membrana; o número de pontos de integração de “Gauss”, que ao longo da espessura, é de cinco pontos; o nível de precisão, o utilizado foi o “standard”; e o refinamento adaptativo da malha.

No que respeita à caracterização mecânica do processo, o mesmo foi definido através de um coeficiente de lubrificação, representativo do processo de estampagem a quente e que se encontra predefinido no software para este tipo de aplicação. Assim, o coeficiente de lubrificação tem definido um valor de 0.35 para a estampagem a quente. Outro parâmetro importante é a força de aperto de cerra-chapas, que foi definida segundo as necessidades de cada processo, e consonante com a geometria da peça, material e espessura.

A caracterização térmica do processo foi para esta análise um ponto muito importante ou diferencial, pois integra a maioria de dados que não são utilizados no processo convencional a frio e que ao mesmo tempo representam as condições da estampagem a quente.

Os dados utilizados foram:

- Temperatura da chapa (850; 900; 950; 1000; 1100; 1200°C);
- Temperatura da ferramenta (valores obtidos através de dados fornecidos pela fornecedores do programa e dos equipamentos, prensa e ferramentas de estampagem);
 - Matriz: 150°C; - Punção: 100°C; - Calcador (cerra-chapas): 150°C;
- Velocidade de arrefecimento da chapa ao ar ~20°C/s;
- Transferência de calor: Entre chapa e ferramenta: factor HTC (Coeficiente de transferência de calor): de 1.0 a 5.0 kW/m² K, variável em função da pressão aferida no processo e calculada automaticamente pelo próprio software em consonância com a variação de pressão do calcador (cerra-chapas), que se encontrará entre 0MPa a 35MPa; a dilatação da chapa de aproximadamente 1% da espessura, pois aquando do aquecimento, a chapa dilata alterando a sua espessura inicial em relação à temperatura ambiente; e o coeficiente de transferência de calor entre a chapa e o meio ambiente considerado 0.15 (kW/m² K). Este valor foi definido segundo a informação analisada junto da entidade fornecedora do software AutoformTM, durante o período de formação sobre o módulo “Hotforming”.

A caracterização do material é também um ponto muito importante a ter em conta neste estudo, pois o material apresenta características específicas e diferenciais aplicadas a este processo. O exemplo utilizado do aço ao boro está presente na biblioteca de materiais do software Autoform e foi caracterizado e fornecido a esta entidade por parte da ArcelorMittal. A designação comercial do material é: Aço ao Boro (22MnB5 + AlSi), sendo o comportamento elásto-plástico caracterizado por: material anisotrópico a frio, no estado de fornecimento e quando da transformação na temperatura de austenitização apresenta isotropia. A caracterização do mesmo é apresentada na íntegra em anexo (Anexo B) e faz parte da biblioteca de materiais do programa Autoform™, figura 2.9:

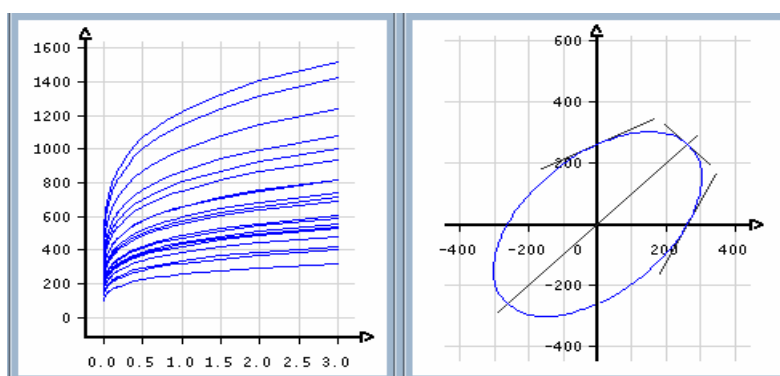


Figura 2.9 - Caracterização da curva tensão-deformação para o material 22MnB5, em função da temperatura de transformação. [14]

A lei de encruamento é considerada mista com uma componente lei de potência - Lei de Swift, associada a uma componente de saturação - Lei de Voce, anteriormente referida na caracterização da estampagem a frio. Quanto ao critério de plasticidade, este é caracterizado segundo o Critério de Hill'48. [14]

2.5.1 - Caracterização das simulações para a barra de impacto (caso 1)

No modelo numérico utilizado nas simulações da barra de impacto foi usada sempre a mesma malha inicial de elementos finitos. A malha em questão é composta por 739 elementos triangulares e 430 nós (figura 2.10).

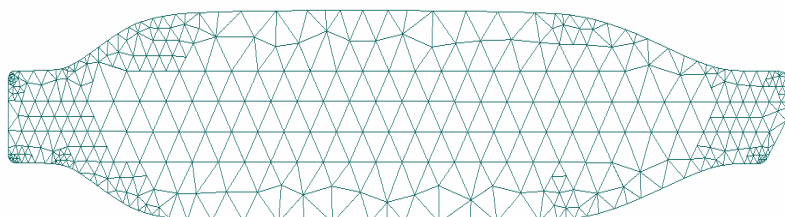


Figura 2.10 - Malha base de elementos finitos utilizada nas simulações da barra de impacto.

Caracterização do ciclo de produção:

O gráfico representativo da estampagem da peça apresenta, deste a entrada até à saída da prensa: Tempo de arrefecimento - 4,0 segundos; Tempo total de ciclo - 9,8 segundos; Velocidade média de estampagem: $430 / 1,8 = 239$ [mm/s]

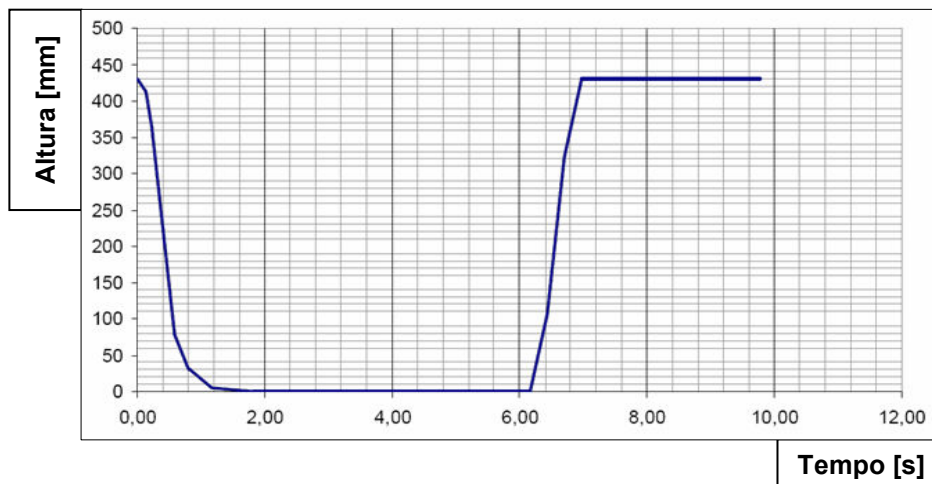


Figura 2.11 - Gráfico representativo do ciclo de estampagem a quente da barra de impacto. [27]

Caracterização dos métodos de análise:

No estudo de estampagem a quente da peça, utilizando o módulo de simulação “Hotforming”, foram considerados os sistemas directos e indirectos, como descrito no capítulo 1 (figura 1.7 e 1.8). Em primeiro lugar foi estudado o processo directo e procedeu-se a uma análise em que se fez variar a temperatura inicial da chapa no intervalo de 850 e 1200°C. Assim, determinou-se a temperatura necessária, à saída do forno, para garantir a temperatura mínima de austenitização (A_3) no início do processo de estampagem. Foi também tido em conta a taxa de arrefecimento entre a saída do forno e o final do processo de estampagem. O factor de velocidade (tvf) foi estabelecido pelo gráfico representativo do ciclo de produção, apresentado acima na caracterização do processo, pela figura 2.11, sendo este de 239 mm/s. O parâmetro de coeficiente de lubrificação utilizado é o indicado neste tipo de processo (0.35).

Fez-se um segundo estudo sobre o efeito do coeficiente de lubrificação, para assim mostrar evidências da influência da fricção existente no processo de estampagem a quente. Tendo em conta que o processo de estampagem a quente através do sistema directo veio a apresentar alguns problemas em termos de conformabilidade (aparecimento de fissuras/rotura), foi também estudado o processo aplicando o sistema indirecto. O processo indirecto está dividido em duas partes distintas: a primeira através da simulação de uma parte da geometria da peça a frio; e a segunda através da simulação da geometria final da peça, a quente. Aqui, como no caso anterior, foi feita uma análise sobre as temperaturas de austenitização, com o mesmo coeficiente de lubrificação (0.35) e velocidade definida no ciclo de produção da peça para o processo de estampagem a quente - sistema directo.

2.5.2 - Resultados das simulações para a barra de impacto (caso 1)

- Processo de estampagem a quente - Sistema directo (Influência da temperatura)

Em primeiro lugar é importante referir que através dos resultados obtidos para este processo nenhuma das soluções foi identificada como factível, pois os resultados da redução de espessura são todos superiores ao especificado (28%), como se pode ver através da tabela 2.6, e das figuras F.1, F.2 e F.3 em anexo (anexo F). No entanto, os valores obtidos de redução de espessura não são representativos da realidade devido à rotura da peça para todos os casos. No que respeita à temperatura os resultados mostram que com o aumento desta, menor é a força de estampagem necessária para realizar o trabalho de transformação, visto que temperaturas mais elevadas facilitam o escoamento. Associado a este parâmetro verifica-se que quanto maior a temperatura inicial da chapa maior vai ser a taxa de arrefecimento deste a temperatura à saída do forno até ao início da transformação. No entanto, através da análise dos diagramas TAC pode-se assumir que é necessário uma temperatura de 950°C à saída do forno, para que a taxa de arrefecimento seja garantida no valor mínimo estudado anteriormente, de aproximadamente de 25°C por segundo, tendo em conta o período de transição em questão, que é de 4,8 segundos. Por fim, os resultados da análise da temperatura mínima de austenitização (880°C), condição necessária para obter uma elevada percentagem de fase martensítica após arrefecimento, mostram que acima da temperatura de 950°C inclusive, esse objectivo é atingido, pois o início do processo de conformação encontra-se num intervalo de temperaturas entre 840 e 888°C. Esta análise é de todo importante e considerada a nível metalúrgico, mesmo que os resultados não sejam favoráveis a nível de factibilidade. A mesma é fundamentada nas evidências dos estudos apresentados no capítulo 1 (pág. 14).

Tabela 2.6 - Resultados da análise da simulação numérica de estampagem a quente do processo directo, variando as temperaturas iniciais da simulação.

Barra de impacto	Temperatura [°C]				Taxa de arrefecimento (a_b) [°C/s]	Redução de espessura [%]	Força de estampagem [kN]
	a) Saída Forno	Início Prensa	Início Forma	b) Fim Forma			
Sistema directo	1200	1121	1059	1043	32,7	50,3 *	379
	1100	1020	972	941	33,1	51,6 *	376
	1000	935	884	870	27,1	47,8 *	403
	950	888	840	827	25,7	48,1 *	434
	900	834	796	783	24,4	48,6 *	447
	850	788	752	737	23,5	49,7 *	497

* - Resultado das simulações em relação à redução de espessura, é relativo ao valor máximo retirado da simulação, contudo é de carácter meramente informativo, isto porque se verificou a rotura em todos os casos estudados e presentes na tabela anterior.

As figuras seguintes apresentadas são o resultado das simulações para a temperatura de 950°C utilizando o sistema directo, pois esta é representativa do processo em questão. É importante referir que esta temperatura para além de garantir as especificações das temperaturas ideais do processo, é a que supostamente consumirá menos energia dentro das admissíveis, por essa razão é importante estudar a temperatura mais baixa possível que dê resposta ao processo em análise.

A figura 2.12 é representativa do resultado da não factibilidade da peça, pela evidente presença de fissuras/rotura na mesma (a leitura mais pormenorizada dos resultados pode ser satisfeita através da ajuda do gráfico de cores da FLD, presente na página 19). As figuras seguintes representam o resultado da redução de espessura (ver figura 2.13) e da temperatura (ver figura 2.14), ambas representativas do estado final de estampagem a quente.

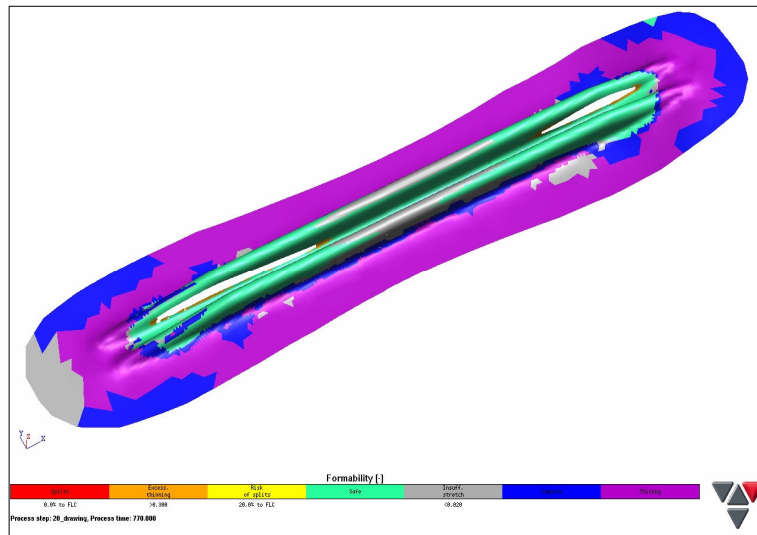


Figura 2.12 - Representação do resultado de conformabilidade obtida da simulação a 950°C.

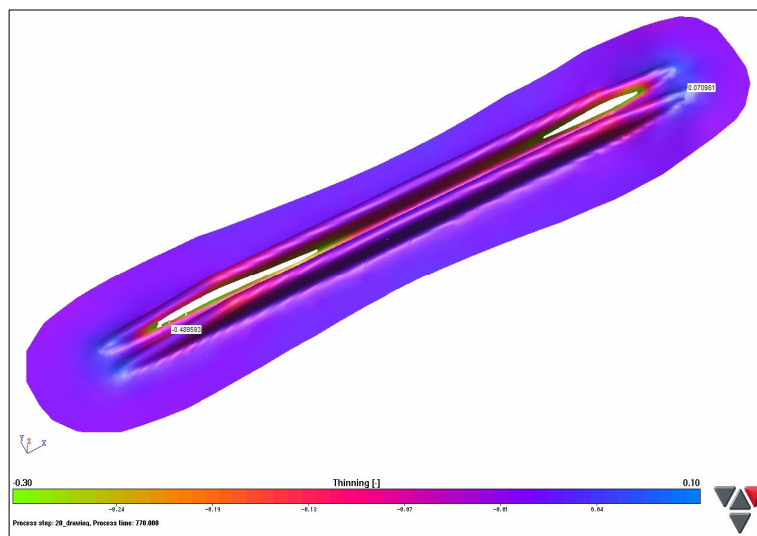


Figura 2.13 - Representação do resultado de redução de espessura obtida da simulação a 950°C.

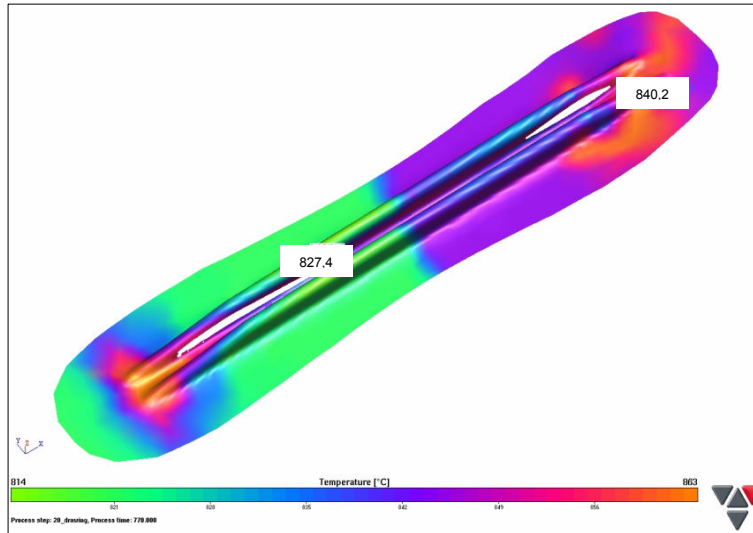


Figura 2.14 - Representação do resultado das temperaturas finais obtidas da simulação a 950°C.

- Processo de estampagem a quente - Sistema directo (Coeficiente de lubrificação)

Os resultados obtidos fazendo variar o valor do parâmetro de coeficiente de lubrificação, evidenciam a não factibilidade da peça para os valores de coeficiente de lubrificação 0.35, 0.25 e 0.15, como se pode verificar através da tabela 2.7 e das figuras G.1, G.2, G.3 e G.4, em anexo (Anexo G). A maioria dos casos apresenta rotura e reduções de espessura superiores ao limite especificado de 28%. Apenas para o valor de 0.05, que representa um valor de lubrificação especial, o resultado não apresenta rotura, como também uma redução admissível na ordem dos 23%, que é inferior ao limite de 28%. No entanto, este estudo teórico serve para mostrar a influência das características especiais do processo de estampagem a quente, no parâmetro de atrito, pois na realidade este coeficiente de lubrificação (0.05) não representa as condições reais a quente. A tabela 2.7 mostra que os resultados relativos à força de estampagem aumentam com a lubrificação especial (0.05) devido à ausência de rotura da peça.

Tabela 2.7 - Resultados da análise da simulação numérica de estampagem a quente do processo directo, variando o coeficiente de lubrificação.

Barra de impacto	Temperatura [°C]	Velocidade [mm/seg]	Coeficiente de lubrificação	Redução de espessura [%]	Força de estampagem [kN]
Sistema directo	950	239	0.35	48,1 *	434
			0.25	47,7 *	439
			0.15	37,2 *	440
			0.05	22,9	455

* - Resultado das simulações relativo à redução de espessura refere-se ao valor máximo retirado da simulação, contudo é de carácter informativo, isto porque se verificou a rotura da peça.

- Processo de estampagem a quente - Sistema indirecto - 1ª Parte a frio (Temperatura)

No sistema indirecto, como já foi abordado anteriormente, a primeira parte da transformação é realizada a frio, utilizando o material no seu estado de fornecimento. O resultado desta simulação em termos de factibilidade é positiva, como se pode verificar através da figura 2.15 e a redução de espessura verificada (figura 2.16), é de aproximadamente 7%, muito inferior ao máximo especificado de 28%. Seguidamente, sobre a geometria concebida na estampagem a frio, efectuou-se um estudo de simulação de estampagem a quente usando os mesmos princípios da primeira parte deste estudo, fixando o coeficiente de lubrificação em 0.35.

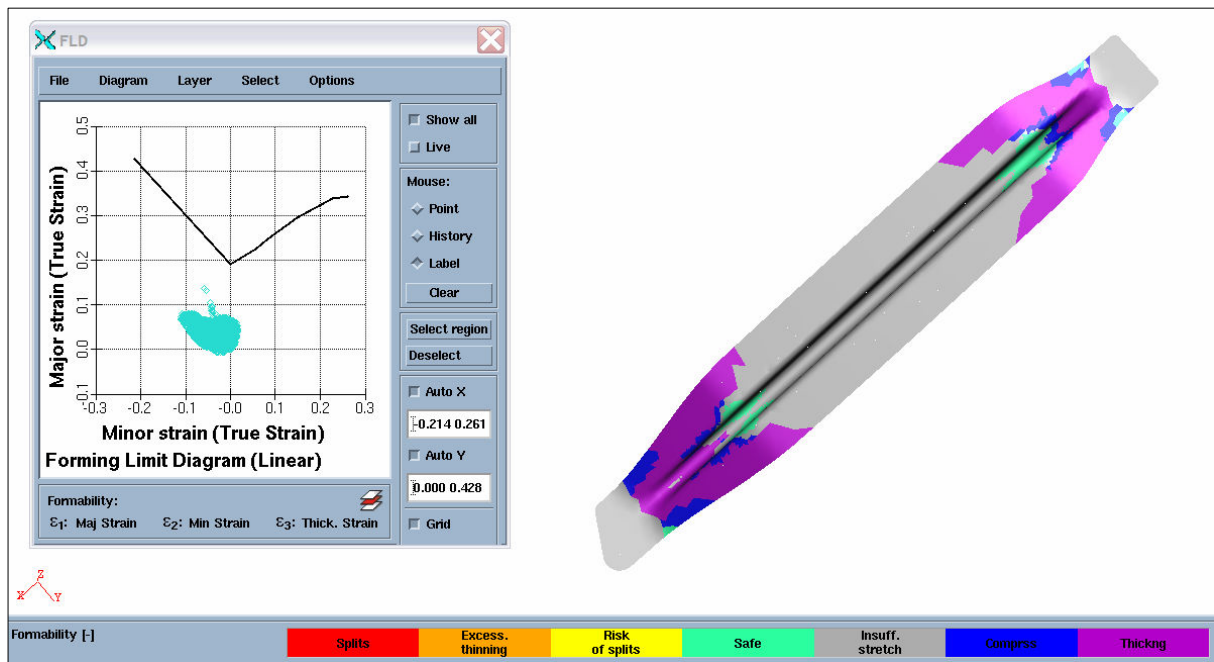


Figura 2.15 - Representação do resultado da análise de factibilidade obtida da simulação a frio e com coeficiente de lubrificação - 0.15 (Standard).

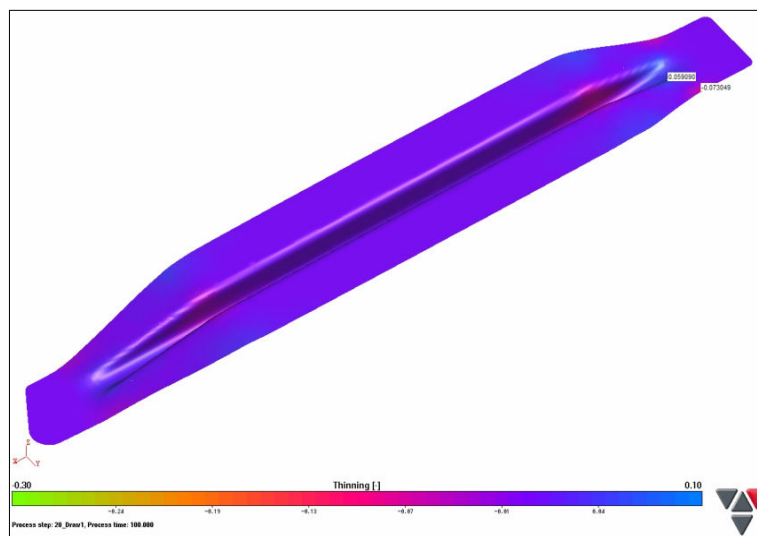


Figura 2.16 - Representação do resultado de redução de espessura obtida da simulação a frio.

- Processo de estampagem a quente - Sistema indirecto - 2ª Parte a quente (Temperatura)

Os resultados obtidos da simulação numérica da estampagem a quente, usando o sistema indirecto, mostram que a peça é factível para todos os casos analisados, pois o valor de redução máxima de espessura verificada é de 13,5%, como se pode ver na tabela 2.8. Verifica-se também que com a diminuição das temperaturas iniciais da simulação a redução de espessura aumenta, contudo, a perda de temperatura é inferior. No que respeita à determinação da temperatura de saída do forno, verifica-se que a temperatura no início do processo de estampagem só é superior à temperatura de austenitização (880°C) para uma temperatura inicial de 900°C, como mostra a tabela 2.8.

Tabela 2.8 - Resultados da análise da simulação numérica de estampagem a quente do processo indirecto, variando as temperaturas iniciais da simulação.

Barra de impacto	Temperatura [°C]				Taxa de arrefecimento	Redução de espessura	Força de estampagem
	a) Saída Forno	Início Prensa	Início Forma	b) Fim Forma	(a_b) [°C/s]	[%]	[kN]
Sistema indirecto	1000	887	834	821	37,3	12,6	439
	950	849	809	795	32,3	13,1	471
	900	820	782	768	27,5	13,3	491
	850	778	745	731	24,8	13,5	519

Assim nas simulações executadas para o estudo de factibilidade considerou-se a temperatura de 1000°C pois esta é a que apresenta resultados admissíveis em termos de temperatura de austenitização. A figura 2.17 apresenta o resultado factível da peça com este processo e parâmetros definidos. As figuras seguintes representam o resultado da redução de espessura (ver figura 2.18) e da distribuição das temperaturas (ver figura 2.19).

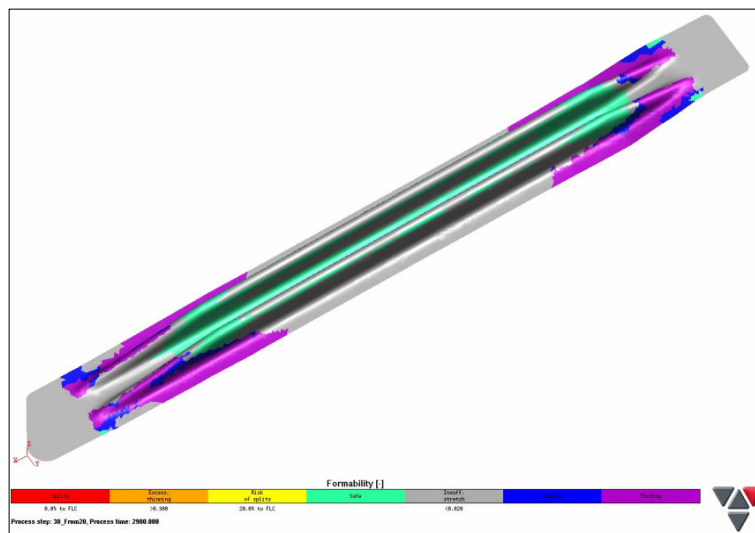


Figura 2.17 - Representação do resultado da análise de factibilidade obtida da simulação a 950°C e com coeficiente de lubrificação 0.35.

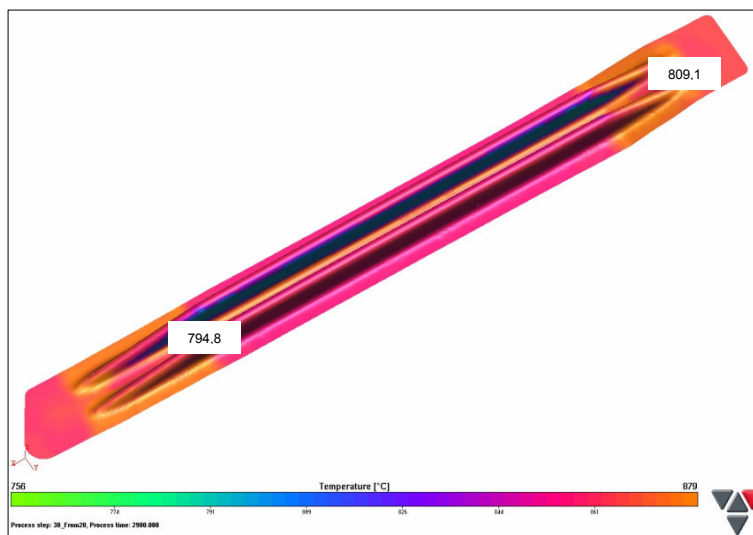


Figura 2.18 - Representação do resultado das temperaturas obtidas da simulação a 950°C.

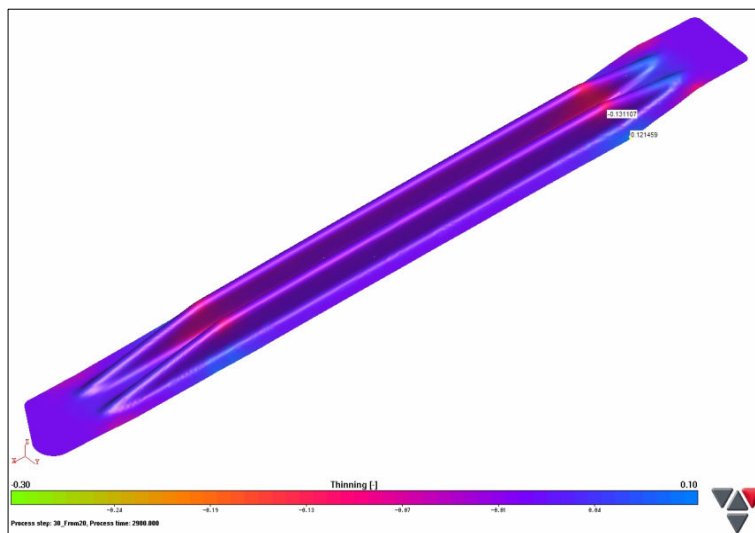


Figura 2.19 - Representação do resultado de redução de espessura obtida da simulação a 950°C.

2.5.3 - Caracterização das simulações para o pilar B (caso 2)

No modelo numérico utilizado nas simulações do pilar B foi usada sempre a mesma malha inicial de elementos finitos. A malha em questão é composta por 1595 elementos triangulares e 917 nós (figura 2.20).

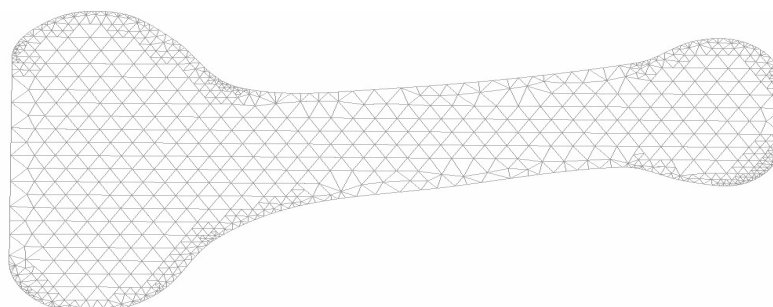


Figura 2.20 - Malha base de elementos finitos utilizada nas simulações do pilar B.

Caracterização do ciclo de produção:

O gráfico representativo da estampagem da peça apresenta, deste a entrada até à saída da prensa: Tempo total de ciclo - 11,1 segundos; Tempo de arrefecimento - 4,5 segundos; Velocidade média de estampagem: $630 / 1,8 = 350$ [mm/s]

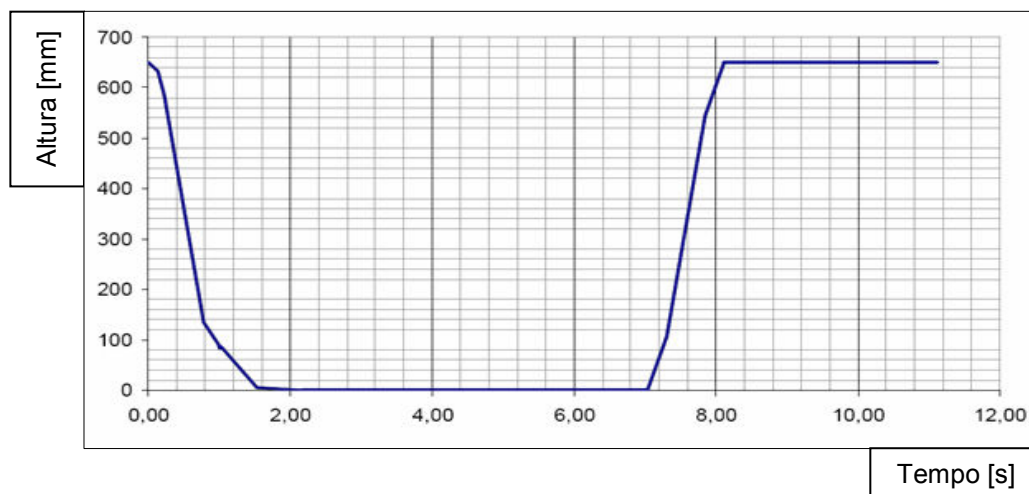


Figura 2.21 - Gráfico representativo do ciclo de estampagem a quente do exemplo do pilar B. [27]

Caracterização dos métodos de análise:

O estudo de factibilidade de simulação numérica através do módulo “Hotforming” para a peça pilar B baseou-se no mesmo princípio, que o da peça barra de impacto. No entanto, este foi apenas realizado através do sistema directo do processo de estampagem a quente, pois não se verificou a necessidade de utilizar o sistema indirecto. Em primeiro lugar estudou-se a variação do parâmetro de temperatura, dentro do intervalo de temperaturas entre os 850°C e os 1100°C, para analisar a perda de temperatura aquando do início do processo de estampagem (e através desta definir a temperatura óptima e/ou necessária para garantir a temperatura mínima de austenitização). O parâmetro de coeficiente de lubrificação definido é o recomendado neste tipo de processo (0.35) e relativamente elevado devido à ausência de lubrificação. Nas simulações executadas o factor numérico de velocidade das ferramentas de estampagem (tvf) foi estabelecido pelo gráfico representativo do ciclo de produção antes apresentado, na figura 2.21, sendo este de 350 mm/s, admitindo-se como velocidade média de estampagem.

2.5.4 - Resultados das simulações para o pilar B (caso 2)

- Processo de estampagem a quente - Sistema directo (Influência da temperatura)

Os resultados obtidos nas simulações a quente permitiram verificar que a peça é factível com o processo testado, isto porque, a redução da espessura é inferior ao valor especificado (28%), obtendo-se um valor máximo de redução de 25%, como se pode verificar através da tabela 2.9. No que respeita à temperatura, os resultados mostram que quanto mais elevada é, menor a força de estampagem necessária para realizar o trabalho de transformação. Associado a este parâmetro verifica-se uma menor redução de espessura. Quanto mais elevada a temperatura inicial da chapa, maior vai ser a taxa de arrefecimento desta à saída do forno, até se iniciar a conformação. Através da análise, pode-se assumir que é necessário uma temperatura mínima de 850°C à saída do forno, para que a taxa de arrefecimento seja garantida no valor mínimo (capítulo 1, pág. 14), de aproximadamente 25°C por segundo, isto tendo em conta o período de transição em questão, de 4,8 segundos. No entanto, os resultados da análise da temperatura mínima de austenitização mostram que é necessária uma temperatura de 900°C, pois para esta temperatura o início do processo de conformação encontra-se num intervalo de temperaturas entre 799 e 849°C, para que assim seja possível obter o máximo de martensite aquando do arrefecimento na ferramenta. Após as considerações descritas é de todo relevante reter que, apesar de outras temperaturas superiores a 900°C sejam admissíveis, é importante conseguir os objectivos com a menor temperatura possível; reflectindo este princípio num melhor controlo do processo e principalmente na redução dos custos de energia associados.

Tabela 2.9 - Resultados da análise da simulação numérica de estampagem a quente do processo indirecto, variando as temperaturas iniciais da simulação.

Pilar B	Temperatura [°C]				Taxa de arrefecimento	Redução de espessura	Força de estampagem
	a) Saída Forno	Início Prensa	Início Forma	b) Fim Forma	(a_b) [°C/s]	[%]	[kN]
Sistema directo	1100	1038	950	935	34,4	24,1	1084
	1000	944	865	841	33,1	24,4	1180
	950	897	822	801	31,0	24,5	1194
	900	849	779	754	30,4	25,1	1309
	850	798	737	718	27,5	25,2	1497

As figuras 2.22, 2.23 e 2.24 apresentam os resultados das simulações para a temperatura de 900°C com o sistema directo, tomada como exemplo, pois este é o mais representativo do processo em questão. Assim, a figura 2.22 mostra o resultado da factibilidade da peça com este processo e parâmetros definidos, onde é possível verificar que a peça é factível. As figuras seguintes representam o resultado da distribuição da temperatura (ver figura 2.23) e o resultado da redução de espessura (ver figura 2.24).

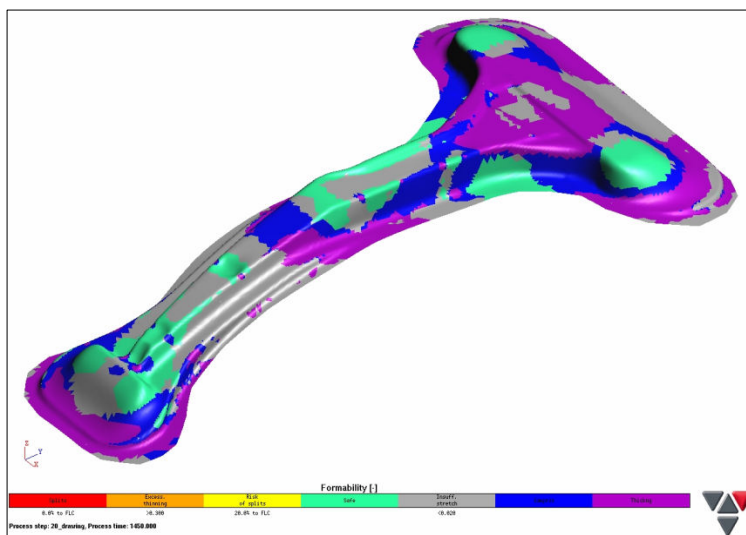


Figura 2.22 - Representação do resultado de factibilidade obtida da simulação a 900°C.

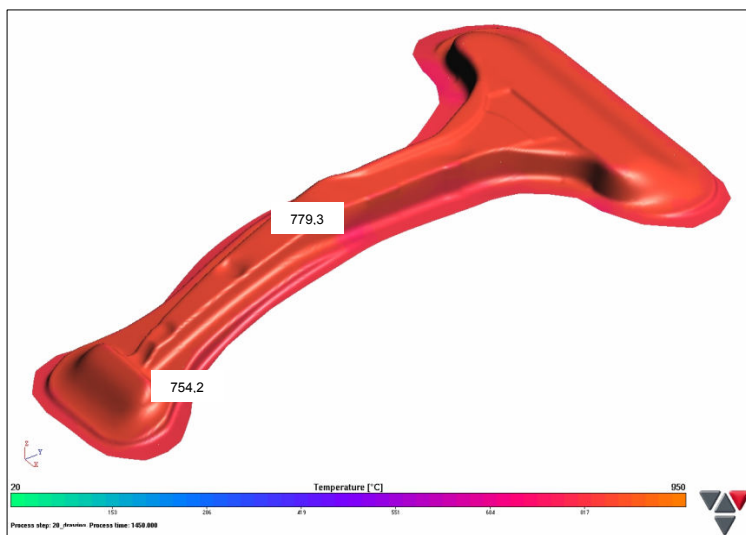


Figura 2.23 - Representação do resultado de temperaturas finais obtidas da simulação a 900°C.

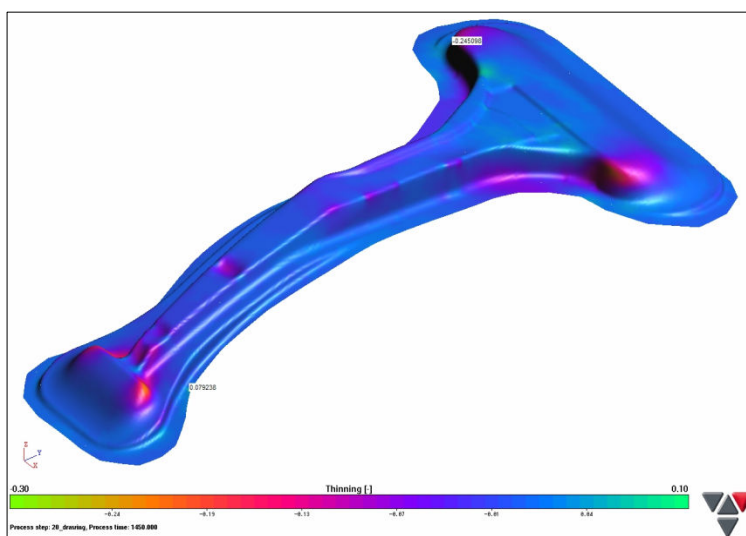


Figura 2.24 - Representação do resultado de redução de espessura obtida da simulação a 900°C.

Capítulo 3 - Análise económica de peças estampadas

Faz-se um levantamento dos custos associados às tecnologias do processo convencional a frio e da estampagem a quente. Apresentam-se e descrevem-se os elementos essenciais utilizados na base de cálculo de custo das peças em estudo. Por fim, comparam-se os resultados obtidos mediante os pressupostos da base de orçamentação.

3.1 - Enquadramento

A existência de custos é uma consequência directa da existência de produção. De facto, para produzir é necessário utilizar factores produtivos tais como matérias-primas, equipamentos, energia, instalações, trabalho, entre outros. Dado que estes factores produtivos são escassos, as empresas para os poderem utilizar têm de pagar um preço, ou seja, têm de incorrer em custos. Constitui tarefa das empresas procurarem métodos de produção eficientes, ou seja, que permitam o máximo de produção ao mínimo custo. A primeira distinção que pode ser efectuada na análise económica dos custos é entre custos totais, custos fixos e custos variáveis: Custo Total: representa a menor despesa total necessária para atingir um determinado nível de produção. Custo Fixo: representa a parte da despesa que não é afectada pelo nível de produção, ou seja, o montante de despesa que se verifica mesmo que o nível de produção seja zero. Custo Variável: representa a parte das despesas que variam com a produção. Por definição, os custos totais (CT) são o somatório de todos os custos fixos (CF) com o somatório de todos os custos variáveis (CV). Nos negócios, despesas gerais, ou gastos gerais, mais conhecido por “overhead” dentro da área económica refere-se a um valor de custo de exploração de uma empresa. O termo é usualmente utilizado para avaliar um grupo de despesas gerais que sejam necessárias para o desenvolvimento e continuação de um bom funcionamento do negócio, mas o que não gera lucros directamente. Despesas gerais são todas as despesas contempladas na demonstração de resultados, à excepção do trabalho e dos materiais directos. Despesas gerais incluem honorários contábeis, publicidade, depreciação, despesas indirectas com contratação de mão-de-obra externa, seguros, juros, honorários, aluguer, manutenção, abastecimentos, impostos, facturas telefónicas, custos de viagem e de utilidade pública. No que respeita ao lucro ou “profit” é, geralmente, o termo que representa o ganho na actividade empresarial em benefício dos responsáveis e/ou detentores do negócio. A palavra vem do latim, que significa “fazer progressos”, é definida em termos económicos como o aumento da riqueza que um investidor tem ao fazer um investimento, tendo em consideração todos os custos associados a esse investimento. [43]

Em suma, a vertente económica deste trabalho visa sobretudo uma análise sobre os custos associados ao processo de estampagem a quente, nas suas diferentes configurações, para uma melhor sensibilidade sobre os custos implícitos, em relação ao processo convencional a frio, analisando em paralelo todas as necessidades em termos técnicos para que no final seja possível avaliar as vantagens e desvantagens técnico-económicas.

3.1.1 - Análise económica da produção de peças estampadas

A vertente económica sobre o estudo do processo de estampagem a quente teve início na análise e levantamento de dados necessários para realizar uma consulta cuidada e fundamentada ao mercado. Consulta essa efectuada junto dos potenciais fornecedores de linhas completas de tecnologia de estampagem a quente, como os casos das entidades: Graebener (Alemanha); Prensas Schuler América do sul (Brasil) e/ou Schuler SMG (Alemanha). A mesma foi realizada através da apresentação das características das peças em estudo e através de uma descrição técnica das necessidades da linha de produção. Após a recepção das ofertas dos fornecedores, as mesmas foram analisadas e relacionadas. A escolha direccionada teve em conta a resposta técnica mais fundamentada e objectiva, a apresentação clara dos conteúdos e a respectivo valor da oferta. Esta baseia-se numa linha totalmente automática para o processo de estampagem a quente e, “adaptada” aos produtos barra de impacto e pilar B, com as seguintes etapas base de produção: - Linha de aquecimento (forno) controlado e monitorizado dos “blank’s”; - Transferência/carregamento os “blank’s” a quente para a ferramenta; - Prensa hidráulica de estampagem a quente “controlada”.

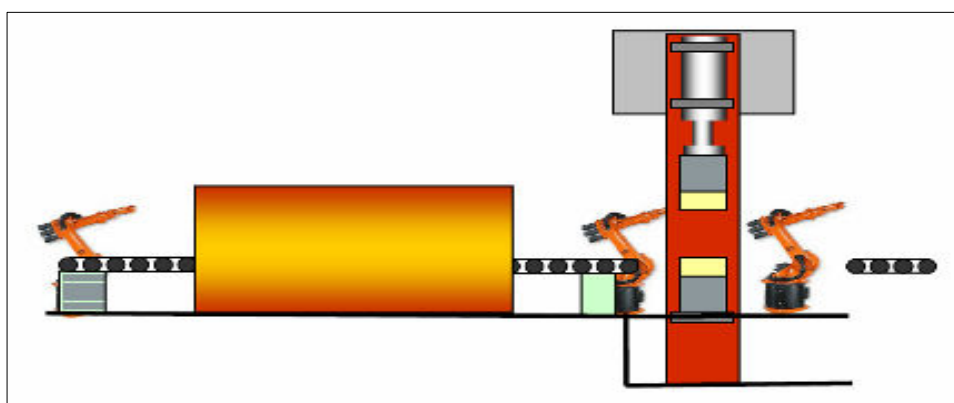


Figura 3.1 - Configuração exemplificativa da linha completa de estampagem a quente. [19]

3.1.2 - Disposição do sistema completo orçamentado de estampagem a quente

Os “Blank’s” são pré-cortados de uma chapa inicial e assim otimizados para a produção da peça final. O funcionamento da linha inicia-se pela manipulação do mesmo por parte de um robot, que após o controlo, os coloca nos rolos transportadores em frente ao forno de aquecimento. Após aquecimento um robot transfere as peças “austenitizadas” para a

ferramenta. Após estampagem e arrefecimento as mesmas são manipuladas por outro robot para um transportador, completando assim o ciclo da linha.

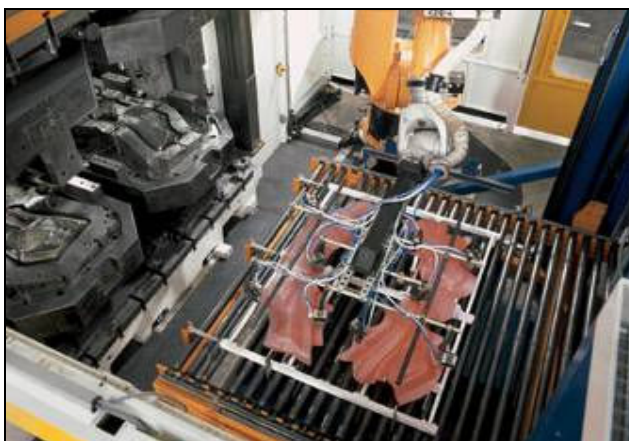


Figura 3.2 - Configuração exemplificativa da movimentação das peças a quente para a prensa. [19]

3.1.3 - Tecnologia de transformação considerada para a estampagem a quente

O sistema de prensa PCH (Pressure Controlled Hardening), que significa pressão controlada de endurecimento, tem a capacidade de regulação de taxa de transferência de calor sobre os “blank’s”, para se obter os melhores resultados em termos de homogeneidade e do endurecimento do material. As características gerais da prensa orçamentada são: Prensa hidráulica com “almofadas” integradas na parte móvel e na parte fixa (na mesa da prensa); Funções especiais das “almofadas” integradas na prensa para um arrefecimento mais rápido; A parte móvel (superior) pode ser influenciada pelos vários parâmetros do processo (velocidades, estágios na ferramenta); Perfeito controlo dos parâmetros do processo; Períodos curtos de arrefecimento, devido às elevadas taxas de arrefecimento e elevadas taxas de pressão controladas em toda a área da peça e das ferramentas.

3.1.4 - Tempos de ciclo de produção (cadência)

Segundo a indicação do fornecedor as taxas médias de saída são de 6 - 20 peças por minuto para o tipo de prensa acima descrita, com a possibilidade de dupla produção de peças, para baixar os custos das ferramentas. No entanto, como é normal, a cadência de produção da linha depende do tamanho e forma das peças, o material especificado, a variável tempo de endurecimento na prensa e da capacidade de movimentação dos “blank’s”/peças. Os dados recebidos (orçamento da linha completa de estampagem a quente) foram baseados na análise sobre os desenhos enviados, da geometria da barra de impacto e do Pilar B. Os tempos de ciclo foram calculados, em conjunto com o fornecedor, com base nas peças em estudo, tendo em conta dimensões das mesmas, geometrias, materiais usados, espessuras, etc., e considerando a tecnologia de prensas PCH da Schuler, anteriormente descrita. Assim, a análise feita em

conjunto, pela SODECIA Centro Tecnológico e pela entidade Schuler SMG, teve em conta todos os pressupostos e parâmetros implícitos no processo para uma real análise da cadência de peças, isto para cada caso em estudo.

3.2 - Caracterização dos processos e métodos de análise

Através dos resultados das simulações foi possível caracterizar os processos de estampagem, quer a frio quer a quente, para produzir as peças estampadas e assim definir quais os métodos de análise em termos de custos associados a cada um dos processos utilizados e/ou necessários. Em relação à barra de impacto (caso 1), iniciou-se a análise através da estampagem a frio, verificando-se resultados susceptíveis de apresentar problemas na aplicação prática, pois os mesmos apresentam alguns problemas para a resistência elevada que é desejada (1400 MPa), mesmo que se verifique na zona de excesso de material da peça (sucata). Assim foram analisadas alternativas, através da simulação da estampagem a quente com os aços ao boro, primeiro através do sistema directo, e depois através do sistema indirecto. Isto porque, o sistema directo de estampagem a quente apresentou problemas de factibilidade, verificadas através das simulações do módulo “Hotforming”. No que respeita ao pilar B (caso 2) a análise foi baseada nos mesmos princípios, contudo não foi necessário simular a peça através do sistema indirecto da estampagem a quente, visto se ter verificado a factibilidade da mesma através do sistema directo da estampagem a quente. Em termos de resultados a frio, a peça pilar B apresentou muitos problemas em termos de estampabilidade verificando-se a não factibilidade, para a resistência mecânica especificada (1400 MPa). De referir que esta análise fez-se comparando todos os processos simulados no capítulo 2, independentemente do resultado de estampabilidade factível ou não factível.

3.2.1 - Definição dos processos de estampagem da barra de impacto (caso 1)

Para barra de impacto (caso 1), foram analisados os custos associados à determinação do preço peça para os três processos simulados, através da estampagem a frio, da estampagem a quente através do sistema directo e indirecto, utilizando a matéria-prima especificada em termos de resistência mecânica, o material metálico ferroso com resistência mínima de 1400 MPa. Foram definidas, segundo os estudos da simulação, as dimensões mínimas para produção da peça e questão para cada tipo de processo de estampagem ou transformação. Os tempos de ciclo ou de arrefecimento para o caso da estampagem a quente foram definidos e/ou segundo valores médios de casos práticos, no que respeita à estampagem a frio. Já para o caso da estampagem a quente, os mesmos tempos foram considerados através dos dados fornecidos pelo fornecedor dos equipamentos de transformação. (Figura 2.11, pág. 33)

Tabela 3.1 - Dados iniciais para a análise de custos dos processos de produção da barra de impacto.

Peça analisada (caso 1)	Designação Processo de Estampagem	Dimensões Comp. x larg. x esp. [mm]	Tempo de ciclo [seg.]	Tempo de arrefecimento [seg.]	Cadência [Golpes/hora]
Barra de impacto	Frio “Progressivo”	682 x 152 x 1,5	3	-	800
	Quente Directo	682 x 152 x 1,5	10	4,0	360
	Quente Indirecto	662 x 142 x 1,5	10	4,0	360

3.2.2 - Definição dos processos de estampagem do pilar B (caso 2)

Para o pilar B (caso 2), foram analisados os custos associados à determinação do preço peça para os dois processos simulados, através da estampagem a frio, e da estampagem a quente, contudo aqui foram analisadas duas situações em termos de alteração de consumo de chapa, através da redução das dimensões necessárias para o sistema directo (2) da estampagem a quente. Aqui também foi usada a mesma matéria-prima especificada em termos de resistência mecânica (1400MPa). Foram definidas, da mesma forma, as dimensões mínimas para produção da peça, para cada tipo de processo de estampagem. Os tempos de ciclo para o caso da estampagem a frio foram estipulados e definidos segundo valores médios verificados em outros casos práticos, anteriormente estudados, que apresentam características similares. Já para o caso da estampagem a quente, os tempos foram considerados através dos dados fornecidos pelo fornecedor dos equipamentos de transformação. (Figura 2.21, pág. 40)

Tabela 3.2 - Dados iniciais para a análise de custos dos processos de produção do pilar B.

Peça analisada (caso 2)	Designação Processo de Estampagem	Dimensões Comp. x larg. x esp. [mm]	Tempo de ciclo [seg.]	Tempo de arrefecimento [seg.]	Cadência [Golpes/hora]
Pilar B	Frio “Transfer”	1327 x 631 x 1,6	4	-	600
	Quente Directo (1)	1327 x 631 x 1,6	12	4,5	300
	Quente Directo (2)	1277 x 581 x 1,6	12	4,5	300

3.3 - Análise de equipamentos associados ao processo de estampagem

3.3.1 - Equipamentos considerados na análise do processo de estampagem a frio

Na estampagem convencional a frio foram tidos em consideração os equipamentos que a entidade SODECIA já possui, analisando as necessidades para cada caso mediante o processo de transformação, previamente definido. Este foi baseado, na experiência dos colaboradores das

unidades e em especial do Centro Tecnológico SODECIA, da área de tecnologia de processos de conformação, da tecnologia de materiais e orçamentação. No que respeita ao caso da barra de impacto foi analisado um equipamento de estampagem com as capacidades necessárias em termos de força, dimensão e capacidade, mediante o processo anteriormente definido, sistema progressivo. Assim, mediante a análise foi definido um equipamento, Prensa de 630 toneladas, principalmente pelas suas necessidades em termos de dimensões de mesa e força de estampagem, necessária à transformação. Em relação ao caso do pilar B, a mesma análise foi feita, no entanto esta tendo em conta o sistema “transfer”. Assim, para este caso do pilar B foi definido um equipamento “Prensa transfer automático” de 1500 toneladas, esta também pelas mesmas razões, força, dimensão de mesa e capacidade.

3.3.2 - Equipamentos considerados na análise do processo de estampagem a quente

Os equipamentos considerados na estampagem a quente, tiveram em consideração os dados recebidos do fornecedor, onde o mesmo apresentou claramente as necessidades e custos associados ao processo para melhor dar resposta à análise de preço peça para cada um dos componentes que trata este trabalho. Seguidamente são apresentados todos os equipamentos, quer principais, quer secundários, como também os próprios investimentos das ferramentas específicas, para transformação a quente.

a) Componentes principais da linha de estampagem a quente orçamentada são:

- Prensa Hidráulica - Sistema Press WHC 600 - 2600 x 600 mm;
- Sistema PCH Press (“Almofadas” - aumenta a homogeneidade de estampagem);
- “Chiller” 326 kW para arrefecimento da ferramenta;
- Linha de aquecimento - Forno (eléctrico/gás aquecimento) com controlo de temperatura, e rolos transportadores (com montagem);

b) Componentes secundários da linha de estampagem a quente:

- Ferramenta “universal” de manipulação a quente - 2 postos (1500 x 1000 x 50);
- Um robot de “alimentação” - incluído ferramenta de manipulação;
- Um robot de descarga - incluído ferramenta de manipulação;
- Uma cadeia transportadora;
- Linha de segurança;
- Linha de controlo (com estação de marcação);
- Um sistema lateral de alteração rápida de ferramentas;
- Duas estações automáticas de elevação de ferramentas;
- Seis sistemas de grampos automáticos;
- Montagem e comissão de montagem da linha (sem transporte incluído);

c) Investimentos associados (específicos):

- Ferramenta de Estampagem a quente - barra de impacto;

- Ferramenta de estampagem a quente - pilar B;

Para ambos os casos referidos (3.3.1 e 3.3.2), e para além de todos estes componentes integrados nos processos de estampagem, esta análise de custos considera também os seguintes factores de custos variáveis: ocupação da superfície (área física ocupada pelos equipamentos); matéria-prima e matérias subsidiárias, consumo de energia eléctrica; consumo de gás; manutenção do equipamento; mão-de-obra especializada, etc.

3.4 - Ferramenta de cálculo utilizada na análise de custos

Nesta análise foi utilizada a folha base de orçamentação da SODECIA Centro Tecnológica S.A., apresentada através da seguinte figura 3.3, que utiliza princípios comuns considerados no estudo de custos das peças em análise do processo convencional a frio e do processo de estampagem a quente. Deste modo são apresentadas as variáveis utilizadas neste estudo associados à transformação de componentes estampados: consumo de matérias-primas; definição de matérias-primas; preço de matérias-primas; custo de transformação (custo do equipamento; mão-de-obra especializada; matérias subsidiárias; gás/energia; manutenção; EPI's; etc) e investimentos no que respeita a ferramentas de transformação.

A ferramenta de base de orçamentação não é apresentada na íntegra neste trabalho, devido a questões de confidencialidade e porque é possível apresentar os pressupostos utilizados na mesma análise e, mais importante, o resultado resumo obtido através da mesma, para os diferentes casos analisados. Esta análise de custo foi efectuada para um volume de produção considerado médio no mercado automóvel, sendo o mesmo de 150.000 carros/ano.

Designação Componente	Nº de op.	Operação	Carros/ano	Nº de peças por ciclo	Designação da Matéria-Prima	Tipo de MP	Espess./ Parede	largura/ Diâmetro	Passo/ Compr. Real	Passo/ Compr. Ajustado	Consumo [Kg]	Código	Máquina	hora teórico	N.º Op.	Total Looses	
1	Pilar B	10	Estampagem a frio - Sistema Transfer	150.000	1	LF(90/90HD)<M1400>1,6	BD	1,60	1327	631	631	10,5170	38	Prensa transfer automática (FAGOR)	600	3	0,4833
3	Barra de Impacto	10	Estampagem a frio - Sistema Progressivo	150.000	1	LF(90/90HD)<M1400>1,5	BD	1,50	682	152	152	1,2206	19	Prensa de 630 T	800	1	0,0583
5	Pilar B	10	Estampagem a quente - Sistema Directo 1	150.000	1	LF(AISi)22MnB5<Aço ao Boro>1,6	BD	1,60	1327	631	631	10,5170	91	Prensa HT_PCH 600_SCHULER + FORNO 1	300	3	0,5337
7	Pilar B	10	Estampagem a quente - Sistema Directo 2	150.000	1	LF(AISi)22MnB5<Aço ao Boro>1,6	BD	1,60	1277	581	581	9,3187	85	Prensa HT_PCH 600_SCHULER + FORNO	300	3	0,4834
9	Barra de Impacto	10	Estampagem a quente - Sistema Directo	150.000	2	LF(AISi)22MnB5<Aço ao Boro>1,5	BD	1,50	304	682	682	1,2206	89	Prensa HT_PCH 600_SCHULER + FORNO 2	360	3	0,0856
11	Barra de Impacto	10	Pré-estampagem	150.000	2	LF(AISi)22MnB5<Aço ao Boro>1,5	BD	1,50	284	662	662	1,1069	88	P630T 2	800	1	0,0253
11	Barra de Impacto	20	Estampagem a quente - Sistema Indirecto	150.000	2								90	Prensa HT_PCH 600_SCHULER + FORNO 3	360	3	

Figura 3.3 - Folha de cálculo utilizada na estimativa de custos das peças analisadas através do processo de estampagem convencional a frio e do processo de estampagem a quente.

3.5 - Análise dos resultados obtidos na estimativa de custos

É importante referir que se fez a análise de estimativa de custos partindo do pressuposto que as peças são factíveis para os processos simulados (a frio e a quente).

3.5.1 - Resultado da análise comparativa de custos para a barra de impacto (caso 1)

Os resultados obtidos na tabela 3.4 mostram que, para o volume definido para os estudos (150.000 peças/ano), o processo de estampagem a quente quer para o sistema directo quer para o sistema indirecto apresenta valores percentuais superiores para a maioria dos parâmetros analisados em relação ao processo convencional a frio. Apenas o parâmetro “matéria-prima” apresenta um valor um pouco inferior em relação à estampagem a frio, mais ainda para o caso do sistema indirecto, que devido às definições do processo, utiliza um menor consumo de material para produzir a peça, na estampagem a quente. O resultado diferencial apresentado na tabela 3.4 é o parâmetro “transformação”, pois apresenta valores superiores, na ordem dos 500%, em termos comparativos. Este deve-se ao facto dos valores elevados dos equipamentos associados ao processo de estampagem a quente e à sua baixa cadência de produção. O resultado final em termos de preço peça é aproximadamente 45% inferior usando o processo de estampagem a frio. Contudo, o processo de estampagem a quente, usando o sistema indirecto é um pouco mais elevado pois considera dois equipamentos nas duas estações de transformação, a frio e a quente. Os resultados apresentados para o custo das ferramentas de estampagem consideradas no sistema directo e indirecto, mostram que este último apresenta valores aproximadamente 55% superiores ao sistema directo e 57% superiores ao convencional a frio. O diferencial entre o preço peça entre os dois sistemas da estampagem a quente deve-se principalmente à influência do consumo de matéria-prima.

Tabela 3.4 - Resultados obtidos da análise de custos do processo de estampagem convencional a frio em relação à estampagem a quente, segundo sistema directo e indirecto.

Parâmetros	Barra de Impacto		
	Estampagem a Frio Sistema Progressivo	Estampagem a Quente Processo Directo	Estampagem a Quente Processo Indirecto
Matéria-Prima	1	-0,04%	-9,35%
Meios de transformação (Amortização Ferramenta)	1	2,49%	57,20%
Transformação	1	511,29%	559,09%
Total Looses	1	46,68%	-56,63%
Overheads + Profit	1	46,68%	46,68%
Preço Peça	1	46,68%	41,60%

O resultado da figura 3.4 mostra, através de uma macro análise, um resumo da tabela anterior, onde é mais perceptível a diferença entre as três soluções de conformação verificada nos parâmetros “transformação” e “ferramentas”, sendo todos os outros muito equivalentes.

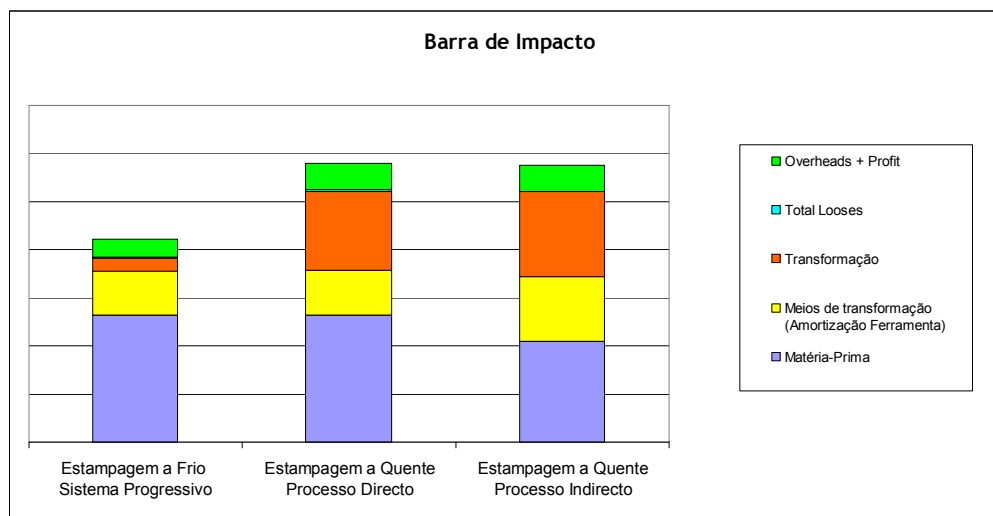


Figura 3.4 - Gráfico comparativo da participação de cada parâmetro no preço peça final.

Para melhor se perceber e quantificar os resultados obtidos, para os três processos analisados em termos de orçamentação são apresentados três gráficos que quantificam percentualmente a participação de cada um dos parâmetros no preço final da peça. Assim, através da figura 3.5, figura 3.6 e figura 3.7, verifica-se que a matéria-prima é o parâmetro com maior “peso”, apresentando 62%, 46% e 40% respectivamente. A percentagem superior da matéria verificada no processo de estampagem a frio deve-se principalmente ao facto de o parâmetro de transformação não ter tanto influência como o que é verificado para a estampagem a quente. Verifica-se também, através destes mesmos gráficos que o “peso” das matérias-primas diminui para os dois processos a quente, passando dos 60% para aproximadamente 40%, em detrimento do aumento dos custos de transformação associados à estampagem a quente. No processo de estampagem a frio a sua participação é de 6% passando para aproximadamente 30% nos dois sistemas de estampagem a quente. Os resultados dos restantes parâmetros apresentam valores percentuais equivalentes em termos de percentuais para os três sistemas analisados de transformação.

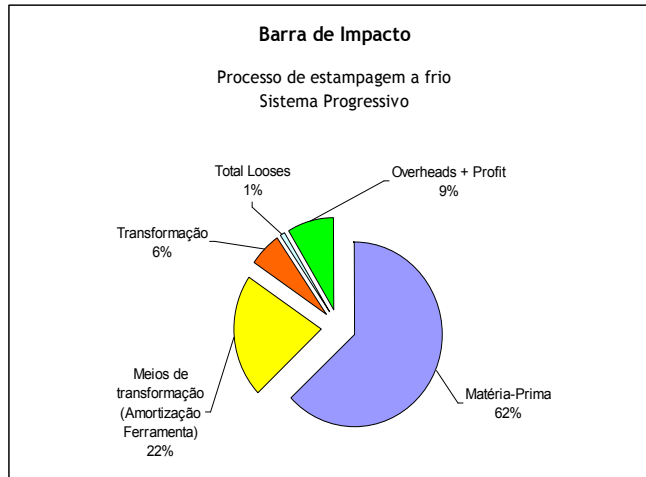


Figura 3.5 - Gráfico representativo da participação de cada parâmetro no preço final para o processo de estampagem a frio - sistema progressivo.

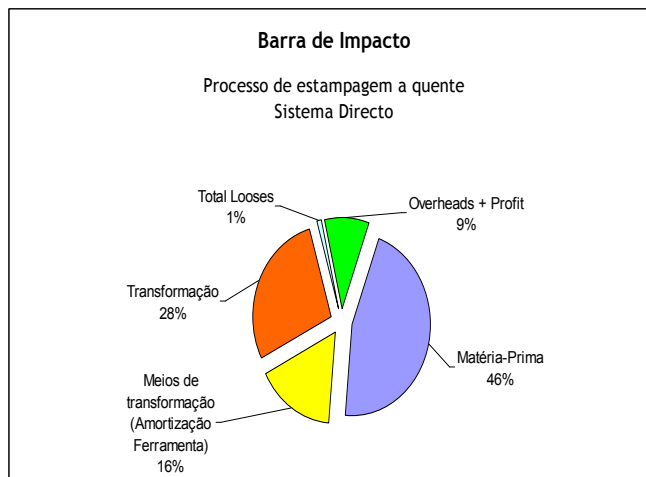


Figura 3.6 - Gráfico representativo da participação de cada parâmetro no preço final para o processo de estampagem a quente - sistema directo.

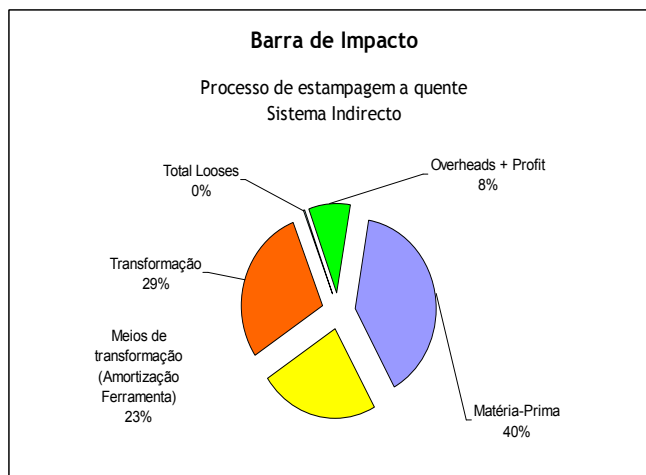


Figura 3.7 - Gráfico representativo da participação de cada parâmetro no preço final para o processo de estampagem a quente - sistema indirecto.

- Análise do preço peça vs volume de produção anual

Em termos de análise da evolução do preço peça com o volume de produção anual, a figura 3.8, apresenta um gráfico onde se verifica que o processo de estampagem a quente é, para os sistemas directo e indirecto, sempre mais elevado em relação ao convencional a frio. Isto independente da alteração de volume de produção. Assim, em termos de preço peça o processo de estampagem a frio apresenta-se mais vantajoso, em termos de custo. Este mostra também que o sistema mais económico dentro do processo de estampagem a quente é o sistema indirecto, mesmo utilizando mais meios de transformação. Este facto devesse principalmente à menor utilização de matéria-prima para produzir a peça final. É possível verificar que para o intervalo de volumes “standard” anuais de produção o preço peça é muito constante (linear), para volumes aproximadamente entre 100.000 e 400.000 peças/ano. Este facto apenas é diferencial, para o processo de estampagem a quente, no intervalo de volumes entre 50.000 e 150.000 peças/ano. A diminuição verificada do preço peça, neste mesmo intervalo, tem em conta a maior necessidade de mais turnos ou mesmo equipamentos para dar resposta à produção, diluindo assim o preço peça pelo período de amortização de 5 anos.

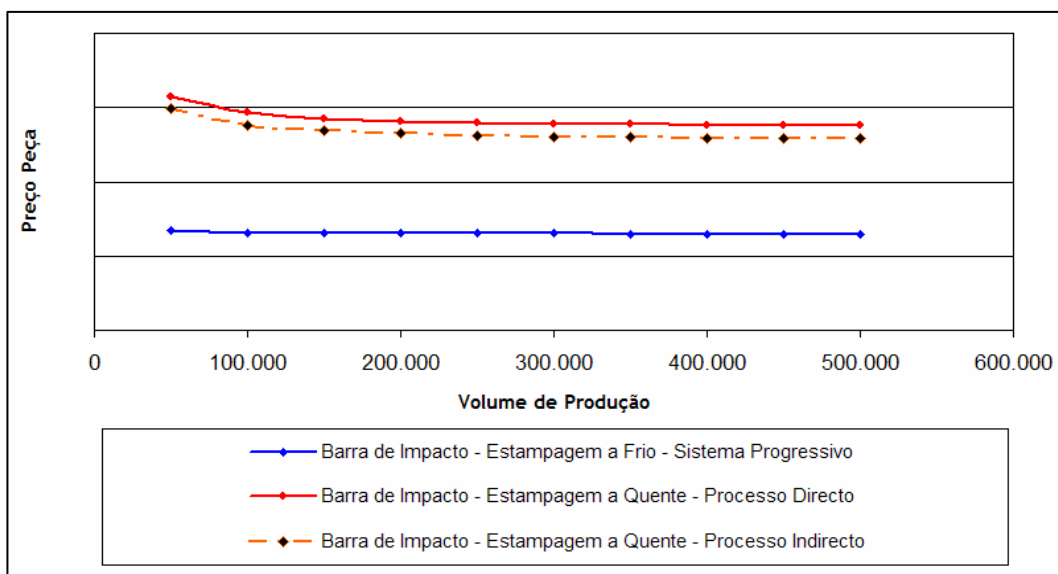


Figura 3.8 - Evolução do preço peça com a variação do volume de produção para o processo de estampagem convencional a frio em relação à estampagem a quente, para o sistema directo e indirecto.

3.5.2 - Resultado da análise comparativa de custos para o pilar B (caso 2)

Os resultados obtidos na seguinte tabela 3.5 mostram que, para o volume definido para os estudos (150.000 peças/ano), o processo de estampagem a quente apresenta valores percentuais superiores para a maioria dos parâmetros analisados, apenas o parâmetro transformação se apresenta muito superior em relação à estampagem a frio, este devido ao preço elevado do equipamento utilizado na estampagem a quente. O resultado do parâmetro da matéria-prima é de todo relevante em termos comparativos (sistema directo 2), pois como os preços da matéria-prima utilizados são muito idênticos, esta apenas se faz sentir devido ao

consumo de matéria-prima, que é inferior no processo de estampagem a quente principalmente no segundo caso analisado. O resultado final, no que respeita ao preço peça, é inferior usando o processo de estampagem a quente, contudo pouco significativo.

Tabela 3.5 - Resultados obtidos da análise de custos do processo de estampagem convencional a frio em relação à estampagem a quente, por peça.

Parâmetros	Pilar B		
	Estampagem a Frio Sistema Tandem	Estampagem a Quente Processo Directo (1)	Estampagem a Quente Processo Directo (2)
Matéria-Prima	1	-0,04%	-11,42%
Meios de transformação (Amortização Ferramenta)	1	-1,58%	-1,58%
Transformação	1	190,63%	197,03%
Total Looses	1	10,44%	0,03%
Overheads + Profit	1	10,44%	0,03%
Preço Peça	1	10,44%	0,03%

O resultado da figura 3.9 mostra, através de uma macro análise, que a diferença entre os dois processos se verifica nos parâmetros matéria-prima e transformação, sendo todos os outros equivalentes, pois seguem o mesmo princípio estabelecido no método de orçamentação. Para melhor se perceber e quantificar os resultados obtidos, para os dois processos analisados em termos de orçamentação, são apresentados dois gráficos que quantificam percentualmente a participação de cada um dos parâmetros no preço final da peça. Assim, através da figura 3.10, 3.11 e figura 3.12, verifica-se que a matéria-prima é o parâmetro com maior “peso”, apresentando 78% e 71% e 69% respectivamente. A percentagem superior da matéria verificada no processo de estampagem a frio deve-se principalmente ao facto de o parâmetro de transformação não ter tanto “peso” como o que é verificado para a estampagem a quente, para as duas situações analisadas.

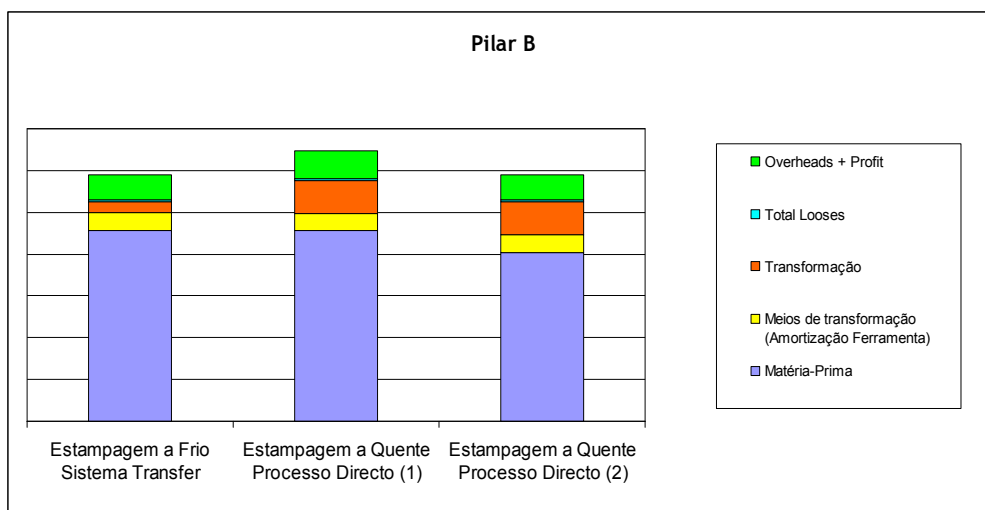


Figura 3.9 - Gráfico comparativo da participação de cada parâmetro no preço peça final.

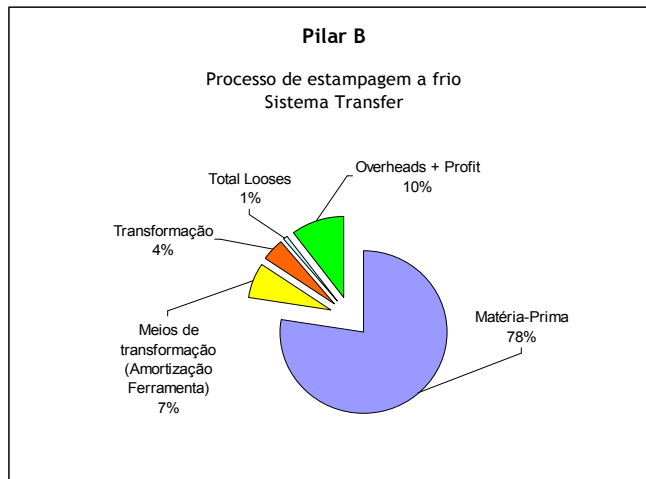


Figura 3.10 - Gráfico representativo da participação de cada parâmetro no preço final para o processo de estampagem a frio - sistema "transfer".

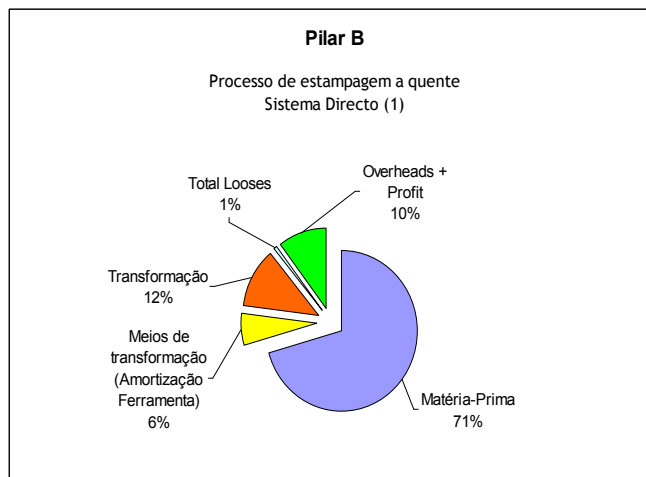


Figura 3.11 - Gráfico representativo da participação de cada parâmetro no preço final para o processo de estampagem a quente - sistema directo (1).

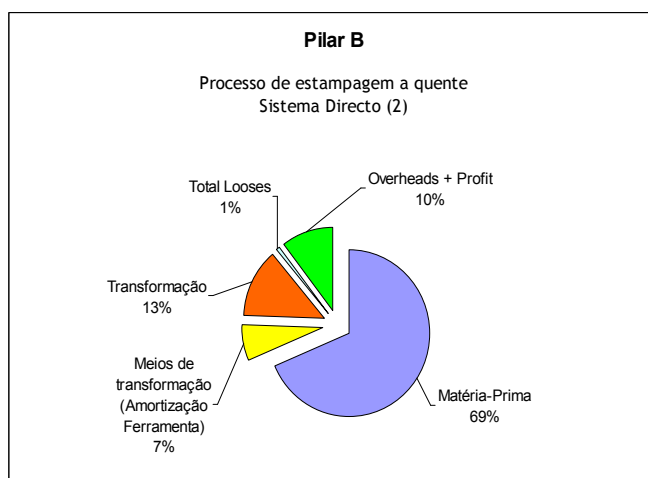


Figura 3.12 - Gráfico representativo da participação de cada parâmetro no preço final para o processo de estampagem a quente - sistema directo (2).

- Análise do preço peça vs volume de produção anual

Em termos de análise da evolução do preço peça com o volume de produção anual, a figura 3.13, apresenta um gráfico onde se verifica, para as mesmas condições de consumo de matéria-prima, um preço peça bastante mais elevado obtida através do processo de estampagem a quente (Sistema directo 1) em relação ao preço peça convencional a frio. Os preços das matérias-primas usadas no processo a frio como nos processos a quente são equivalentes, apesar de apresentarem designações diferentes. A curva representativa da evolução do preço peça para a estampagem a frio apresenta-se linear, ao contrário das duas curvas representativas do processo de estampagem a quente que apresentam um comportamento decrescente, devido à necessidade de um segundo turno a partir de 100.000 peças por ano. Com a introdução de um segundo turno, e como o estudo foi baseado num período de amortização a 5 anos, o custo horário é diminuído, contudo desconsiderado nesta abordagem. No entanto, os resultados obtidos para o segundo processo directo (2) da estampagem a quente em termos de preço peça verificam-se inferiores ao processo convencional a frio, para volumes de produção superiores a 150.000 peças por ano, não pela questão do uso de um segundo turno mas também pelo facto de se utilizar menos matéria-prima para conformar e obter a peça final.

Assim, esta análise mostra que o processo de estampagem a quente apresenta-se superior ao processo convencional a frio, para as mesmas condições em termos de ocupação de máquina, isto é, entre o intervalo de volumes de 50.000 a 150.000 peças/ano (ocupação - 1 turno).

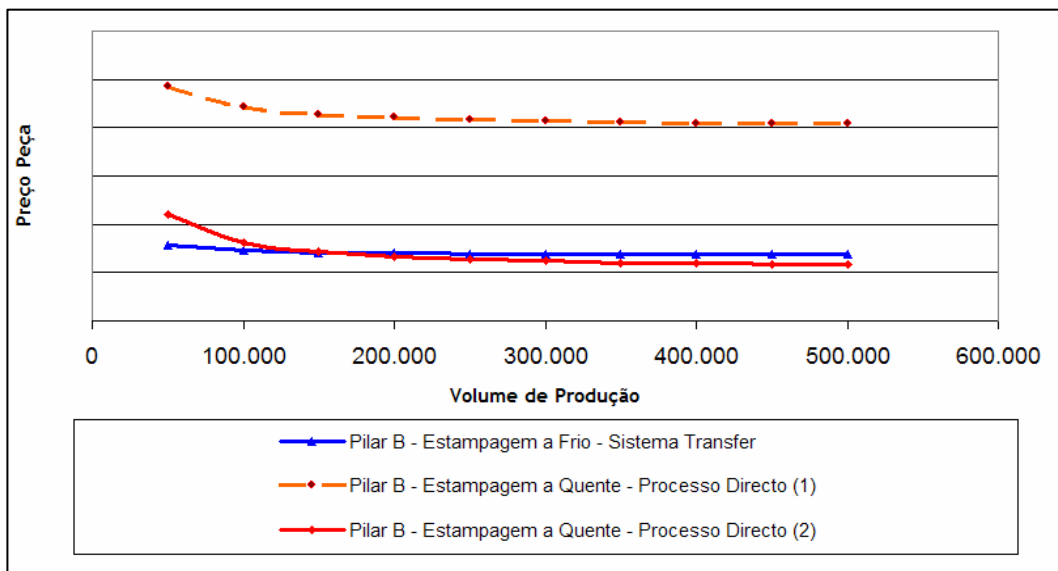


Figura 3.13 - Evolução do preço peça com a variação do volume de produção para o processo de estampagem convencional a frio em relação à estampagem a quente.

Capítulo 4 - Conclusões e considerações finais

Este capítulo resume as conclusões principais deste trabalho, ao nível teórico ou científico, através do estudo técnico e económico. Faz-se uma breve referência ao processo de estampagem a quente. Apresenta as mais valias das diferentes naturezas do trabalho, dos estudos desenvolvidos para o interesse da área científica em geral, como também para o conhecimento e possíveis aplicações industriais na entidade SODECIA Group S.A..

4.1 - Sumário

O trabalho apresentado, desenvolvido através da parceria entre o Departamento de Metalurgia e de Materiais da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto e SODECIA Centro Tecnológico, S.A., “tem a sua mais valia” em diferentes naturezas abordadas. Em primeiro lugar serviu como catalizador no aumento dos conhecimentos, para ambas entidades e para todos aqueles que nele participaram directa ou indirectamente, sobre uma nova tecnologia de transformação mecânica de chapa metálica, quer ao nível técnico e económico. Possibilitou também conhecer e utilizar um novo módulo de simulação numérico designado por “Hotforming”, do software AutoformTM. Através da interacção entre as partes envolvidas e a colaboração dos demais, foi permitido uma análise detalhada dos fenómenos metalúrgicos associados ao processo e aos materiais específicos. O processo de estampagem a quente é uma técnica inovadora utilizada para produzir componentes da parte estrutural da carroçaria automóvel, de muita elevada resistência mecânica e complexidade geométrica. A principal característica deste processo é a combinação mecânica e metalúrgica associada aos aços microligados ao boro, proporcionada pela deformação e arrefecimento simultâneo.

4.2 - Conclusões

Um dos objectivos principais do presente trabalho foi investigar a possibilidade de produzir peças com diferentes níveis de resistência mecânica, através da simulação numérica do processo convencional a frio e do processo de estampagem a quente, como solução técnica ao nível da resistência e melhores níveis de ductilidade. Assim, para os dois casos estudados constata-se, através dos resultados das simulações a frio, que com o aumento do nível de resistência mecânica dos materiais, maiores são os problemas apresentados em termos de factibilidade das peças. Os estudos realizados reforçam que as ferramentas de simulação são essenciais na análise de viabilidade de aplicação de materiais de elevada resistência mecânica e no estudo de novas configurações de processos, permitindo analisar novas soluções de factibilidade de geometrias complexas, e muito importante mesmo que não analisado neste

trabalho, a previsão do fenómeno de “springback”. Permitindo também a otimizando de tempos e custos de desenvolvimento.

As conclusões finais sobre os dois casos estudados são referidas separadamente (barra de impacto e pilar B), analisando-se, técnica e economicamente. Através dos mesmos resultados podem ser tiradas ilações para futuros trabalhos de investigação e para aplicações industriais.

Caso 1 - Barra de impacto

No que respeita aos resultados da análise técnica através da simulação numérica da barra de impacto, caso 1, relativamente ao estudo da influência da resistência mecânica do material no processo a frio constata-se, como seria de esperar, que o aumento da resistência dos materiais associado ao decréscimo de elasticidade é um problema evidente, principalmente para esta peça, de elevada complexidade geométrica. Contudo, evidencia-se que a simulação é uma ferramenta muito útil para melhor analisar e por em prática soluções ao nível de processo.

Em relação aos estudos realizados através da simulação de ambos os sistemas do processo de estampagem a quente, conclui-se que para os parâmetros definidos a temperatura inicial da chapa, para garantir a temperatura de austenitização e transformação “completa” de fase é de aproximadamente 950°C, valor mínimo entre as temperaturas analisadas. Esta garante a taxa de arrefecimento mínima de 25°C/segundo, definida através do diagrama TAC (pág. 14).

No estudo da variação do coeficiente de lubrificação foi possível constatar a elevada influência deste parâmetro na factibilidade das peças. Mesmo que não representativa da realidade, um coeficiente associado a uma lubrificação especial (0.05) apresenta resultados satisfatórios para transformar a peça com sucesso, ao contrário do valor representativo da estampagem a quente (0.35). Assim, foi possível concluir que nem todas as peças são factíveis através do processo directo de estampagem e, por isso se verificou a necessidade de recorrer ao sistema indirecto de estampagem a quente. Conclui-se através deste último estudo de simulação que é possível tornar a peça factível através do sistema indirecto, quer ao nível das temperaturas estudadas, quer à percentagem de redução de espessura admissível, onde se verificaram valores inferiores ao máximo especificado (aproximadamente 50% inferiores).

A análise de estimativa de custos demonstrou que, quer para o sistema directo ou indirecto do processo de estampagem a quente, o preço peça se verifica sempre superior, dentro dos intervalos de volumes usuais do mercado automóvel, em relação ao processo convencional a frio definido. Comparativamente entre os dois sistemas de estampagem a quente, o preço peça do sistema indirecto verifica-se inferior, visto que utiliza menos matéria-prima para produzir a peça final. Contudo apresenta valores percentuais superiores para os parâmetros de transformação e meios de transformação, isto porque necessita mais do que um equipamento de transformação para realizar a peça. Em suma, tendo em conta todos os estudos efectuados técnica e economicamente, conclui-se que o método mais indicado para produzir esta peça é através da estampagem convencional a frio, com 2 etapas.

Caso 2 - Pilar B

Os estudos de simulação do processo a frio sobre o pilar B, relativos à influência da resistência mecânica do material, permitiram concluir que não é possível conformar com sucesso a geometria para a resistência mecânica especificada, de 1400 MPa.

A análise dos resultados obtidos através do processo a quente, e no sistema directo, possibilitaram concluir que a mesma apresenta-se como uma solução factível, mecânica e metalurgicamente. Isto porque apresenta resultados de factibilidade aceitáveis verificados através das curvas FLD, valores de redução de espessura inferiores ao máximo especificado e taxas de arrefecimento admissíveis para transformação da martensite. Os estudos da temperatura de austenitização permitem concluir que a temperatura da chapa à saída do forno deve ser no mínimo de 900°C para se obter o máximo de martensite após uma taxa de arrefecimento de 25°C/segundo.

Tendo em conta os processos definidos e simulados, a análise de estimativa de custos dos processos estudados recaiu sobre a comparação entre o convencional a frio, e as duas soluções apresentadas para o sistema directo do processo de estampagem a quente. Este apresenta resultados distintos, onde se pode constatar que acima de 150.000 peças/ano o processo de estampagem a quente torna-se, em termos de preço peça, inferior em relação ao processo convencional a frio. No entanto, este resultado não é conclusivo para admitir que é mais económico. Pois a partir deste volume é assumido um segundo turno de trabalho, devido à baixa cadência de produção do processo a quente. Tendo em conta que a análise foi feita considerando um período de amortização de 5 anos, o custo hora é influenciado, tornando-se inferior. Assim, o valor do preço peça passa a ser inferior, mas este apenas para o segundo caso do sistema directo (2), e também ao facto de usar menos matéria-prima para produzir a peça. Por fim conclui-se, que mesmo sendo a estampagem a quente o processo mais caro, este é o que permite obter a factibilidade da geometria/peça com o nível de resistência especificada.

Em termos económicos, conclui-se que, para ambos os casos analisados, o parâmetro “transformação” é o que mais influencia o custo de fabrico através da estampagem a quente, sendo influenciado positivamente pela menor necessidade de matéria-prima inicial, para produzir o produto final.

4.3 - Considerações finais

O programa de simulação numérica utilizado apresenta as suas potencialidades tanto na análise de factibilidade a frio e a quente, através do utilizado módulo “Hotforming”. No entanto, este último, apresenta lacunas para uma análise mais profunda e realista do processo de estampagem a quente, em termos da simulação do arrefecimento acompanhado da transformação da fase cristalográfica. Contudo, a versão utilizada é a “alfa 2”, ainda em evolução e que poderá vir a ter integrado esta vertente. Assim, para estudos futuros, será de

todo interessante e importante estudar em simultâneo, e através da simulação, o comportamento mecânico e metalúrgico, para que seja possível definir com mais exactidão a temperatura inicial do processo e determinar no final a percentagem de cada fase cristalográfica.

- Sugestões para futuros trabalhos

Existem uma série de aspectos envolvidos no processo e simulação do processo de estampagem a quente que poderão ser abordados em trabalhos futuros.

1. Aprofundar os estudos relativamente aos parâmetros implícitos de coeficiente de atrito, no que respeita ao contacto, pressão, temperatura e do tipo de superfície ou acabamento;
2. Evoluir para os estudos de experimentação prática no que respeita à transferência de calor entre a peça e as ferramentas, adicionando a dependência da pressão e temperatura;
3. Evoluir nos estudos de simulação de transformação de fase cristalográfica durante a transformação a quente (Exemplos dos softwares: LS-Dyna e ABAQUS);
4. Analisar a aplicação de outros materiais metálicos ferrosos, com comportamento idêntico. Exemplo materiais com “mistura” de diferentes fases para permitir a melhor analisar a capacidade de elasticidade.

- Análise SWOT da tecnologia de estampagem a quente

Esta análise baseia-se na recolha de dados e experiências adquiridas após os estudos efectuados. Resume as principais ideias a reter sobre o processo de estampagem a quente focando os seguintes pontos: ameaças, pontos fracos, oportunidades e pontos fortes.

Ameaças	Oportunidades
1- Tecnologia numa fase de evolução em relação à convencional (a frio); 2 - Pouca diversidade de fornecedores de tecnologia e de materiais associados; 3 - Aparecimento de novas tecnologias equivalentes a curto e médio prazo.	1 - Tecnologia diferenciadora ou de equilíbrio junto dos demais concorrentes que já utilizam este tipo de processo; 2 - Mais valias ao nível do desenvolvimento e aplicação em novas configurações de elementos de segurança do automóvel.
Pontos Fracos	Pontos Fortes
1 - Valores elevados dos equipamentos e investimentos de transformação associados; 2 - Uso de materiais muito específicos na produção de peças estampadas; 3 - Cadências de produção baixas em relação aos métodos convencionais a frio.	1 - Produtos diferenciadores com muito elevadas resistência mecânica; 2 - Solução técnica para produtos com especificações de muito alta resistência e elevada complexidade na sua geometria; 3 - Diminuição de peças da carroçaria automóvel, logo menos peso no global.

Referências Bibliográficas

- [1] ULSAB (Ultra Light Steel Auto Body) Programme ULSAB, 2005.
- [2] SSAB - Seminários “Open Your Mind”, Seminário Técnico para a Indústria Automóvel Sobre Aços de Extra e Ultra Resistência, SSAB - Swedish Steel, Estádio do Dragão, Porto, 22 de Fevereiro de 2006.
- [3] IDDRG 2006 (International Deep Drawing Research Group), Conference “Advanced tooling design and machine tools”, “Sheet forming processes”, “Tool-part”, FEUP, Porto, Portugal, 19-21 Junho 2006.
- [4] EuroNCAP (European New Car Assessment Programme), Test results, 2007.
- [5] International Iron and Steel Institute. “Global Steel Industry Announces Future Vehicle Research Program”, www.worldautosteel.org, 2005/2006/2007/2008.
- [6] IQPC - Light Weight Concepts Conference, Internacional Quality & Productivity Center, INNOVATIVE LIGHTWEIGHT CONCEPTS, 27th - 28th November 2007, Frankfurt, Alemanha.
- [7] Roland Geyer, Dipl. Phys., Ph.D, The Example of Mild Steel, Advanced High Strength Steel and Aluminium in Body in White Applications, University of California, USA, December 2007, pag. 2-7.
- [8] IDDRG 2008 (International Deep Drawing Research Group), Conference “Best in Class Stamping”, Olofström, Suécia, de 16-18, Junho 2008.
- [9] Euroblech 2006 - “International Sheet Metal Working Technology”, Feira Internacional Tecnológica da Transformação da Chapa, Hannover/Alemanha, Outubro 2006.
- [10] Advanced high strength steel (AHSS) application guidelines Version 3 - 2006, Prepared by INTERNATIONAL IRON & STEEL INSTITUTE, Committee on Automotive Applications, September 2006.
- [11] Robert H. Wagoner, Organizer, George R. Smith Chair, “Advanced High Strength Steel”, Materials Science and Engineering, TMS - 136th Annual Meeting & Exhibition, 2007.
- [12] J. Faderi, R. Vehof, “Press hardening steel: a new coating and process technology”, International Conference on Steels in Cars and Trucks, 2005, 172 - 178.
- [13] B. Carlsson, L. Olsson, “Improved formability of ultra high strength steels through local heat treatment”, International Conference on Steels in Cars and Trucks, 2005, 196-203.
- [14] H. Livatyali, M. Terziakin, “Forming of heat treatable-high strength steel sheets at elevated temperature”, International Conference on Steels in Cars and Trucks, 2005, 187-195.

- [15] K. Mori, S. Maki, Y. Tanaka, “Warm and Hot Stamping of Ultra High Tensile Strength Steel Sheets Using Resistance Heating”, Department of Production Systems Engineering, Japan, 2005.
- [16] H. Hoffmann, H. So, H. Steinbeiss, “Design of Hot Stamping Tools with Cooling System”, Materials Science and Engineering, A 56 (2007) 269-272.
- [17] M. Decker, GRAEBENER Prensas, Fornecedor de prensas convencionais, hidráulicas e de linhas de estampagem a quente, Alemanha, 2007.
- [18] M. Naderi, “Hot Stamping of Ultra High Strength Steels”, PhD thesis Master of Science, Iran, November 2007.
- [19] K. Lander, SCHULER SMG Prensas, Fornecedor de prensas convencionais, hidráulicas e de linhas de estampagem a quente, Alemanha, 2008.
- [20] Mats Oldenburg, Paul Akerstrom, Greger Bergman, Per Salomonsson, “Simulation and Evaluation of Phase Transformations and Mechanical Response in the Hot Stamping Process”, Lulea University of Technology, Gestamp Hartech AB, SE-97125 Lulea, Sweden, 1181-1186, 2007.
- [21] M. Babbit, “Potential for Mn in New Automotive Steels”, Arcelor presentation, Flat Carbon Steel USIBOR 1500 Pre-coated, November 2006.
- [22] D. Wilde, J. Reibel, AUDI AG, DE, Presentation 7, International Circle of Experts Car Body Engineering (Audi), 9th International Car Body Benchmarking Platform, EurocarBody, October 2007.
- [23] P. Akerstrom, “Modelling and Simulation of Hot Stamping”, PhD thesis, Lulea University of Technology Department of Applied Physics and Mechanical Engineering, 2006.
- [24] K. Mori, S. Maki, Y. Tanaka, “Warm and hot stamping of ultra high tensile strength steel sheets using resistance heating”, Annals of the CIRP, A 54 (2005) 209-212.
- [25] H. Santos, “Transformação isotérmica da austenite não eutectóide”, Disciplina de Tratamentos Térmicos, DEMM, FEUP, Aula nº7, 2001-2002, pag. 1-8.
- [26] M. Merklein, J. Lechler, M. Geiger, “Characterisation of the Flow Properties of the Quenchenable Ultra High Strength Steel 22MnB5”, Chair of Manufacturing Technology, Institute of Mechanical Engineering, University of Erlangen-Nuremberg, Germany, Annals of the CIRP Vol. 55/1/2006.
- [27] H. Santos, “Domínio Martensítico”, Tratamentos Térmicos, Aula nº6, DEMM, FEUP. 2001, pag. 1-7.
- [28] M. Vieira, “Recristalização dinâmica em condição de deformação a quente, Departamento de Metalurgia”, DEMM, FEUP, 1989, pag. 2-15.

- [29] E. López-Chipres, I. Mejía, C. Maldonado, A. Bedolla-Jacuinde, J.M. Cabrera, “Hot Flow Behavior of Boron Microalloyed Steel”, *Materials Science and Engineering*, A 480 (2008) 49-55.
- [30] H. Engels, O. Schalmin, and C. Müller-Bollenhagen, “Controlling and monitoring of the hot stamping process of boron alloyed heat treated steels”, *Proc. New development in steel metal forming technology*, Stuttgart, Germany, 2006, 135-150.
- [31] M. Merklein, J. Lechler, “Investigation of the thermo-mechanical properties of hot stamping steels”, *Department of Manufacturing Technology, Journal of Materials Processing Technology*, 2006, 452-455.
- [32] E. López-Chipres, I. Mejía, C. Maldonado, A. Bedolla-Jacuinde, J.M. Cabrera, “Hot Ductility Behavior of Boron Microalloyed Steel”, *Materials Science and Engineering*, A 460 (2007) 464-470.
- [33] H.J. Jun, J.S. Kang, D.H. Seo, K.B. Kang, C.G. Park, “Effects of deformation and boron on microstructure and continuous cooling transformation in low carbon HSLA steels”, *Materials Science and Engineering*, A 422 (2006) 157-162.
- [34] S.H. Song, A.M. Guo, D.D. Shen, Z.X. Yuan, J. Liu, T.D. Xu, “Effect of boron on the hot ductility of 2.25Cr1Mo steel”, *Materials Science and Engineering*, A 360 (2003) 96-100.
- [35] M. Naderi, A. Saeed-Akbari, W. Bleck, “The effects of non-isothermal deformation on martensitic transformation in 22MnB5 steel”, *Materials Science and Engineering*, A 487 (2008) 445-455.
- [36] M. Suehiro, K. Kusumi, T. Miyakoshi, J. Maki e M. Ohgami, “Properties of aluminium-coated steels for hot-forming”, *Nippon steel technical report n° 88*, July 2003, 16-21.
- [37] E. Juarez, D. Camargo, *USIMINAS, Aços AHSS (Advanced High Strength Steel)*, 2007.
- [38] H. Hein, “Numerical simulation of the hot stamping of automotive components with USIBOR 1500 P”, *Arcelor Flat Steel Europe, EuroPAM 2005*.
- [39] J. Chen, *Simulation of hot stamping processes, Great designs in steel seminar, Severstal, North America*, www.worldautosteel.org.
- [40] M. Jonsson; *Products in hot stamped boron steel, GESTAMP*, www.autosteel.org.
- [41] *Autoform - Release Notes Book, Product Feasibility and Rapid Die Face Design*, 2004.
- [42] M. Pilar, *Autoform - Formação do módulo “Hotforming”, SODECIA Centro Tecnológico*, 2008. Realizada pela entidade Autoform, Abril/Maio 2008.
- [43] V. S. Roldão, “Gestão de projectos”, *Uma perspectiva integrada*, Fevereiro 2000.

ANEXO A

Seqüência base das etapas da simulação do processo de estampagem a quente - Autoform™

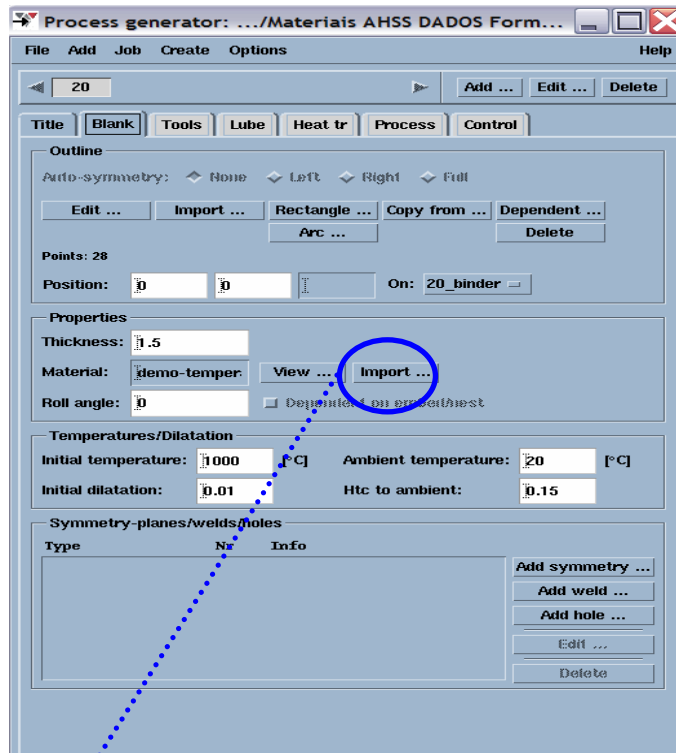


Figura A.1 - Input de dados - Process Generator (Definição de parâmetros do processo).

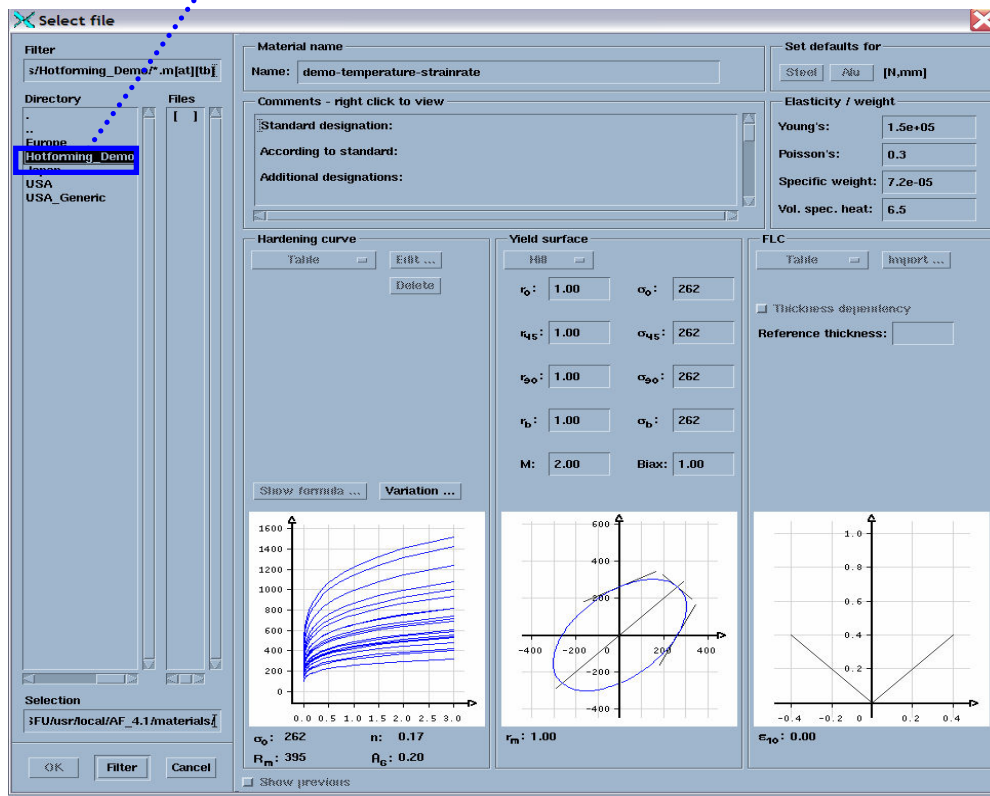


Figura A.2 - Definição da matéria-prima para a simulação - Aço ao boro (22MnB5).

- Input Dados ferramentas de estampagem - Cerra-chapas + punção + matriz

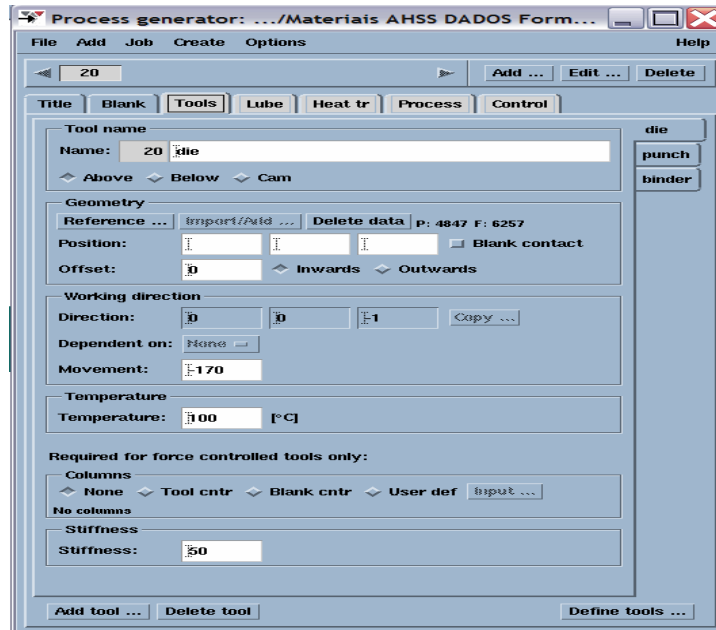


Figura A.3 - Representação do parâmetro do processo “Hotforming”.

- Lubrificação das ferramentas (coeficiente de atrito);

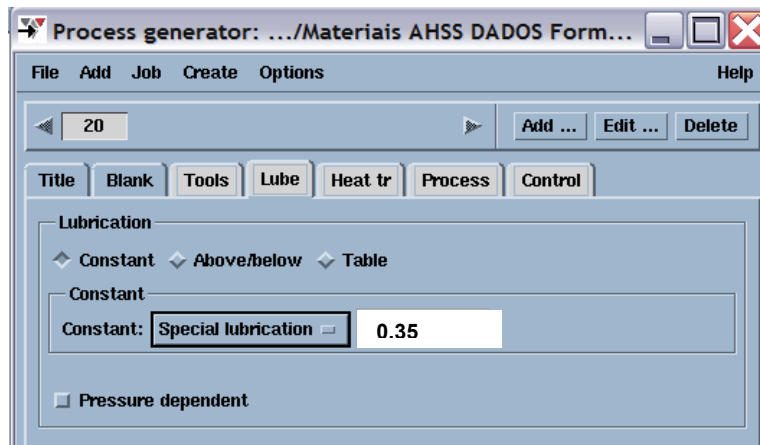


Figura A.4 - Representação do parâmetro do processo “Hotforming” - Coeficiente de lubrificação.

- Coeficiente de transferência de calor entre a peça e as ferramentas;

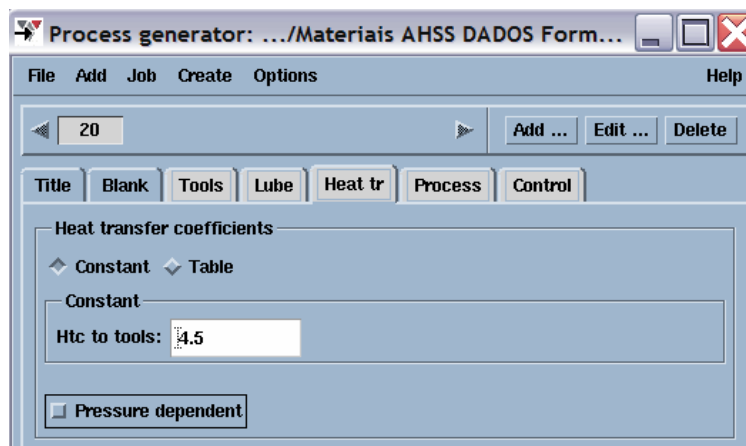


Figura A.5 - Parâmetro do processo “Hotforming” - Coeficiente de transferência de calor.

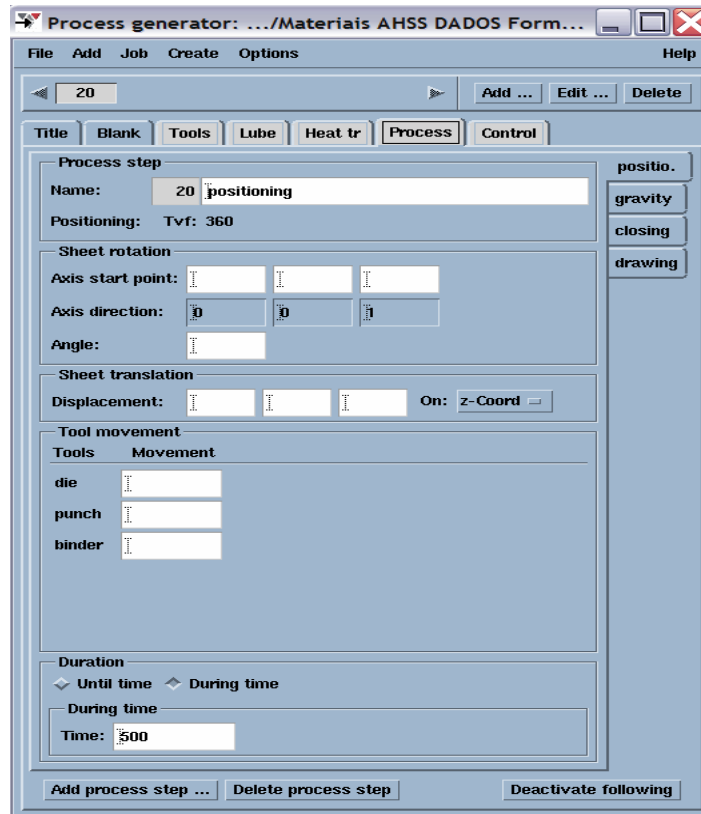


Figura A.6 - Parâmetro do processo “Hotforming” - Posição Inicial da prensa/ferramenta.

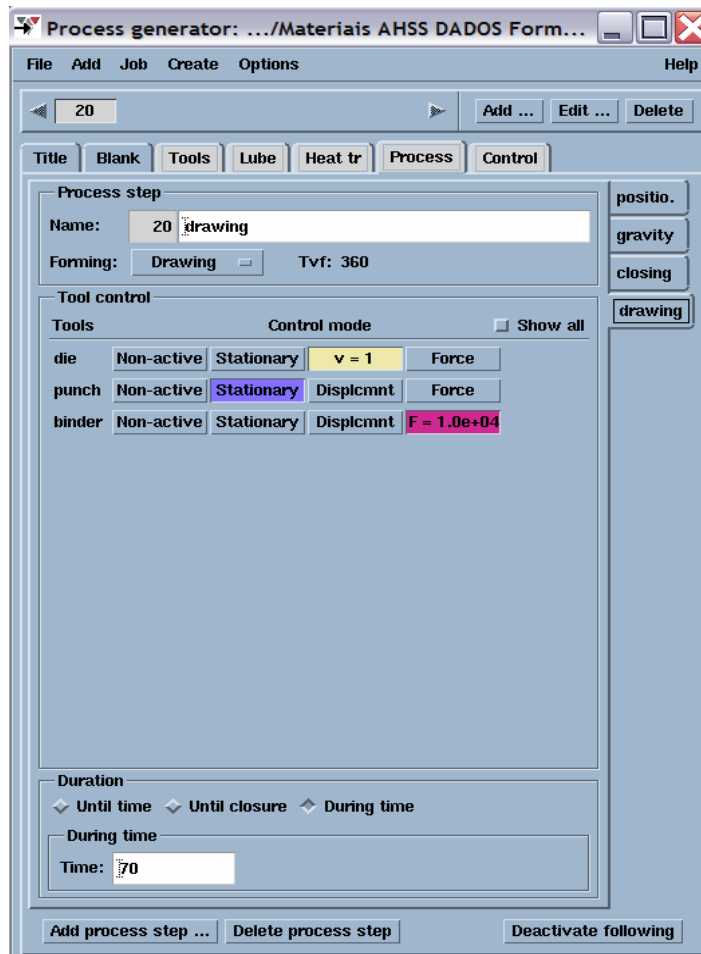


Figura A.7 - Parâmetro processo “Hotforming” - Força de cerra-chapas.

ANEXO B

Caracterização mecânica do aço ao boro - Autoform (ArcelorMittal)

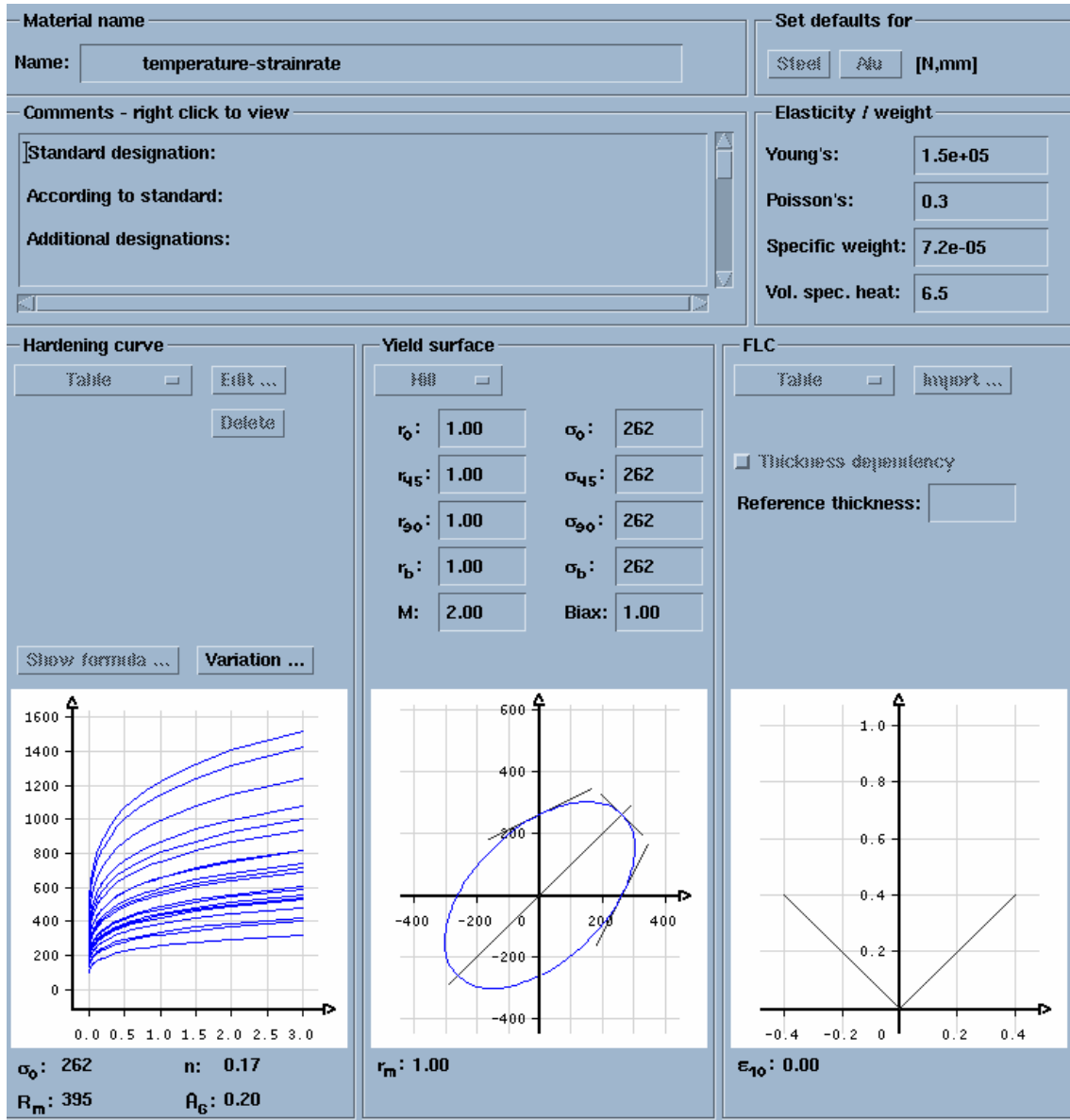


Figura B.1 - Caracterização do aço ao boro (22MnB5) disponível na base de dados da AUTOFORM.

ANEXO C

Aços ao boro - Especificações do mercado siderúrgico

Identificação de FORNECEDORES

- Identificação de Fornecedoras - Aços ao boro:
 - ARCELOR (ArcelorMittal)
 - SSAB
 - RUUKKI
 - SALZGITTER FLACHSTAHL
 - USIMINAS

- Designação técnica/comercial - Aços ao boro:
 - ARCELOR (ArcelorMittal) - USIBOR 1500P
 - SSAB - Docol Boron 02 / 20MnB5
 - RUUKKI - Racold B24 / Raex B24
 - SALZGITTER FLACHSTAHL - 22MnB5
 - USIMINAS - 22MnB5

- Características Específicas - Aços boro:
 - Características químicas:

Tabela C.1 - Características químicas dos diferentes aços ao boro

	Usibor 1500	Docol Boron 02	Racold B24 Raex B24	SALZGITTER 22MnB5	USIMINAS 22MnB5
C %	< 0,25	0,20-0,25	0,20-0,255	0,22-0,25	0,19-0,25
Si %	< 0,35	0,20-0,35	< 0,40	0,20-0,30	< 0,40
Mn %	< 1,40	1,00-1,30	< 1,43	1,20-1,40	1,10-1,40
P %	--	< 0,030	< 0,025	< 0,020	< 0,025
S %	--	< 0,010	< 0,015	< 0,005	< 0,015
Cr %	< 0,30	0,14-0,26	0,18-0,44	0,11-0,20	0,15-0,35
B %	< 0,0050	< 0,0050	< 0,0050	0,002-0,0035	< 0,0050

MATERIAL ANALISADO - ARCELORMITTAL (CST - Brasil) 22MnB5

Composição Química

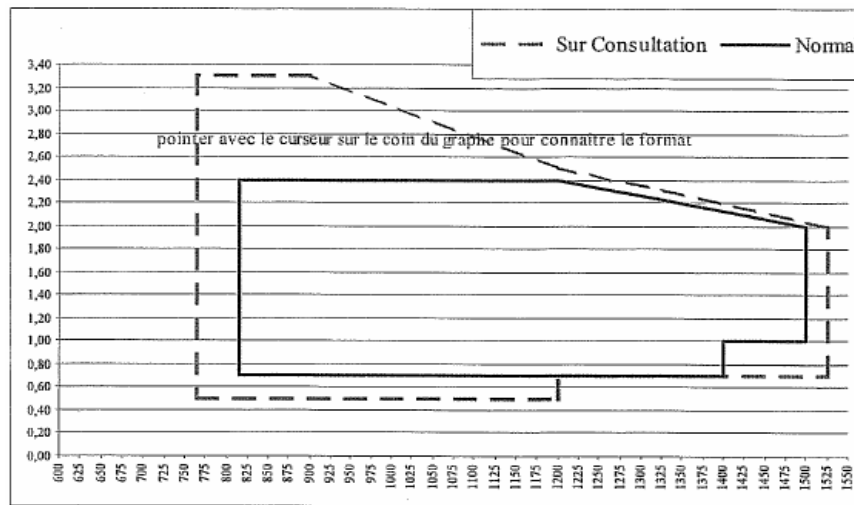
	C	Si	Mn	Cr	Mo	P	S	Ti	Al	B
% Peso	0,24	0,15	1,10	0,15	0,35	0,025	0,008	0,020	0,020	0,005

(continuação)

Propriedades Mecânicas de fornecimento

Tensão de Cedência (Rp0,2) MPa	Tensão de Rotura (Rm) MPa	Alongamento (%)
400	600	~ 20%

Intervalos de espessuras e larguras disponíveis:



Especificações do revestimento do aço ao boro - Al+Si

Percentagens dos constituintes do revestimento

	Al	Si
mínimo	85%	5%
máximo	95%	11%

Especificações da quantidade de revestimento do aço ao boro - Al+Si

Segundo norma EN 10327 - medido em três pontos da chapa:
> 150 g/m² nas duas faces (>AS150<)

	Espessura (g/m ² por face)
Mínimo	70
Máximo	90

Tolerâncias de Fornecimento - em Bobinas:

Intervalos de dimensão (mm)	Min (mm)	Max (mm)
601 - 1199	0	5
1200 - 1500	0	6
> 1500	0	7

(continuação)

- Fornecimento em Rolos/Tiras:

Espessura (mm)	Largura dos Rolos / Tiras			
	< 125	> 125 a < 250	> 250 a < 400	> 400 a < 600
< 0,6	0 / +0,2	0 / +0,2	0 / +0,3	0 / +0,5
> 0,6 - < 1,0	0 / +0,2	0 / +0,3	0 / +0,4	0 / +0,6
> 1,0 - < 2,0	0 / +0,3	0 / +0,4	0 / +0,5	0 / +0,7
> 2,0 - < 3,0	0 / +0,4	0 / +0,5	0 / +0,6	0 / +0,8

Método experimental - Meio de “simulação” da estampagem a quente:

Características mecânicas após estampagem a quente:

Espessura (mm)	Tensão de Cedência (Rp0,2) MPa	Tensão de Rotura (Rm) MPa	Alongamento (%)			Dureza HV 30
			A80 % min.	A50 % min.	A5 (5,65) % min.	
> 1,2	1250	1700	> 4,5	> 5	> 6	550
< 1,2	950	1300	> 4	> 4,5	> 5,5	400

Qualidade dos produtos estampados a quente

Raios > 5 mm

Redução de espessura < 10 %

Tolerância de Precisão: +/-0,5 mm em volume

Espessura/Quantidade de revestimento Al-Si, após estampagem a quente

> 35 µm

Tolerâncias do revestimento, após estampagem a quente

Espessura (mm)	Tolerância
0,8 - 1,9	+/- 0,065
1,2 - 1,49	+/- 0,075
1,5 - 1,79	+/- 0,009
1,8 - 2,59	+/- 0,13
2,6 - 3	+/- 0,14

(continuação)

Aços microligados ao boro - Tratamento superficial

Os primeiros desenvolvimentos relativamente ao processo de estampagem a quente apresentaram alguns “problemas” no que respeita ao acabamento superficial dos produtos estampados. Tendo em conta as elevadas temperaturas ao qual se processam as chapas, as mesmas apresentavam oxidação superficial pois estavam expostas ao ar a temperaturas muito elevadas. Consequentemente esta oxidação proporciona o aparecimento de “resíduos” de óxido de ferro nas ferramentas de estampagem, que por sua vez causavam danos irreparáveis nas mesmas peças produzidas. Aplicado a este processo a solução encontrada passa por ter um material revestido com Al-10%Si, que aquando das elevadas temperaturas o revestimento passa a fazer parte integrante do produto final estampado FeAl(Si). Ensaios sobre a quantidade de revestimento recomendada referem um intervalo de 120 a 160 g/m². O produto final revestido, após estampagem a quente, apresenta boas condições de pintura sem necessitar de tratamento de fosfatação e, também boas características em termos de soldadura por pontos. [36]

Em suma na ausência do referido revestimento, verificam-se problemas de oxidação superficial, após arrefecimento da chapa (óxido de ferro), apresentado na seguinte figura C.1 a) à esquerda. O mesmo é solucionado através de um pré-revestimento aluminizado (Al-Si) que dá origem a uma protecção final - Liga FeAl(Si), como se pode ver na seguinte figura C.1 - b) à direita;

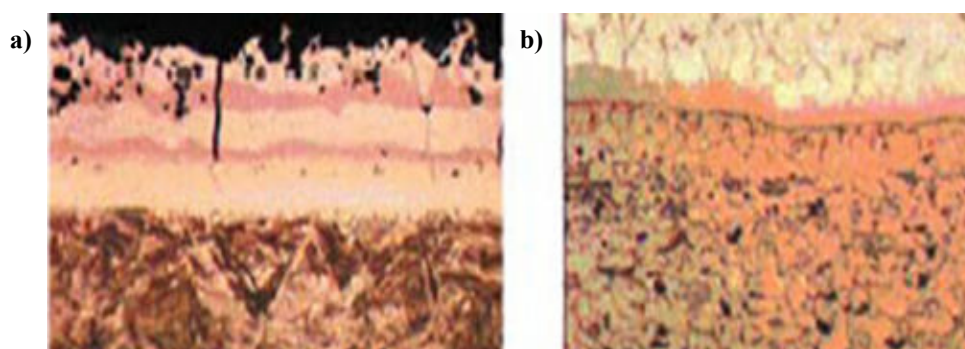


Figura C.1 - Representação dos estados superficiais de peças estampadas a quente [36]

- a) Estrutura martensítica após estampagem a quente (sem revestimento Al-Si)
- b) Estrutura ligada FeAl(Si) após estampagem a quente (com revestimento Al-Si)

ANEXO D

Resultados da distribuição de pontos da curva limite de embutadura (FLD) para os materiais simulados na estampagem a frio da barra de impacto [Autoform versão 4.1.1]

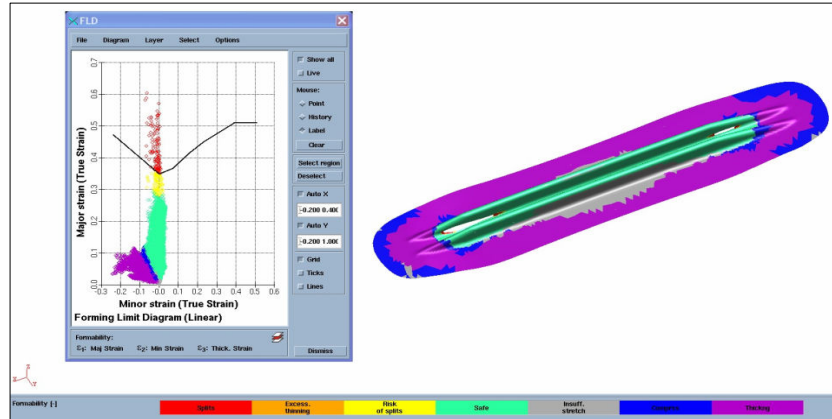


Figura D.1 - Representação da conformabilidade global qualitativa e da FLD para o caso da simulação da barra de impacto com o material DC03 (1 Etapa).

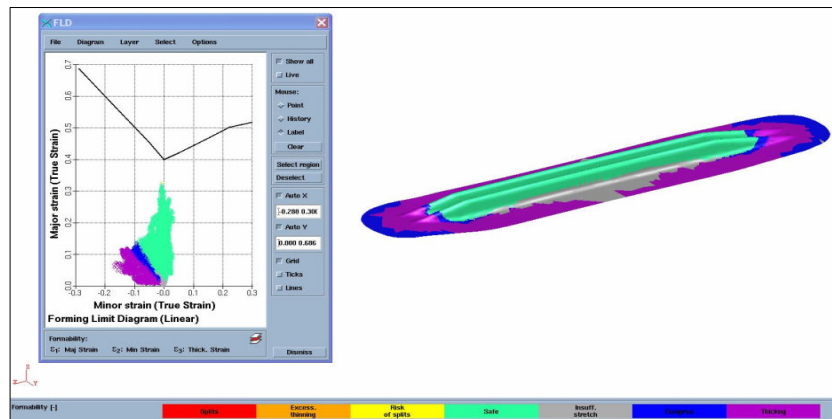


Figura D.2 - Representação da conformabilidade global qualitativa e da FLD para o caso da simulação da barra de impacto com o material DC06 (1 Etapa).

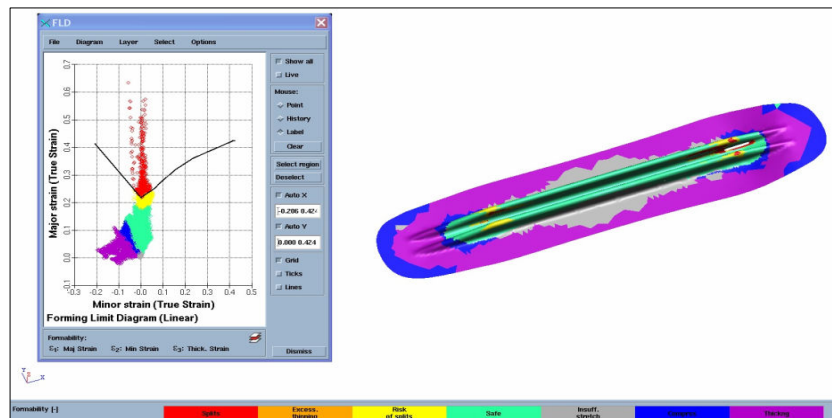


Figura D.3 - Representação da conformabilidade global qualitativa e da FLD para o caso da simulação da barra de impacto com o material H400LA (1 Etapa).

(continuação)

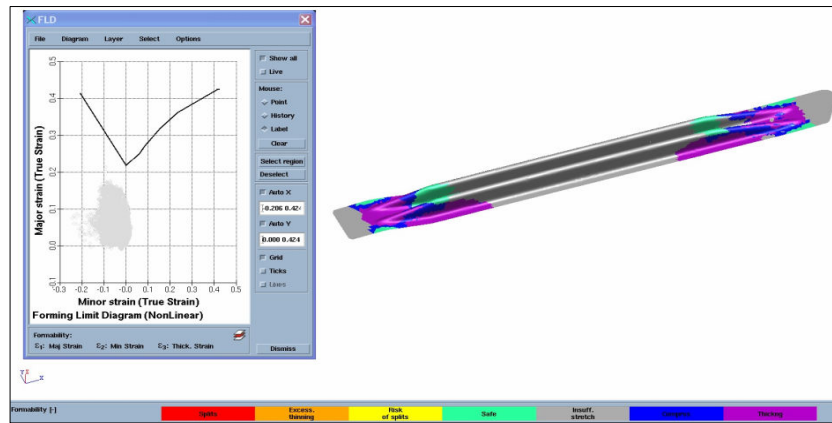


Figura D.4 - Representação da conformabilidade global qualitativa e da FLD para o caso da simulação da barra de impacto com o material H400LA (2 Etapas).

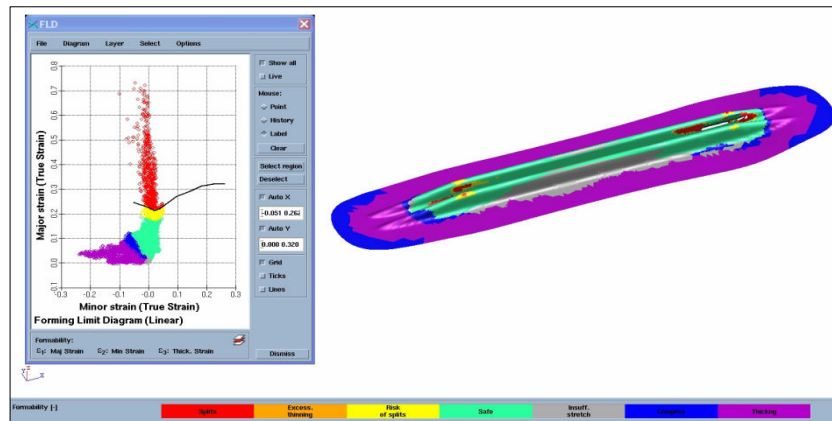


Figura D.5 - Representação da conformabilidade global qualitativa e da FLD para o caso da simulação da barra de impacto com o material DP800 (1 Etapa).

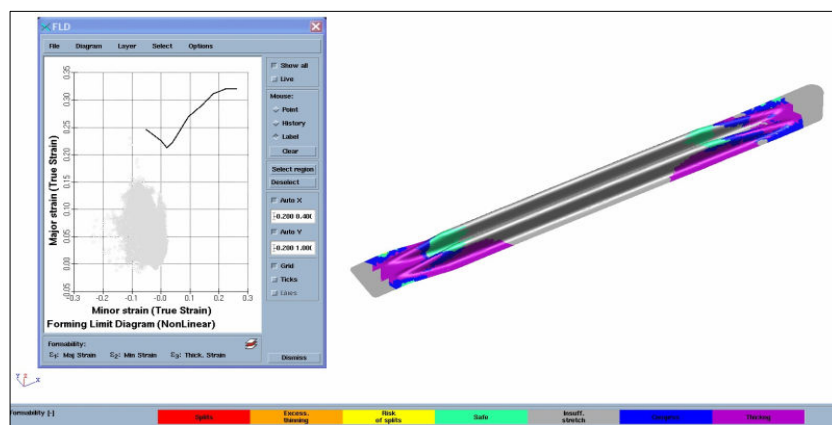


Figura D.6 - Representação da conformabilidade global qualitativa e da FLD para o caso da simulação da barra de impacto com o material DP800 (2 Etapas).

(continuação)

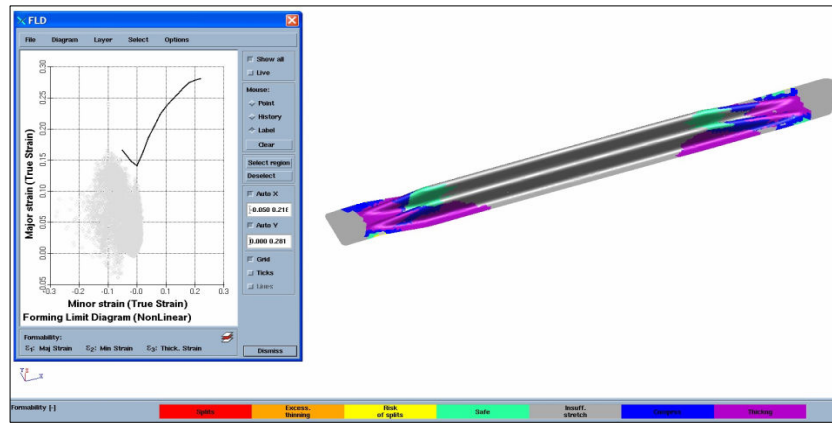


Figura D.7 - Representação da conformabilidade global qualitativa e da FLD para o caso da simulação da barra de impacto com o material M1400 (2 Etapas).

ANEXO E

Resultados da distribuição de pontos da curva limite de embutadura (FLD) para os materiais simulados na estampagem a frio do pilar B [Autoform versão 4.1.1]

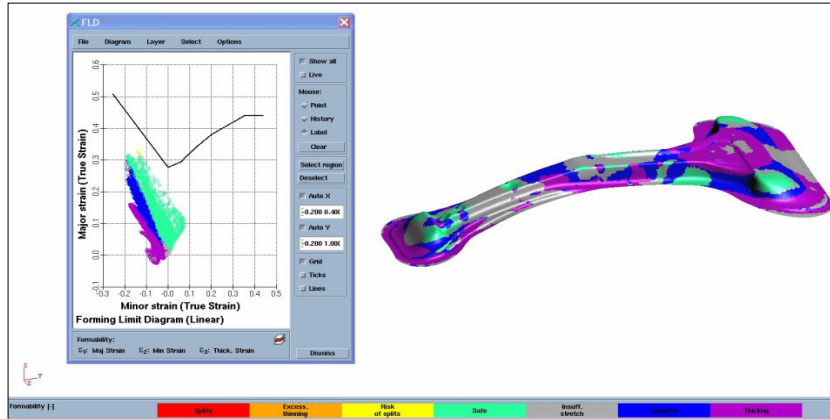


Figura E.1 - Representação da conformabilidade global qualitativa e da FLD para o caso da simulação do pilar B com o material DC06 (1 Etapa).

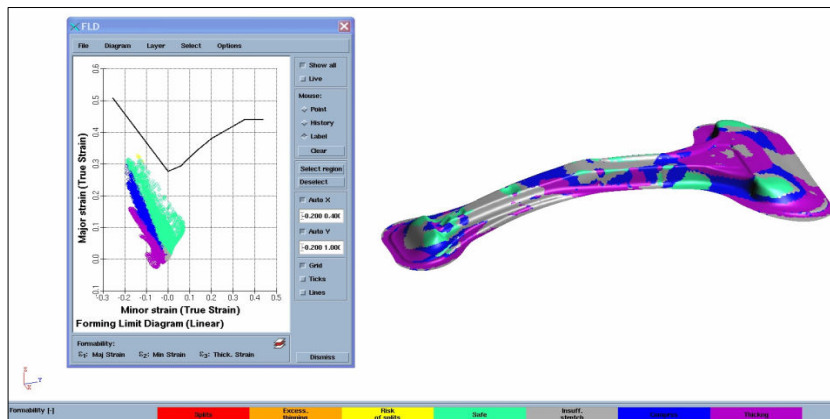


Figura E.2 - Representação da conformabilidade global qualitativa e da FLD para o caso da simulação do pilar B com o material H300LA (1 Etapa).

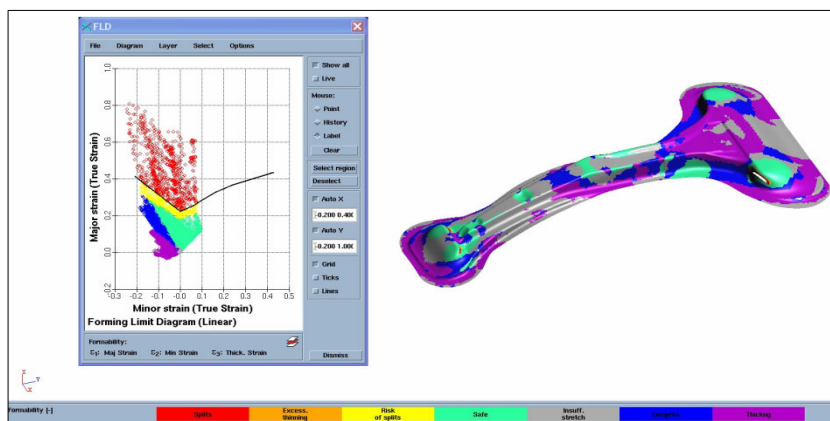


Figura E.3 - Representação da conformabilidade global qualitativa e da FLD para o caso da simulação do pilar B com o material H400LA (1 Etapa).

(continuação)

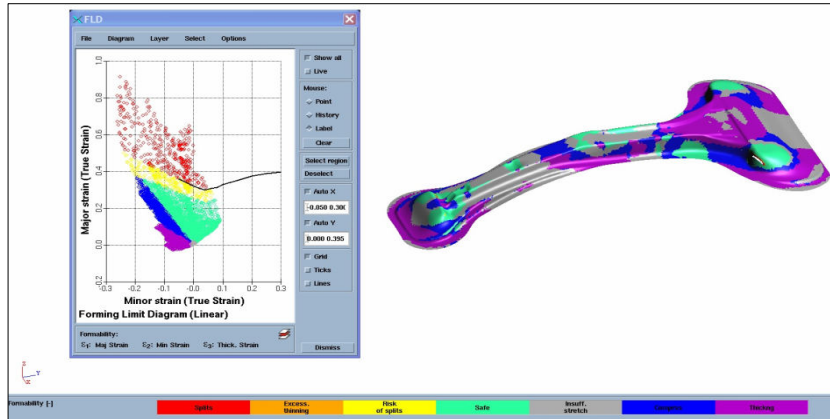


Figura E.4 - Representação da conformabilidade global qualitativa e da FLD para o caso da simulação do pilar B com o material DP500 (1 Etapa).

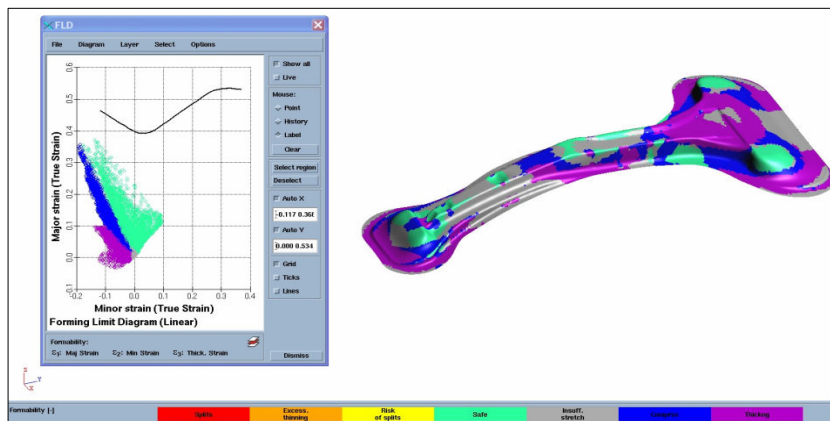


Figura E.5 - Representação da conformabilidade global qualitativa e da FLD para o caso da simulação do pilar B com o material DL500 (1 Etapa).

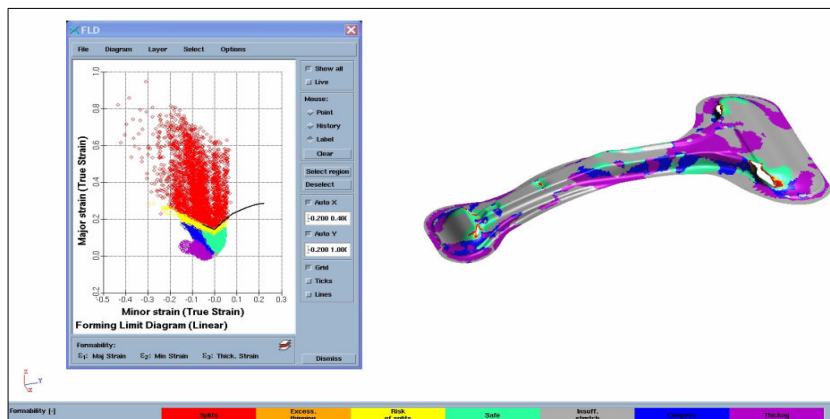


Figura E.6 - Representação da conformabilidade global qualitativa e da FLD para o caso da simulação do pilar B com o material M1400 (1 Etapa).

ANEXO F

Coefficiente de lubrificação 0.35 - 950°C

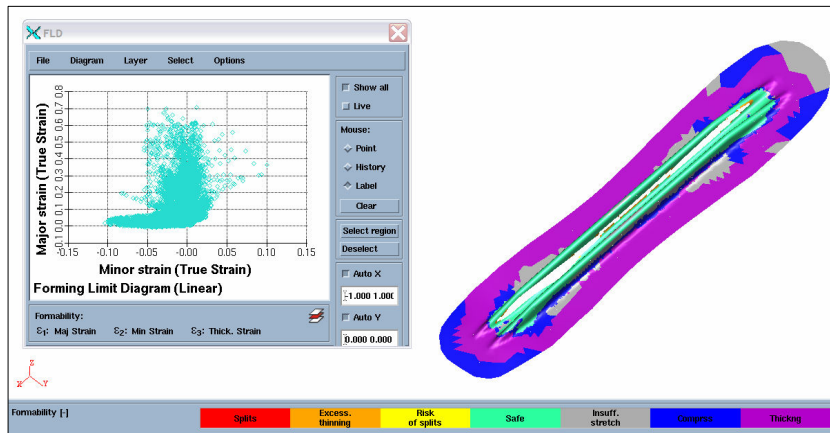


Figura F.1 - Resultado de factibilidade (FLD) a 950°C com coeficiente de lubrificação - 0.35.

Coefficiente de lubrificação 0.35 - 1000°C

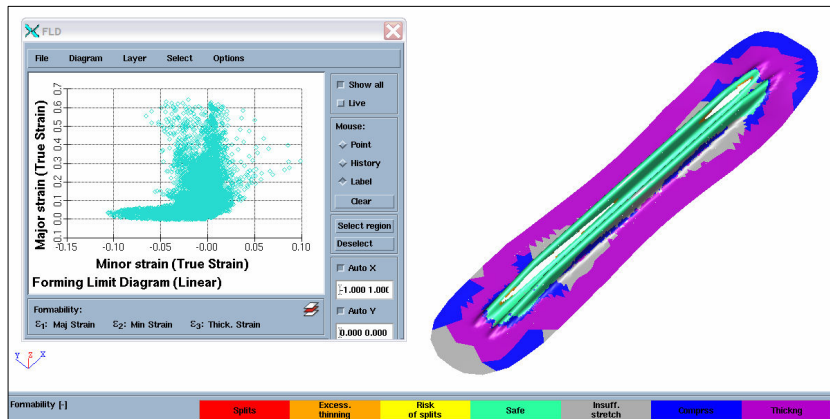


Figura F.2 - Resultado de factibilidade (FLD) a 1000°C com coeficiente de lubrificação - 0.35.

Coefficiente de lubrificação 0.35 - 1200°C

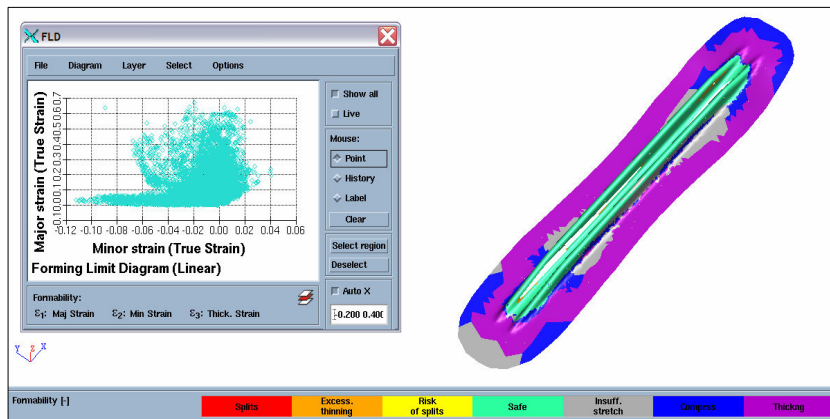


Figura F.3 - Resultado de factibilidade (FLD) a 1200°C com coeficiente de lubrificação - 0.35.

ANEXO G

Análise dos resultados da influência do coeficiente de lubrificação
 Processo de estampagem a quente - Sistema directo

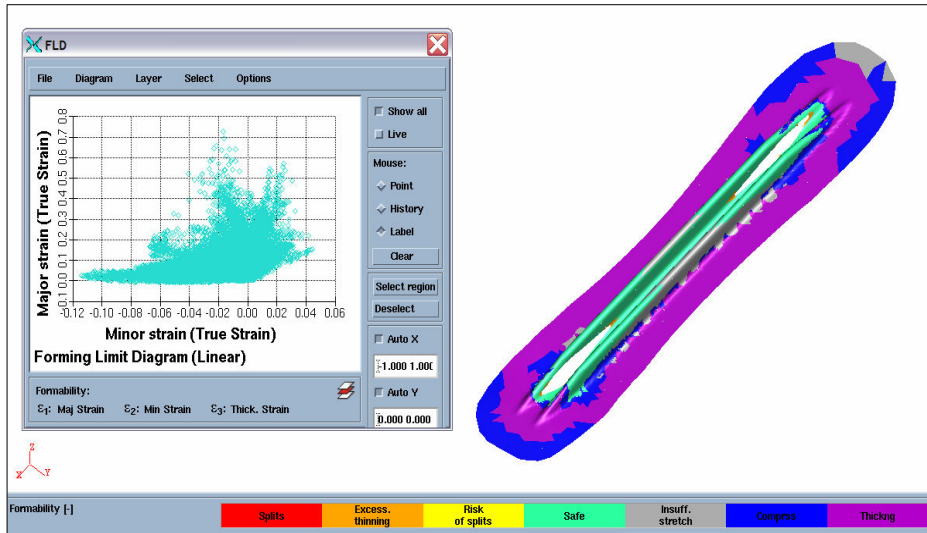


Figura G.1 - Representação dos resultados da análise de factibilidade mais FLD obtidas da simulação a 950°C com coeficiente de lubrificação - 0.35.

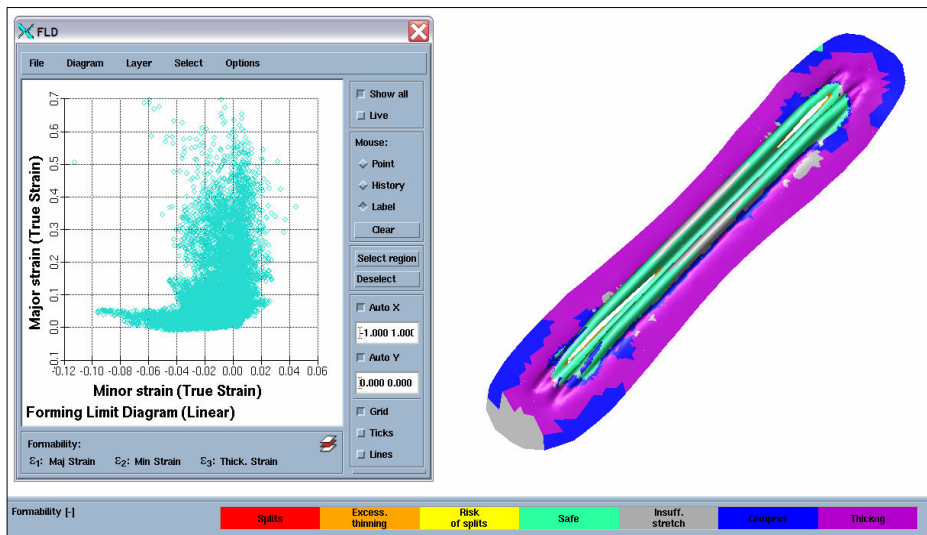


Figura G.2 - Representação dos resultados da análise de factibilidade mais FLD obtidas da simulação a 950°C com coeficiente de lubrificação - 0.25.

(continuação)

Análise dos resultados da influência do coeficiente de lubrificação
 Processo de estampagem a quente - Sistema directo

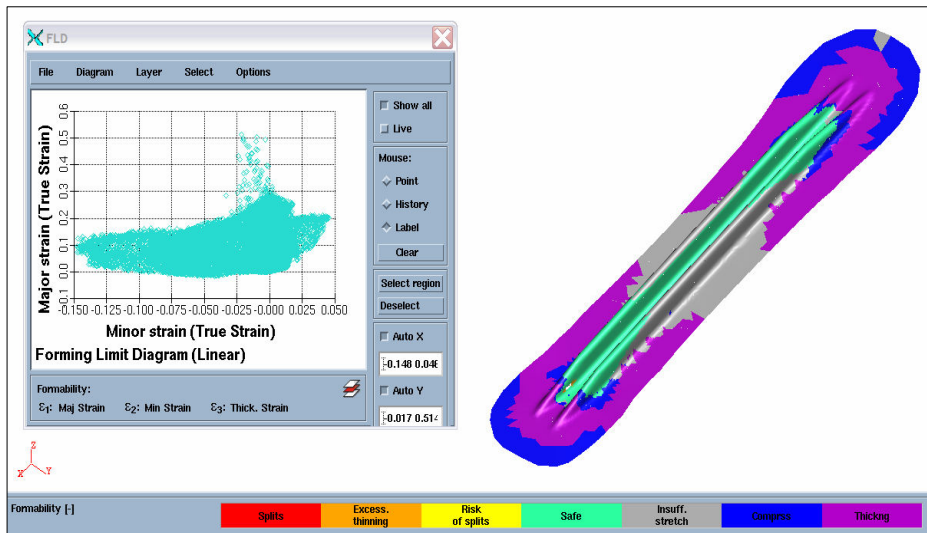


Figura G.3 - Representação dos resultados da análise de factibilidade mais FLD obtidas da simulação a 950°C com coeficiente de lubrificação - 0.15.

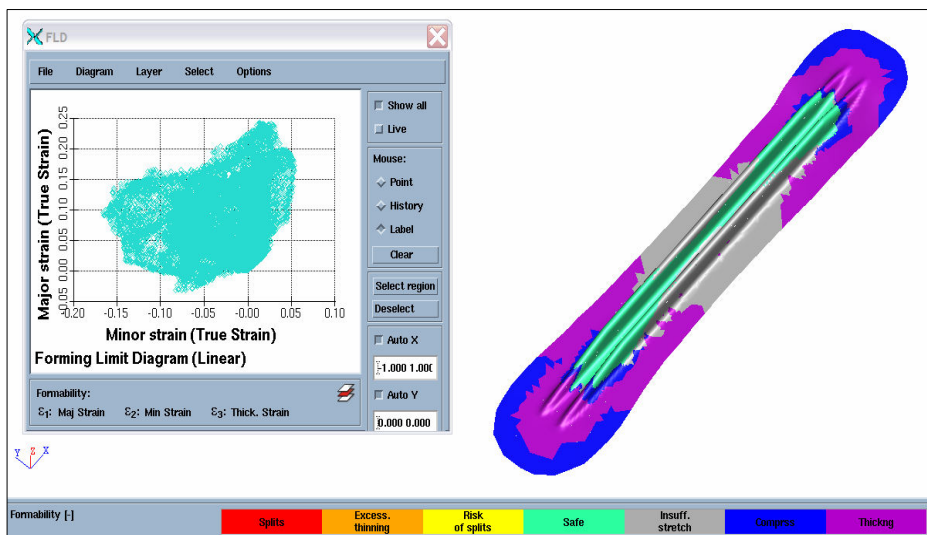


Figura G.4 - Representação dos resultados da análise de factibilidade mais FLD obtidas da simulação a 950°C com coeficiente de lubrificação - 0.05.