

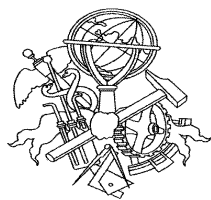
Estudo de Ferramentas FEA Comerciais na Simulação
Numérica de Processos de Conformação de Chapas
Metálicas. Aplicação à Indústria Automóvel.

Mestrado em Engenharia Mecânica

Diana Vieira

Dissertação submetida para a obtenção do grau de Mestre em
Engenharia Mecânica

Instituto Superior de Engenharia do Porto
Departamento de Engenharia Mecânica



18 de Dezembro de 2015

Relatório da Unidade Curricular de Dissertação/Projeto/Estágio do 2º ano do Mestrado em
Engenharia Mecânica

Candidato: Diana Vieira, N° 1030599, 1030599@isep.ipp.pt

Orientação Científica: Fernando Ferreira, fjf@isep.ipp.pt

Empresa: Sodecia, S. A.

Supervisão: Fernando Ferreira, fjf@isep.ipp.pt

Mestrado em Engenharia Mecânica
Departamento de Engenharia Mecânica

Instituto Superior de Engenharia do Porto



18 de Dezembro de 2015

"Viva o hoje, pois o ontem já se foi e o amanhã talvez não venha."

Agradecimentos

Tudo na vida requer bastante esforço e dedicação para que satisfaça as nossas exigências e os nossos objetivos. Esta tese absorveu bastante tempo pessoal e profissional, impedindo-me muitas vezes, de viver pequenos momentos que não voltam atrás.

Desta forma, queria deixar aqui expresso um agradecimento especial a todas as pessoas que direta ou indiretamente contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho.

Em primeiro lugar, agradecer ao meu orientador Eng.º Fernando Ferreira, por toda a confiança em mim depositada, encorajamento, apoio e orientação prestada ao longo deste longo período de trabalho. Foi muito importante todo o comprometimento que criamos desde o início para terminar esta importante etapa.

Ao meu colega Anthony, um muito obrigada por toda a ajuda e parceria ao longo destes meses intensivos de trabalho. Sem ti nada disto teria acontecido.

Ao meu chefe, Eng.º Nuno Merendeiro por toda a disponibilidade e apoio prestado. Obrigada por me teres dado liberdade total para o desenvolvimento deste trabalho.

A todos os meus colegas do Centro Tecnológico da Sodecia que em pequenos pormenores contribuíram, sem dúvida, para complementar este trabalho.

Às pessoas que nesta vida sempre me ensinaram o verdadeiro significado da palavra “Amor” e que estão e estarão sempre do meu lado, independentemente das circunstâncias: a minha mãe, o meu irmão, a minha irmã e o meu pai, que me acompanha todos os dias – obrigada por existirem.

Ao Miguel, que é o pilar da minha vida, o meu muito obrigada pelo amor, paciência e parceria constante ao longo de todos estes meses de trabalho.

Resumo

Os componentes obtidos através da conformação plástica de chapas têm uma grande importância, tanto na etapa de concepção do produto como na etapa de produção na indústria automóvel. Isto comprova-se pelo facto de, em média, cada automóvel integrar cerca de 500 componentes estampados para construir o chassis e a carroçaria [Alves 2003]. Deste total de componentes, 50 são de grandes dimensões (portas, tejadilho, painéis inferior e laterais, entre outros) e necessitam, em média, de cinco ferramentas para o seu fabrico, sendo o custo estimado para cada ferramenta de 230 000 € [Col 2000, Alves 2003].

Para além da indústria automóvel, a conformação plástica de chapas metálicas é um processo tecnológico presente nas indústrias relativas à aeroespacial, petrolífera, decoração, alimentar, entre outras.

Do ponto de vista do enquadramento económico, cerca de 20% do custo total de um automóvel novo é devido à incorporação de componentes metálicos estampados. [Alves 2003]. A pressão do “Mercado Global” faz com que os custos relativos à matéria-prima, energia e mão-de-obra sejam uma constante em termos de redução do seu impacto no orçamento das empresas fornecedoras destes produtos.

É neste contexto que surge a necessidade da realização deste estudo de *Benchmark de Softwares*, tornando-se bastante importante, quer ao nível da competitividade industrial, quer ao nível da inovação para novos produtos.

A análise por elementos finitos desempenha um papel primordial no tryout virtual e otimização das ferramentas e processos de conformação plástica. Os objetivos principais deste estudo de simulação numérica são a identificação e comparação dos resultados obtidos pelo AUTOFORM e pelo PAMSTAMP, para cada uma das variáveis identificadas como as mais influentes na robustez dos processos de estampagem de chapa metálica. Estas variáveis identificadas são: consumo de material (*Draw-in*) após conformação; forças de conformação; valores de variação de espessura e dos valores de extensão e resultados de *Springback*.

Os resultados obtidos são comparados com os resultados experimentais e, desta forma, avalia-se a capacidade inovadora e a eficácia de cada um dos *softwares*, obtendo-se assim, uma orientação mais real para o *software* mais indicado aos objetivos impostos pela indústria automóvel.

Para este efeito, a indústria automóvel, como maior impulsionador e motor da investigação na área da simulação numérica aplicada aos processos de estampagem, tem aderido em peso ao *Benchmarking*. Um exemplo disto, é o que acontece nas conferências Numisheet.

O *Benchmark #2* da conferência *Numisheet* 2008 é analisado pormenorizadamente e os resultados numéricos e experimentais são comparados e apresentados. Dois materiais distintos (aço HC260LAD e liga de alumínio AC170), assim como três modelos com geometrias diferentes (com e sem freios) são apresentados neste relatório.

Com vista à redução dos ciclos tentativa-erro, tem-se adotado ciclos virtuais ou numéricos e tem-se incrementado a interatividade entre as fases de concepção e projeto, num conceito muito próprio, mas cada vez mais abrangente, denominado “produção virtual”.

É nesta filosofia que se insere a simulação numérica dos processos de conformação de chapa.

Palavras-Chave

Estampagem, chapas metálicas, simulação, indústria automóvel, Autoform, PAMStamp, produto, processo, produção.

Abstract

The components obtained by sheet metal forming are a great importance, both in product concept stage, as in manufacturing for the automotive industry. This is proved by the fact that, in average, each automobile, carries around 500 stamped components in order to build the car body and *chassis* [Alves 2003]. From this total amount of components, 50 are of large dimension (doors, roof, floor panel, side panels, among others), and they require an average of 5 stamping dies for manufacturing, with an estimated cost of 230 000 € each [Col 2000, Alves 2003].

Besides the automotive industry, sheet metal forming is a technological process present in industries such as aerospace, oil, decorating, food, among others.

From an economical stand point, around 20% of the total cost of a new automobile, comes from the integration of metal stamping components [Alves 2003]. The “Global Market” pressure makes costs associated with raw material, energy, and man-power, a constant factor in terms of lowering their impact in the companies that supply these products.

In this concept arises the need of performing this *Software Benchmark* study, becoming of high importance, in industrial competitiveness, and also for new products innovation.

Finite element analysis drives a crucial role in virtual tryout and die optimization, and also in metal sheet forming process. The main goals for this study are the identification and comparison of the obtained results by AUTOFORM and PAMSTAMP, for each variable identified as being the most influent in the stamping process reliability. These identified variables are: Raw material consumption (Draw-in) after forming, forming forces, strain and thinning values, and *Springback* results.

The results obtained are compared with the experimental results and there is an evaluation of the innovative capacity and *software* efficiency, therefore achieving a more realistic guidance for the most suitable *software* to reach the goals that are imposed by the automotive industry.

For this, the automotive industry, as the biggest driver in research of finite element simulation applied by the stamping processes, has been a user of *Benchmarking* studies. As an example of this, the *Numisheet* Conferences.

The *Benchmark #2* of the *Numisheet* Conference 2008 is analyzed in detail and the numerical/experimental results are compared and presented. Two different materials (HC260LAD steel and AC170 aluminum alloy), as well as three models with different design, with and without drawbeads are presented in this report.

In order to reduce attempt/error cycles, we have been using virtual or numerical cycles and increasing the interaction between the concept and design stages, in to a very particular concept, becoming more extensive, called the “virtual production”.

This mindset complies the numerical simulation of sheet metal forming.

Keywords

Stamping, sheet metal, simulation, automotive industry, Autoform, PAMStamp, product, process, manufacturing

Índice

AGRADECIMENTOS.....	II
RESUMO	III
ABSTRACT.....	V
ÍNDICE	VIII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XI
ÍNDICE DE TABELAS	XIV
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	XVI
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO	1
1.2. OBJETIVOS.....	7
1.3. FUNDAMENTOS DO PROCESSO DE ESTAMPAGEM	8
1.4. <i>SPRINGBACK</i> (RECUPERAÇÃO ELÁSTICA/RETORNO ELÁSTICO).....	9
2. ESTADO DA ARTE.....	13
2.1. FERRAMENTAS FEA – AUTOFORM E PAMSTAMP	14
3. CARATERIZAÇÃO DE MATERIAIS METÁLICOS	20
3.1. MATERIAIS AVANÇADOS MONOLÍTICOS.....	21
3.2. LEIS DE EVOLUÇÃO	25
3.3. MODELOS CONSTITUTIVOS DO MATERIAL.....	28
3.4. CONTACTO E ATRITO.....	29
3.5. CARATERIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DOS MATERIAIS METÁLICOS	30
4. ESPECIFICAÇÕES DO <i>BENCHMARK</i>.....	36
4.1. DESCRIÇÃO.....	37
4.2. OBJETIVOS.....	38
4.3. TAREFAS.....	38
4.4. DESCRIÇÃO DO TIPO DE MATERIAL	39
4.5. APRECIÇÕES AO DOCUMENTO DE SUPORTE AO <i>BENCHMARK</i>	41
4.6. ABORDAGEM PADRÃO: ETAPAS DO PROCESSO A SER SIMULADO	41
4.7. DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS DE FRICÇÃO	43
5. SIMULAÇÕES NUMÉRICAS	44
5.1. ANÁLISE DOS PARÂMETROS DE OTIMIZAÇÃO	45
5.2. AVALIAÇÃO APÓS CONFORMAÇÃO	46
5.3. PREPARAÇÃO DAS SIMULAÇÕES NUMÉRICAS	48

6.	PREPARAÇÃO DOS TESTES EXPERIMENTAIS.....	60
6.1.	EQUIPAMENTO PARA CONFORMAÇÃO DO <i>S-RAIL</i>	60
6.2.	AVALIAÇÃO DO RETORNO ELÁSTICO.....	63
7.	RESULTADOS EXPERIMENTAIS VERSUS RESULTADOS NUMÉRICOS	64
7.1.	AVALIAÇÃO DA FORÇA DO PUNÇÃO	64
7.2.	AVALIAÇÃO DO <i>DRAW-IN</i>	76
7.3.	AVALIAÇÃO DA MAIOR E MENOR DEFORMAÇÃO E REDUÇÃO DE ESPESSURA	86
7.4.	DISTRIBUIÇÃO DAS ESPESSURAS ANTES DA RECUPERAÇÃO ELÁSTICA	89
7.5.	AVALIAÇÃO DA RECUPERAÇÃO ELÁSTICA.....	90
8.	CONTRIBUIÇÃO INDUSTRIAL	109
9.	CONCLUSÕES.....	110
10.	SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS.....	113
11.	REFERÊNCIAS.....	115
	ANEXO A. RESULTADOS DOS TESTES EFECTUADOS	120
A1)	AVALIAÇÃO DA MAIOR E MENOR DEFORMAÇÃO E REDUÇÃO DE ESPESSURA	120

Índice de Figuras

Figura 1: Exemplo do tipo de produtos fabricados pelo Grupo Sodécia nas suas unidades.	2
Figura 2: Exemplo do tipo de produtos fabricados pelo Grupo Sodécia nas suas unidades.	2
Figura 3: Esquema básico de uma ferramenta de embutidura [Vreede 1992].....	9
Figura 4: Retorno Elástico. A figura mostra a deformação da placa carregada e descarregada [Springback].....	10
Figura 5: Classificação das distorções dimensionais observadas no processo de Embutidura	11
Figura 6: Variáveis que influenciam a previsão do retorno elástico pela simulação	11
Figura 7: Redução de peso do <i>body-in-white</i> Porsche Cayenne 2011 pela aplicação de aços avançados de alta resistência.....	13
Figura 8: Exemplo de simulação Incremental com Autoform	15
Figura 9: Exemplo de simulação Incremental com PAMStamp	16
Figura 10: Variedade de materiais utilizados na indústria automóvel [Flegel 2001].....	20
Figura 11: Representação esquemática dos encruamentos isotrópicos e cinemáticos	26
Figura 12: Esquema representativo do contacto entre dois corpos	29
Figura 13: Representação da gama de deformações atingidas pelos diversos ensaios de caracterização dos materiais [Gerlach 2003]	31
Figura 14: Ensaio de Tração para o aço HC260LAD	32
Figura 15: Ensaio de Tração para o aço HC260LAD	32
Figura 16: Ensaio de Tração para o alumínio AC170	33
Figura 17: Ensaio de Tração para o alumínio AC170	33
Figura 18: Superfície de Plasticidade HC260LAD e AC170	34
Figura 19: <i>Forming Limit Curve</i> para o material HC260LAD	35
Figura 20: <i>Forming Limit Curve</i> para o material AC170.....	35
Figura 21: Geometria do <i>Benchmark</i> BM02 - “S-Rail 2008”	37
Figura 22: Corte transversal da ferramenta para o caso sem freio	38
Figura 23: Corte transversal da ferramenta para o caso freio suave.....	39
Figura 24: Corte transversal da ferramenta para o caso freio de bloqueio/retenção	39
Figura 25: Representação do dispositivo montado para a realização do “ <i>strip drawing test</i> ”	43
Figura 26: Soluções de <i>software</i> para simulação numérica que acompanham todas as etapas de desenvolvimento do produto.	44
Figura 27: Secções para a avaliação do <i>draw-in</i>	46
Figura 28: Representação do efeito de torção sofrido pelo esboço a medida que escoar para	48
Figura 29: Definição da matéria-prima através do Autoform.	49
Figura 30: Definição da matéria-prima através do PAMStamp.	49

Figura 31: Definição do processo de estampagem através do Autoform	50
Figura 32: Definição do Processo de Estampagem através do PAMStamp.	51
Figura 33: Definição da cinemática das ferramentas OP20 através do Autoform	52
Figura 34: Definição da cinemática das ferramentas de conformação da OP20 através do PAMStamp	52
Figura 35: Definição da cinemática das ferramentas de corte da OP30 através do Autoform.....	53
Figura 36: Definição da cinemática das ferramentas de corte da OP30 através do PAMStamp.....	53
Figura 37: Definição da cinemática dos pontos de constrangimento da OP40 (<i>Springback</i>) através do Autoform	54
Figura 38: Definição da cinemática dos pontos de constrangimento da OP40 (<i>Springback</i>) através do PAMStamp	54
Figura 39: Soluções de <i>software</i> para simulação numérica que acompanham todas as etapas de desenvolvimento do produto em Autoform – LC1	55
Figura 40: Soluções de <i>software</i> para simulação numérica que acompanham todas as etapas de desenvolvimento do produto em PAMStamp– LC1.....	55
Figura 41: Soluções de <i>software</i> para simulação numérica que acompanham todas as etapas de desenvolvimento do produto em Autoform – LC2.....	56
Figura 42: Freios Suaves do modelo LC2 - Autoform.....	56
Figura 43: Soluções de <i>software</i> para simulação numérica que acompanham todas as etapas de desenvolvimento do produto em PAMStamp – LC2.....	57
Figura 44: Freios Suaves do modelo LC2 – PAMStamp	57
Figura 45: Soluções de <i>software</i> para simulação numérica que acompanham todas as etapas de desenvolvimento do produto – LC3	58
Figura 47: Soluções de <i>software</i> para simulação numérica que acompanham todas as etapas de desenvolvimento do produto – LC3	59
Figura 48: Freios de Retenção do modelo LC3 - PAMStamp.....	59
Figura 49: Corte transversal de um modelo CAD do equipamento dos testes de conformação e localização dos extensómetros no punção.....	60
Figura 50: Ferramentas de conformação: cerra-chapas, freios e matrizes.	61
Figura 51: Equipamento de medição do <i>draw-in</i>	61
Figura 52: Ferramenta do <i>S-Rail</i> : medidor dos deslocamentos e mecanismo de calibração.....	62
Figura 53: Stop mecânico para o posicionamento correto do esboço.	62
Figura 54: Perfil obtido nos ensaios experimentais.....	63
Figura 55: Localização dos furos no <i>S-Rail</i> para fixação no instrumento de medição do retorno elástico.....	63
Figura 56: Ferramentas e <i>blank</i> na posição inicial, antes do início da fase de conformação	65
Figura 57: Ferramentas e <i>blank</i> na posição final impondo o fim da fase de conformação: quando BDC é atingido	65
Figura 58: Secções para as quais se conseguiram resultados experimentais na medição do	76
Figura 59: Representação das secções para estudo das variáveis macro.....	86

Figura 60: Representação das secções para estudo das variáveis macro.....	87
Figura 61: Representação das secções para estudo das variáveis macro.....	87
Figura 62: Modelo representativo das condições de <i>Springback</i>	90
Figura 63: Condições de Fronteira para os modelos de <i>Springback</i>	90
Figura 64: Perfil A ₀ para validação dos modelos de <i>Springback</i>	91
Figura 65: Secção de referência para análise de <i>Springback (Ao)</i>	92
Figura 66: Comparação dos perfis de <i>Springback</i> - LC1 HC260LAD.....	92
Figura 67: Resultado de <i>Plastic Strain</i> - PAMStamp.....	93
Figura 68: Resultado de <i>Plastic Strain</i> - Autoform.....	93
Figura 69: Secção de referência para análise de <i>Springback</i>	94
Figura 70: Comparação dos perfis de <i>Springback</i> - LC2 HC260LAD.....	95
Figura 73: Secção de referência para análise de <i>Springback</i>	96
Figura 74: Comparação dos perfis de <i>Springback</i> - LC3 HC260LAD.....	97
Figura 75: Resultado de <i>Plastic Strain</i> - PAMStamp.....	97
Figura 76: Resultado de <i>Plastic Strain</i> - Autoform.....	98
Figura 77: Secção de referência para análise de <i>Springback</i>	99
Figura 78: Comparação dos perfis de <i>Springback</i> - LC1 AC170.....	99
Figura 79: Resultado de <i>Plastic Strain</i> - PAMStamp.....	100
Figura 80: Resultado de <i>Plastic Strain</i> - Autoform.....	100
Figura 81: Resultados de <i>Plastic Strain</i> - Autoform vs PAMStamp.....	101
Figura 82: Secção de referência para análise de <i>Springback</i>	102
Figura 83: Comparação dos perfis de <i>Springback</i> - LC2 AC170.....	103
Figura 84: Resultado de <i>Plastic Strain</i> - PAMStamp.....	103
Figura 85: Resultado de <i>Plastic Strain</i> - Autoform.....	104
Figura 87: Comparação dos perfis de <i>Springback</i> - LC3 AC170.....	105
Figura 88: Resultado de <i>Plastic Strain</i> - PAMStamp.....	106
Figura 89: Resultado de <i>Plastic Strain</i> - Autoform.....	106

Índice de Tabelas

Tabela 1: Principais características numéricas dos <i>Softwares</i> Autoform e PamSTAMP	17
Tabela 2: Principais vantagens entre os <i>Softwares</i> Autoform e PamSTAMP	18
Tabela 3: Parâmetros mecânicos experimentais e Parâmetros constitutivos considerados em Barlat 2000 para HC260LAD	34
Tabela 4: Parâmetros mecânicos experimentais e Parâmetros constitutivos considerados em Barlat 2000 para AC170.....	34
Tabela 5: Características da matéria prima utilizada.....	40
Tabela 6: Características de Processo utilizadas	40
Tabela 7: Definição dos componentes do Tribosistema.....	43
Tabela 8: Casos seleccionados no estudo da sensibilidade do draw-in.....	47
Tabela 9: Tabela com os desvios de cada modelo em relação ao ensaio experimental LC1 HC260LAD.....	79
Tabela 10: Tabela com os desvios de cada modelo em relação ao ensaio experimental LC2 HC260LAD	80
Tabela 11: Tabela com os desvios de cada modelo em relação ao ensaio experimental LC3 HC260LAD.....	81
Tabela 12: Tabela com os desvios de cada modelo em relação ao ensaio experimental LC1 AC170	82
Tabela 13: Tabela com os desvios de cada modelo em relação ao ensaio experimental LC2 AC170	83
Tabela 14: Tabela com os desvios de cada modelo em relação ao ensaio experimental LC3 AC170	84

Índice de Gráficos

Gráfico 1: Forças medidas nos ensaios experimentais (HC260LAD).....	66
Gráfico 2: Forças medidas nos ensaios experimentais (AC170).....	67
Gráfico 3: Forças medidas nos ensaios numéricos – LC1 (HC260LAD).	68
Gráfico 4: Forças medidas nos ensaios numéricos – LC1 (AC170).....	69
Gráfico 5: Forças medidas nos ensaios numéricos – LC2 (HC260LAD).	70
Gráfico 6: Forças medidas nos ensaios numéricos – LC2 (AC170).....	71
Gráfico 7: Forças medidas nos ensaios numéricos – LC3 (HC260LAD).	72
Gráfico 8: Forças medidas nos ensaios numéricos – LC3 (AC170).....	73
Gráfico 9: Comparação da força de prensa de todos os modelos HC260LAD.	74
Gráfico 10: Comparação da força de prensa de todos os modelos AC170.	74
Gráfico 11: Draw-in medido nos ensaios experimentais (HC260LAD).	77
Gráfico 12: Draw-in medido nos ensaios experimentais (AC170).....	78
Gráfico 13: Draw-in medido nos ensaios numéricos (HC260LAD) LC1.	79
Gráfico 14: Draw-in medido nos ensaios numéricos (HC260LAD) LC2.	80
Gráfico 15: Draw-in medido nos ensaios numéricos (HC260LAD) LC3.	81
Gráfico 16: Draw-in medido nos ensaios numéricos (AC170) LC1	82
Gráfico 16: Draw-in medido nos ensaios numéricos (AC170) LC2.	83
Gráfico 17: Draw-in medido nos ensaios numéricos (AC170) LC3	84
Gráfico 18: Evolução das deformações logarítmicas na secção A2D para LC1 (HC260LAD).....	120
Gráfico 19: Evolução das deformações logarítmicas na secção A2D para LC1 (HC260LAD).....	121
Gráfico 20: Evolução das deformações logarítmicas na secção D2D para LC1 (HC260LAD).....	121
Gráfico 21: Evolução das deformações logarítmicas na secção A2D para LC2 (HC260LAD).....	122
Gráfico 22: Evolução das deformações logarítmicas na secção B2D para LC2 (HC260LAD).....	122
Gráfico 23: Evolução das deformações logarítmicas na secção C2D para LC2 (HC260LAD).....	123
Gráfico 24: Evolução das deformações logarítmicas na secção A2D para LC3 (HC260LAD).....	124
Gráfico 25: Evolução das deformações logarítmicas na secção A2D para LC3 (HC260LAD).....	124
Gráfico 26: Evolução das deformações logarítmicas na secção B2D para LC3 (HC260LAD).....	125
Gráfico 27: Evolução das deformações logarítmicas na secção B2D para LC3 (HC260LAD).....	125
Gráfico 28: Evolução das deformações logarítmicas na secção D2D para LC3 (HC260LAD).....	126
Gráfico 29: Evolução das deformações logarítmicas na secção D2D para LC3 (HC260LAD).....	126
Gráfico 30: Evolução das espessuras ao longo das secções.....	127

1. Introdução

1.1. Contextualização

A Sodecia SGPS é um grupo industrial português que actua no mercado automóvel há cerca de trinta anos e que consolidou a sua experiência, sobretudo no desenvolvimento e produção de componentes estampados. A Sodecia Centro Tecnológico (CT), empresa do grupo Sodecia SGPS, foi criada em 2005 com a finalidade de conceber e projetar componentes para veículos, automóveis ou motociclos, criar e desenvolver novos produtos e processos, respondendo às solicitações das unidades industriais do Grupo e dos seus clientes.

Com cerca de 21 colaboradores, o CT assegura um conjunto de competências técnicas essenciais para as atividades de I&D que a empresa desenvolve. Não obstante, existem determinadas áreas em que a intervenção de outras entidades se torna fundamental para a qualidade técnica do projeto. Neste sentido, a empresa tem vindo a desenvolver alguns projetos com o envolvimento de entidades externas, podendo destacar-se, entre outros, as parcerias com: a Universidade de Aveiro no projeto *Concept Car*; com o PIEP no projeto *Hybrid Component 2 Wheels*; com o INEGI no projeto *New Generation Hybrid Fuel Tank*; com o MIT Portugal e, mais recentemente com a Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, no projeto CCB 360°.

Desde a sua criação que o Centro Tecnológico Sodecia participa ativamente no desenvolvimento de novos produtos e novas soluções de engenharia para a indústria automóvel, encontrando-se particularmente focado na concepção de produtos estampados (ver Figura 1).

Nos últimos anos, têm sido várias as parcerias de R&D estabelecidas pelo CT com vista ao desenvolvimento de novos produtos e novas soluções para a indústria automóvel. Tais estudos envolvem, em geral, a utilização de novos materiais, novas tecnologias e novos processos de manufatura, que exigem as mais recentes e avançadas ferramentas de simulação.

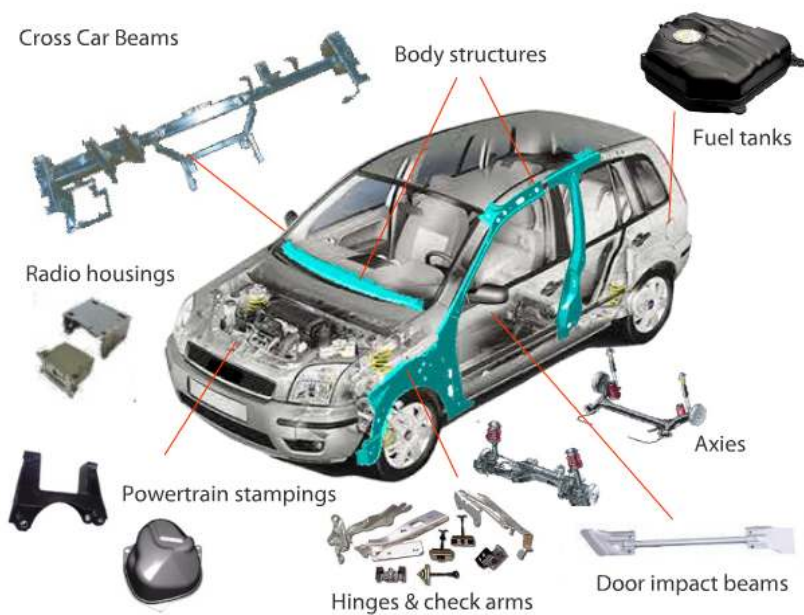


Figura 1: Exemplo do tipo de produtos fabricados pelo Grupo Sodecia nas suas unidades



Figura 1: Exemplo do tipo de produtos fabricados pelo Grupo Sodecia nas suas unidades.

Para atender às necessidades de CAE para a concepção e estudo de novos componentes estampados o CT:

- ◆ dispõe de licenças para as mais avançadas ferramentas de CAE-Processo, disponíveis comercialmente, a saber: o AUTOFORM, a ferramenta considerada *standard* e mais utilizada pela indústria automóvel para a concepção de peças estampadas, e outras, como o PAM-STAMP, o PAM-TUBE e WELDPLANNER;
- ◆ reforçou, recentemente, as suas competências ao ver desenvolvido o seu laboratório de caracterização experimental com os recursos/equipamentos necessários à validação dos respetivos produtos conformados. Entre outros, devem destacar-se, por exemplo, os equipamentos de caracterização mecânica de materiais, nomeadamente o durómetro, máquina de tração e máquina de *bulge test*;
- ◆ tem fomentado e incentivado a contínua formação dos seus recursos humanos, no sentido de desenvolver as competências necessárias às várias áreas do ciclo de vida dos produtos desenvolvidos.

Todavia, constata-se que, no decorrer dos últimos anos e no desenrolar dos seus projetos de R&D, o CT tem-se deparado com importantes limitações das ferramentas comerciais de CAE disponíveis, em particular do AUTOFORM e PAM-STAMP. Estas têm limitado e constringido a capacidade de inovação, no âmbito dos projetos por si desenvolvidos. Em vários casos, os contactos estabelecidos pelo CT junto dos departamentos técnicos e de desenvolvimento dos fornecedores das ferramentas comerciais de CAE, revelaram que nenhuma ferramenta numérica comercial, atualmente disponível, tem capacidade para simular, com adequado grau de confiança e flexibilidade, quer processos especiais e específicos de estampagem, quer a conformação de materiais multi-camadas.

Tais ferramentas estabelecem limites, quer aos materiais passíveis de serem simulados, quer aos processos e operações que permitem simular.

Compreender a importância da variabilidade dos parâmetros de processo é fundamental, tanto no caso do estudo dos materiais avançados multicamada como dos monolíticos ou mono-materiais. Tendo em vista a prestação de serviços para as Unidades do Grupo Sodécia, o CT realiza frequentemente estudos de factibilidade de produtos conformados e/ou de validação dos processos de conformação, com recurso à simulação numérica. Esta

acompanha o desenvolvimento das ferramentas desde as etapas iniciais do projeto até ao arranque da produção. Estes estudos de simulação preliminares são fundamentais para determinar:

- se é ou não possível produzir uma peça com uma determinada geometria e um determinado material;
- se é possível utilizar determinado conceito de processo de estampagem;
- estimar o consumo de matéria-prima.

Ainda assim, peças com defeitos que precisam ser descartadas continuam a fazer parte do ciclo real de produção. Isto deve-se, em parte, pela diferença entre a realidade e a simulação. Contudo, o aspeto mais importante relaciona-se com a variabilidade e o ruído existentes no processo real. A repetibilidade dos resultados depende destes parâmetros. Assim, por mais abrangente e avançado que seja o modelo numérico utilizado, nunca conseguirá garantir a confiabilidade dos resultados e assegurar a robustez do processo, a menos que se tome em consideração, estatisticamente, a variabilidade e o “ruído” existentes. Este é um passo preponderante para desenvolver e implementar o conceito de produção virtual.

Uma das tarefas mais complicadas de executar no processo produtivo é, atualmente, conseguir ajustar um processo de modo a garantir-se simultaneamente tolerâncias de forma e posição apertadas e boa repetibilidade. Este problema torna-se ainda mais complexo quando se introduzem na equação, materiais metálicos avançados monolíticos, como os aços de alta resistência. A utilização deste tipo de aços tornou-se cada vez mais comum nos automóveis modernos, pelo que a estampagem de componentes estruturais de aços avançados, nomeadamente pilar-A, pilar-B e Impact Beams, nas Unidades do Grupo Sodecia também têm aumentado. O fenómeno de *Springback* a que estes aços estão sujeitos é a causa primária de problemas de qualidade que levam à rejeição de peças. O *Springback* é muito sensível à variabilidade dos parâmetros de processo e dos materiais. Para se obterem resultados numéricos de *Springback* confiáveis é essencial garantir também a sua repetibilidade. Só depois disto é possível compensar este efeito, ajustando-o dentro dos limites de tolerância especificados. Porém, alcançar a necessária consistência nos desvios de *springback* e garantir a qualidade do produto, a partir dos outputs de uma única simulação convencional de *springback*, não é possível.

Para levar em conta a variabilidade na simulação numérica dos processos de conformação

de chapa é necessário recorrer à análise estocástica. Para este fim, o CT dispõe de um módulo associado à ferramenta AUTOFORM, designado SIGMA. O AUTOFORM-SIGMA permite a execução de simulações múltiplas e baseia-se na análise estocástica para avaliar a robustez e capacidade dos processos de conformação.

Portanto, este estudo de capacidade dos processos de conformação de materiais metálicos avançados monolíticos é fundamental tanto para resolver problemas industriais como para gerar mais conhecimento sobre o comportamento dos materiais multicamada, até agora mal descritos e mal dominados. Ainda assim, interessa referir que, embora as ferramentas comerciais CAE disponíveis, possam dar um contributo importante, limitam o trajeto de inovação do CT, dificultando a possibilidade de diferenciação dos seus concorrentes através de ferramentas exclusivas de cálculo. A razão prende-se com o facto de os fornecedores apenas tornarem acessíveis algumas funcionalidades e características.

Esta limitação é especialmente penalizadora tendo em conta que o mercado automóvel está cada vez mais permeável à introdução de soluções tecnológicas inovadoras que incorporem novos materiais avançados, sejam eles de natureza monolítica ou multicamada, com vista à redução do peso dos automóveis. Diferentemente do que acontecia no passado, as OEM's estão agora mais propensas a assumir custos relativos às flutuações no mercado de matéria-prima cotada em bolsa (ligas de alumínio e magnésio, entre outros), valorizando as soluções tecnológicas mais exóticas e onerosas em detrimento das convencionais.

Em suma, o CT considera fundamental desenvolver os conhecimentos e competências internas no sentido de aumentar a sua capacidade de projeto e desenvolvimento de novos produtos e, conseqüentemente, aumentar a sua competitividade e das empresas do Grupo Sodecia. Associado a esse desenvolvimento, as necessidades especiais das atividades de R&D, a desenvolver pelo CT são:

- Modelar e simular o processamento de mono-materiais;
- Aumentar a robustez dos processos de conformação de novos materiais avançados, e assim contribuir para um maior rigor numérico dos resultados;
- Simular e otimizar processos de conformação plástica não cobertos pelas ferramentas comerciais de CAE já disponíveis no CT.

Para este efeito, a indústria automóvel, como maior impulsionador e motor da investigação na área da simulação numérica aplicada aos processos de estampagem, tem aderido em

peso ao *benchmarking*. A comprová-lo é o que acontece nas conferências *Numisheet*. Estas visam dar a oportunidade, a engenheiros e cientistas de todo o mundo, de partilharem os seus mais recentes desenvolvimentos no campo da simulação numérica dos processos de conformação de chapa, comparando o estado da arte das simulações com resultados experimentais cuidadosamente obtidos. A primeira conferência *Numisheet* ocorreu em 1991, e desde então tem-se realizado de três em três anos. Ora, é sobre esta temática que toda a investigação, reportada neste trabalho, se alicerça.

As marcas que assumiram o papel de mentores este ano foram a BMW, para o *Benchmark 1*, a Daimler, para o *Benchmark 2* e a Audi, para o *Benchmark 3*. O *benchmark* em estudo nesta investigação será o *Benchmark 2* proposto pela empresa Daimler. Pretende-se com este, encontrar investigadores capazes de mostrar, virtualmente, a influência dos freios na recuperação elástica, com o auxílio de ferramentas numéricas, e dispostos a partilhar os seus resultados, para incrementar o conhecimento nesta área. O investigador encontra-se inserido num núcleo, devidamente creditado e reputado pela entidade organizadora do *benchmarking*, com investigadores de renome na área da simulação numérica aplicada aos processos conformação de chapa, onde participa como colaborador.

Assim, o trabalho a desenvolver, visa essencialmente colmatar as lacunas identificadas pelo CT, e assim contribuir para o aumento da sua competitividade e capacidade de geração de valor, quer a nível nacional como internacional.

1.2. Objetivos

A Sodecia Centro Tecnológico SA presta serviços de engenharia, quer às empresas e Unidades do Grupo Sodecia, quer a clientes externos. As ferramentas numéricas de CAE processo disponíveis, embora poderosas, contêm limitações ao nível da versatilidade e na capacidade de modificação das suas funções e funcionalidades. Para além disso, não contribuem para a capacidade de diferenciação do CT e das Unidades do Grupo em relação aos demais *players* do mercado.

A presente proposta pretende contribuir para atingir os objetivos industriais e contribuir para o crescimento e aumento de competitividade de todo o Grupo Sodecia, nomeadamente:

- Conhecer os produtos utilizados pelos clientes, suas necessidades presentes e futuras;
- Contribuir para o sucesso dos seus clientes, através de soluções que permitam a redução de peso e melhoria de segurança nos veículos;
- Redução de tempo e custos de desenvolvimento e produção;
 - Verificação atempada da factibilidade dos conformados;
 - Redução dos períodos de desenvolvimento;
 - Redução do número de iterações tentativa-erro;
 - Rápida resposta a possíveis alterações.
 - Produtos mais baratos;
 - Redução do custo das ferramentas de conformação;
 - Redução do tamanho das prensas;
 - Aumento da fiabilidade.

- Assegurar que os novos investimentos do grupo estão a ser feitos em concordância, tanto com as necessidades atuais como com as tendências futuras dos processos industriais;
- Potenciar a sua capacidade de inovar;
- Aumento da qualidade dos produtos:
 - Seleção otimizada do material do esboço;
 - Produção de conformados cada vez mais complexos;
 - Acumulação de experiência na conformação de novos materiais.

1.3. Fundamentos do Processo de Estampagem

Os processos tecnológicos de conformação dos metais por deformação plástica caracterizam-se pela capacidade de obtenção de peças mecânicas com cadências de produção elevadas e pela utilização praticamente integral da matéria-prima, permitindo a obtenção da forma final ou quase final do produto (*'near-netshape technology'*). É, aliás, a sua capacidade para altas cadências que faz com que este tipo de processos seja especialmente adequado para a produção de componentes em larga escala.

Dos processos de conformação plástica em chapa, a estampagem (embutidura), que consiste na obtenção de peças mecânicas de superfície não gerada ou não planificável, ocupa um lugar de destaque. Tipicamente, uma operação de estampagem implica a presença de três componentes fundamentais: punção, matriz e cerra-chapas. O princípio do processo é o descrito na figura 3.

O deslocamento do punção deforma uma chapa inicialmente plana até atingirmos a forma pretendida.

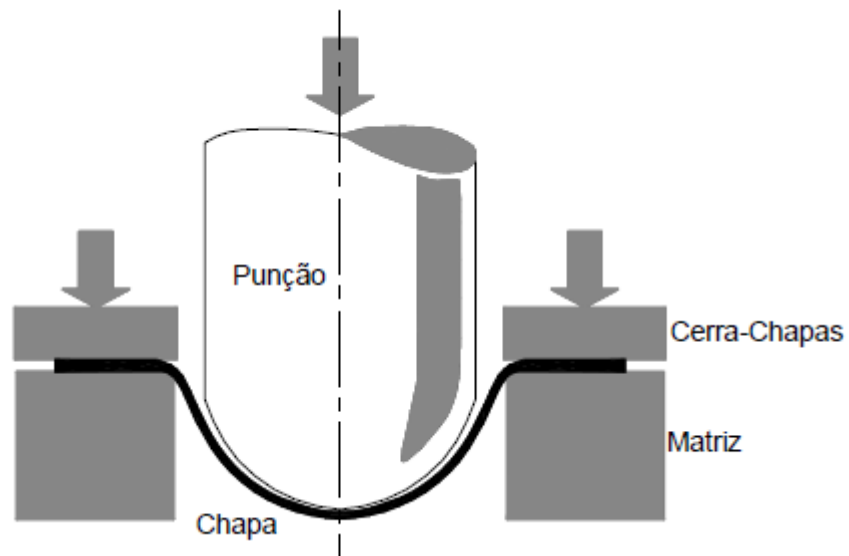


Figura 2: Esquema básico de uma ferramenta de embutidura [Vreede 1992]

O cerra-chapas transfere uma força externa à chapa, impedindo a formação de rugas e permitindo o controlo do processo. Os dois modos principais de deformação em embutidura dependem diretamente da ação do cerra-chapas e da pressão por ele exercida.

No exemplo da figura 3 é apresentada uma ferramenta de um embutido axisimétrico. No entanto, o processo de embutidura é utilizado para conformar peças de geometria complexa, como, por exemplo, componentes de automóveis. Para alguns produtos é necessário efetuar a conformação em diversas etapas. Nestes casos, há lugar ao fabrico de um conjunto de ferramentas para conformar um único produto.

1.4. *Springback* (Recuperação Elástica/Retorno Elástico)

O retorno elástico é um dos principais fatores que influencia a geometria do produto final, que se não for corretamente controlado, pode afetar a precisão tendo como consequência a qualidade do produto.

Este é um fenómeno que ocorre após a conformação plástica e posteriormente à remoção das forças aplicadas às ferramentas, dependendo da conjugação e/ou interação de um grande número de fatores:

- propriedades mecânicas dos materiais;
- geometria das ferramentas
- níveis e distribuição das tensões e deformações;
- parâmetros do processo (pressão do cerra-chapas, lubrificação, etc.).

A simulação do retorno elástico não só depende das condições de conformação (contacto, atrito e geometria das ferramentas) mas também da escolha do modelo constitutivo aplicado ao material e da implementação numérica no programa de elementos finitos, tamanho do elemento, tipo de elemento e pontos de integração ao longo da espessura e no plano (Kinzel 2001, Taherizadeh 2009).

Devido à necessidade do mercado, os métodos tradicionais de tentativa e erro são caros e demorados, enquanto uma abordagem empírica, baseada em ligeiros ajustes para o retorno elástico, geralmente não se aplica a geometrias complexas e/ou a materiais cujo seu comportamento mecânico não é totalmente conhecido (Levy 1984).

Contudo, é preciso ter em conta o impacte económico em termos de atraso na produção, revisão e rejeição de peças devido a este desvio geométrico.

A figura seguinte mostra um pequeno exemplo do comportamento de uma chapa metálica ao efeito de *springback*:

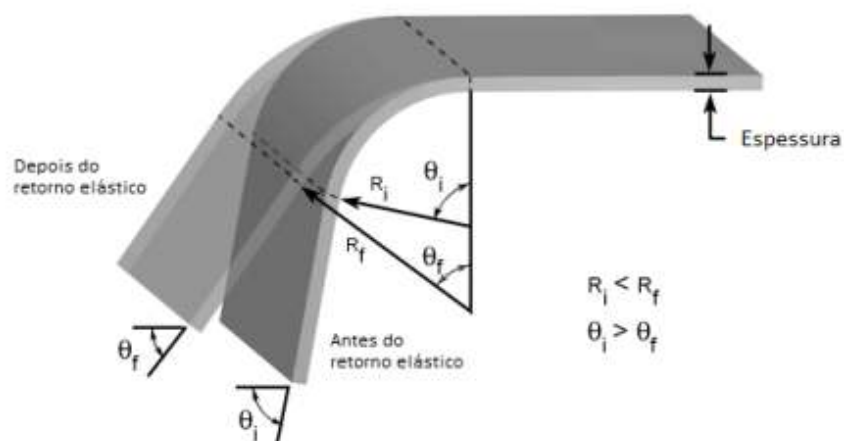


Figura 3: Retorno Elástico. A figura mostra a deformação da placa carregada e descarregada [*Springback*]

Este comportamento à recuperação elástica pode tomar diferentes configurações, como as que mostramos nas figuras seguintes:





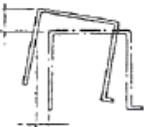

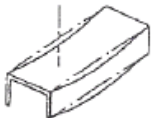

Alteração do ângulo		
Curvatura das paredes verticais		
Torção ('Twist')		
'Warping'		

Figura 4: Classificação das distorções dimensionais observadas no processo de Embutidura

A imagem seguinte resume os principais fatores que influenciam o retorno elástico, durante um processo de conformação plástica:

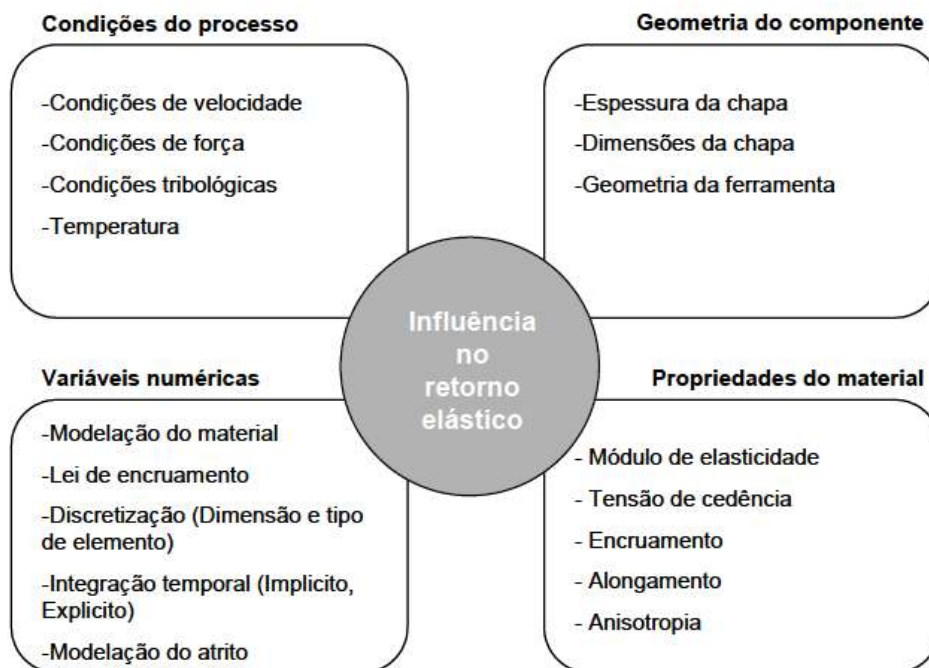


Figura 5: Variáveis que influenciam a previsão do retorno elástico pela simulação numérica

2. Estado da Arte

Com vista a aumentar a sua rigidez estrutural do automóvel, melhorar a segurança passiva e reduzir o consumo por via da redução do peso, tem tornado a simulação numérica dos processos de conformação de chapas um desafio de crescente complexidade e decrescente rigor dos resultados numéricos. Desta forma tem-se assistido a uma crescente utilização de novos materiais avançados, em particular aços de alto limite Elástico, ligas de alumínio e magnésio com elevado potencial, os materiais multi-camada e multi-material, no *body-in-white* automóvel.

De facto, no decorrer das últimas décadas tem-se assistido a um contínuo desenvolvimento e surgimento de novos materiais metálicos monolíticos, tais como, entre outros, os aços Dual-Phase (DP), os aços de alta e ultra resistência e baixa liga (HSLA, TRIP, etc.) e as ligas de alumínio e magnésio, hoje de utilização quase universal na indústria automóvel, dadas as suas claras vantagens em termos de aumento da rigidez estrutural e segurança passiva dos meios de transporte atuais e redução do seu consumo energético por via da redução do peso.

Se, por um lado, as aproximações numéricas alcançadas pelos modelos atuais nas simulações de estampagem permitem uma correlação satisfatória com os resultados obtidos para a conformabilidade geral, para resultados mais precisos no cálculo de *springback*, os modelos necessitam ser mais abrangentes. Nos últimos anos, muito trabalho científico tem sido desenvolvido em torno do estudo da influência dos parâmetros numéricos óptimos para o cálculo de *springback*.

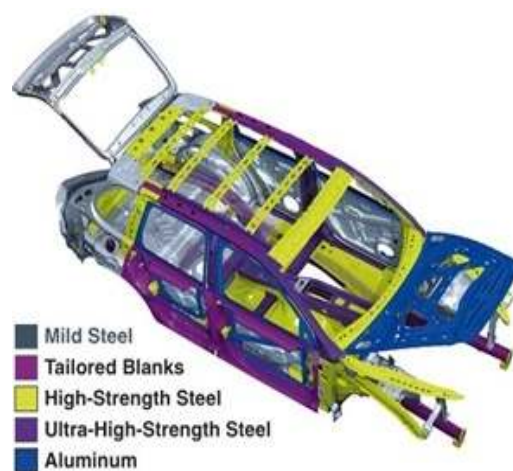


Figura 6: Redução de peso do *body-in-white* Porsche Cayenne 2011 pela aplicação de aços

Alguma investigação também tem sido canalizada para estudar a influência dos principais parâmetros de processo nos desvios de *Springback*. Mais recentemente, tem-se dado especial atenção ao estudo da variabilidade dos parâmetros de processo e da sua influência no *Springback*.

Por outro lado, outros materiais, denominados por *sandwich* e constituídos por multicamadas e multi-materiais, estão a ser exaustivamente desenvolvidos e estudados para serem introduzidos no mercado automóvel, apresentando-se como dos mais promissores para integrar os futuros *bodies*, ultra leves e super resistentes. São exemplo deste esforço a família de projetos internacionais UL (ULSAB, ULSAC, ULSAS e ULSAB-AVC) e os recentes projetos Future Steel Vehicle, FUTURA e SuperLightCar.

No caso destes últimos, muito esforço tem sido investido no desenvolvimento de modelos capazes de simular o seu comportamento mecânico. Ainda assim, não existe atualmente nenhuma ferramenta numérica comercial capaz de prever o comportamento mecânico destes materiais, descrevendo com rigor a sua conformabilidade.

Os novos materiais avançados, independentemente da sua natureza monolítica ou multicamada, ainda são mal dominados e apresentam muitos desafios do ponto de vista da mecânica computacional. Compreender e solucionar os problemas associados à sua correta modelação e simulação é um contributo fundamental à sua industrialização.

2.1. Ferramentas FEA – AUTOFORM E PAMSTAMP

Como inicialmente foi referido, as ferramentas de análise por elementos finitos utilizadas ao longo deste projeto foram o Autoform e o PamStamp.

O Autoform, sendo um *software* desenvolvido exclusivamente para a simulação numérica de processos de fabrico através de chapa metálica, demonstra grandes vantagens relativamente aos seus concorrentes.

Fundado em 1995 em Zurich, o Autoform tem sido reconhecido como um dos principais fornecedores de *softwares* para soluções de projeto de ferramentas e conformação de chapa metálica, fornecendo soluções bastante completas. Os módulos do *software* incluem

simulação de conformação plástica, planeamento de processo, desenho de ferramentas, consumo de chapas e buscas de linhas de corte, análise numérica de recuperação elástica, compensação de ferramentas, análise estatística do processo e análise de custos. Alguns destes módulos encontram-se integrados na plataforma Catia V5 e Unigraphics (como as análises One-Step e as Análises Incrementais). Os consumos de chapa também podem ser conectados ao Autodesk e ao Inventor.

O *software* também suporta análises de Hidroforming, Hotforming, Hemming entre outras.

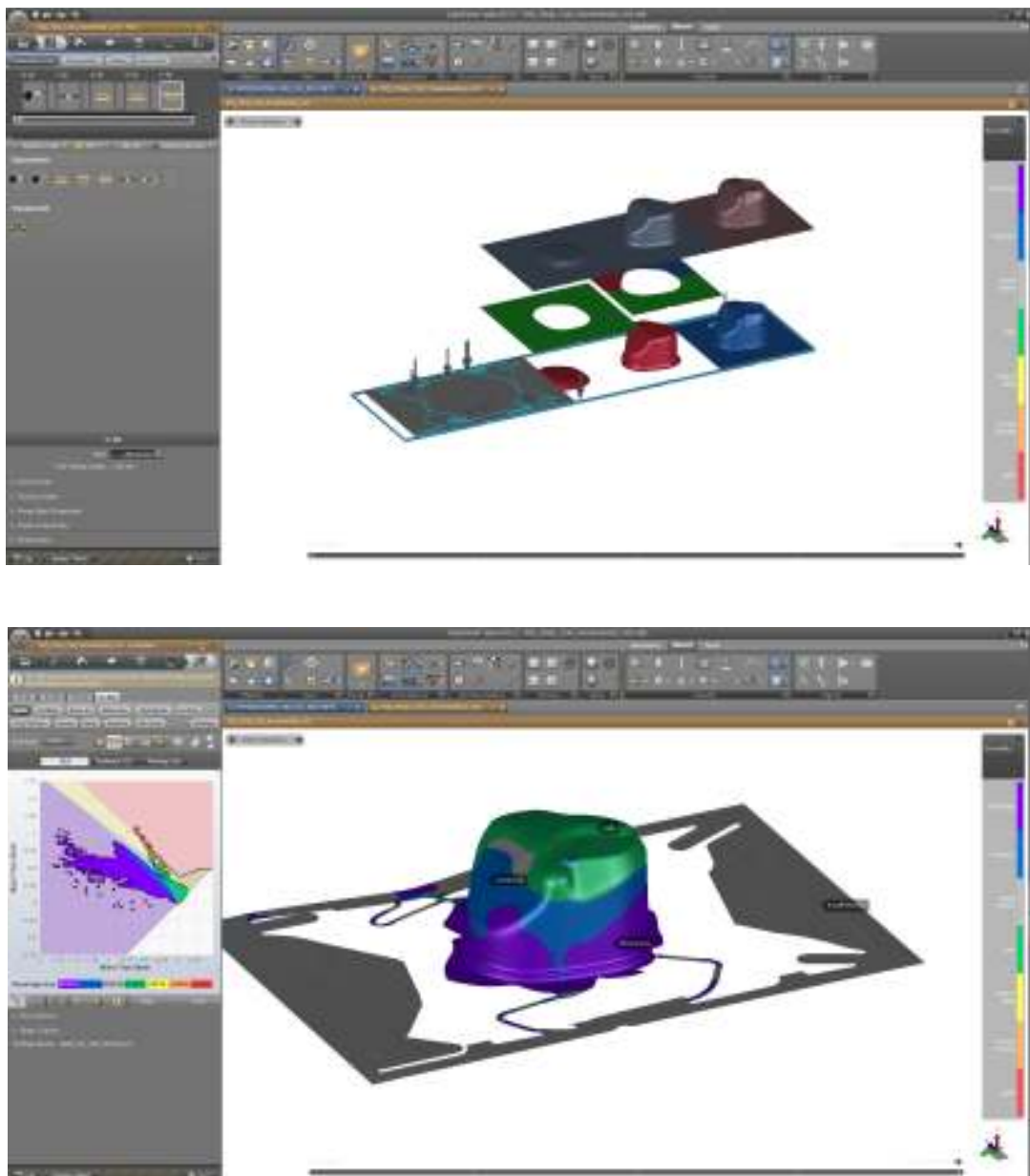


Figura 7: Exemplo de simulação Incremental com Autoform

O PAMStamp 2G é um módulo de *software* desenvolvido pela Esi Group para simulação numérica de chapa metálica. Fundada em 1973, a ESI é pioneira mundial no fornecimento de serviços na área da prototipagem virtual. À semelhança do Autoform, o Pam Stamp 2G fornece uma solução integrada para a simulação numérica em conformação de chapas metálicas. Esta solução abrange desde a cotação e desenho de ferramentas através de análises numéricas de conformabilidade plástica, até à validação (“*try-out*”), incluindo avaliação de recuperação elástica (“*Springback*”) e sua otimização (compensação de ferramentas).

A análise dos processos de estampagem suportados pela ESI Group, incluem simulação numérica de conformação de chapa metálica, planeamento de processo, desenho de ferramentas, consumo de chapas e buscas de linhas de corte, análise numérica de recuperação elástica, compensação de ferramentas e análise estatística do processo.

Uma particularidade do PAMStamp é o módulo de desenho de ferramentas (*Pam DieMaker*) estar directamente associado ao Catia V5, limitando desta forma o uso deste módulo em ambientes desprovidos de ferramentas de CAD.

Soluções relacionadas com Hotforming, hemming ou Hidroforming, são também possíveis de obter através deste *software*.

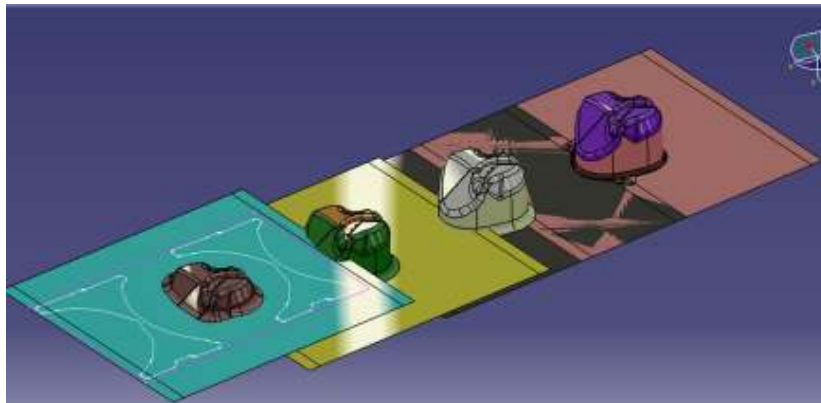


Figura 8: Exemplo de simulação Incremental com PAMStamp

Durante 6 meses, estas ferramentas foram testadas internamente juntamente com o Hyperform (Altair), de forma a avaliar a capacidade de cada uma delas em responder às necessidades do mercado. O Hyperform mostrou-se bastante limitado, não sendo considerado para as análises propostas neste *Benchmark*.

O recurso a estes *softwares* de simulação numérica do processo de estampagem centra-se em responder a questões associadas com a viabilidade do componente, à identificação de zonas críticas e à ocorrência de rotura ou defeitos.

Estas ferramentas numéricas diferenciam-se entre si em diversas variáveis de controlo tais como: tipo de algoritmo usado, tipo de malha, número de pontos de integração e tipo de elemento finito utilizado. Para cada ciclo tentativa-erro procede-se à simulação do processo para um determinado conjunto de parâmetros tecnológicos pre-definidos, de modo a analisar os resultados e determinar possíveis alterações. Deste modo, a aplicação do método dos elementos finitos permite apenas retirar conclusões acerca dos conjuntos de parâmetros testados. A tabela seguinte indica a diferença entre os dois *Softwares* de acordo com as variáveis descritas:

Tabela 1: Principais características numéricas dos *softwares* Autoform e PAMStamp

Parâmetro	AUTOFORM	PAMStamp
Algoritmo	Implícito	Explícito
Tipo de Malha	Triângular	Quadrangular
Tamanho Malha	30° - definido pelo ângulo do triângulo	Automática e/ou definida pelo utilizador
Número Pontos Integração	11	11
Tipo de Elemento	Casca	Casca

A tabela seguinte mostra algumas vantagens verificadas entre os dois *softwares*, salientando o que de mais benéfico podemos encontrar em cada um respectivamente.

Tabela 2: Principais vantagens entre os *Softwares* Autoform e PAMStamp

	Vantagens	
	Autoform	PAMStamp
Rapidez do Solver.	<i>Software</i> de simulação de estampagem numericamente mais eficiente.	Necessidade de utilização de mais <i>cores</i> para obter os mesmos tempos de simulação.
Geração de Ferramentas	O módulo de “ <i>Die Face</i> ” está diretamente sincronizado com a definição da cinemática do processo. Todas as ferramentas podem ser geradas com base em uma superfície apenas.	Necessita do Catia V5 para a geração mais eficiente das ferramentas. Trabalha com <i>offsets</i> físicos o que implica a geração de cada ferramenta a partir da sua superfície.
Caraterização de Materiais	Permite utilizar diretamente os valores obtidos nos ensaios experimentais (tensão de cedência, tensão de rotura, coeficientes de anisotropia, alongamento, etc) na definição das leis de comportamento dos materiais.	Dispõe de leis constitutivas mais flexíveis, que permitem por exemplo modelar o comportamento de polímeros. Não permite incorporar diretamente dados obtidos dos ensaios experimentais necessários para a caraterização dos parâmetros mecânicos.
Flexibilidade	Disponibiliza mais módulos e mais opções dentro dos processos de estampagem. Ex: Módulo de <i>Springback</i> com mais opções de estrangimento, simulação de Hemming, módulo sigma, etc.	Permite criar modelos com elementos sólidos e simular processos de conformação plástica mais exóticos.
Pós-Processamento	O Autoform é mais flexível e oferece mais opções para realizar a análise dos resultados. Ex: permite definir macros específicas para procura automática dos pontos críticos segundo os critérios de cada OEM. Permite também a sincronização de simulações para estudo simultâneo. Gera relatórios automaticamente.	Grava os resultados em ficheiros diferentes o que implica avaliar uma operação de cada vez.

Atendendo às características geométricas de uma chapa metálica, nomeadamente a sua pequena espessura, esta pode ser discretizada com elementos finitos do tipo membrana, casca e sólido. Os elementos finitos baseados na teoria de membrana são os mais simples de utilizar. No entanto, são de aplicação limitada porque não contemplam efeitos de flexão. O programa comercial implícito mais utilizado a nível industrial, o AUTOFORM, utiliza elementos do tipo membrana e um algoritmo de integração específico que permite minimizar o tempo de cálculo na simulação numérica da operação de conformação [Kubli e Reissner 1995]. No entanto, a necessidade de resultados fidedignos na simulação do retorno elástico e de multi-processos, em que os efeitos de flexão são muito relevantes, obrigou à introdução de um elemento do tipo casca como alternativa ao elemento membrana [Schönbach et al. 2004].

Entretanto, continuam a ser propostas diferentes estratégias para melhorar o comportamento destes elementos em problemas dominados pelo fenómeno de flexão. Este esforço justifica-se pelo facto de os elementos baseados na teoria da membrana conduzirem a tempos de cálculo entre 5 a 20 vezes inferiores aos obtidos com elementos casca [Sriram e Wagoner 2000]. Os elementos casca apresentam também alguns cuidados específicos, apesar de surgirem naturalmente como os mais indicados para a simulação de processos de conformação de chapa.

3. Caraterização de Materiais Metálicos

Os processos de conformação plástica em chapa representam um grande peso na economia de países desenvolvidos. Tomando como exemplo a Alemanha em 1997, por cada dia de trabalho eram utilizadas 20000 toneladas chapas de aço em instalações de embutidura para a indústria automóvel [Wagener 1997]. Em virtude da grande competitividade no sector automóvel os fabricantes tentam, por um lado reduzir custos e, por outro aumentar a produtividade, mantendo os elevados níveis de propriedades tecnológicas e de qualidade para o produto. A tendência atual dos processos de conformação plástica é aumentar a razão rigidez/peso nos componentes conformados e melhorar a precisão e produtividade do processo. Para atingir estes objetivos, houve um grande desenvolvimento ao nível de materiais, promovendo a necessária economia de energia. A evolução dos materiais teve como principal motor de desenvolvimento a indústria automóvel, a qual é responsável por uma elevada percentagem no consumo de combustível e na energia despendida em processos de conformação plástica, daí esta indústria representar o estado da arte em termos de novos materiais aplicados aos processos de conformação plástica.

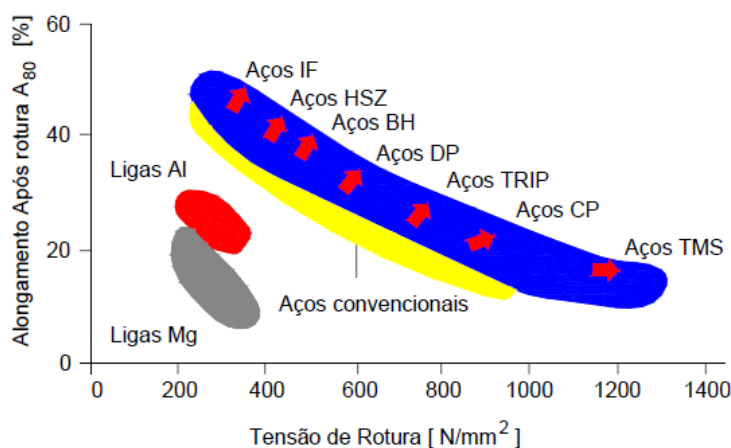


Figura 9: Variedade de materiais utilizados na indústria automóvel [Flegel 2001]

No presente trabalho vão ser analisados dois tipos de materiais metálicos, uma liga de aço (HC260LAD) e uma liga de alumínio (AC170) na aplicação da simulação numérica a 3 casos práticos do *Benchmark #2 da Conferência Numisheet 2008*.

3.1. Materiais Avançados Monolíticos

A qualidade dos componentes estampados é assegurada pelo toleranciamento imposto às peças durante a fase de desenvolvimento de produto. À medida que o intervalo de tolerâncias diminui torna-se cada vez mais difícil garantir a robustez do processo produtivo de forma a se obterem, repetidamente, peças com boa qualidade. O que se deve, não à quantidade dos fatores intervenientes durante o processo de conformação, mas à variabilidade destes fatores. Ao variarem, os parâmetros de processo induzem a diferentes estados de deformação plástica e, conseqüentemente, o *springback* sofrido pela peça torna-se imprevisível. Assim sendo, os problemas de qualidade associados à falta de robustez do *springback*, ou retorno elástico, são os que geram maior preocupação no campo da estampagem (Yang, et al., (2010, 2011), Hedrick, 2011).

Em anos recentes, a tendência crescente para a aplicação de aços de alto limite elástico e ligas de alumínio em componentes automóvel aumentou em muito a severidade do desvio de *springback*, devido ao maior rácio tensão de cedência/módulo de elasticidade destes materiais avançados. Se este desvio exceder os limites de tolerância admissíveis para a peça, poderão originar-se sérios problemas nas operações de montagem subsequentes.

Portanto, o maior desafio relacionado com a estampagem destes novos materiais consiste em conseguir prever e quantificar com precisão este efeito para se definirem as geometrias de ferramentas compensadas antes do fabrico.

No passado, a compensação do retorno elástico era feita manualmente através de muitas medições nas ferramentas e conformados protótipo, ou mesmo de produção, e modificando a geometria à mão, tornando-se um processo muito moroso e com custos associados proibitivos. Foi reportado (Roll, et al., 2005) que um simples ciclo de correção de compensação do retorno elástico para um hood inner levaria cerca de 5 semanas e que os custos poderiam rondar os 70 000 euros.

Se operações adicionais fossem envolvidas, uma iteração extra poderia levar a 10 semanas adicionais de trabalho, com um custo de aproximadamente 150 000 euros. Porém, na generalidade dos casos são necessárias várias iterações do processo iterativo de compensação do retorno elástico, o que aumenta consideravelmente o custo de concepção e fabrico das ferramentas de conformação. Com formas geométricas cada vez mais complexas, e novos materiais metálicos avançados, é muito difícil ou até mesmo impossível confiar neste tipo de experiência para estimar os desvios de forma e compensar as ferramentas (Banabic, et al., 2010).

Com o desenvolvimento de tecnologias computacionais e do método de elementos finitos, particularmente com melhorias recentes na previsão do *springback*, foi desenvolvido um novo método de compensação baseado no retorno elástico calculado. Com a ajuda deste método, o retorno elástico pode ser facilmente e rapidamente compensado e o custo do desenvolvimento da ferramenta significativamente reduzido.

Na abordagem de compensação *springback*, a compensação geométrica é baseada no retorno elástico real calculado. Portanto, não existe introdução de erros artificiais como é o caso das abordagens *spring-forward*. Esta metodologia aborda a compensação computacional do retorno elástico da seguinte forma (Schoenbach et al., 2008; Banabic, et al., 2010):

- 1) Execução das simulações de conformabilidade e retorno elástico a partir das geometrias CAD e os parâmetros de processo originais.
- 2) Análise das formas da geometria que necessitam ser compensadas a partir do desvio geométrico calculado entre a peça no estado relaxado e a geometria da peça desejada.
- 3) Verificação do desvio geométrico calculado. Se exceder a tolerância especificada, deve-se implementar a compensação do retorno elástico baseada em estratégias de compensação e em um factor de compensação.
- 4) Repetir as simulações de conformabilidade e retorno elástico com as geometrias das ferramentas compensadas. Este processo é repetido iterativamente até se conseguir a forma desejada.

A qualidade da compensação de *springback* assistido por computador (CASC) é crítica para o desenvolvimento e custo das ferramentas de estampagem, refletindo-se directamente no tempo de desenvolvimento do automóvel (Banabic, et al., 2010). Dois fatores que influenciam a qualidade da compensação de *springback* assistido por computador são a robustez e o rigor da previsão do retorno elástico, e a robustez/sensibilidade da resposta do retorno elástico à variação dos parâmetros de material e de processo.

A simulação robusta e precisa do retorno elástico é crítica para a compensação de *springback* assistido por computador. Está bem estabelecido que a simulação de retorno elástico é sensível a muitos parâmetros numéricos, como por exemplo, a formulação do elemento, o tamanho do elemento, o número de pontos de integração ao longo da espessura, o tamanho do incremento de tempo, o modelo constitutivo, etc. Para garantir a confiabilidade dos resultados de compensação os parâmetros numéricos otimizados, as denominadas configurações de validação final, são fundamentais durante a compensação de *Springback* assistida por computador. A literatura científica disponível apresenta muitos exemplos que demonstram que a robustez e o rigor das simulações de retorno elástico podem ser garantidos quando se utilizam as configurações de validação final (Smith, et al., 2005; Hora, 2008).

Igualmente importantes são os parâmetros de processo. Reconhecidamente, uma das principais limitações dos modelos numéricos da atualidade está intimamente associada à falta de dados relativos aos parâmetros de processo (velocidade da prensa, efeito das variações térmicas, valores de atrito, paralelismo das ferramentas, etc.) (Roll, 2008; Hedrick, 2010). Assim, a chave do sucesso está em compreender como estas variáveis estão envolvidas no processo e qual a influência da sua variabilidade nos resultados obtidos.

Pequenas variações relativas a estes parâmetros podem resultar em mudanças significativas do retorno elástico, em alguns casos, até mesmo na direção do retorno elástico, o que introduz grandes desafios à sua compensação. Para assegurar a qualidade da compensação do retorno elástico uma análise de robustez é recomendada antes e depois da compensação.

Segundo Banabic, et al. (2010), a metodologia mais correta para a compensação do retorno Elástico deve ter como ponto de partida a validação do *layout* de processo que será utilizado.

Desta forma, na primeira otimização, deve-se assegurar a factibilidade do estágio de conformação, otimizando também o consumo de material, não só pela sua relação evidente com o aspecto comercial do negócio da produção de componentes estampados, mas também porque qualquer alteração posterior na forma e tamanho do esboço afectará significativamente os desvios de retorno elástico.

Só após se obterem resultados numéricos satisfatórios no que toca à conformabilidade geral, se deve prosseguir para o estudo de retorno elástico. Este primeiro estudo, deve ser realizado para se entender se o retorno elástico deve ser compensado geometricamente ou se o conceito da ferramenta e/ou parâmetros de processo precisam ser modificados. Com base nestas premissas, avalia-se a robustez da resposta do retorno elástico à variabilidade do processo de fabrico antes de compensar a geometria das ferramentas. Visto que a modificação da geometria das ferramentas influencia directamente o escoamento do material que, por sua vez, afecta o retorno elástico, torna-se necessário realizar uma nova análise de robustez após a compensação do retorno elástico para assegurar que o esquema final de compensação de retorno elástico seja repetível.

Anteriormente, a variabilidade do processo não era tida em conta. A abordagem clássica consiste em introduzir margens de segurança e levar em conta os piores cenários. Desta forma, a incorporação da variabilidade e de ruído é reduzida a um problema determinístico onde o domínio de validade da simulação é estabelecido para um conjunto específico de variáveis e propriedades atribuídas durante o pré-processamento. O resultado esperado é um protótipo virtual que demonstre que é possível produzir a peça. Isto permite definir um ponto de processo. Porém, além de não garantir a robustez do processo e nada revelar acerca da variabilidade dos resultados, esta abordagem incorre no risco de obter soluções demasiadamente conservativas e dispendiosas. Em termos práticos, o que muitas vezes sucede é que, embora se obtenham peças com sucesso em ambiente virtual, em ambiente industrial peças com defeitos que precisam ser descartadas continuam a fazer parte do ciclo de produção. Isto ocorre porque, diferentemente do que é especificado no processo virtual, o processo real está sujeito à variabilidade e ao ruído. As forças da prensa não são constantes, a espessura do filme lubrificante não é constante, as propriedades mecânicas do material não são constantes. Esta variabilidade reflecte-se nos valores de conformabilidade e *springback* que diferem de peça para peça.

Portanto, quando se parte para o processo de produção esta variabilidade, deve ser conhecida para garantir um processo estável.

Para se obter essa condição é necessário recorrer a uma análise estocástica, baseada em múltiplas simulações, onde a influência e a sensibilidade de vários parâmetros de processo durante o processo de conformação podem ser determinadas. O resultado da análise estocástica é a identificação de uma janela de processo e da sua capacidade. (Banabic, et al., 2010).

Com base nesta análise é possível que a simulação resulte em benefícios tangíveis tanto na fase de projeto das ferramentas, reduzindo tempo e custo, como na fase da implementação das ferramentas, reduzindo significativamente os *try-outs* físicos necessários, como ao longo do processo produtivo, reduzindo número de peças com defeito e prolongando a vida das ferramentas. Considera-se, por isso, este estudo fundamental para o sucesso da aplicação industrial de novos materiais avançados em componentes automóveis.

3.2. Leis de Evolução

Na análise dos processos de conformação plástica é fundamental ter-se a capacidade de modelar o comportamento plástico dos materiais. Este comportamento, o encruamento, é um fenómeno modificativo da estrutura cristalina dos metais e ligas pouco ferrosas, em que a deformação plástica realizada abaixo da temperatura de recristalização causa o endurecimento e consequente aumento de resistência do metal.

Considerando um qualquer ponto material para o qual é conhecida a superfície de plasticidade inicial, com o decorrer da deformação plástica a superfície de plasticidade vai-se expandir ou contrair, transladar ou distorcer, ou seja, evolui.

As leis de encruamento regem a evolução da dimensão da superfície de plasticidade caracterizada pela tensão equivalente, em função da evolução das variáveis internas do material.

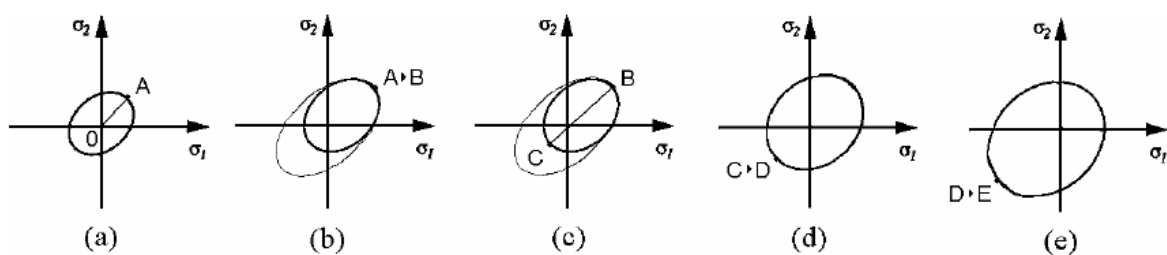


Figura 10: Representação esquemática dos encruamentos isotrópicos e cinemáticos

a) estado inicial e regime Elástico; b) após alguma deformação plástica; c) após inversão da trajetória de deformação em regime elástico; d) e e) após mais alguma deformação plástica.

A figura 11.a apresenta a superfície de plasticidade inicial. A evolução do estado de tensão entre os pontos O e A dá-se no domínio elástico e sem alteração da superfície de plasticidade inicial. Após alguma deformação plástica em trajetória monótona (Figura 11.b), a superfície de plasticidade isotrópica (fictícia) expandir-se-á devido à acumulação de deformação plástica, enquanto a superfície de plasticidade “real” resultará da adição dos efeitos dos encruamentos isotrópico (a superfície de plasticidade expande-se) e cinemático (a superfície de plasticidade translada-se no espaço das tensões, na direção da trajetória de deformação). A figura 11.c esquematiza-se uma inversão da trajetória de deformação. A evolução entre os estados de tensão B e C dá-se no interior da superfície de plasticidade e, por conseguinte, no domínio elástico. A superfície de plasticidade não sofre alteração. Por fim, nas figuras 11.d, e exemplifica-se a evolução da superfície de plasticidade com a prossecução da deformação, evidenciando-se o facto de o centro da superfície de plasticidade evoluir no sentido da trajetória de deformação.

O objetivo das leis de evolução é modelar e quantificar a evolução da superfície de plasticidade esquematizada na figura 11, contudo, quando estão envolvidas alterações de trajetória de deformação complexas, este objetivo é mais difícil de ser atingido.

Entre as diferentes leis de encruamento (evolução) propostas por vários autores destacam-se as seguintes (Alves 2003):

- Ludwik, em 1909,
- Prager, em 1938,
- Hollomon, em 1944,
- Swift, em 1947,
- Voce, em 1948,
- Johnson-Cook, em 1983,
- Gavrus, em 1996.

O Autoform utiliza a lei *Hocket-Sherby* para a modelação do comportamento plástico dos materiais metálicos. Esta lei é formulada através da ponderação da lei de *Voce* (Alumínio) e da lei de *Swift* (Aços).

O Pamstamp utiliza a lei de *Hill48* para a modelação do comportamento plástico dos aços e a lei de *Barlat* para a modelação do comportamento plástico dos alumínios.

3.2.1. Lei de Swift

A lei de *Swift* (1952) é uma lei para descrever a evolução da componente isotrópica da tensão em função da deformação, descrita matematicamente por:

$$\sigma = (\varepsilon^0 + \varepsilon)^n$$

Os valores de K , n e ε^0 representam constantes do material enquanto que σ e ε são os valores representativos da tensão e deformação, respetivamente.

3.2.2. Lei de Voce

A lei de *Voce* (1948) propõe uma expressão que descreve a evolução da componente isotrópica do encruamento, expressa por:

$$\sigma = A - B \cdot \exp(-C\varepsilon)^n$$

As constantes do material, A, B e C, são identificadas pelo ajuste da curva tensão/deformação dos dados experimentais, obtida no ensaio de tração uniaxial. Esta expressão é usualmente utilizada para descrever a componente isotrópica de materiais que apresentam saturação da tensão, como por exemplo a maioria dos alumínio.

3.3. Modelos Constitutivos do Material

Um critério de plasticidade pode interpretar-se como um modelo que define uma superfície no espaço das tensões, ou seja, uma superfície contínua. Esta superfície corresponde a todos os estados de tensão para os quais ocorre o início da deformação plástica. A superfície de plasticidade inicial, e a sua evolução, que é em geral traduzida por leis de encruamento, são características mecânicas relevantes, que servem para descrever a resposta e o comportamento mecânico dos materiais metálicos quando são sujeitos a diferentes trajetórias de sollicitação e deformação.

Na simulação de processos de conformação, é usual admitir que a superfície de plasticidade de um dado material evolui, expandindo-se isotropicamente (encruamento isotrópico) em função do trabalho plástico. Quando este se deforma plasticamente e devido ao aparecimento de direções privilegiadas, o material vai-se tornando progressivamente anisotrópico.

Os critérios de plasticidade anisotrópicos foram sendo estudados e desenvolvidos por diferentes autores, sendo que os mais relevantes são o Hill (1948, 1979, 1990 e 1993), Baasani (1977), Barlat (1989, 1991, 1997 e 2000), e mais recentemente Cazacu & Barlat (2001).

3.4. Contacto e Atrito

O cuidado acurado no tratamento do contacto, na modelação dos fenómenos de atrito e na representação exacta das superfícies da ferramenta, é essencial no desenvolvimento de um modelo numérico capaz de simular o processo de conformação de chapas. As condições de contacto e atrito verificado ao longo do processo são muito próprias em cada zona e evoluem continuamente ao longo do processo. Por isso, as não-linearidades geradas ao nível do contacto entre as superfícies da ferramenta e o esboço, são aquelas que têm maior influência nas mudanças abruptas das condições de fronteira estabelecidas, dificultando a convergência dos algoritmos implícitos.

Durante uma operação de estampagem, é possível que a ferramenta se deforme elasticamente, originando um escorregamento reversível ou colante. Este fenómeno do tipo micromecânico é levado em conta na formulação de modelos incomuns, análogos à teoria da plasticidade, onde é tratado à luz de formalismos dos critérios de plasticidade. O tratamento do contacto com recurso a tais modelos requer a utilização de leis de atrito anisotrópico não associado [Onâte, 1996]. Porém, este tipo de solução não é recomendado para descrever o atrito na simulação numérica dos processos de conformação de chapa, o qual é geralmente tido como constante e isotrópico. Por conseguinte, o modelo adoptado, onde o atrito é descrito pela lei de Coulomb, não prevê tal deformação elástica da ferramenta. A ferramenta, tida como rígida, é o corpo de referência a partir do qual se descreve o comportamento do esboço (corpo deformável). Portanto, diz-se que a formulação do contacto é do tipo master – slave:

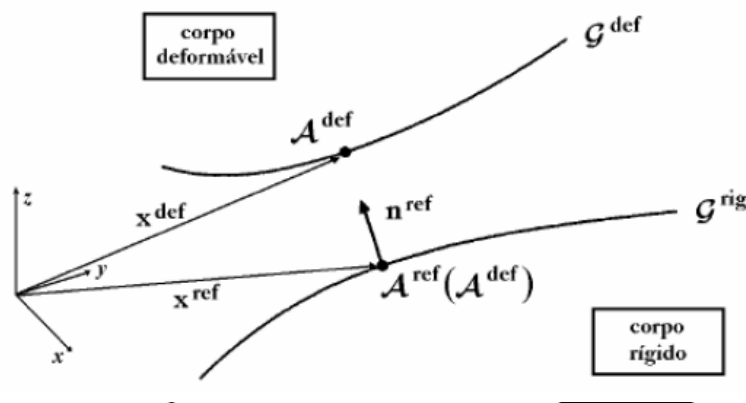


Figura 11: Esquema representativo do contacto entre dois corpos

3.5. Caracterização do Comportamento Mecânico dos Materiais Metálicos

A embutidura é um processo de conformação que necessita de uma boa caracterização de diferentes propriedades dos metais [Rocha 1987], tais como as relacionadas com a sua formabilidade, propriedades elásticas e propriedades tribológicas inerentes ao contacto chapa / ferramenta. Propriedades e fenómenos como a tensão de rotura e o comportamento elástico, anisotropia resultante das condições de laminagem de chapa e lubrificação são parâmetros que influenciam a precisão geométrica e dimensional de componentes embutidos. O uso crescente da simulação numérica na produção de ferramentas de embutidura e na validação dos parâmetros do processo levaram a numerosos desenvolvimentos com o objetivo de melhorar a precisão dos programas de elementos finitos e das técnicas de modelação do material. A precisão dos resultados numéricos é extremamente dependente da modelação do material. A modelação do comportamento mecânico necessita de ter em conta todo o conjunto de fenómenos que ocorrem durante o processo de embutidura. As leis constitutivas de modelação do material requerem, portanto, dados experimentais fiáveis, que têm de ser fornecidos através da caracterização mecânica dos materiais. A boa correlação entre simulações e realidade só poderá ser atingida pela melhoria da qualidade desses dados provenientes da caracterização experimental sendo necessário investir na fiabilidade da determinação das propriedades relevantes dos materiais [Holmberg 2004].

O ensaio de tração é, eventualmente, o ensaio mais comum para caracterizar os materiais metálicos. A sua simplicidade torna este ensaio o mais popular permitindo a aquisição, com uma boa precisão, da relação tensão-deformação durante a deformação plástica. Contudo, a gama de deformação plástica atingida por este ensaio está geralmente limitada a 20 ou 30 %. Esta limitação pode ser ultrapassada com outros ensaios como sendo o ensaio de corte ou o ensaio Joviot ('Bulge test'), também utilizados para determinar as propriedades dos materiais metálicos [Massoni 2003]. Na figura 13, são apresentados os principais ensaios mecânicos que permitem efectuar a caracterização dos materiais metálicos e as suas limitações no que diz respeito ao nível de deformação plástica equivalente atingido.

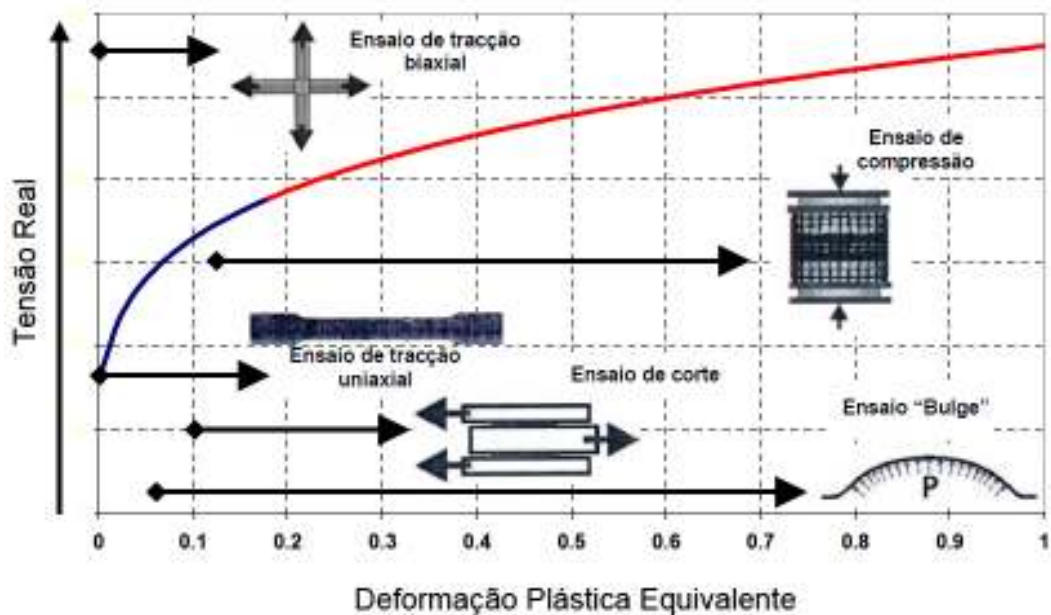


Figura 12: Representação da gama de deformações atingidas pelos diversos ensaios de caracterização dos materiais [Gerlach 2003]

As limitações dos ensaios experimentais na obtenção da relação tensão-deformação além de determinados valores de deformação plástica impõe a necessidade de proceder à extrapolação da curva tensão-deformação para níveis superiores de deformação plástica, níveis esses que são atingidos durante os processos de embutidura reais. A extrapolação, normalmente definida por funções que aproximam a curva experimental, se incorretamente realizada, pode introduzir erros na relação tensão/ deformação que é introduzida na simulação numérica, afectando a previsão da mesma. Portanto o crescente grau de qualidade exigido às previsões providas pela simulação numérica deve ser acompanhado com o mesmo grau de exigência à aquisição experimental das propriedades do material de forma que os resultados numéricos sejam o mais realísticos possível.

Um trabalho interessante realizado por Borowski [Borowski 2004] estabelece uma comparação de valores experimentais determinados em diversos laboratórios. Na sua análise, ele verificou enormes discrepâncias na determinação do módulo de elasticidade pelos diversos laboratórios, a que atribui ao método utilizado pelos diversos técnicos e à dificuldade de obtenção deste parâmetro. Esta constatação apenas reforça a necessidade de uma evolução das técnicas de caracterização experimental de materiais metálicos, a par da modelação matemática, mas também justifica a necessidade urgente de uniformização de procedimentos experimentais para que a determinação de parâmetros de caracterização mecânica não sejam de algum modo subjectivo.

Para os materiais apresentados, HC260LAD e o A170, foi disponibilizada por parte da Numisheet, toda a informação da caracterização mecânica dos mesmos.

As imagens seguintes demonstram os resultados obtidos através da caracterização mecânica destes dois materiais:

3.5.1. Resultados para o Ensaio de Tração

Numisheet						Tensile Data	
Material: HC260LAD						Material: HC260LAD	
Strain (ε)	σ _{0.2} [MPa]	σ _{0.01} [MPa]	σ _{0.005} [MPa]	σ _{UTS} [MPa]	σ _{0.1} [MPa]	Average	σ _{UTS} [MPa]
0.000	262.7	0.000	271.3	0.000	291.5	0.000	262.7
0.005	264.8	0.005	291.3	0.005	290.7	0.005	264.8
0.010	268.5	0.010	300.7	0.010	282.5	0.010	268.5
0.015	273.3	0.015	326.7	0.015	253.0	0.015	273.3
0.020	281.3	0.020	338.1	0.020	226.1	0.020	281.3
0.025	282.7	0.025	350.5	0.025	208.4	0.025	282.7
0.030	289.8	0.030	358.4	0.030	184.3	0.030	289.8
0.035	299.4	0.035	368.2	0.035	153.3	0.035	299.4
0.040	309.1	0.040	376.4	0.040	125.1	0.040	309.1
0.045	323.0	0.045	386.7	0.045	93.4	0.045	323.0
0.050	342.0	0.050	391.4	0.050	57.0	0.050	342.0
0.055	362.0	0.055	390.3	0.055	10.1	0.055	362.0
0.060	391.9	0.060	402.1	0.060	389.1	0.060	391.9
0.065	398.0	0.065	407.4	0.065	365.1	0.065	398.0
0.070	402.9	0.070	412.8	0.070	338.8	0.070	402.9
0.075	407.1	0.075	416.6	0.075	303.4	0.075	407.1
0.080	410.9	0.080	421.1	0.080	268.2	0.080	410.9
0.085	414.9	0.085	426.2	0.085	233.9	0.085	414.9
0.090	417.9	0.090	430.5	0.090	201.2	0.090	417.9
0.095	422.2	0.095	431.8	0.095	170.7	0.095	422.2
0.100	425.3	0.100	436.7	0.100	142.8	0.100	425.3
0.105	428.1	0.105	438.0	0.105	117.3	0.105	428.1
0.110	433.2	0.110	442.7	0.110	93.1	0.110	433.2
0.115	434.8	0.115	445.0	0.115	70.0	0.115	434.8
0.120	438.1	0.120	448.0	0.120	48.8	0.120	438.1
0.125	440.2	0.125	450.0	0.125	29.7	0.125	440.2
0.130	442.7	0.130	453.2	0.130	12.8	0.130	442.7
0.135	446.9	0.135	456.4	0.135	4.2	0.135	446.9
0.140	448.0	0.140	458.1	0.140	0.0	0.140	448.0
0.145	451.0	0.145	462.7	0.145	488.1	0.145	451.0
0.150	452.4	0.150	461.8	0.150	468.8	0.150	452.4
0.155	455.0	0.155	465.2	0.155	452.3	0.155	455.0
0.160	457.2	0.160	468.4	0.160	435.0	0.160	457.2
0.165		0.165	470.2	0.165	417.0		
0.170		0.170	471.1	0.170	399.7		
0.175		0.175	473.3				
0.180		0.180	476.1				
0.185		0.185	478.0				

Figura 13: Ensaio de Tração para o aço HC260LAD

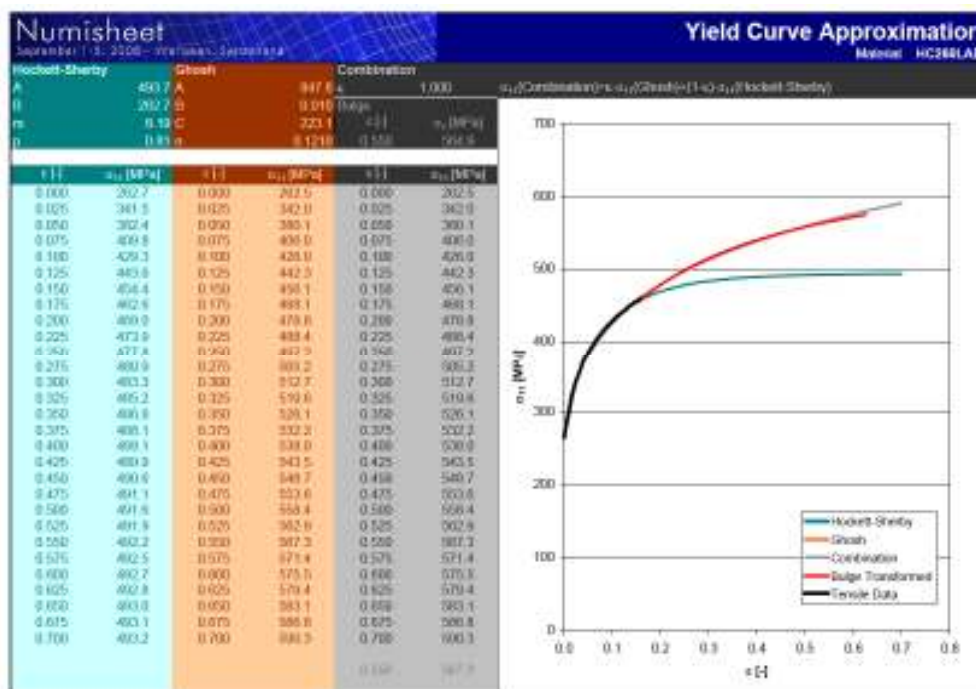


Figura 14: Ensaio de Tração para o aço HC260LAD

Numisheet						Tensile Data				
September 13, 2016 - 10:45:44 AM - 10/20/16						Material Ac-178				
Young's E	A ₀ -25% (Gage)		A ₀ -25% (KT)		A ₀ -25%		Average		Edge	
E (1)	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	$\epsilon_{0.2}$	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	$\epsilon_{0.2}$	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	$\epsilon_{0.2}$	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	$\sigma_{0.2}$ (MPa)
0.000	100.0	0.000	89.0	0.000	86.5	0.000	100.0	115.0	0.00	112.7
0.000	119.8	0.006	118.8	0.006	118.1	0.006	118.9	133.0	0.01	131.8
0.012	123.0	0.012	130.0	0.012	129.6	0.012	130.9	145.0	0.03	143.9
0.018	142.7	0.018	139.4	0.018	139.2	0.018	140.4	151.0	0.04	150.1
0.024	152.1	0.024	149.0	0.024	147.5	0.024	149.7	162.1	0.05	163.3
0.030	160.0	0.030	158.0	0.030	156.9	0.030	159.1	174.3	0.06	170.8
0.036	168.1	0.036	165.4	0.036	165.7	0.036	167.1	180.4	0.08	177.7
0.042	175.7	0.042	172.9	0.042	172.6	0.042	173.5	186.9	0.09	185.1
0.048	182.4	0.048	179.5	0.048	179.3	0.048	180.4	186.3	0.10	183.5
0.054	189.3	0.054	185.3	0.054	184.5	0.054	180.2	201.9	0.11	190.8
0.060	195.9	0.060	192.2	0.060	191.3	0.060	193.1	207.3	0.13	199.5
0.066	201.0	0.066	197.0	0.066	198.1	0.066	198.1	214.1	0.14	200.4
0.072	206.0	0.072	202.0	0.072	204.1	0.072	204.2	217.0	0.15	203.4
0.078	210.4	0.078	206.8	0.078	208.2	0.078	208.5	226.5	0.16	209.8
0.084	215.5	0.084	210.9	0.084	213.0	0.084	213.0	226.0	0.18	213.0
0.090	220.2	0.090	215.0	0.090	218.9	0.090	218.5	233.0	0.19	219.1
0.096	224.4	0.096	219.3	0.096	219.4	0.096	221.0	234.1	0.20	219.8
0.102	228.0	0.102	222.2	0.102	224.0	0.102	224.7	242.2	0.21	224.0
0.108	231.1	0.108	227.3	0.108	228.2	0.108	228.9	245.0	0.23	228.0
0.114	233.9	0.114	229.0	0.114	232.1	0.114	231.9	250.9	0.24	239.7
0.120	237.0	0.120	233.3	0.120	234.5	0.120	234.9	250.2	0.25	242.1
0.126	241.2	0.126	235.9	0.126	235.9	0.126	237.7	255.8	0.26	245.8
0.132	244.2	0.132	239.2	0.132	239.9	0.132	241.1	258.8	0.28	249.3
0.138	246.2	0.138	241.8	0.138	243.6	0.138	243.9	259.5	0.29	249.3
0.144	248.9	0.144	244.6	0.144	246.1	0.144	246.5	258.4	0.30	249.7
0.150	252.6	0.150	247.6	0.150	248.2	0.150	248.8	267.3		
0.156	253.8	0.156	248.2	0.156	250.0	0.156	250.8	269.1		
0.162	255.2	0.162	251.3	0.162	253.9	0.162	253.5	268.2		
0.168	258.4	0.168	253.4	0.168	253.8	0.168	255.2	271.9		
0.174	260.2	0.174	256.3	0.174	257.0	0.174	257.8	272.8		
0.180	261.4	0.180	257.2	0.180	259.6	0.180	259.4	276.2		
0.186	264.6	0.186	260.1	0.186	259.0	0.186	261.2	278.7		
0.192	265.7	0.192	262.5	0.192	262.8	0.192	263.7	282.4		
0.198	267.8	0.198	263.3	0.198	263.3	0.198	264.8	280.9		
0.204	267.8	0.204	266.7	0.204	265.4	0.204	266.6	287.7		
0.210	271.0	0.210	267.9	0.210	267.1	0.210	268.7	284.0		
0.216	271.3	0.216	269.2	0.216	266.6	0.216	269.0	287.3		
0.222	272.5	0.222	270.1							

Figura 15: Ensaio de Tração para o alumínio AC170

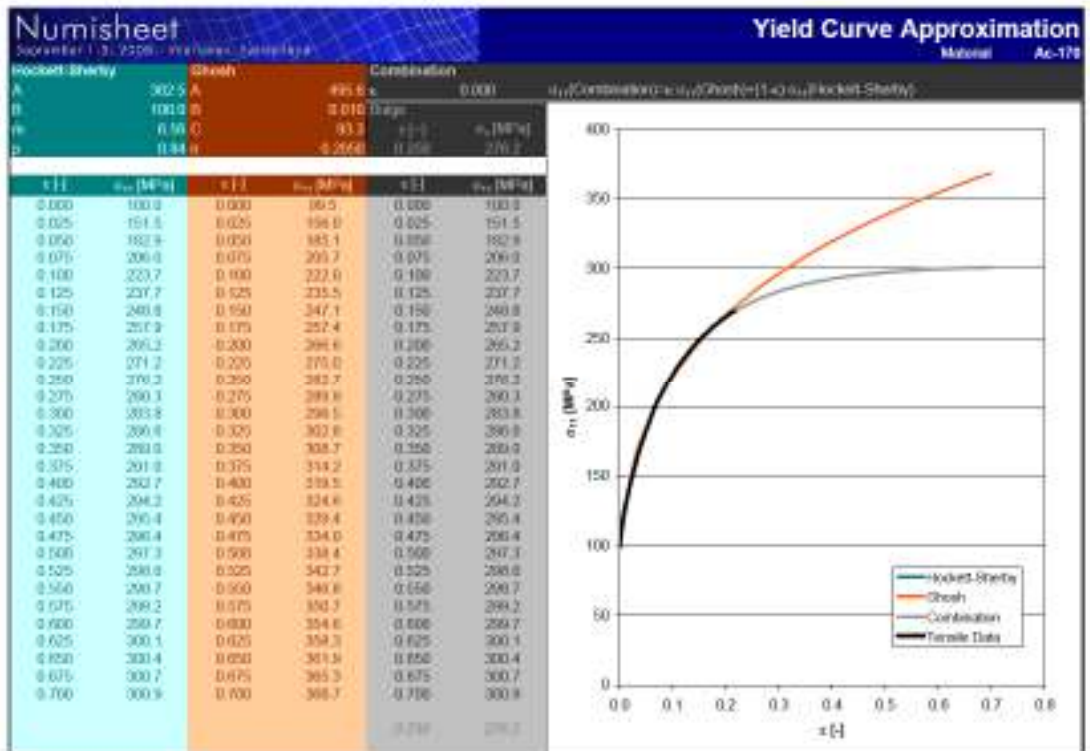


Figura 16: Ensaio de Tração para o alumínio AC170

3.5.2. Resultados para as Superfícies de Plasticidade

As tabelas e imagens seguintes, correspondem respetivamente aos parâmetros experimentais, aos parâmetros constitutivos e às superfícies de plasticidade, para cada um dos materiais.

Tabela 3: Parâmetros mecânicos experimentais e parâmetros constitutivos considerados em Barlat 2000 para HC260LAD

Orientation [°]	0	15	30	45	60	75	90	
Y/Y0 [-]	1,000	0,997	1,016	1,028	1,018	1,005	0,988	<i>Stresses evaluated at $\epsilon = 0.05$ R values evaluated at $\epsilon = 0.10$</i>
R [-]	1,34	1,15	1,08	1,06	1,12	1,37	1,58	
Yb/Y0 [-]	$\epsilon = 0.05$: 1,044		$\epsilon = 0.10$: 1,061		$\epsilon = 0.15$: 1,088			
Rb [-]	1 <i>assumed</i>							
Yld2000 Yield Locus Coefficients								
α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	α_6	α_7	α_8	a
0,9588	1,1017	0,9412	0,9547	0,9639	0,8756	0,9723	1,0035	6

Tabela 4: Parâmetros mecânicos experimentais e parâmetros constitutivos considerados em Barlat 2000 para AC170

Orientation [°]	0	15	30	45	60	75	90	
Y/Y0 [-]	1,000	1,000	0,990	0,978	0,975	0,980	0,978	<i>Stresses evaluated at $\epsilon = 0.05$ R values evaluated at $\epsilon = 0.10$</i>
R [-]	0,74	0,70	0,60	0,50	0,55	0,62	0,67	
Yb/Y0 [-]	$\epsilon = 0.05$: 1,040		$\epsilon = 0.10$: 1,018		$\epsilon = 0.15$: 1,012			
Rb [-]	1 <i>assumed</i>							
Yld2000 Yield Locus Coefficients								
α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	α_6	α_7	α_8	a
0,9657	0,9873	0,8996	1,0164	1,0049	0,9513	0,9479	1,1608	8

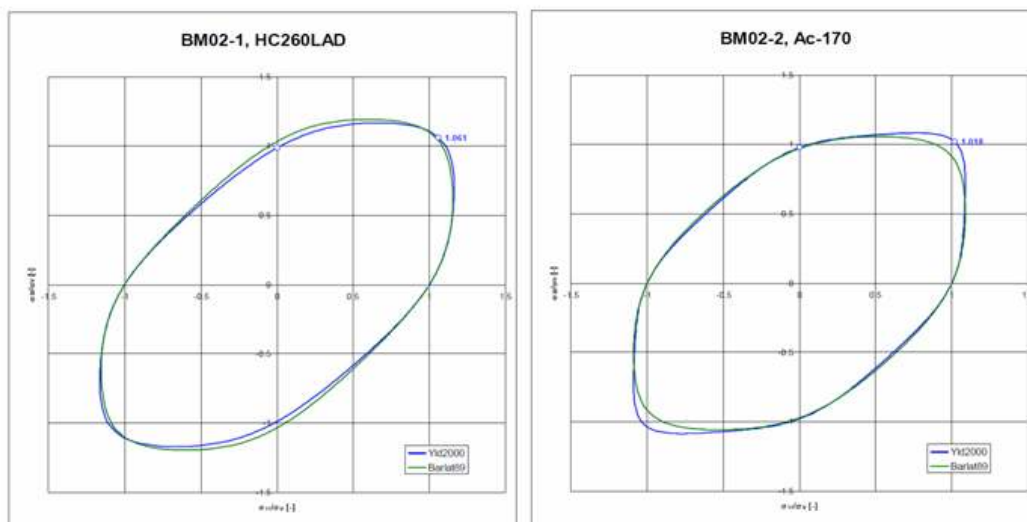


Figura 17: Superfície de Plasticidade HC260LAD e AC170

3.5.3. Resultados para Curvas FLC (Forming Limit Curve)

Para as curvas FLC de cada um dos materiais, são apresentadas as figuras 19 e 20.

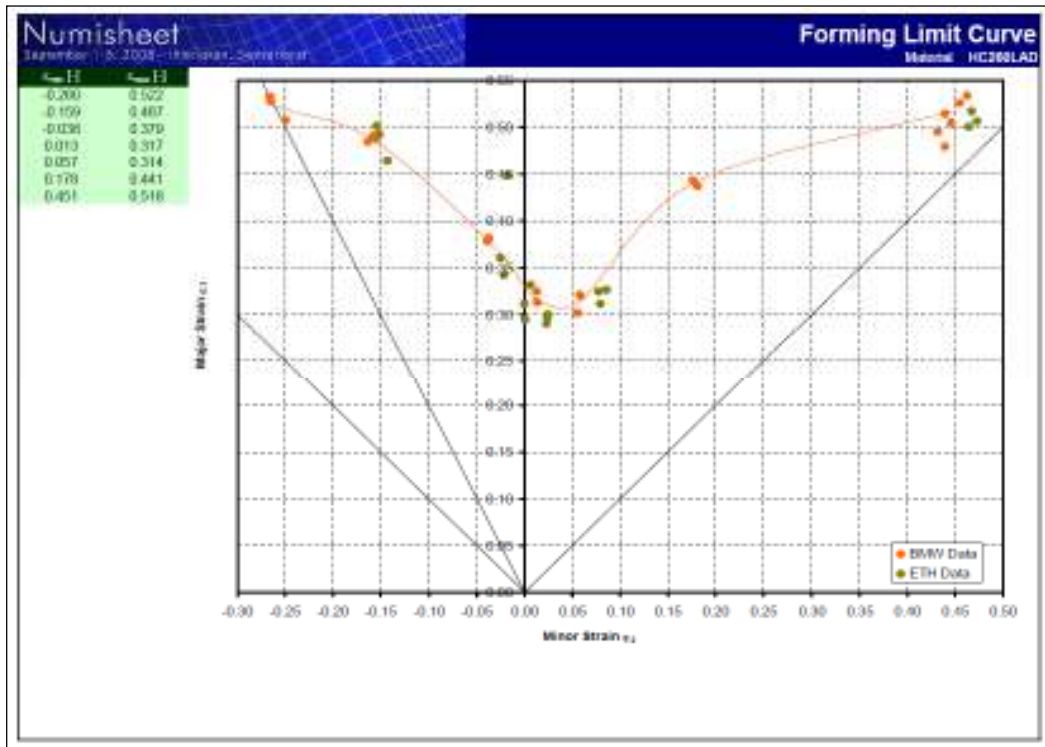


Figura 18: *Forming Limit Curve* para o material HC260LAD

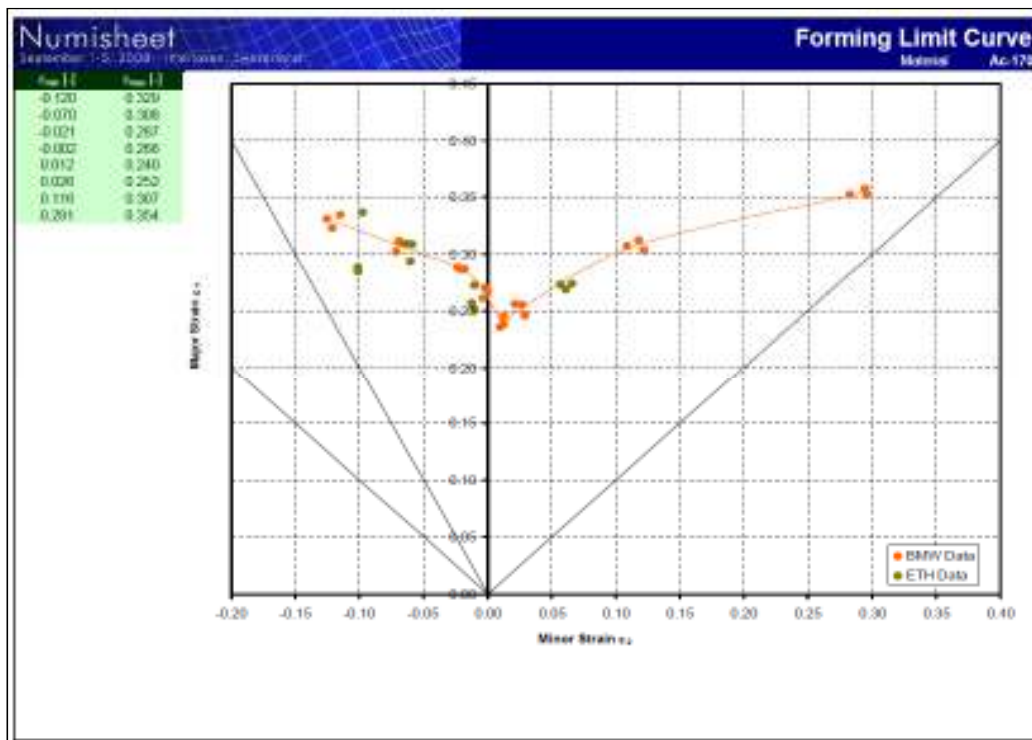


Figura 19: *Forming Limit Curve* para o material AC170

4. Especificações do *Benchmark*

O exercício utilizado para a realização deste *Benchmark* foi, como já referido anteriormente, o *Benchmark #2 da conferência Numisheet 2008*.

A conferência *NUMISHEET* tem o objetivo de promover uma constante validação dos resultados obtidos através das ferramentas existentes de simulação numérica de processos de conformação plástica de chapa. Esta avaliação do estado da arte, é realizada através da comparação entre resultados numéricos e experimentais, obtidos por diferentes instituições de todo o mundo. A análise dos resultados dos casos de estudo propostos pela *NUMISHEET*, reflete os desafios atuais que se colocam à simulação numérica do processo de estampagem. As primeiras conferências caracterizaram-se por uma dispersão dos resultados numéricos, em consequência da imaturidade das diferentes formulações e estratégias adoptadas. Com a contínua evolução dos programas de simulação esta dispersão reduziu-se enormemente.

Das sucessivas conferências *NUMISHEET* realizadas, tornou-se evidente a necessidade de reunir um conjunto de resultados experimentais cuidados e precisos para conseguir avaliar a eficiência dos programas de simulação numérica de estampagem.

4.1. Descrição

Neste *Benchmark* serão estudados os resultados obtidos através das análises numéricas obtidas pelos dois *Softwares* utilizados ao longo de todo este trabalho.

Todos os parâmetros de processo serão comparados e monitorizados de forma a transmitir a influência de diferentes geometrias de freios (suaves ou de retenção) na conformabilidade e no retorno Elástico, para o aço HC260LAD e a liga alumínio AC170. Desta forma foi utilizada a conhecida geometria S-Rail (*Numisheet* 1996) que é apresentada na Figura 21. Existem três variantes desta geometria: geometria sem freios, com freios suaves e com freios de retenção.

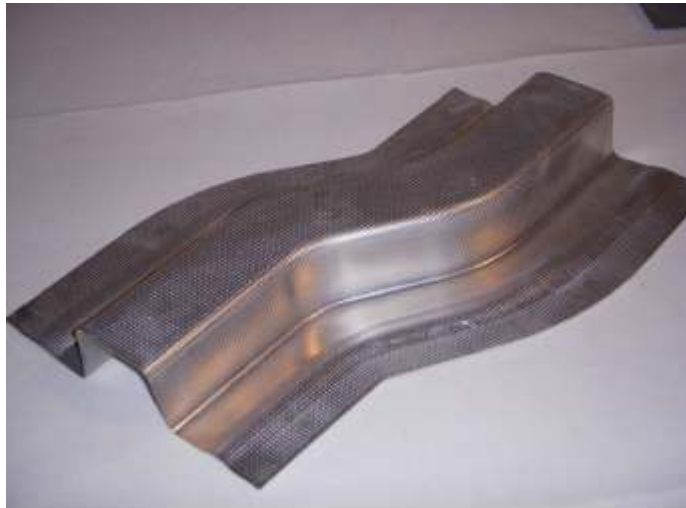


Figura 20: Geometria do *Benchmark* BM02 - “S-Rail 2008”

De acordo com as requisições de processo, as operações a serem modeladas virtualmente têm a seguinte sequência: operação de fecho de ferramenta (“*closing*”), conformação (“*drawing*”), recuperação elástica (“*Springback*”), fixação no dispositivo de controlo (“*clamping*”), corte e uma última operação de recuperação elástica (*Springback*).

4.2. Objetivos

Um dos principais objetivos deste estudo numérico centra-se na comparação das forças de restrição realistas obtidas através dos diferentes *softwares* existentes no mercado.

A avaliação da precisão da recuperação elástica para diferentes tipos de restrição (sem freios, freios suaves e freios de retenção) também é um dos objetivos principais para este estudo.

Os principais tópicos são, então, os seguintes:

- Analisar e comparar as forças resultantes dos estudos numéricos a efetuar;
- Analisar a precisão dos resultados de conformabilidade e retorno elástico;
- Comparar os resultados das análises numéricas com os ensaios físicos.

4.3. Tarefas

Como já referido anteriormente, a validação da precisão do modelo numérico irá ser estudada nos seguintes casos:

- Sem freios (Figura 22);
- Com freios suaves (Figura 23);
- Com freios de retenção; (Figura 24)



Figura 21: Corte transversal da ferramenta para o caso sem freio

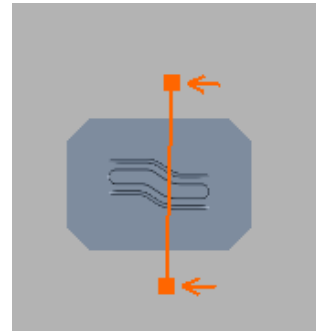
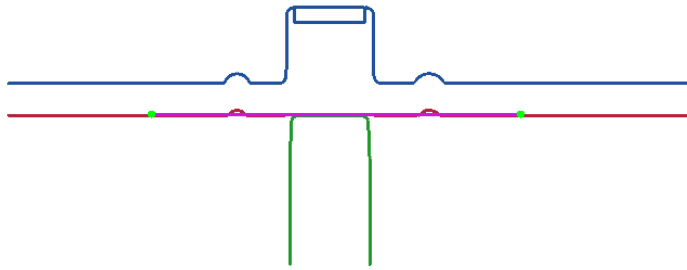


Figura 22: Corte transversal da ferramenta para o caso freio suave

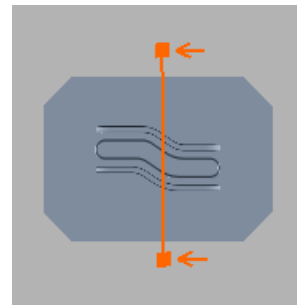
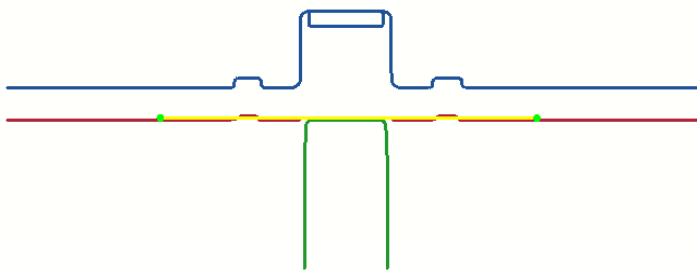


Figura 23: Corte transversal da ferramenta para o caso freio de bloqueio/retenção

4.4. Descrição do Tipo de Material

Os materiais utilizados foram o aço HC260LAD (aço micro-ligado) e a liga de alumínio AC170. As especificações a ter em consideração encontram-se na tabela seguinte:

Tabela 5: Características da matéria-prima utilizada

Materiais	Material 1 (Aço)	Material 2 (Alumínio)
Tipo de Material	HC260LAD	AC170
Espessura	1.00 mm	1.00 mm
Direção de Laminagem	Paralela ao eixo Global xx	Paralela ao eixo Global xx
Database	Ver ficheiro em anexo: Numisheet08-BM02-Material1.xls	Ver ficheiro em anexo: Numisheet08-BM02-Material2.xls

Do cruzamento desta informação surgem 6 casos de estudo para cada um dos materiais (Tabela 6):

Tabela 6: Características de Processo utilizadas

Material/Caso de estudo	Tipo de freio	Força do cerra chapas
HC260LAD-LC1	Sem freio 400 kN	Sem freio 400 kN
HC260LAD-LC2	Freio suave (altura = 3.6mm) 400 kN	Freio suave (altura = 3.6mm) 400 kN
HC260LAD-LC3	Freio de retenção (altura = 2.2 mm) 650 kN	Freio de retenção (altura = 2.2 mm) 650 kN
AC170-LC1	Sem freio 90 kN	Sem freio 90 kN
AC170-LC2	Freio suave (altura = 3.6mm) 90 kN	Freio suave (altura = 3.6mm) 90 kN
AC170-LC3	Freio de retenção (altura = 2.2 mm) 90 kN	Freio de retenção (altura = 2.2 mm) 90 kN

4.5. Apreciações ao Documento de Suporte ao *Benchmark*

Será importante destacar dois aspectos relevantes quanto aos procedimentos, experimental e numérico, definidos no documento de suporte ao *Benchmark*. O primeiro está relacionado com a liberdade de entre participar um modelo numérico, onde se usa a geometria real, ou, com uma geometria equivalente, baseada num modelo analítico. Optou-se por uma geometria real, dada a natureza do trabalho e os objetivos a atingir pelo presente trabalho. Em segundo lugar, poderia optar-se por uma aproximação *standard* ou avançada, sendo a principal diferença entre estas a sequência de etapas, ou seja, a aproximação referida como *standard* consiste na simulação da sequência “Estampagem, corte, retorno elástico” conquanto que na aproximação avançada este procedimento é mais complexo, mas mais próximo do procedimento experimental: “Estampagem, retorno elástico, fixação, corte, retorno elástico”. Isto porque do ponto de vista numérico não serão de prever diferenças significativas entre os dois procedimentos, a opção recaiu sobre a simplicidade do procedimento *standard*.

Por outro lado, convém salientar que toda a informação paramétrica relativa à definição das ferramentas e geometria do esboço inicial, bem como, os resultados experimentais dos ensaios mecânicos, indispensáveis à identificação dos parâmetros constitutivos dos materiais, e condições de lubrificação, para a determinação do coeficiente de atrito, foram definidas atempadamente pela comissão organizadora, em anexo ao procedimento experimental.

4.6. Abordagem Padrão: Etapas do Processo a ser Simulado

- Ferramentas de fecho
 - Punção: estacionário.
 - Matriz e calço interior: deslocamento controlado com movimento negativo na direção z .
 - Pisador: estacionário.

- Conformação até ocorrer contato entre as duas superfícies (punção– platina – calço interior).

- Punção: estacionário.

- Matriz e calço interior: deslocamento controlado com movimento negativo na direção z .

- Pisador: força controlada (a força atua na direção z positiva).

- Corte do componente conformado.
- Recuperação elástica no final do corte.

Condições de fronteira para a recuperação elástica (“*Springback*”):

- Ponto A ($x=122.0$, $y=-13.0$, $z=0.5$): x, y e z translação DOF fixa

- Ponto B ($x=122.0$, $y=-37.0$, $z=0.5$): x e z translação DOF fixa

- Ponto C ($x=-122.0$, $y=25.0$, $z=0.5$): z translação DOF fixa

4.7. Definição dos Parâmetros de Fricção

Tabela 7: Definição dos componentes do Tribosistema

Componentes do Tribosistema	Especificações
Ferramenta em Aço	1.2358
Superfície de Ferramenta - Tratamento	<ul style="list-style-type: none"> • Endurecido a laser (58-63 HRC) • Polida
Lubrificante	<ul style="list-style-type: none"> • MULTIDRAW KTL N 16 (Zeller+Gmelin) • Quantidade: 2-3 g/m²
Velocidade da Ferramenta	30 mm/s

Adicionalmente, com estes dados, são realizados os testes de estudo de banda nas mesmas condições tribológicas. Os detalhes nos testes experimentais, bem como os resultados dos testes de estudo de banda incluindo os coeficientes de atrito são fornecidos no arquivo "*Numisheet08-BM02-Tribo-experiments.pdf*".

Na figura 25, podemos observar a representação do dispositivo montado para a realização do “*strip drawing test*” (testes de estudo de banda).

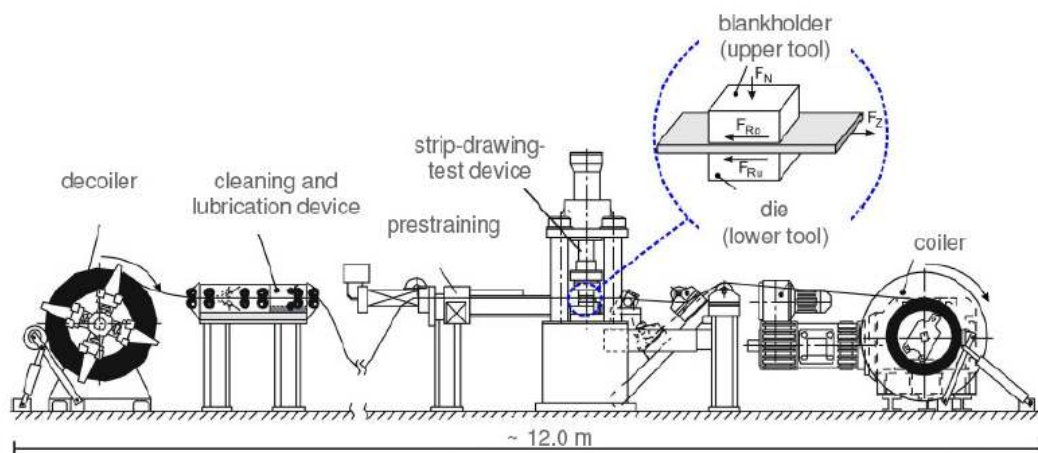


Figura 24: Representação do dispositivo montado para a realização do “*strip drawing test*”.

5. Simulações Numéricas

Como já referido anteriormente, a utilização de ferramentas de simulação numérica na conceção de processos de fabrico tem vindo a crescer na indústria nas últimas décadas. A aplicação de métodos computacionais continua, porém, ainda muito limitado nas etapas mais tardias de ensaio e produção do processo de desenvolvimento. Isto é devido ao fato de as técnicas de simulação atualmente aplicadas ainda necessitarem de muitas simplificações importantes dos sistemas de produção reais.

A aplicação da simulação numérica começa desde logo na etapa de desenvolvimento de produto, onde se analisa e avalia a factibilidade do produto em questão. As fases seguintes consistem na avaliação e estudo da definição de processo propriamente dita: estudo de banda, operações e otimização de matéria-prima (planeamento do processo), simulação numérica e validação do processo produtivo (ferramentas e operações produtivas), correlação e validação dos ensaios (*try-outs*) e produção. A figura seguinte mostra o fluxo desta sequência:



Figura 25: Soluções de *software* para simulação numérica que acompanham todas as etapas de desenvolvimento do produto.

Neste capítulo são apresentados, comparados e discutidos os resultados numéricos obtidos e os resultados experimentais verificados. Este divide-se em três partes:

- Comparação dos resultados obtidos entre os dois *softwares* de simulação numérica;
- Estudo e comparação das variáveis macro analisadas;
- Estudo da influência dos freios no retorno elástico.

A primeira parte pretende comparar diferentes fatores tais como o draw-in, as forças de conformação, a redução de espessura, maior e menor deformação na obtenção dos resultados numéricos. A segunda parte visa determinar a influência de fatores como geometria de freios, na qualidade e eficácia dos resultados de retorno elástico

Por último, pretendemos mostrar a capacidade numérica do *software* que melhor se adapta às necessidades industriais, tendo em conta todas as etapas envolvidas, desde a concepção da ideia até à produção da mesma.

5.1. Análise dos Parâmetros de Otimização

Os parâmetros de otimização a serem comparados para efeitos de *Benchmark* são os seguintes:

- Avaliação do consumo de material (*Draw-in*) após conformação;
- Forças de conformação;
- Avaliação do *springback*;
- Avaliação dos valores de variação de espessura e dos valores de extensão

5.2. Avaliação Após Conformação

A avaliação da geometria final dos conformados (*draw-in*) torna-se um importante parâmetro de validação dos solvers dos *softwares* em análise.

Desta forma, apresentam-se agora os resultados obtidos para a geometria do conformado após a fase de conformação. Para isso, dividiu-se o esboço segundo a direção perpendicular ao escoamento em 8 secções (A, B, C, D, E, F, G, H). Cada secção contém dois pontos extremos diametralmente opostos ($a_1, a_2, \dots, h_1, h_2$), cujos deslocamentos na direção do escoamento, medidos no fim do processo de conformação, representam o *draw-in*, ou escoamento de material para dentro da matriz, verificado. As secções encontram-se representadas na figura 27, onde se assinala a sua localização:

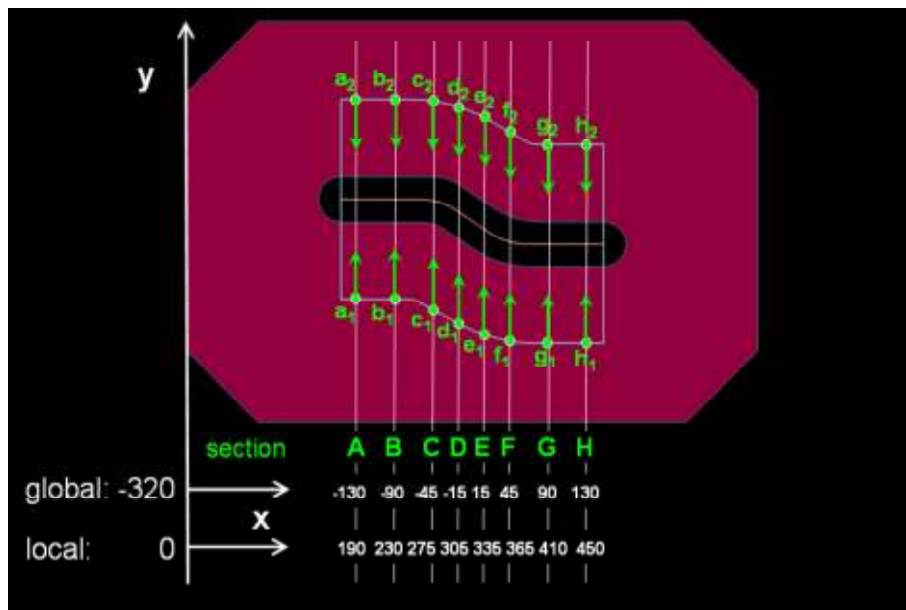


Figura 26: Secções para a avaliação do *draw-in*

Para uma análise demonstrativa da influência dos parâmetros associados à malha no *draw-in*, seleccionou-se dois materiais, três casos de estudo e dois *softwares* que se encontram apresentados na tabela 8:

Tabela 8: Casos seleccionados no estudo da sensibilidade do *draw-in*

Material/Caso de estudo	Tipo de freio	SOFTWARES
HC260LAD-LC1	Sem freio 400 kN	AUTOFORM e PAMSTAMP
HC260LAD-LC2	Freio suave (altura = 3.6mm) 400 kN	AUTOFORM e PAMSTAMP
HC260LAD-LC3	Freio de retenção (altura = 2.2 mm) 650 kN	AUTOFORM e PAMSTAMP
AC170-LC1	Sem freio 90 kN	AUTOFORM e PAMSTAMP
AC170-LC2	Freio suave (altura = 3.6mm) 90 kN	AUTOFORM e PAMSTAMP
AC170-LC3	Freio de retenção (altura = 2.2 mm) 90 kN	AUTOFORM e PAMSTAMP

Primeiro são destacados os resultados obtidos para o draw-in no caso sem freio. Assim, analisaram-se os deslocamentos sofridos pelos pontos extremos de cada secção para as diferentes malhas e os deslocamentos experimentais. Após isso, identificam-se os resultados com maior desvio face aos resultados experimentais.

Outro aspecto claramente perceptível consiste na diminuição dos valores do escoamento da secção H face a secção A para o lado 1, verificando-se uma tendência inversa para o lado 2. Este comportamento pode ser entendido a luz do efeito de rotação do esboço no plano, à medida que processa a conformação do perfil, como e exemplificado na figura 28. Assim, verifica-se que nas secções extremas a rotação do esboço poderá favorecer o escoamento, quando no mesmo sentido, ou prejudicá-lo, quando no sentido contrario:

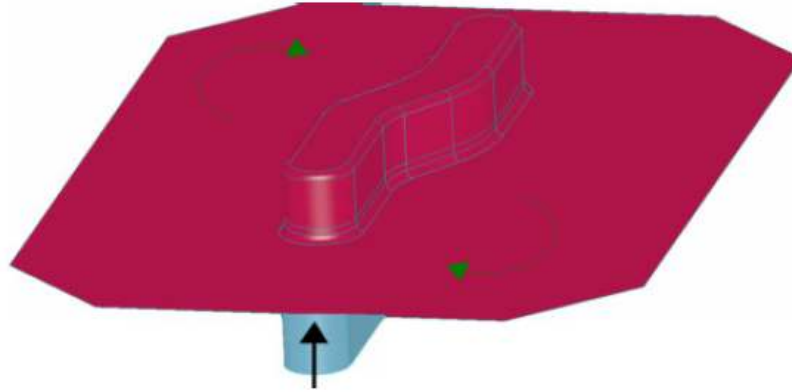


Figura 27: Representação do efeito de torção sofrido pelo esboço a medida que escoa para dentro da matriz.

5.3. Preparação das Simulações Numéricas

O componente em estudo refere-se a uma peça simples conformada com três geometrias distintas: sem freios, com freios suaves e com freios de retenção. Os materiais a aplicar serão, como já referidos, o aço HC260Lad e o alumínio AC170. A espessura do componente é de 1 mm. A imagem seguinte representa o tamanho do *blank* (platina) utilizado para todas as iterações efectuadas:

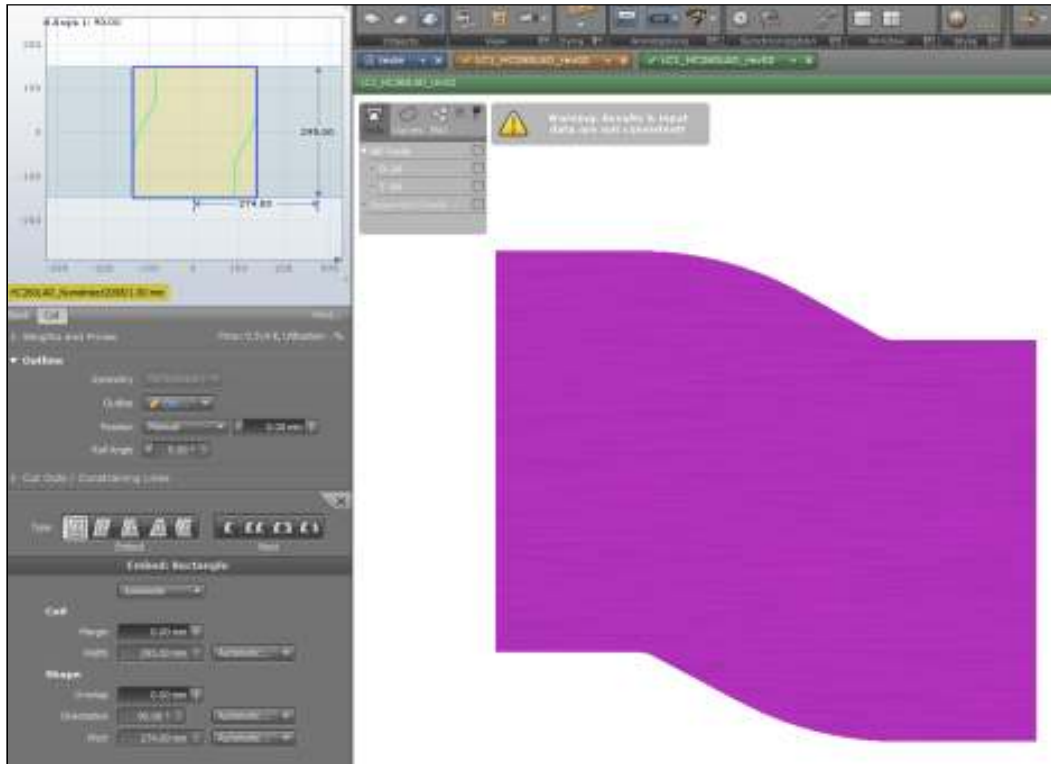


Figura 28: Definição da matéria-prima através do Autoform.

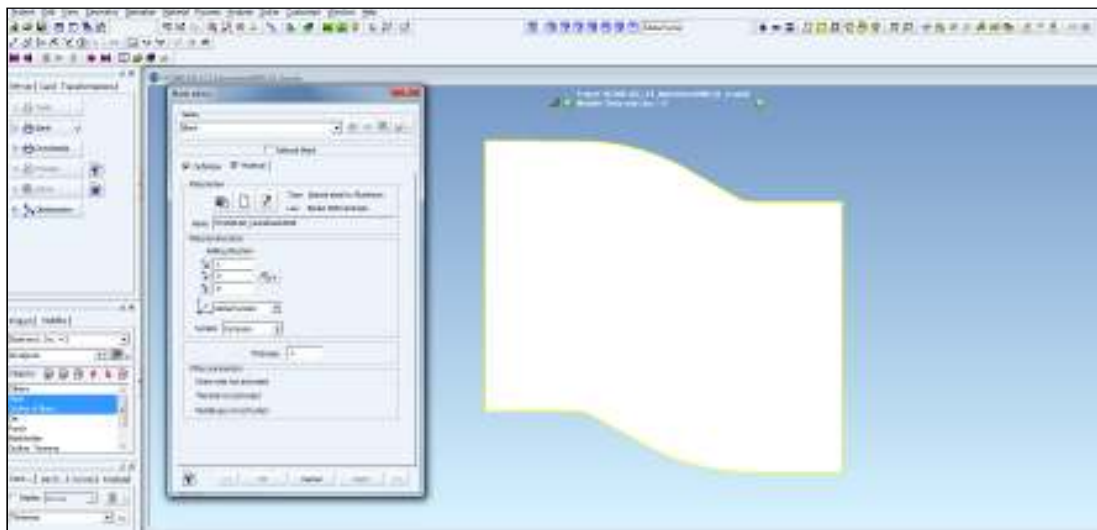


Figura 29: Definição da matéria-prima através do PAMStamp.

As imagens seguintes dizem respeito a toda a definição de processo desde a definição do número de operações para a obtenção do componente, até à definição das ferramentas e cinemática das mesmas:

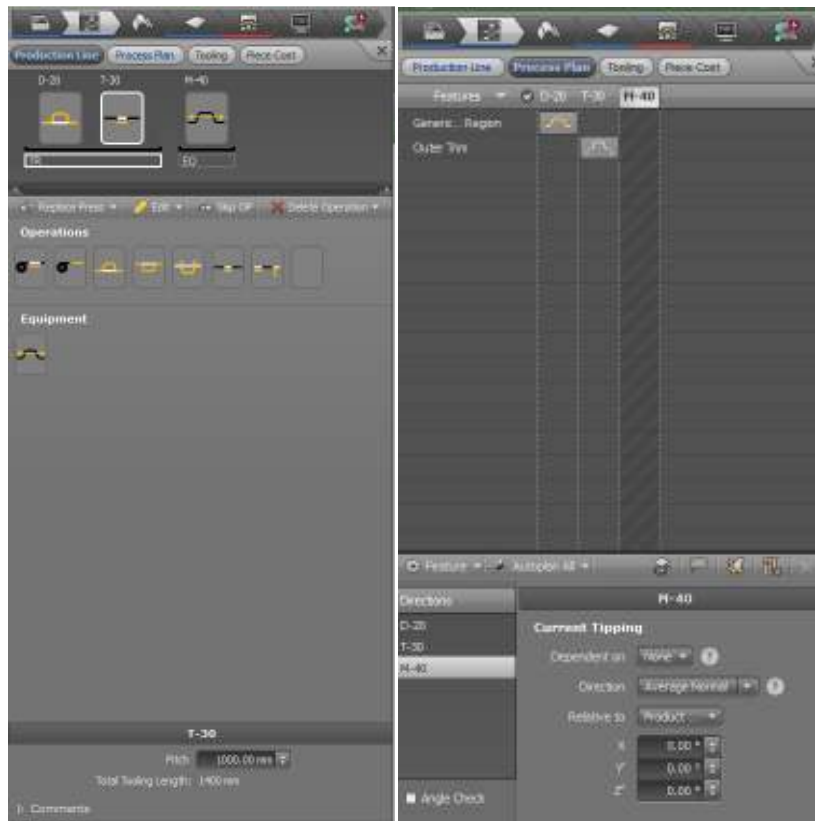


Figura 30: Definição do processo de estampagem através do Autoform



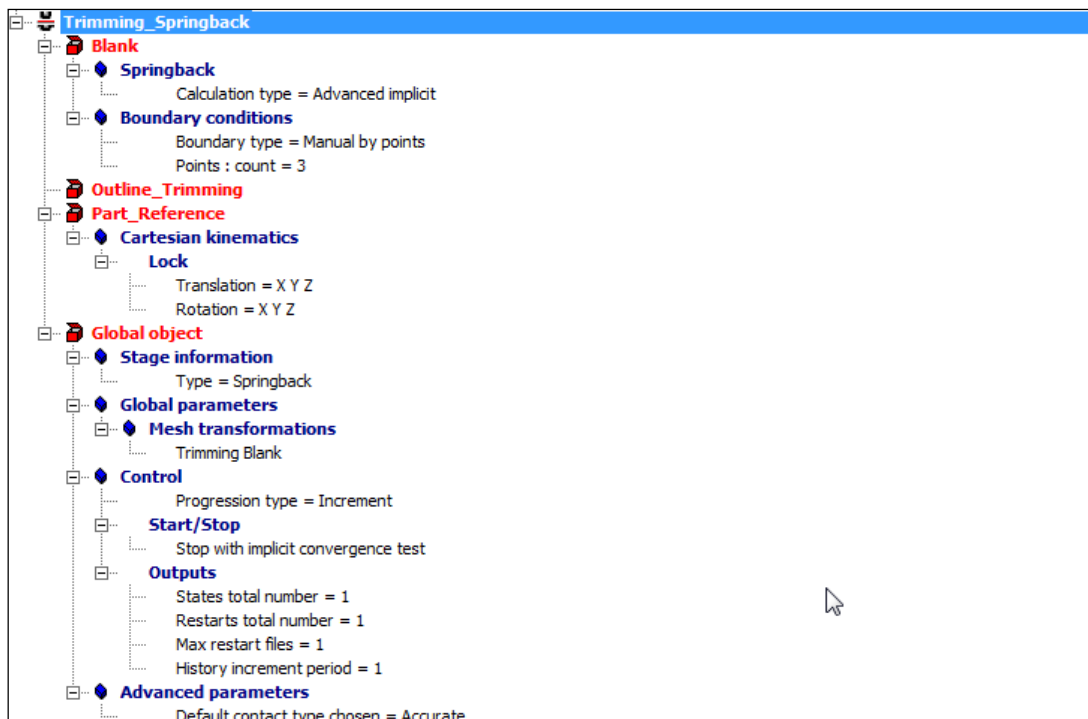
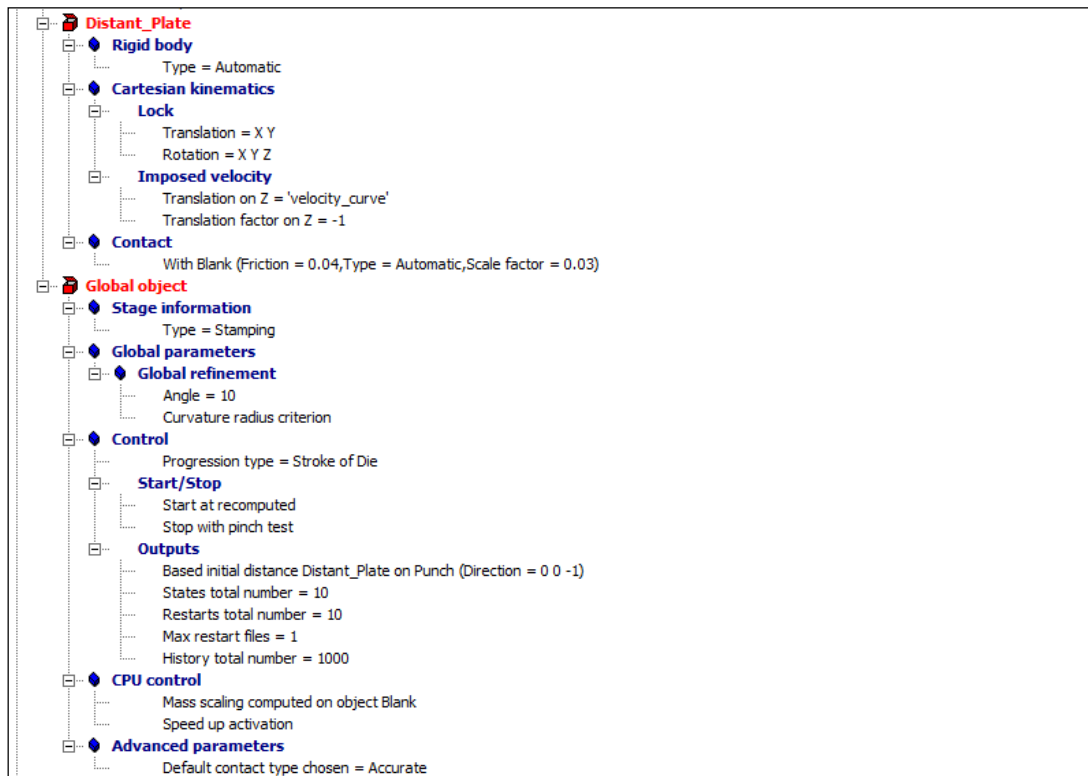


Figura 31: Definição do Processo de Estampagem através do PAMStamp.

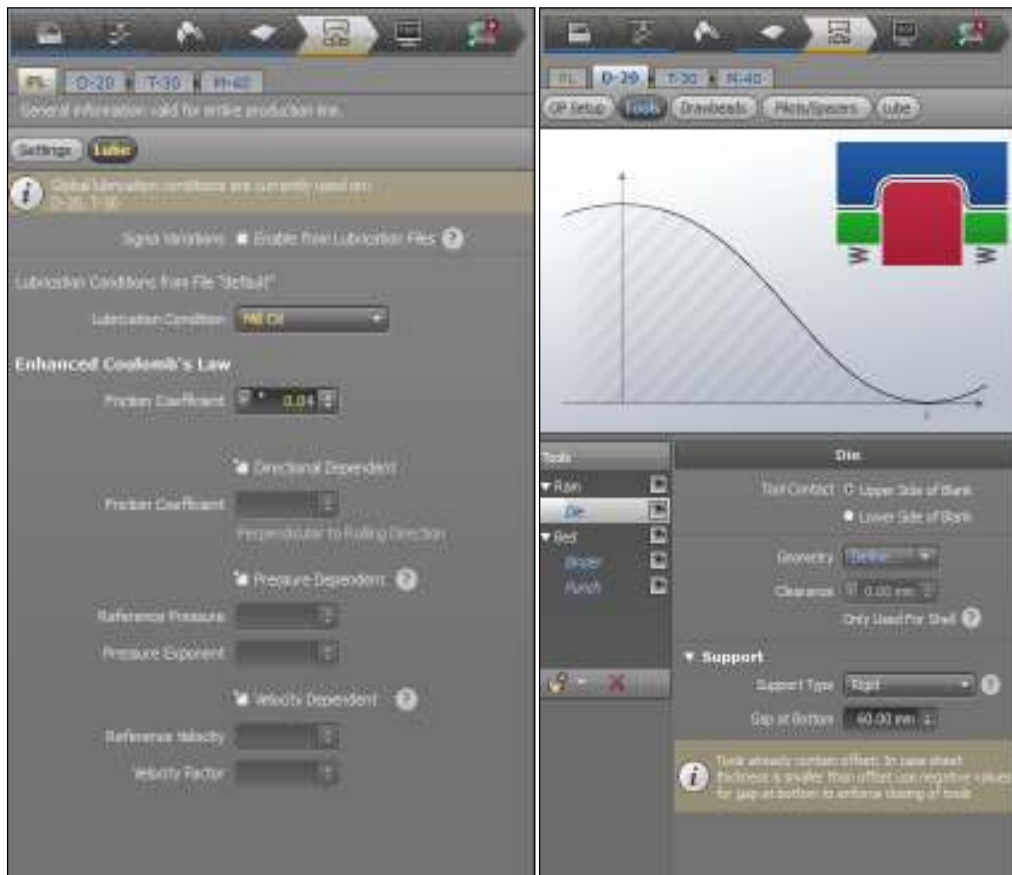


Figura 32: Definição da cinemática das ferramentas OP20 através do Autoform

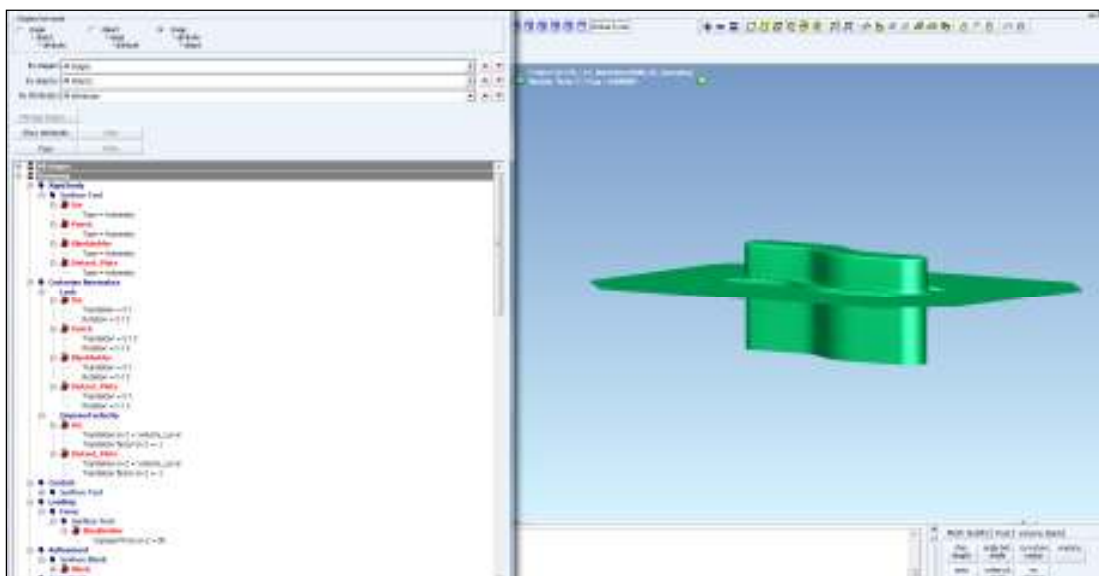


Figura 33: Definição da cinemática das ferramentas de conformação da OP20 através do PAMStamp

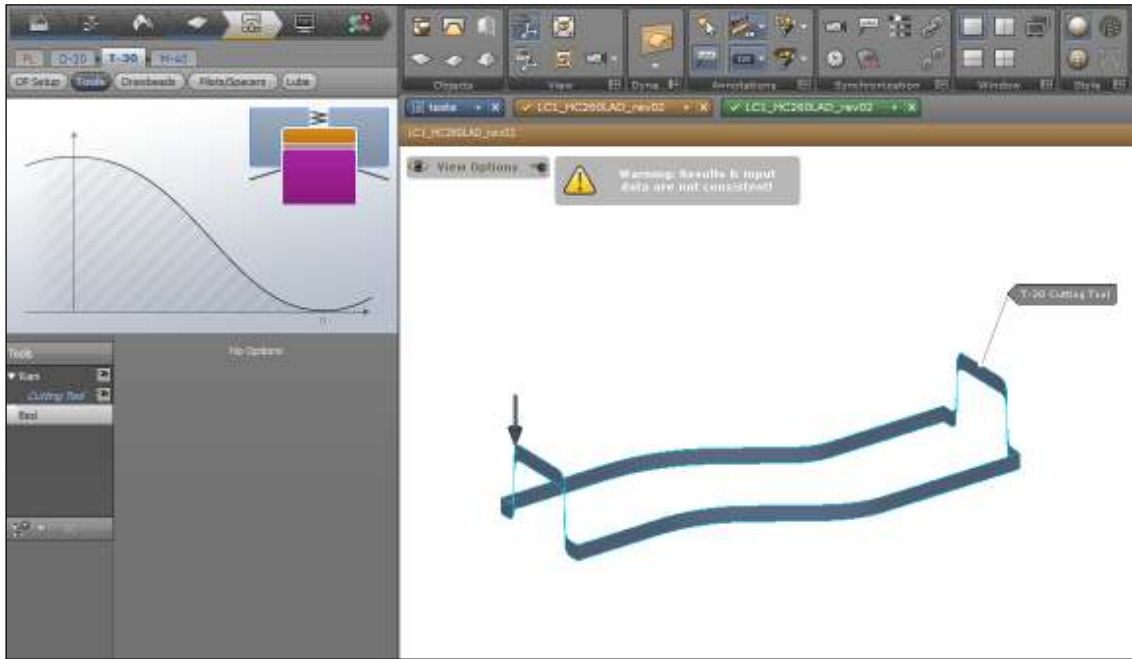


Figura 34: Definição da cinemática das ferramentas de corte da OP30 através do Autoform

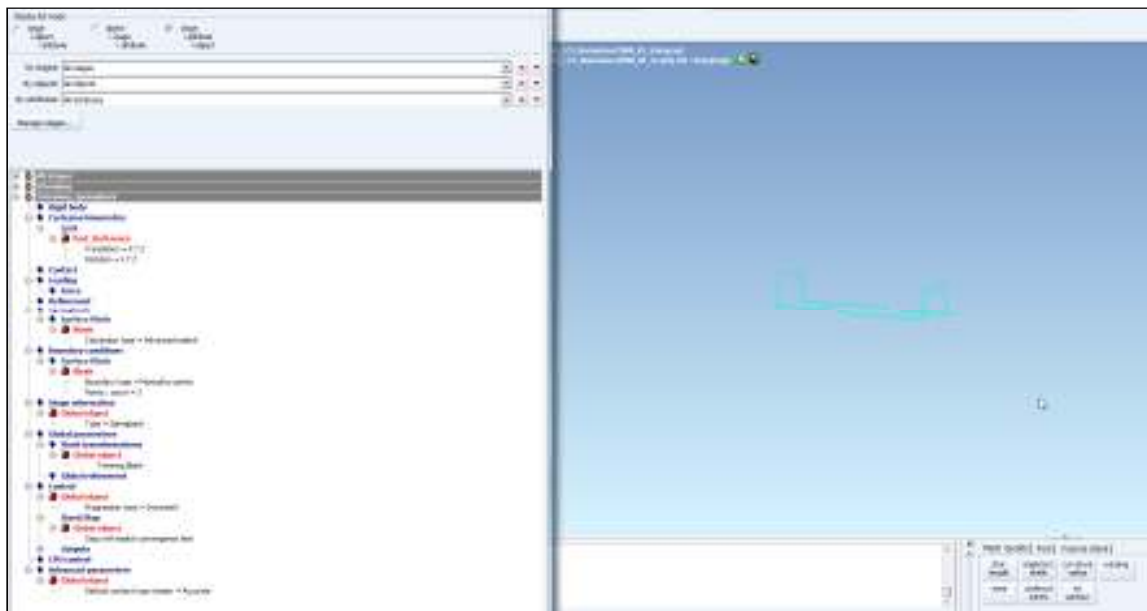


Figura 35: Definição da cinemática das ferramentas de corte da OP30 através do PAMStamp

As imagens seguintes representam esquematicamente as operações envolvidas no processo de conformação plástica do componente assim como os resultados de conformabilidade, para cada um dos modelos:

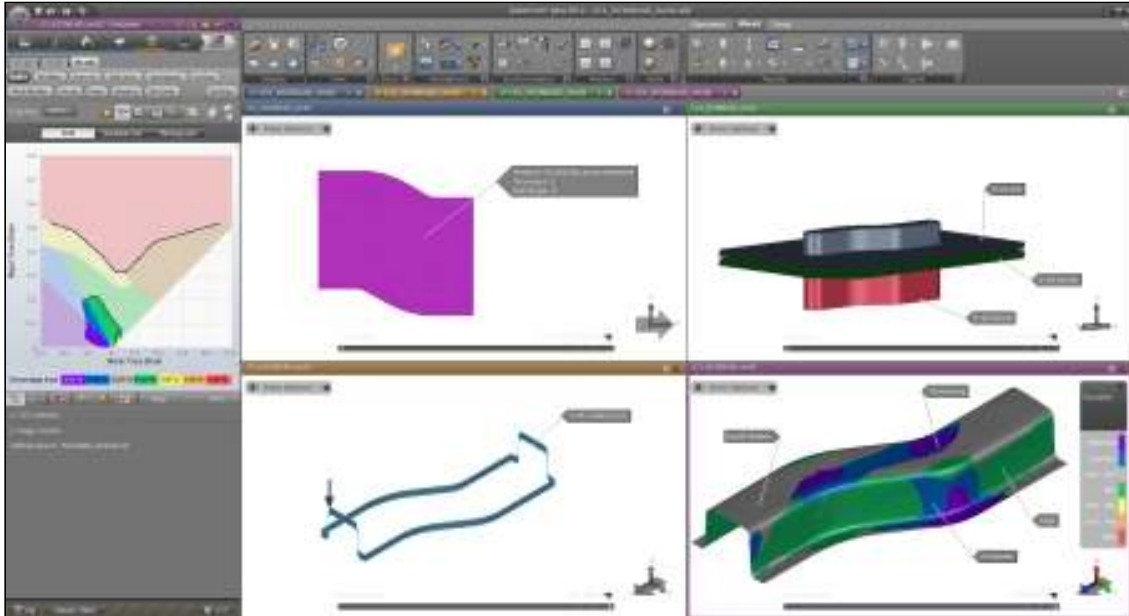


Figura 38: Soluções de *software* para simulação numérica que acompanham todas as etapas de desenvolvimento do produto em Autoform – LC1

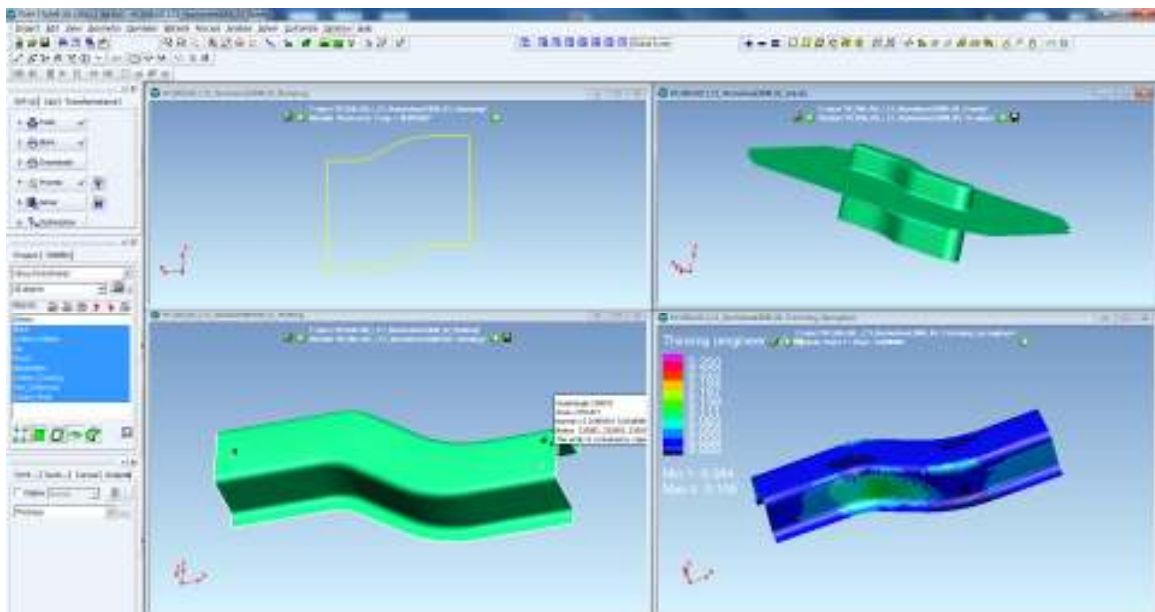


Figura 39: Soluções de *software* para simulação numérica que acompanham todas as etapas de desenvolvimento do produto em PAMStamp– LC1

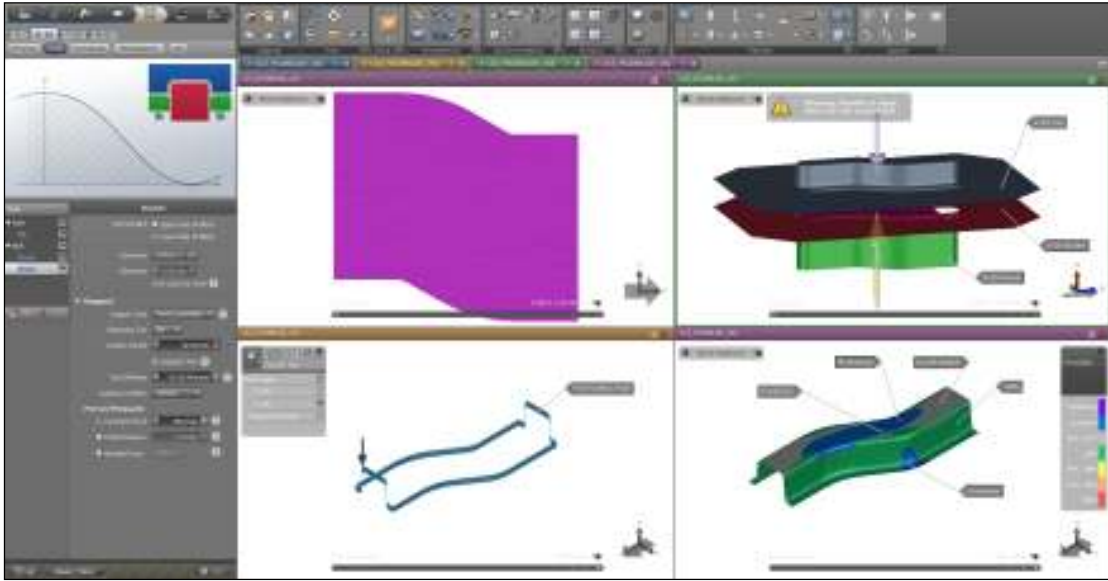


Figura 40: Soluções de *software* para simulação numérica que acompanham todas as etapas de desenvolvimento do produto em Autoform – LC2

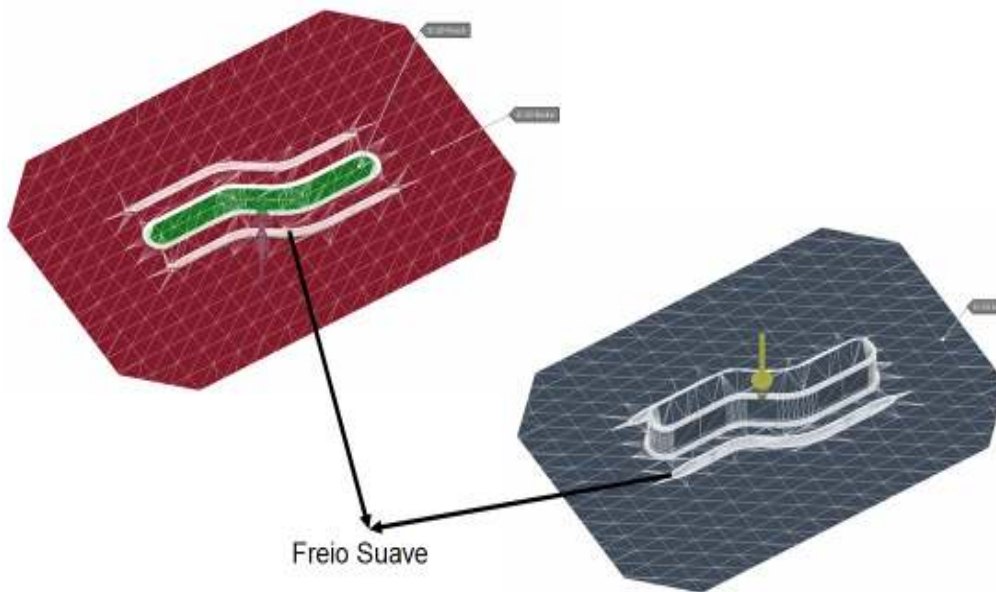


Figura 41: Freios Suaves do modelo LC2 - Autoform

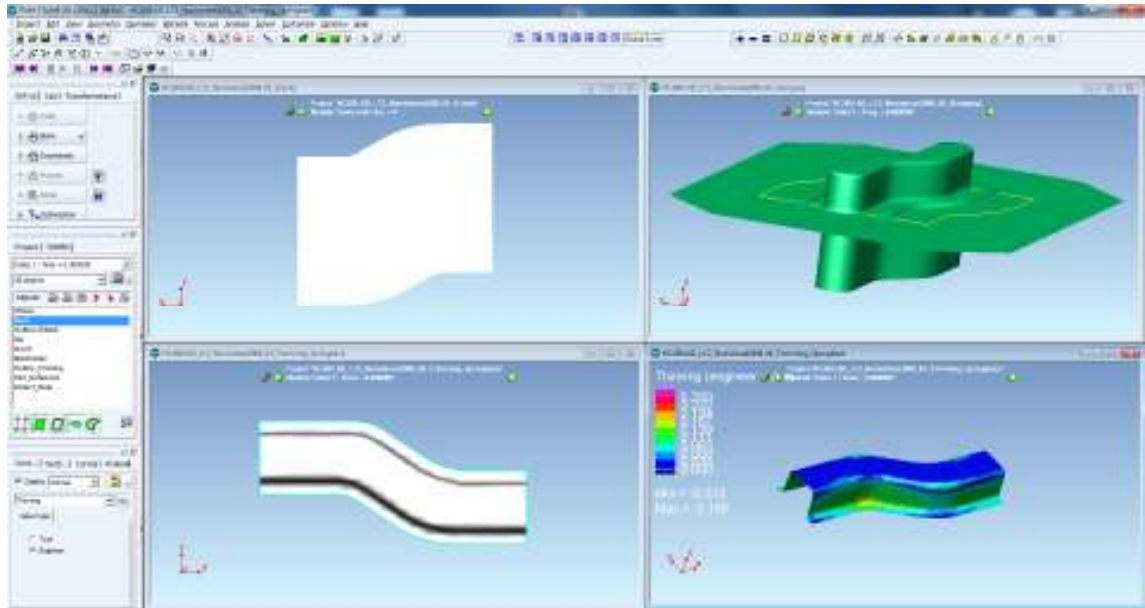


Figura 42: Soluções de *software* para simulação numérica que acompanham todas as etapas de desenvolvimento do produto em PAMStamp – LC2

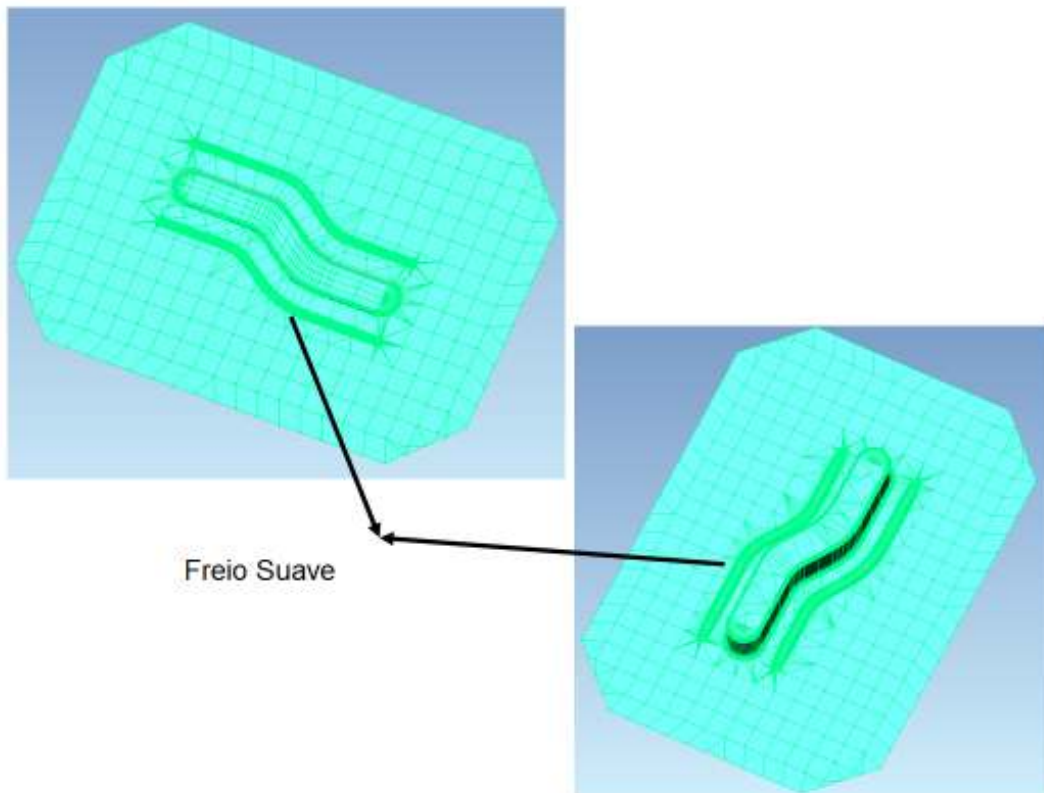


Figura 43: Freios Suaves do modelo LC2 – PAMStamp

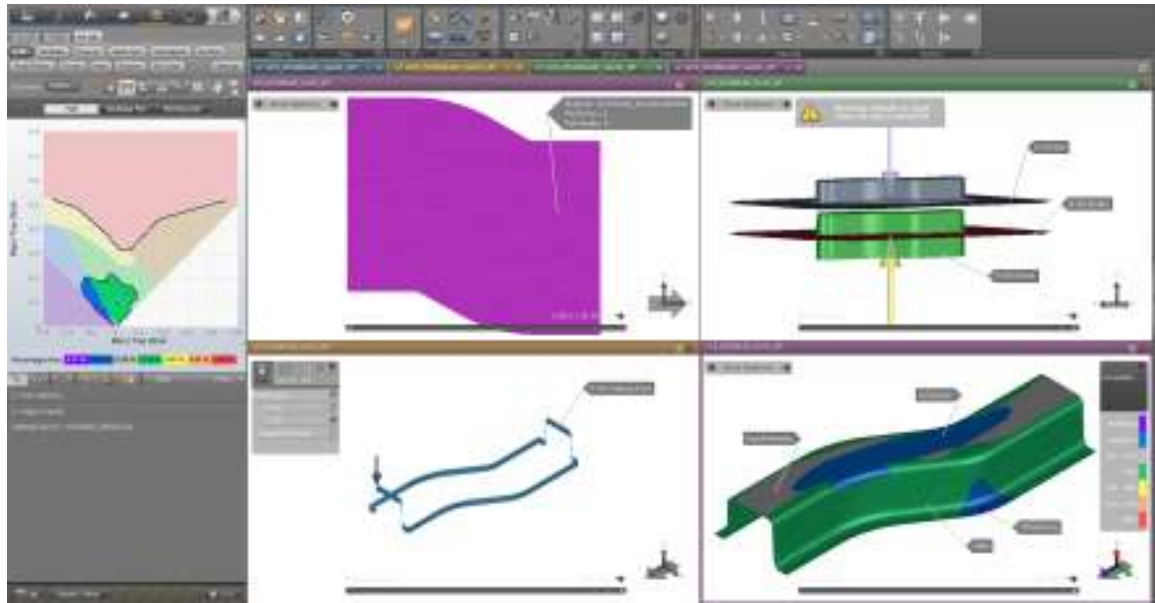


Figura 44: Soluções de *software* para simulação numérica que acompanham todas as etapas de desenvolvimento do produto – LC3

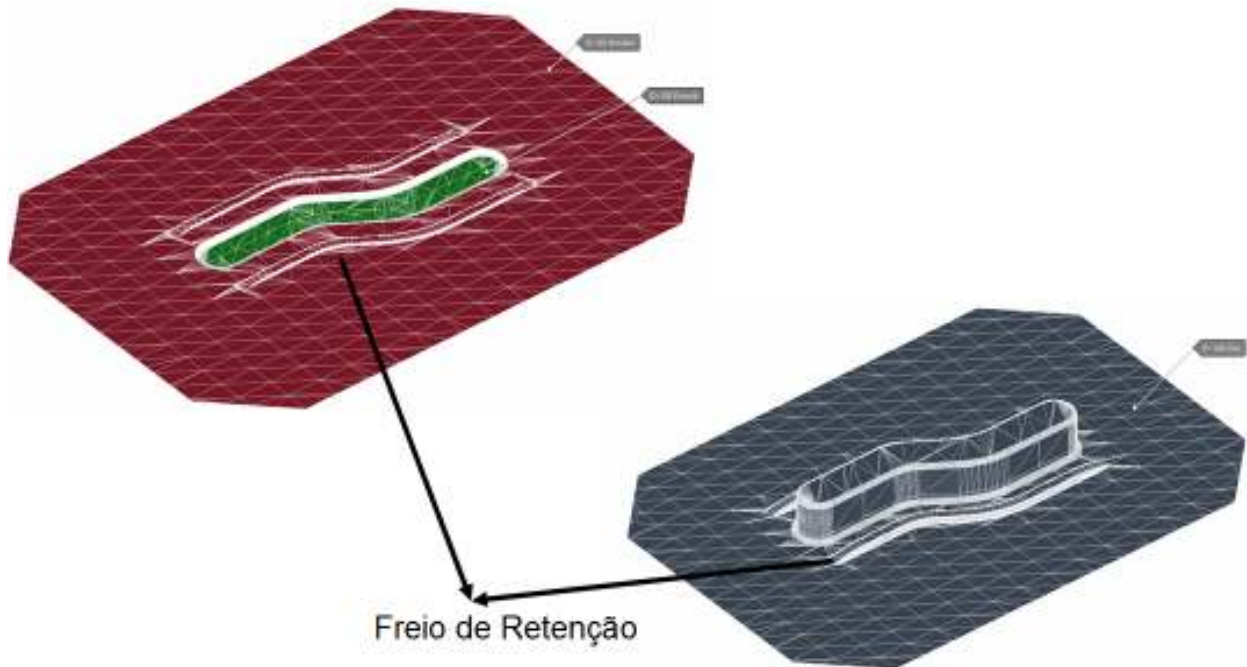


Figura 45: Freios de Retenção do modelo LC3 - Autoform

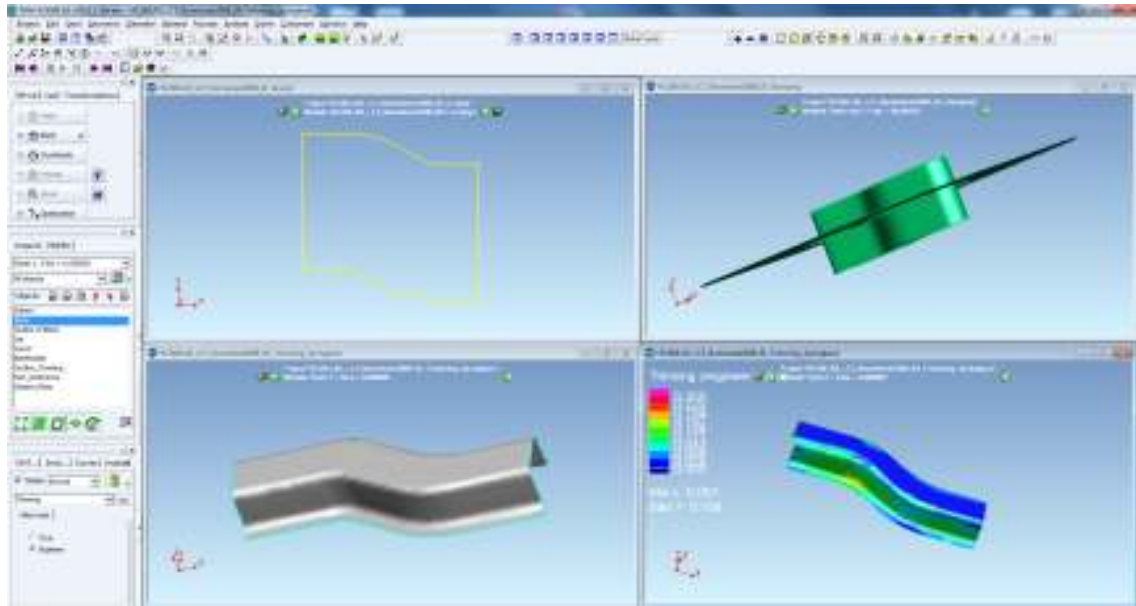


Figura 46: Soluções de *software* para simulação numérica que acompanham todas as etapas de desenvolvimento do produto – LC3

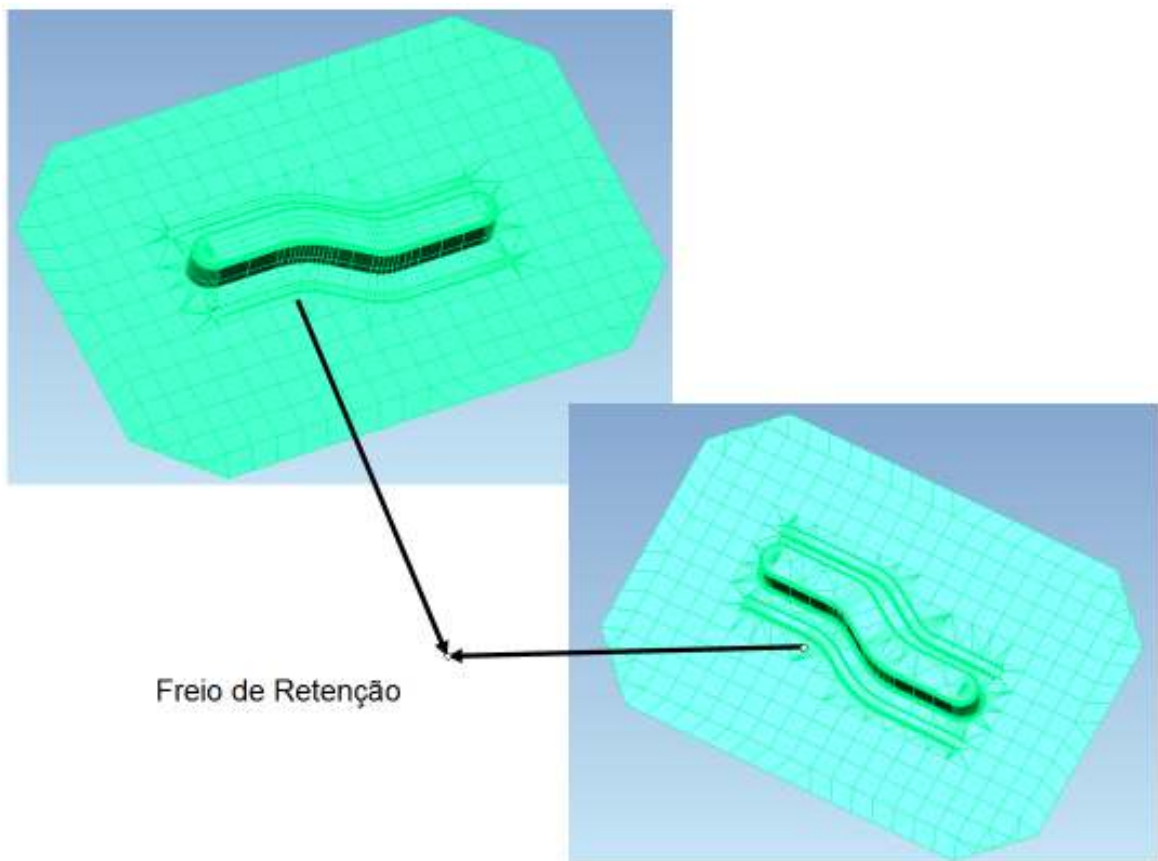


Figura 47: Freios de Retenção do modelo LC3 - PAMStamp

6. Preparação dos Testes Experimentais

6.1. Equipamento para Conformação do *S-rail*

A figura 49 (ilustração CAD) apresenta um corte transversal do equipamento usado nos testes experimentais. Para medir a força exercida pela punção a sua parte inferior (base do punção) é munida de dois furos contendo extensómetros. A posição e o tamanho destes furos são determinados através do cálculo por elementos finitos.

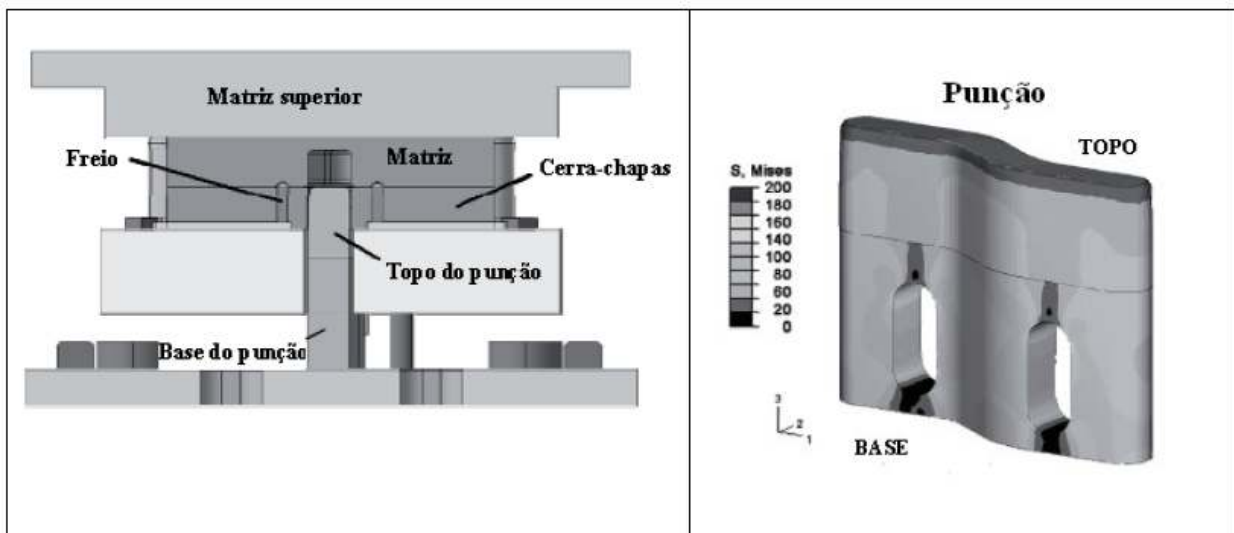


Figura 48: Corte transversal de um modelo CAD do equipamento dos testes de conformação e localização dos extensómetros no punção.

Este punção é concebido de forma a ser desmontado, já que a medição da deformação do punção é realizada na parte inferior, a qual é calibrada por um sistema profissional de calibragem da HBM.

A ferramenta do *S-Rail* contém dois tipos de cerra-chapas. Um pode ser equipado com diferentes freios (suaves ou de retenção); o outro apresenta uma superfície completamente plana. Dependendo da geometria aplicada adota-se uma matriz adequada (Figura 50).

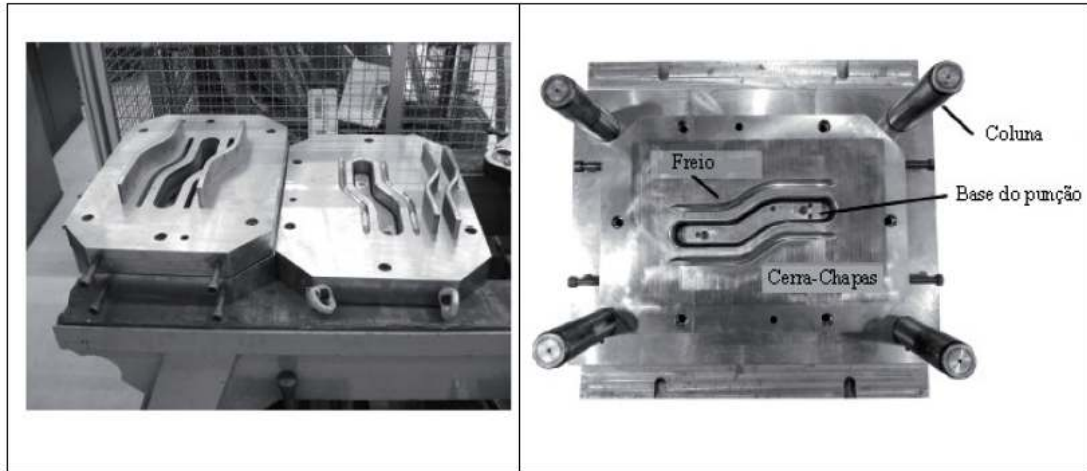


Figura 49: Ferramentas de conformação: cerra-chapas, freios e matrizes.

Para a medição do *draw-in* foram usados uma série de transdutores de deslocamento impelidos por cilindros pneumáticos (Figura 51). Para assegurar que a medição dos deslocamentos ocorra ao longo de um eixo, os deslocamentos dos sensores são guiados por tiras metálicas planas. O erro desta medição está abaixo de $\pm 1\%$.

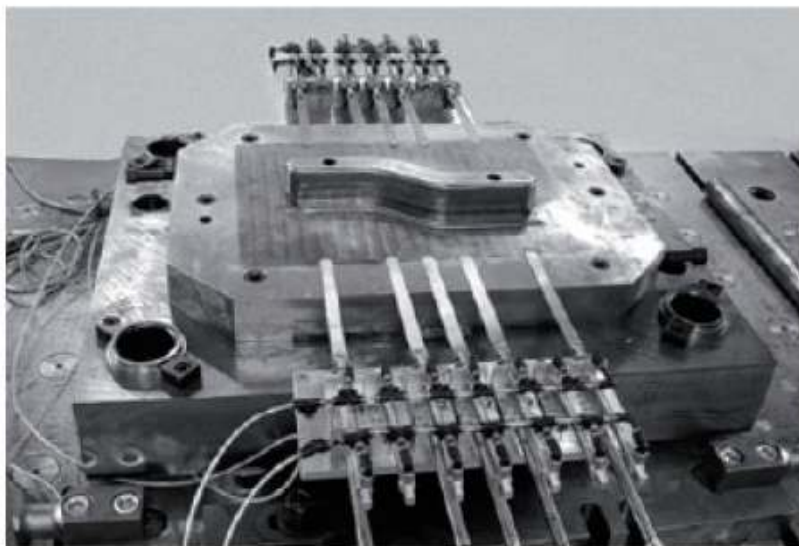


Figura 50: Equipamento de medição do *draw-in*.

A determinação da força do cerra-chapas é derivada indiretamente da pressão do mecanismo de conformação. O procedimento de calibração consiste na medição:

- a) Da força do cerra-chapas através duma célula de carregamento
- b) Da pressão dentro do mecanismo de conformação por um sensor de pressão.

Esta aproximação permite a determinação e o ajuste da força do cerra-chapas com um desvio inferior a $\pm 2\%$ (Figura 52):

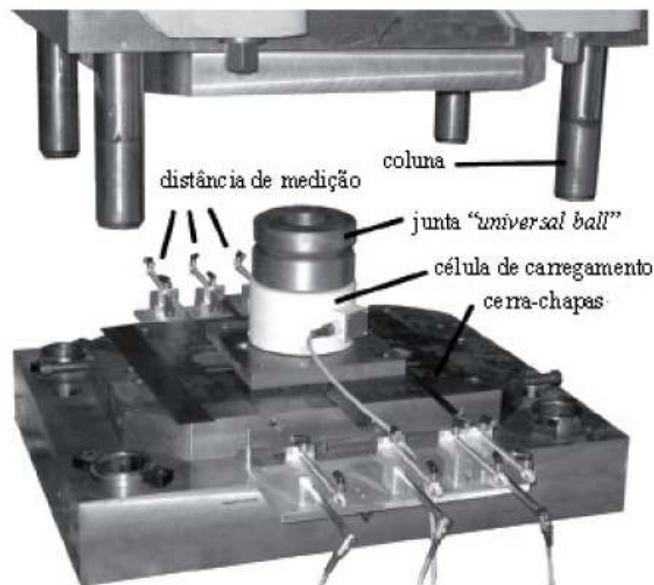


Figura 51: Ferramenta do *S-Rail*: medidor dos deslocamentos e mecanismo de calibração para a determinação da força do cerra-chapas.

Todos os ensaios foram realizados numa prensa hidráulica equipada com um mecanismo de conformação hidráulico. A velocidade média da ferramenta verificada nos ensaios foi de 30 mm/s. Para garantir a mesma posição inicial do esboço foi usado um stop mecânico (Figura 53), cuja precisão é de aproximadamente $\pm 0,25\text{mm}$.

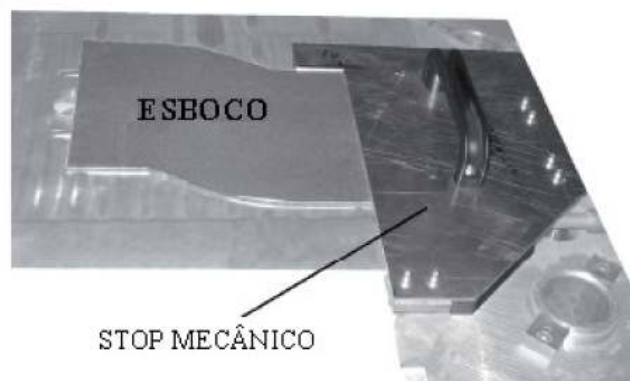


Figura 52: Stop mecânico para o posicionamento correto do esboço.

6.2. Avaliação do Retorno Elástico

Para avaliar a topologia após o retorno elástico os perfis foram cobertos por uma grelha de pontos e medidos por meio de um sistema óptico (Figura 54):



Figura 53: Perfil obtido nos ensaios experimentais.

Para fixar o perfil dentro do instrumento de medição foram usados três pontos materiais (Figura 55):

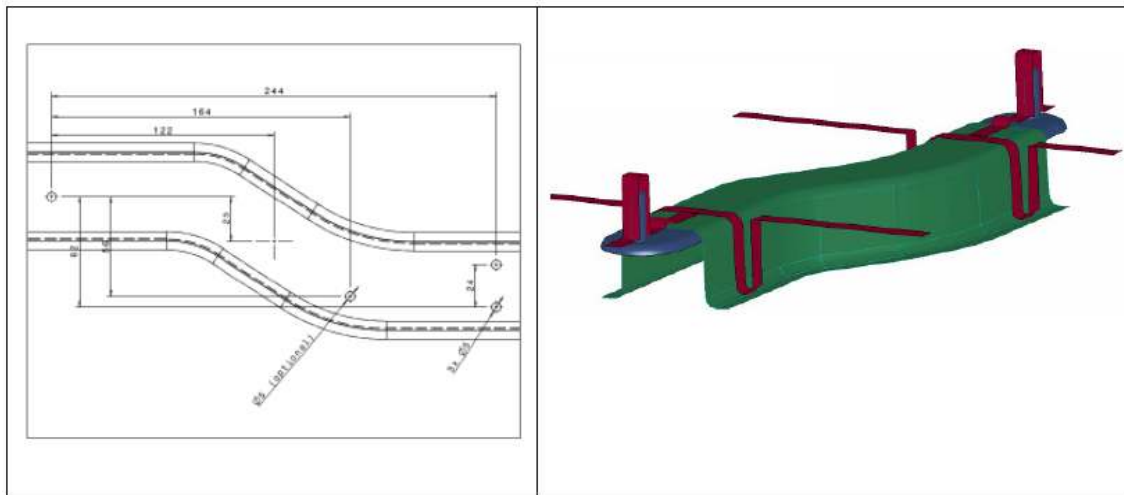


Figura 54: Localização dos furos no *S-Rail* para fixação no instrumento de medição do retorno elástico.

Os dados experimentais medidos foram passados para o sistema coordenado da ferramenta com a melhor aproximação possível à posição do punção (referência).

7. Resultados Experimentais versus Resultados Numéricos

A comparação dos resultados baseou-se na avaliação da diferença entre os resultados numéricos obtidos por cada *software* e os resultados medidos experimentalmente. Desta forma, são apresentadas de seguida todas as variáveis macro analisadas:

7.1. Avaliação da Força do Punção

Os valores da força do punção foram analisados de acordo com a distância de conformação imposta na simulação numérica: “Força do punção vs distância a BDC”, onde BDC (acrónimo de *Bottom Dead Center* – Ponto morto inferior) indicando a posição do punção no fim da fase de conformação (Figura 57). Estes dados foram organizados em gráficos e comparados com as curvas força vs distância BDC para a correta avaliação dos parâmetros de processo que mais interferem nos resultados de conformação plástica.

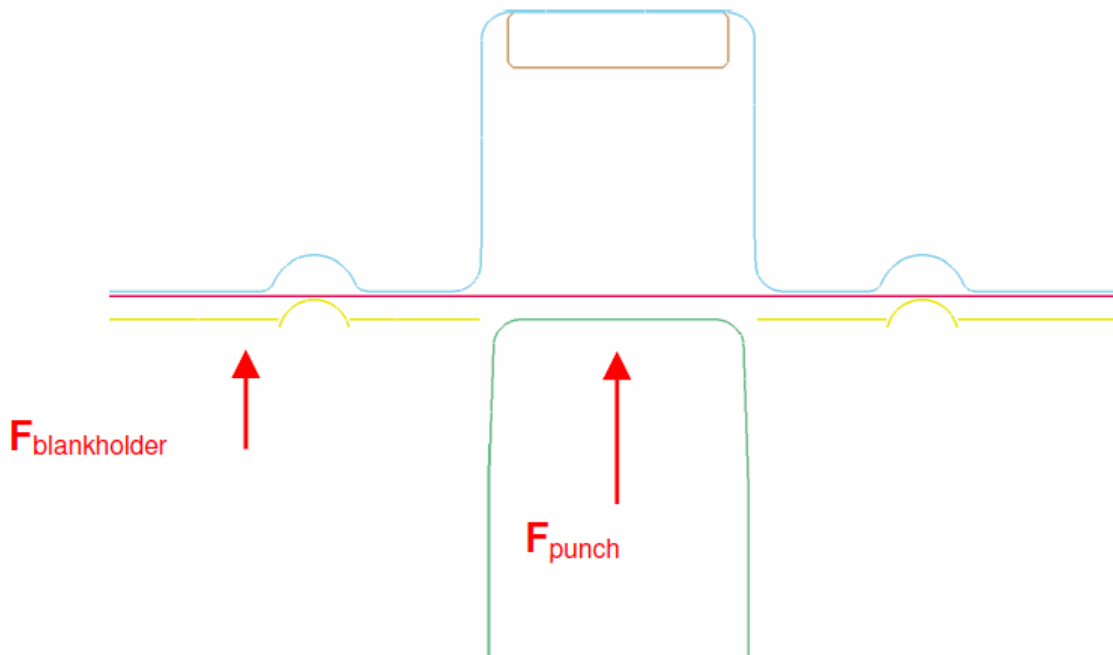


Figura 55: Ferramentas e *blank* na posição inicial, antes do início da fase de conformação

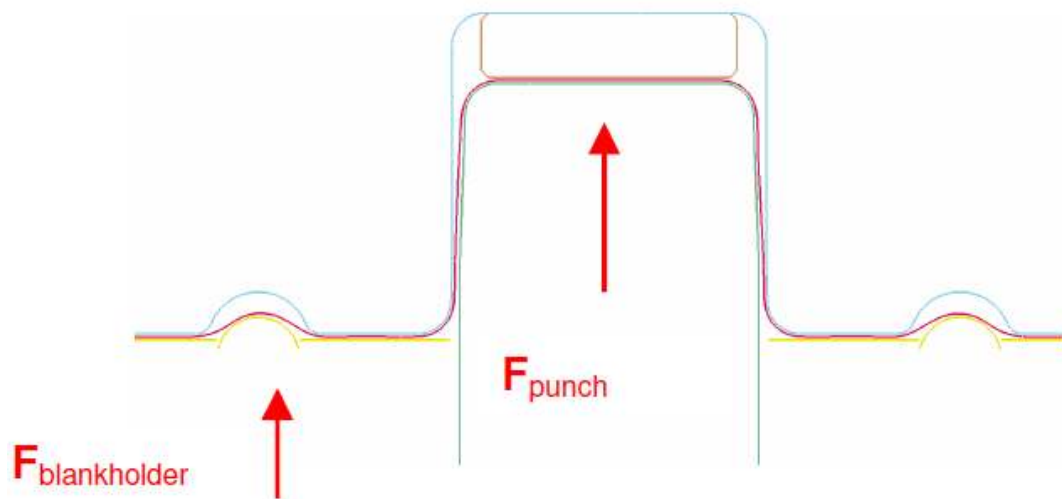


Figura 56: Ferramentas e *blank* na posição final impondo o fim da fase de conformação: quando BDC é atingido

Assim, para cada material e geometria de freio usada distinguem-se 3 curvas de força, correspondentes as 3 intensidades de força do cerra-chapas:

Gráfico 1: Forças medidas nos ensaios experimentais (HC260LAD).

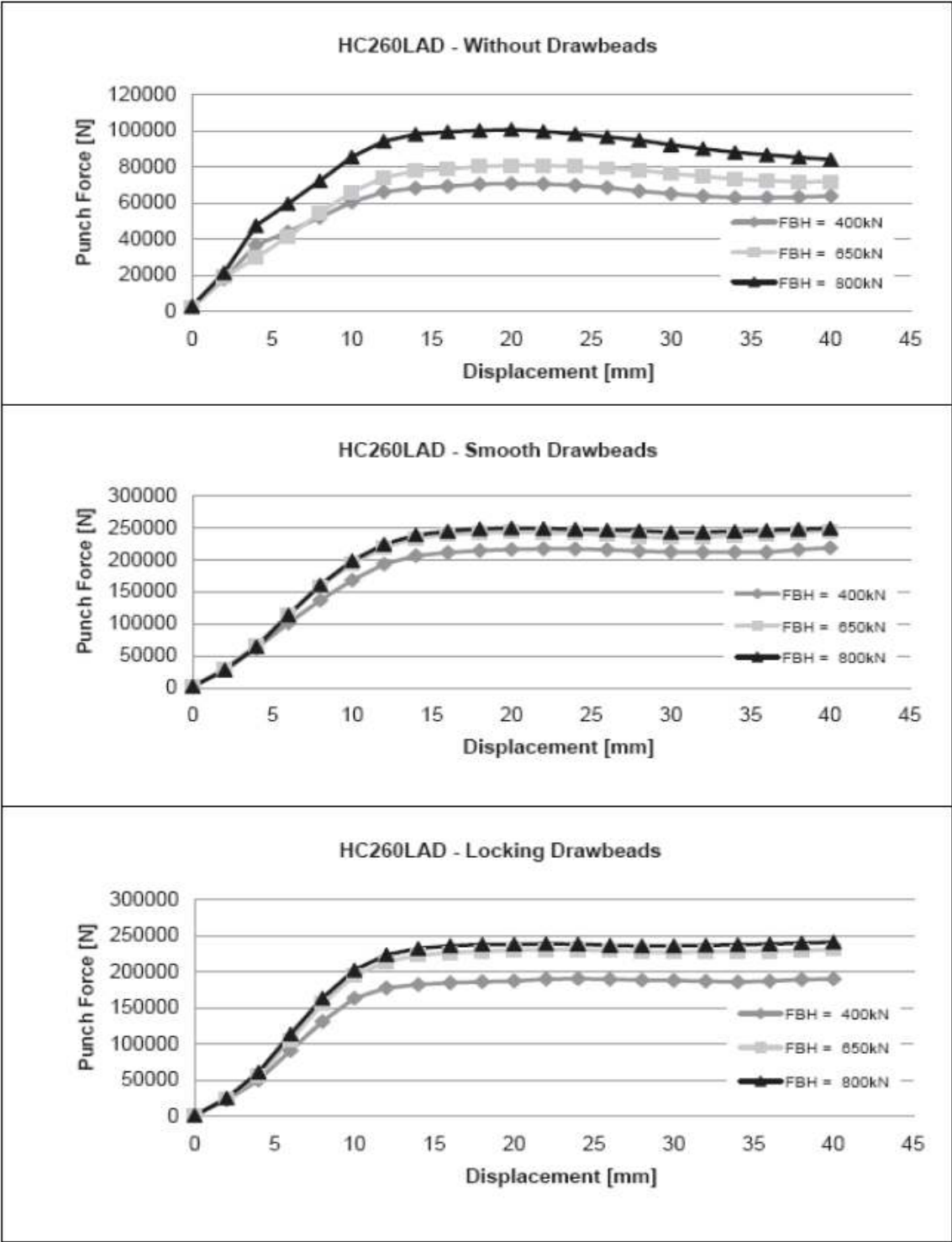
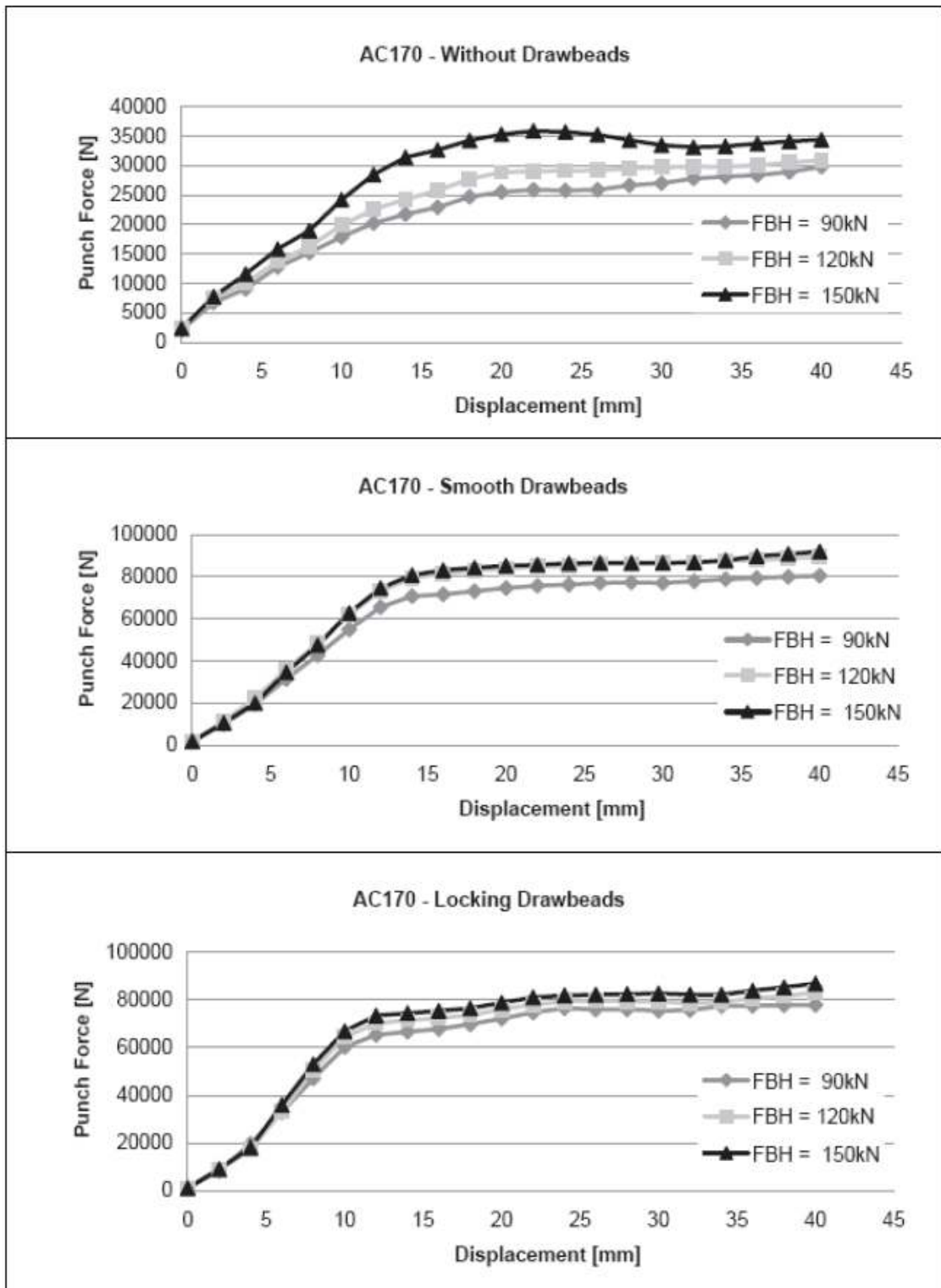


Gráfico 2: Forças medidas nos ensaios experimentais (AC170).



Para cada provete analisado, de acordo com as especificações iniciais do *Benchmark*, os gráficos seguintes apresentam os resultados para as análises numéricas, correspondentes apenas à força de cerra-chapas de 400 kN (aço) e 90 kN (alumínio):

Gráfico 3: Forças medidas nos ensaios numéricos – LC1 (HC260LAD).

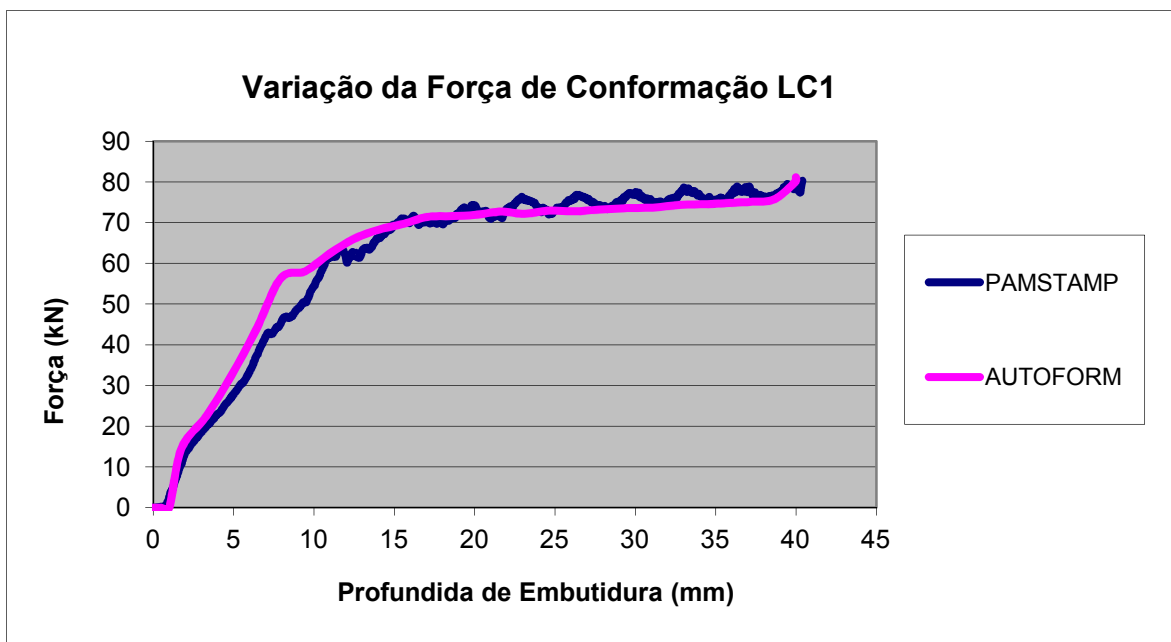
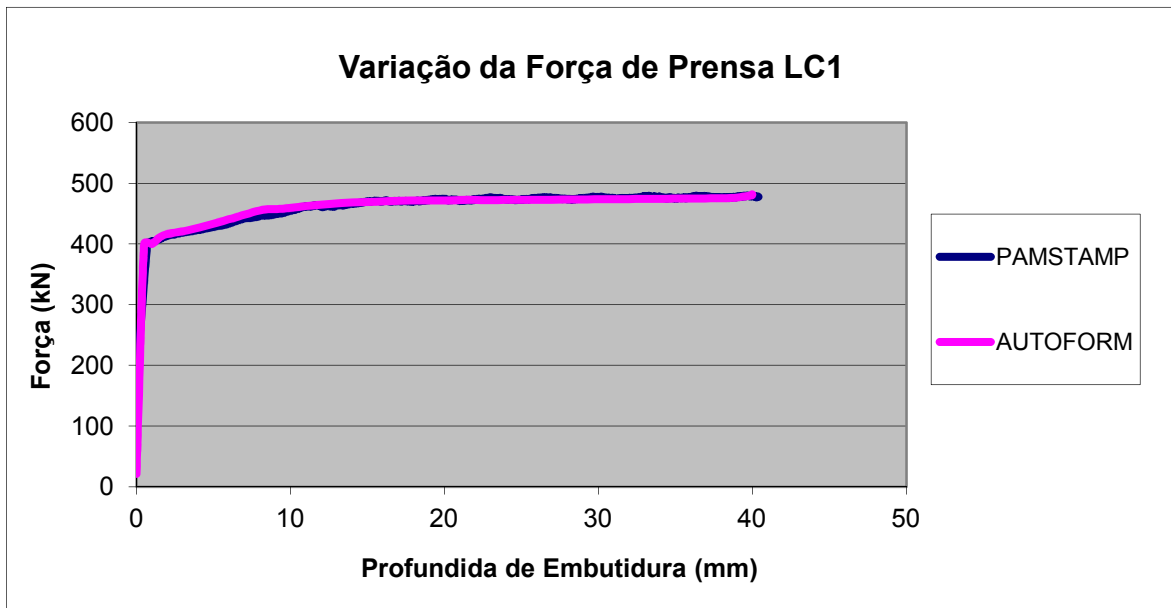


Gráfico 4: Forças medidas nos ensaios numéricos – LC1 (AC170).

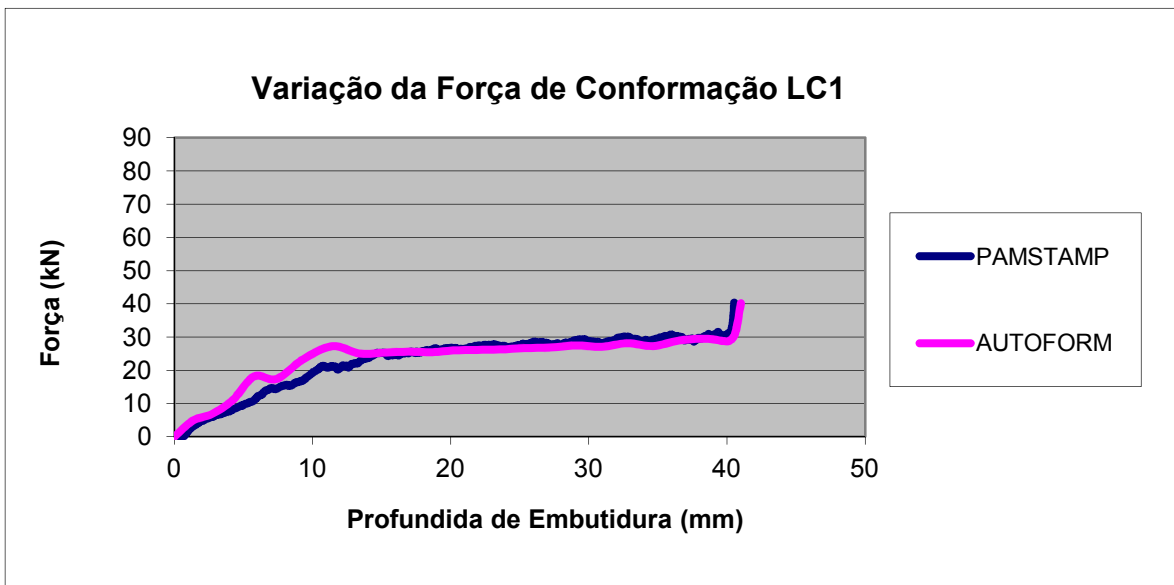
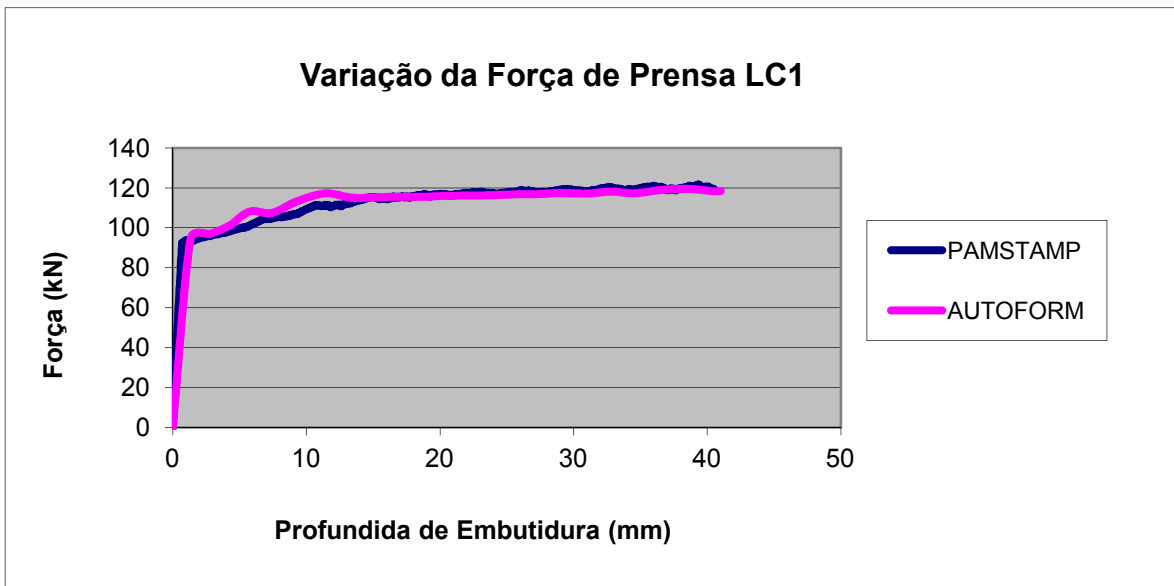


Gráfico 5: Forças medidas nos ensaios numéricos – LC2 (HC260LAD).

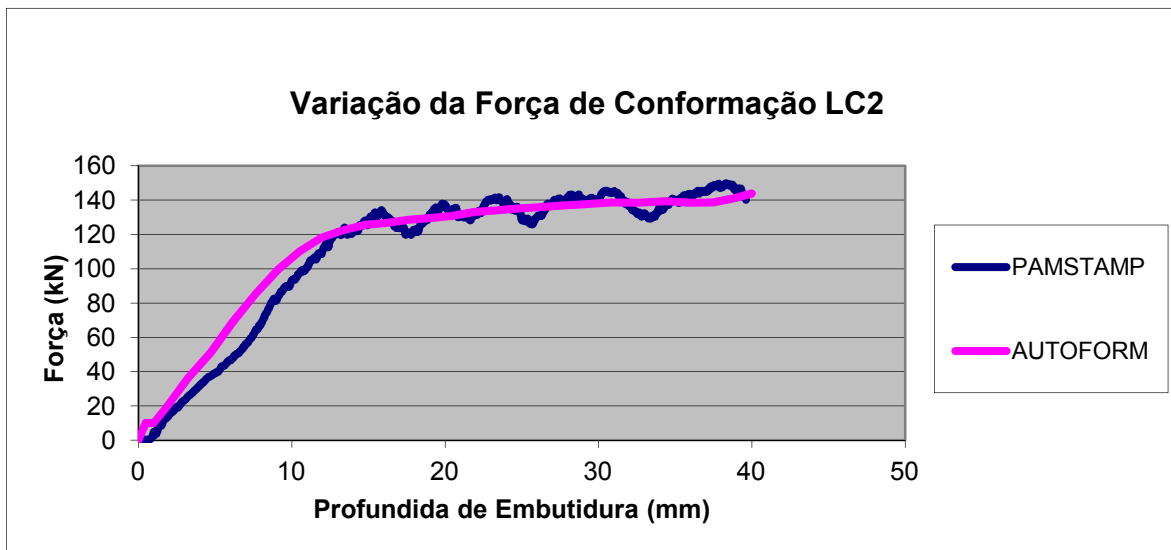
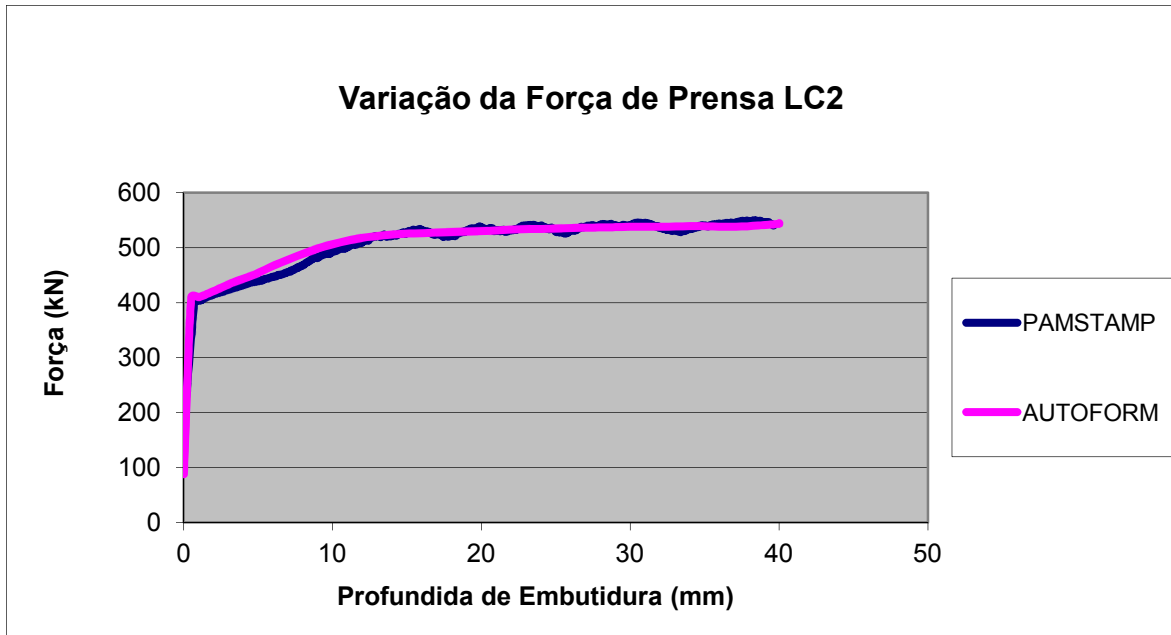


Gráfico 6: Forças medidas nos ensaios numéricos – LC2 (AC170).

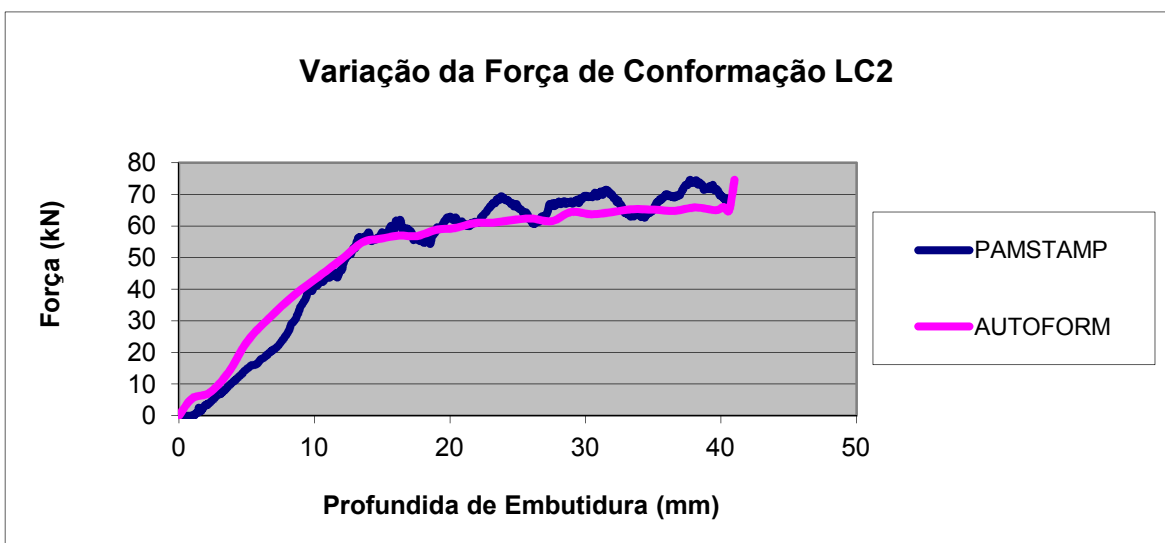
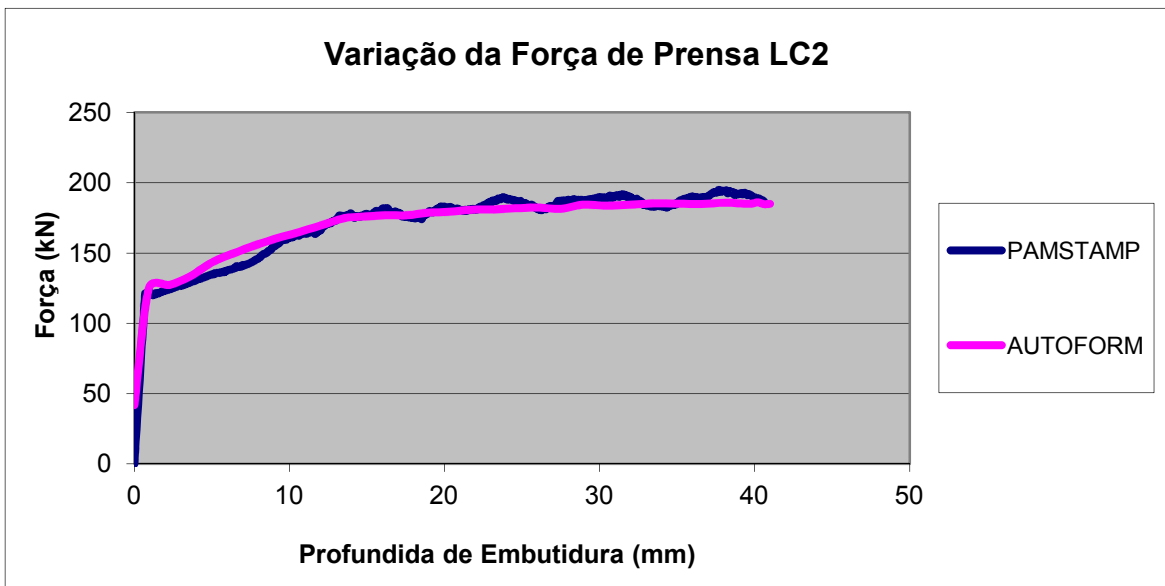


Gráfico 7: Forças medidas nos ensaios numéricos – LC3 (HC260LAD).

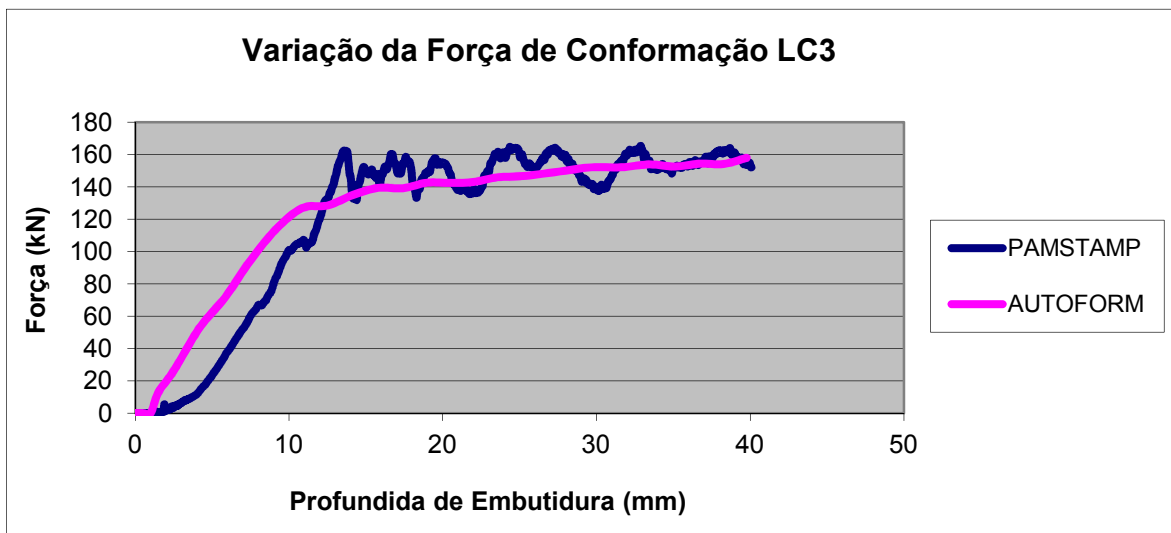
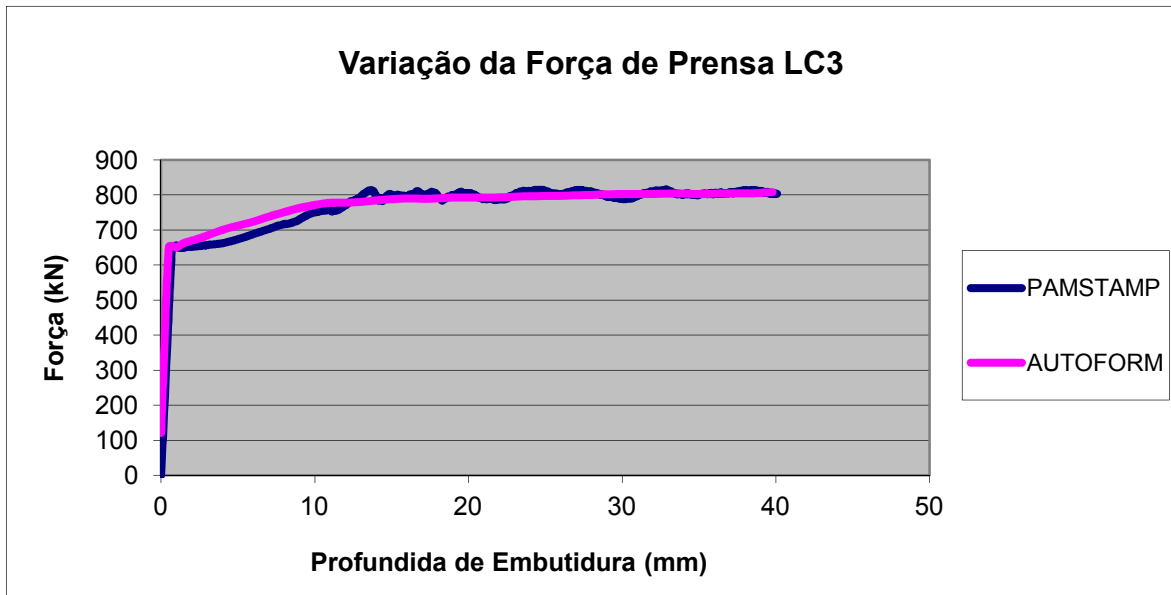


Gráfico 8: Forças medidas nos ensaios numéricos – LC3 (AC170).

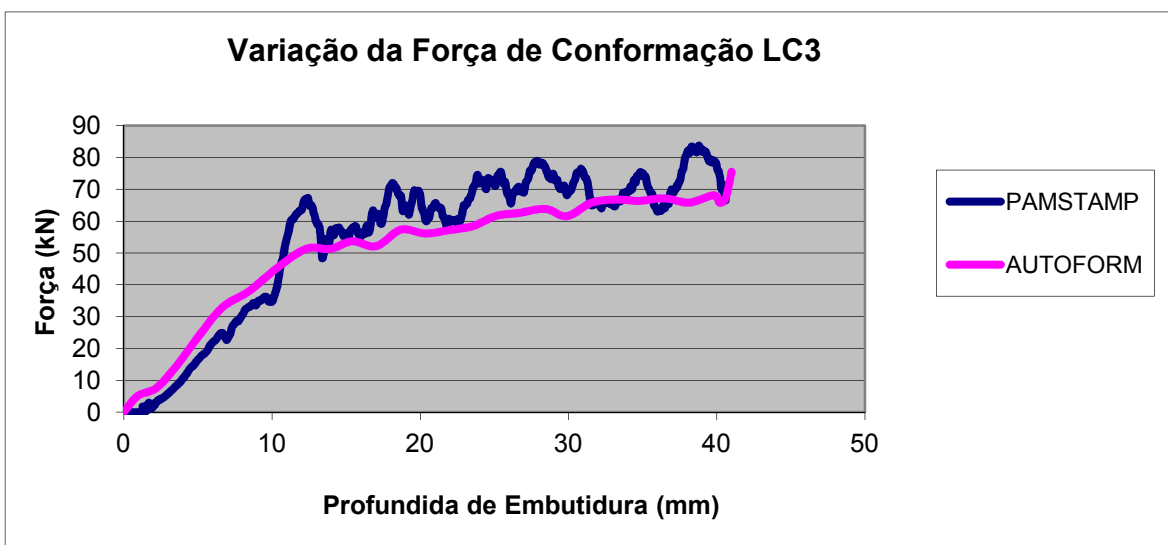
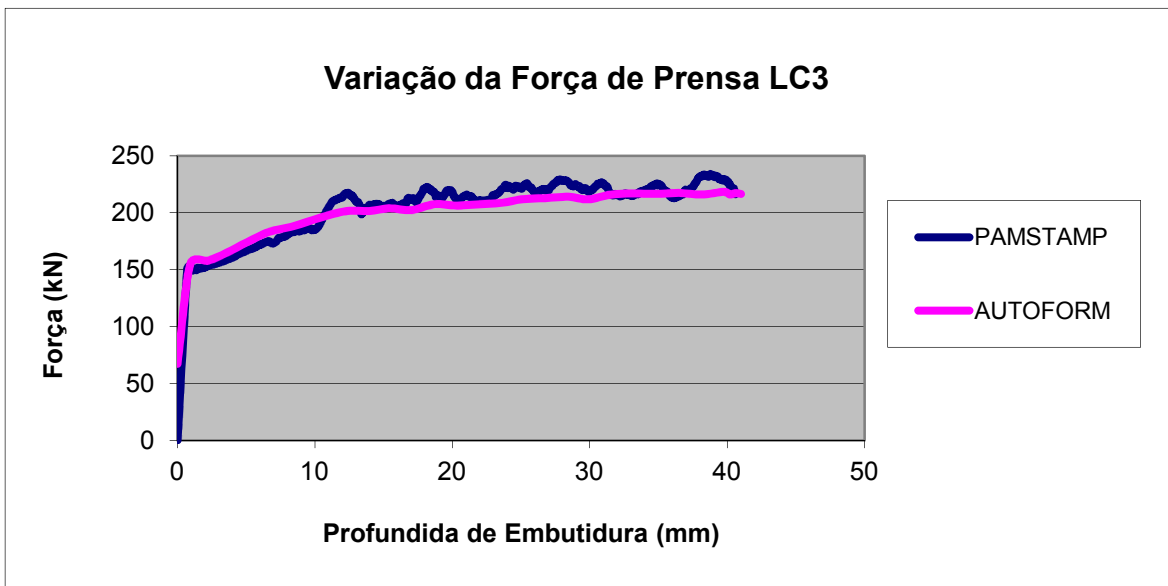


Gráfico 9: Comparação da força de prensa de todos os modelos HC260LAD.

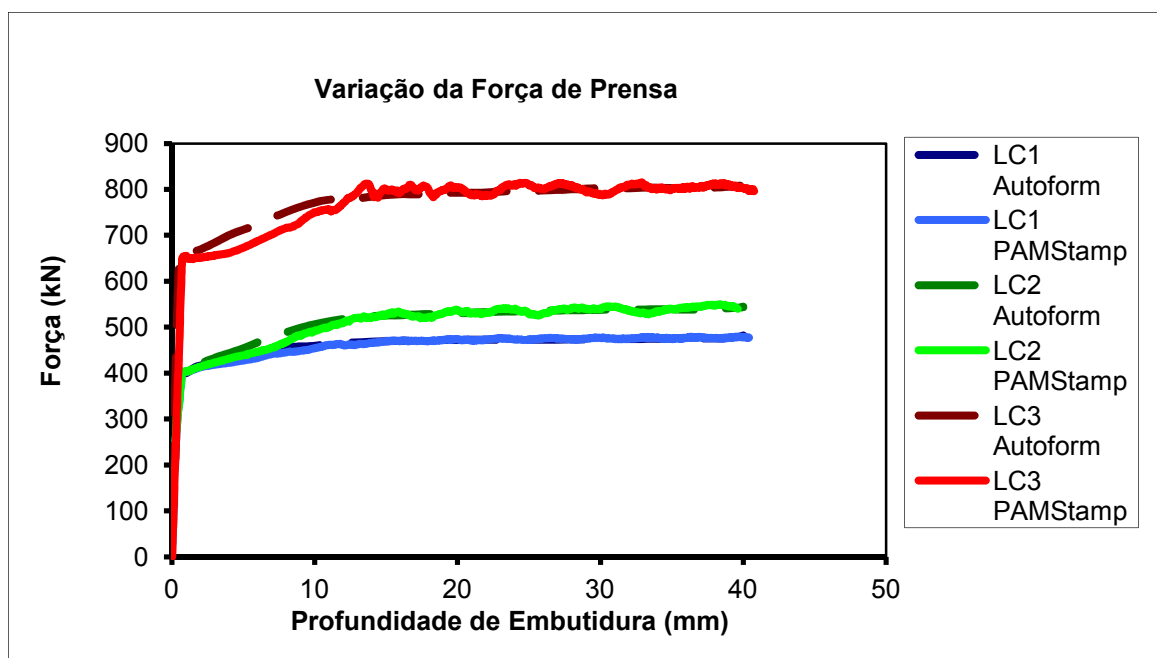
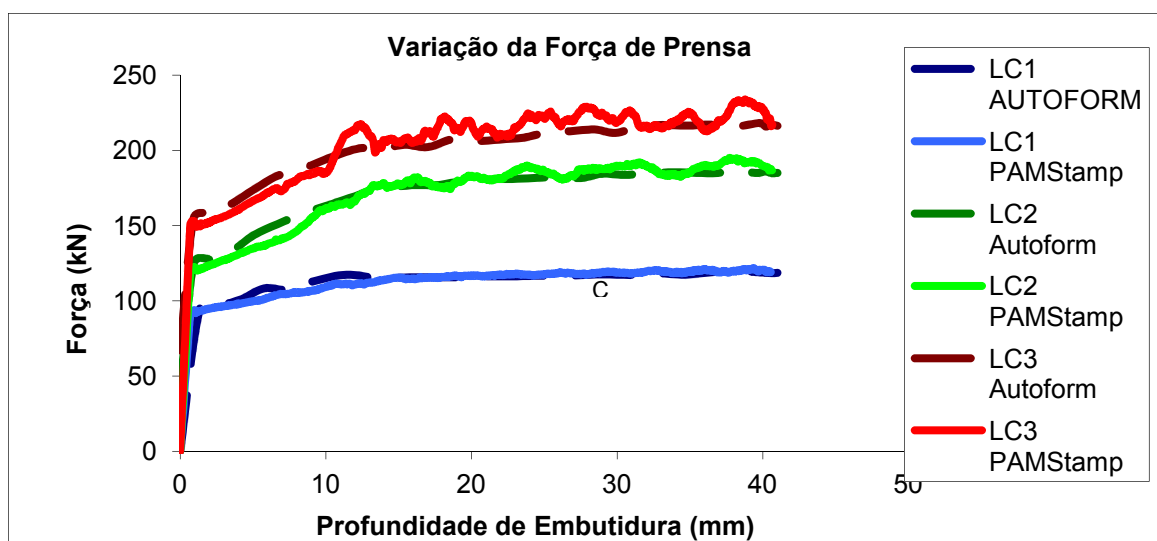


Gráfico 10: Comparação da força de prensa de todos os modelos AC170.



Através da análise dos gráficos acima apresentados, podemos verificar um decréscimo na intensidade da força no fim da fase de conformação para o caso sem freio.

Como se pode constatar, este efeito é tanto maior quanto maior a intensidade da força do cerra-chapas.

Uma vez que, na ausência de freios, as forças de retenção são essencialmente devidas à componente de atrito, intrínseca às condições de contacto, este comportamento era previsível. De facto, à medida que o esboço escoia para o interior da matriz, assiste-se a uma contínua diminuição da área de contacto, o que, por sua vez, faz aumentar a pressão de contacto, já que a força do cerra-chapas se assume constante ao longo do tempo. O aumento da pressão de contacto parece contribuir para uma diminuição do coeficiente de atrito, que se reflete na redução da intensidade da força de conformação, como podemos verificar no gráfico 9 e no gráfico 10.

Este parâmetro torna-se bastante importante do ponto de vista industrial, uma vez que estas forças de conformação avaliadas anteriormente irão ter um peso considerável aquando da escolha do tipo de prensa a utilizar, na produção deste tipo de componentes. O sobredimensionamento das forças das prensas a serem utilizadas, torna-se muitas vezes um encargo pesado do ponto de vista financeiro para as empresas. Uma correta estimativa destes valores, pode representar muitas vezes ganhos significativos no final de cada projeto.

7.2. Avaliação do *Draw-in*

De acordo com as normas estabelecidas no *Benchmark* foi requerida a avaliação dos deslocamentos em 8 secções transversais ao esboço no fim da fase de conformação, conforme representado na figura 58:

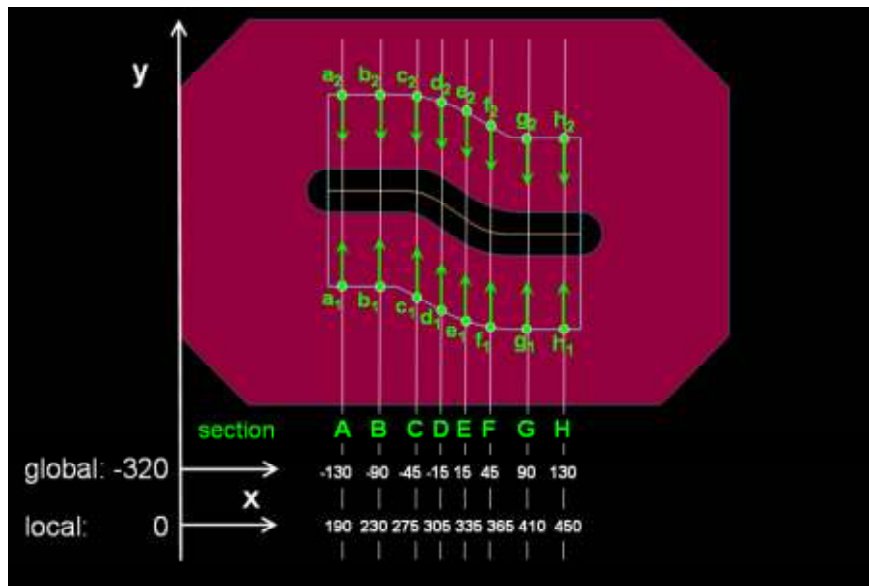


Figura 57: Secções para as quais se conseguiram resultados experimentais na medição do *draw-in*

Devido às dificuldades no posicionamento do equipamento de medição durante os ensaios experimentais, reduziu-se o número de secções para 5. Assim, os resultados experimentais obtidos para a avaliação do *draw-in* nas 5 secções representados nos gráficos 11 e 12:

Gráfico 11: *Draw-in* medido nos ensaios experimentais (HC260LAD).

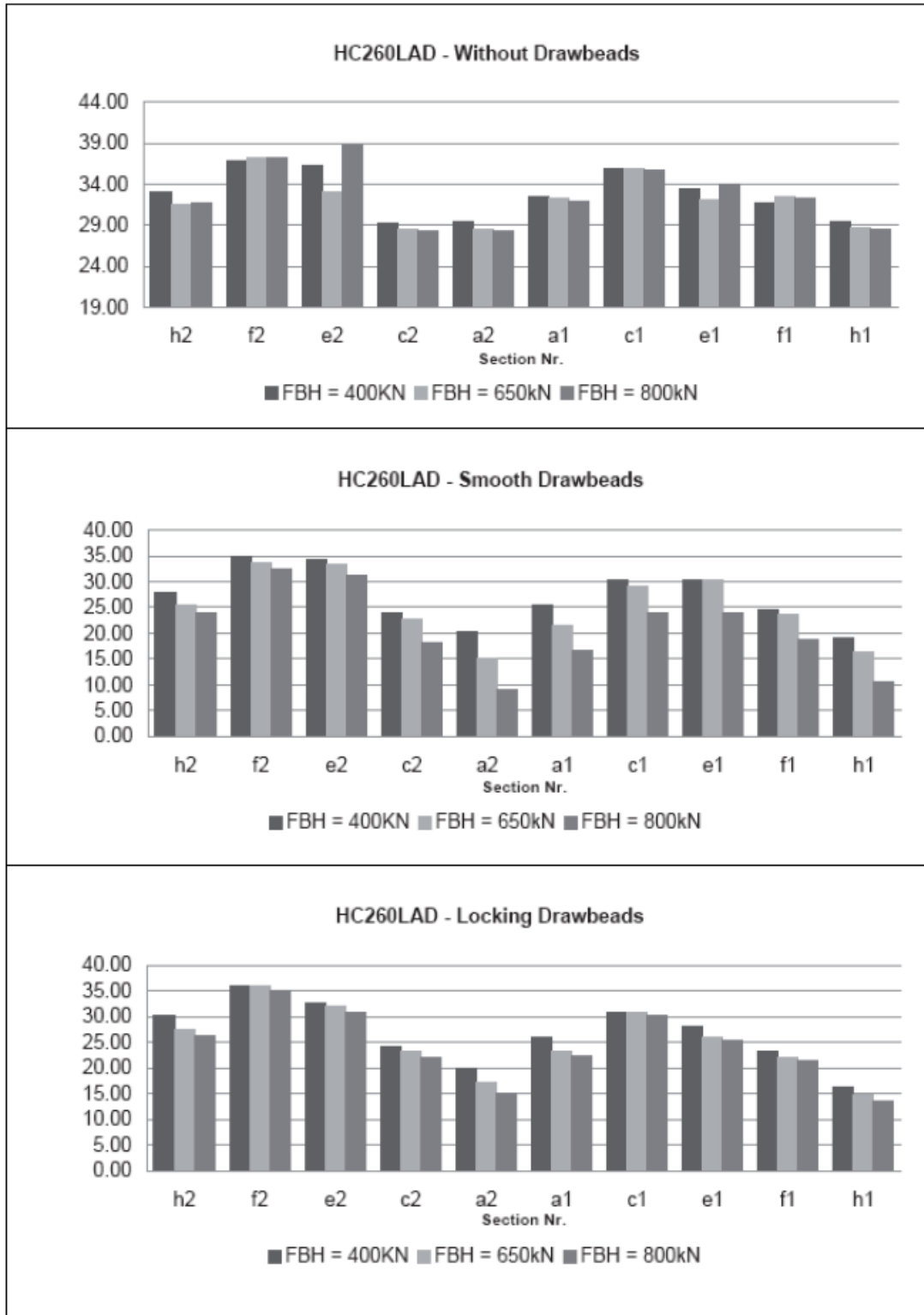
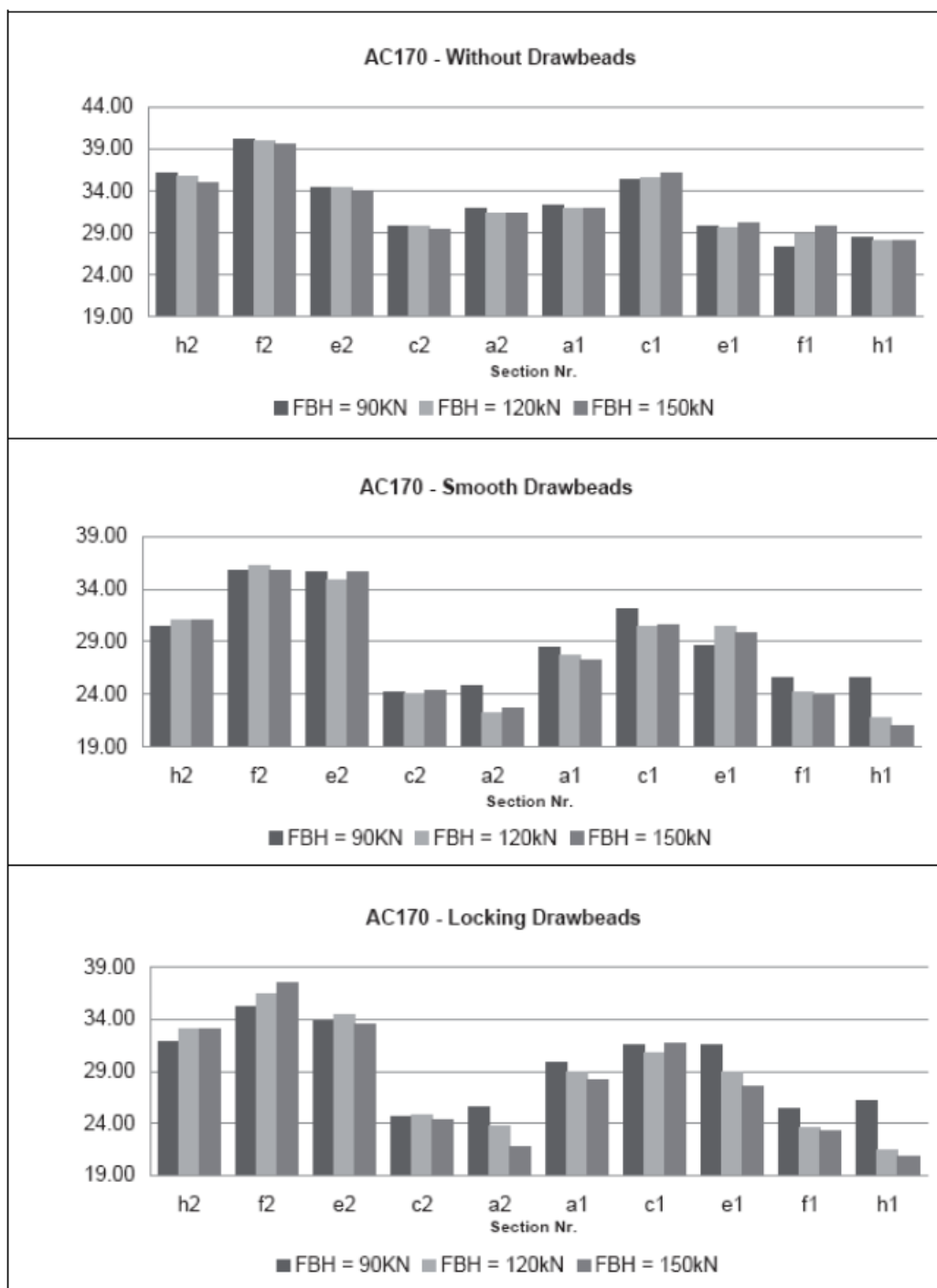


Gráfico 12: *Draw-in* medido nos ensaios experimentais (AC170).

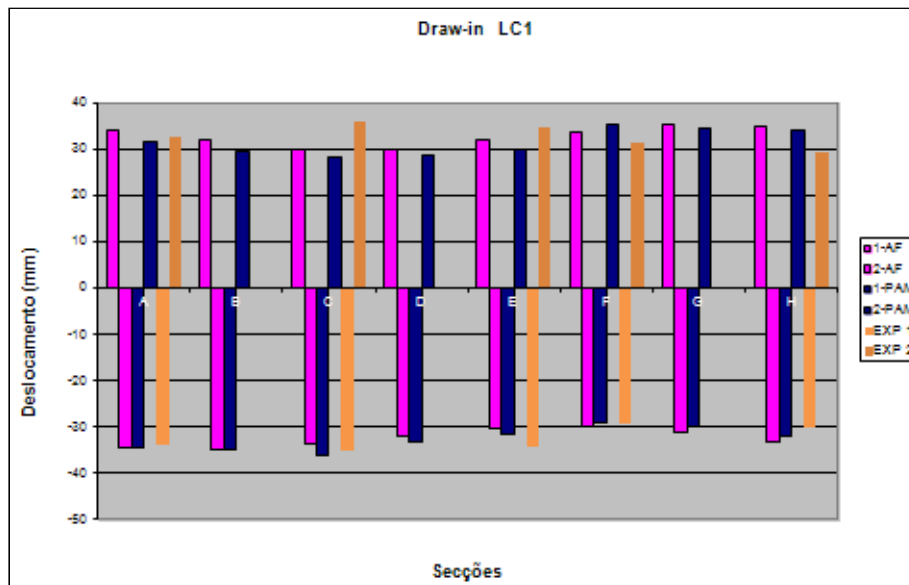


Os resultados experimentais mostram que, na prática, as zonas propensas a maior escoamento, estão compreendidas entre a secção C e F. Isto parece razoável já que nessas zonas o material é mais solicitado a esforços multi-direcionais, presentes no plano do esboço, que “repuxam” e “tracionam” a chapa para o interior da matriz, obrigando-a a um maior escoamento (gráficos 11 e 12).

Contudo, existe uma tendência para os valores numéricos serem inferiores aos experimentais nessas zonas. Desta forma, prevê-se que nesta zona, e em qualquer caso, o “escoamento físico” será sempre superior ao “escoamento numérico”. Ora, como já foi dito, esta é uma área de maior sollicitação, ficando a malha mais sujeita a efeitos de locking, o que lhe confere um comportamento mais rígido, logo menos propenso ao escoamento. Para ultrapassar tal dificuldade considera-se que se deveria proceder a um maior refinamento desta zona. Este refinamento, a nível industrial, comportaria um custo computacional elevado e claramente desnecessário face à boa aproximação dos resultados.

Os gráficos 13-18 apresentam os resultados numéricos para as 8 secções analisadas, com as respectivas tabelas comparativas.

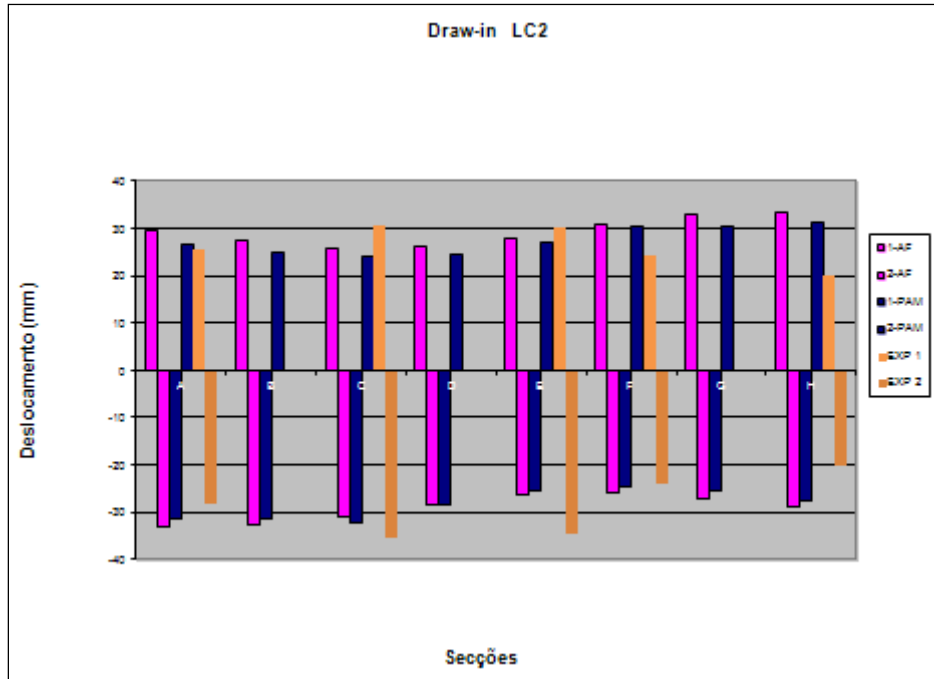
Gráfico 13: *Draw-in* medido nos ensaios numéricos (HC260LAD) LC1.



		A (%)	C (%)	E (%)	F (%)	H (%)
PAMStamp	1	-1,9	-3,4	7,5	-0,3	-5,6
Autoform	1	-1,6	3,8	10,5	-2,4	-9,6
PAMStamp	2	2,7	21,9	14,2	-12,8	-16,6
Autoform	2	-4,8	17,1	8,4	-8,1	-19,5

Tabela 9: Tabela com os desvios de cada modelo em relação ao ensaio experimental LC1 HC260LAD

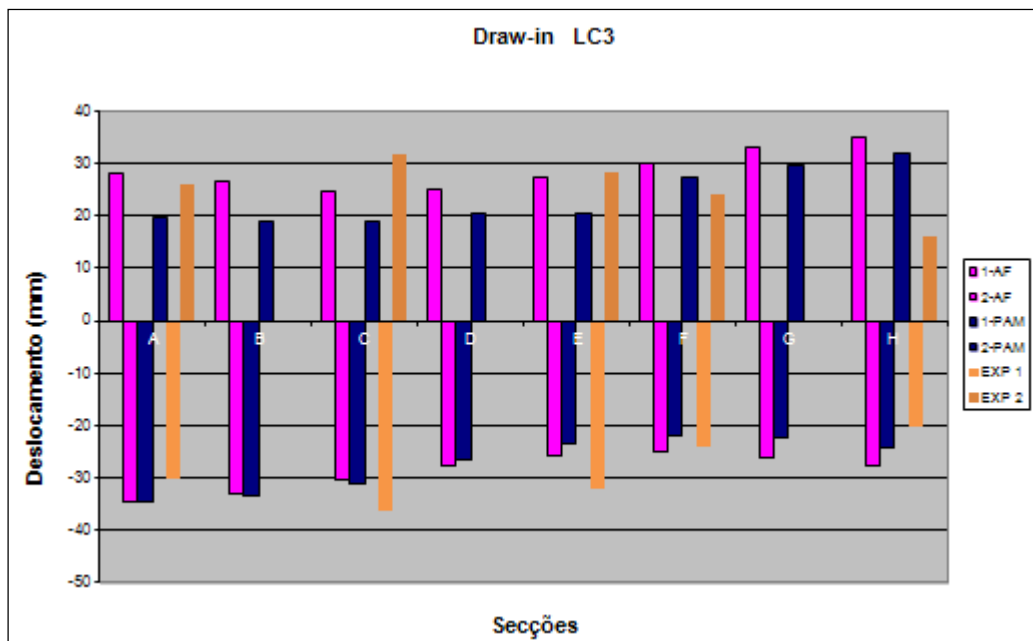
Gráfico 14: *Draw-in* medido nos ensaios numéricos (HC260LAD) LC2



		A (%)	C (%)	E (%)	F (%)	H (%)
PAMStamp	1	-4,8	21,8	11,3	-26,2	-57,3
Autoform	1	-15,2	15,4	7,3	-27,3	-67,7
PAMStamp	2	-11,4	8,8	26,2	-3,2	-37,6
Autoform	2	-17,2	12,7	23,4	-8,6	-43,9

Tabela 10: Tabela com os desvios de cada modelo em relação ao ensaio experimental LC2
HC260LAD

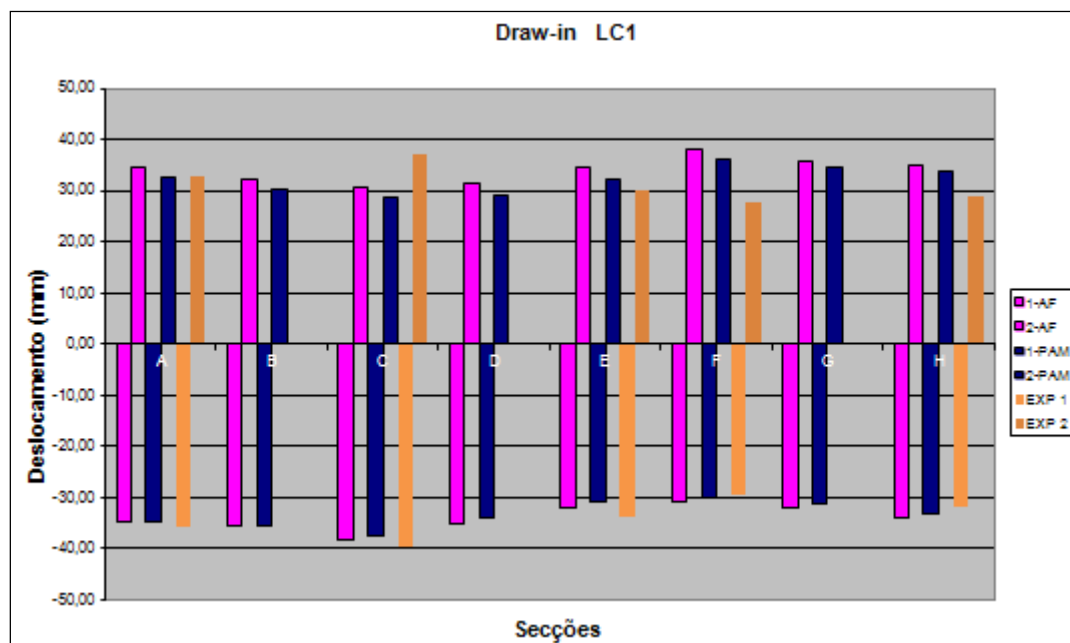
Gráfico 15: *Draw-in* medido nos ensaios numéricos (HC260LAD) LC3.



		A (%)	C (%)	E (%)	F (%)	H (%)
PAMStamp	1	-14,6	14,7	27,3	8,1	-19,1
Autoform	1	-15,2	15,4	7,3	-27,3	-67,7
PAMStamp	2	24,9	40,0	27,9	-13,9	-99,6
Autoform	2	-8,3	21,7	2,6	-25,7	-117,7

Tabela 11: Tabela com os desvios de cada modelo em relação ao ensaio experimental LC3 HC260LAD

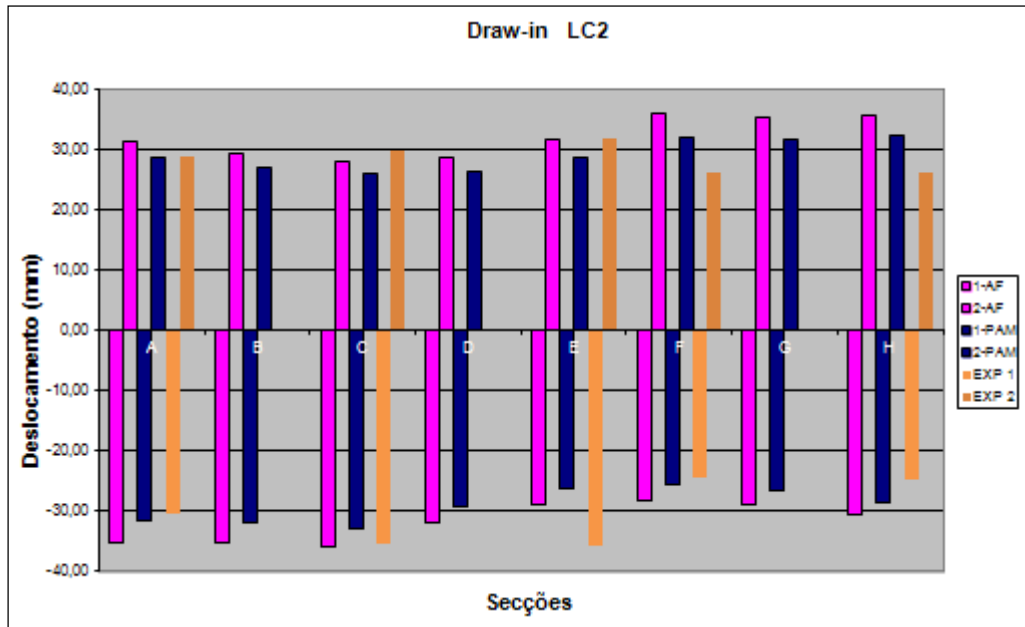
Gráfico 16: *Draw-in* medido nos ensaios numéricos (AC170) LC1



		A (%)	C (%)	E (%)	F (%)	H (%)
PAMStamp	1	2,8	5,5	8,6	-2,3	-5,2
Autoform	1	2,8	3,4	5,7	-5,0	-7,4
PAMStamp	2	0,9	22,2	-6,3	-30,7	-17,9
Autoform	2	-4,6	16,9	-14,0	-38,2	-21,6

Tabela 12: Tabela com os desvios de cada modelo em relação ao ensaio experimental LC1 AC170

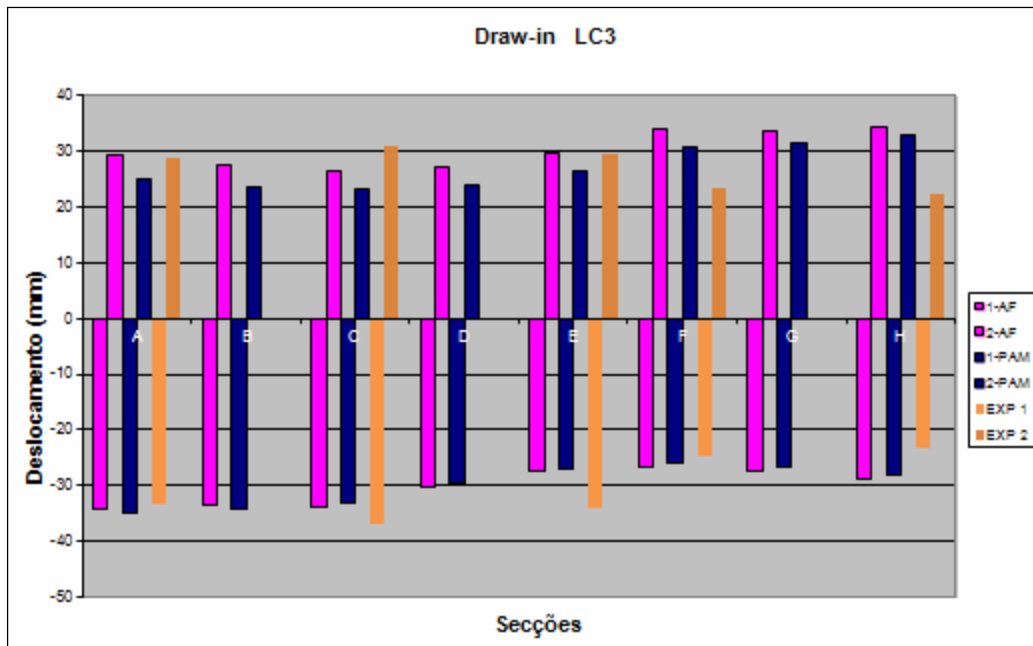
Gráfico 17: Draw-in medido nos ensaios numéricos (AC170) LC2.



		A (%)	C (%)	E (%)	F (%)	H (%)
PAMStamp	1	-3,6	6,8	26,2	-5,1	-16,4
Autoform	1	-15,6	-1,1	18,8	-15,4	-24,6
PAMStamp	2	0,2	13,6	10,8	-23,2	-23,1
Autoform	2	-8,5	6,2	1,4	-38,5	-36,4

Tabela 13: Tabela com os desvios de cada modelo em relação ao ensaio experimental LC2 AC170

Gráfico 18: *Draw-in* medido nos ensaios numéricos (AC170) LC3



		A (%)	C (%)	E (%)	F (%)	H (%)
PAMStamp	1	-10,3	2,9	18,2	-5,9	-11,1
Autoform	1	-7,6	1,3	16,5	-8,0	-13,6
PAMStamp	2	16,3	25,4	13,6	-22,6	-24,4
Autoform	2	1,9	14,6	3,5	-34,3	-29,9

Tabela 14: Tabela com os desvios de cada modelo em relação ao ensaio experimental LC3 AC170

Os gráficos 13 e 16 revelam-nos que para o caso sem freio não existem variações significativas no *draw-in* apesar das diferenças na intensidade de força do cerra-chapas. Mesmo assim, o PAMStamp apresentou valores com desvios inferiores ao Autoform.

Por outro lado, é notório que com a aplicação do freio a sensibilidade a intensidade da força do cerra-chapas aumenta. É de salientar que todas as geometrias promovem a tendência para o mesmo tipo de escoamento diferenciado ao longo das secções.

Para o caso com freios suaves, gráfico 14 e 17, podemos verificar que os resultados também sofrem uma tendência equilibrada entre os *softwares*.

Para o caso com freios de retenção, gráfico 15 e 18, o Autoform mostrou menores desvios face aos resultados experimentais.

A avaliação dos melhores resultados obtidos entre os *softwares* utilizados, é um dos principais objetivos, uma vez que este também se torna num dos parâmetros de processo bastante importante, do ponto de vista industrial.

Assim sendo, é possível verificar que os valores apresentados pelo Autoform e pelo PAMStamp mostram-se compatíveis relativamente à entrada de material, em todas as secções, embora haja algumas diferenças, a tendência é visivelmente a mesma.

Ao nível de rapidez de cálculo, o Autoform destaca-se pela adoção de um algoritmo com base puramente implícita e estática, o que confere estabilidade numérica e um menor desvio na previsão da deformação plástica.

As leis constitutivas usadas nas simulações também têm influência, uma vez que fazem uso de um critério de plasticidade recente para descrever o comportamento anisotrópico do material. Todos estes pontos mencionados, aliados a um refinamento razoável já existente, foram suficientes para garantir o comportamento plástico mais próximo do real face às solicitações mecânicas sofridas pelo material, devolvendo os melhores valores para o *draw-in*.

A correta previsão das forças de conformação tem uma íntima ligação com a previsão do *draw-in* sendo que, o escoamento sofrido pelo material é resultado das forças de retenção existentes que, por sua vez, se reflectem no valor da força exercida pelo punção. Contudo, este não é o único fenómeno envolvido, já que se o material é sujeito a solicitações multi-axiais. Por conseguinte, o escoamento dependerá não apenas do tipo de solicitação mecânica envolvida como também da resposta plástica do próprio material, ou, por outras palavras, da sua capacidade de deformação.

Desta forma, justifica-se a importância deste parâmetro, uma vez que a redução do consumo de matéria-prima tem-se tornado uma constante na indústria automóvel.

7.3. Avaliação da Maior e Menor Deformação e Redução de Espessura

Conforme referido anteriormente, devido a quantidade elevada de dados numéricos relativos a análise das variáveis macro, o autor do *Benchmark* considerou apropriado focar os casos particulares e assim dispensar uma grande quantidade de resultados desnecessários, que apenas levaria a repetibilidade das conclusões obtidas.

Após a fase de conformação e corte foi calculada a distribuição das deformações logarítmicas e da espessura em 4 secções específicas dos perfis obtidos (Figura 59).

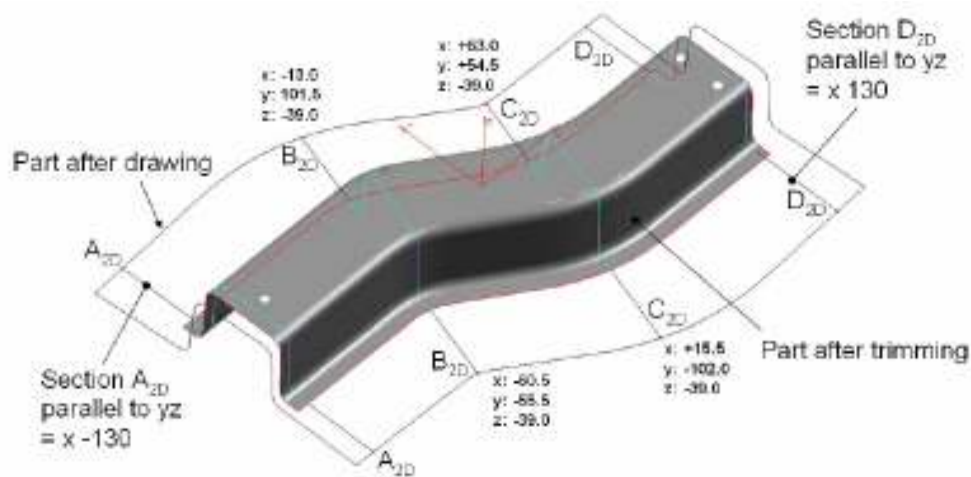


Figura 58: Representação das secções para estudo das variáveis macro

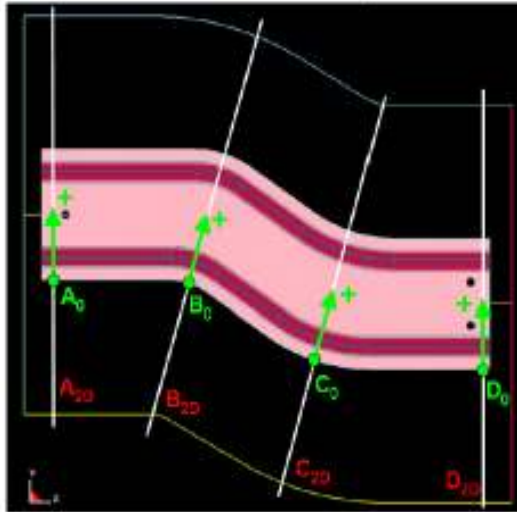


Figura 59: Representação das secções para estudo das variáveis macro.

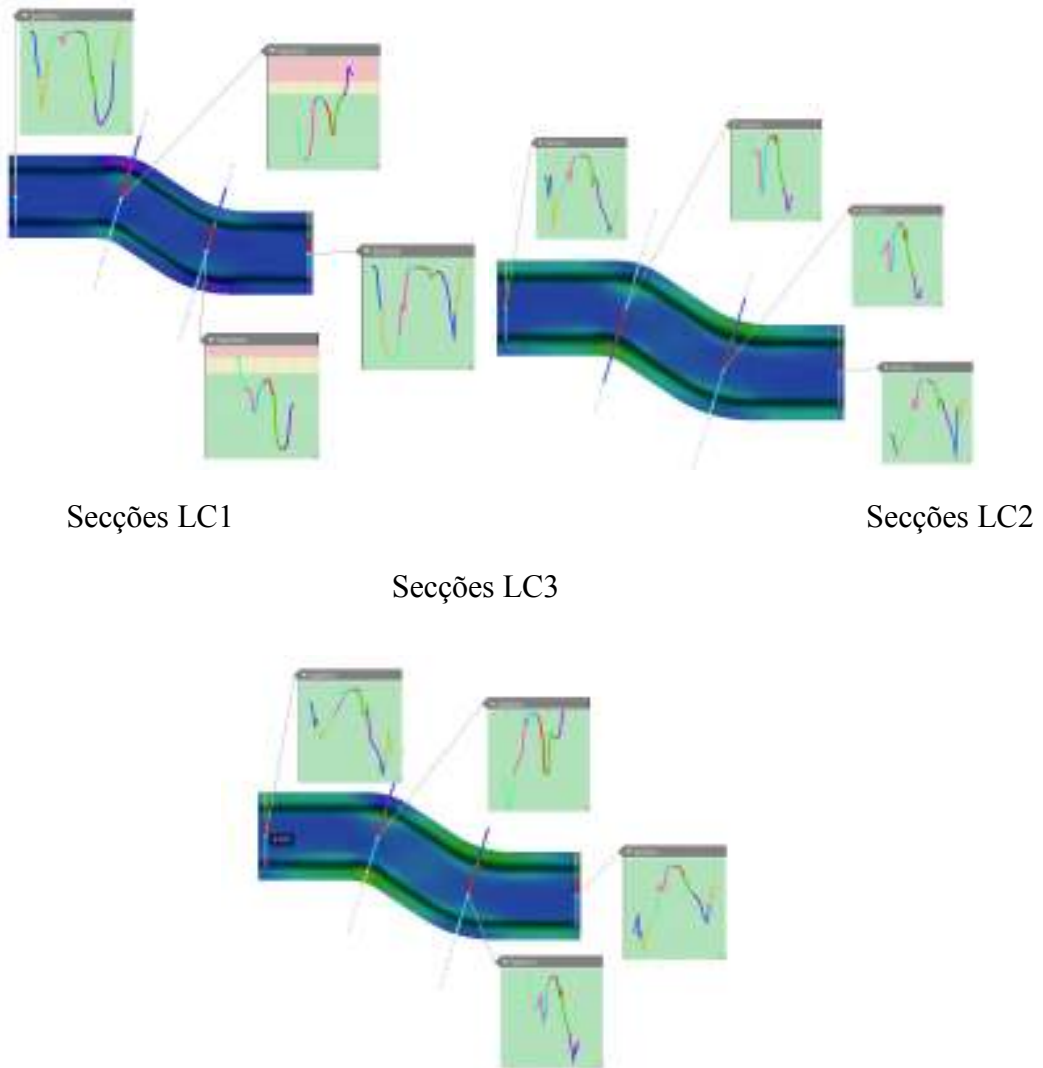


Figura 60: Representação das secções para estudo das variáveis macro

Os gráficos que representam os resultados obtidos numericamente para a distribuição da maior e menor deformação logarítmicas em função da distância geodésica das secções anteriormente apresentadas, encontram-se em anexo, pois não foi possível comparar os resultados numéricos com os resultados experimentais.

Estes resultados correspondem respectivamente ao aço HC260LAD e a liga AC170, respectivamente. A distância geodésica é medida a partir do ponto A0 e acompanha todo o perfil resultante do corte transversal até ao ponto extremo oposto (Figura 60) e assim sucessivamente.

A maior deformação logarítmica resulta da integração da deformação infinitesimal medida na direção de escoamento; a menor deformação logarítmica é conseguida quando se integra a deformação infinitesimal na direção perpendicular a anterior no plano da chapa. Esta definição genérica permite entender os picos de deformação logarítmica representados. Uma visão global permite identificar três zonas distintas em todas as figuras. Duas com picos de deformação e outra central onde os valores de deformação caem abruptamente. Os picos correspondem claramente a zonas de deformação mais intensa, como os freios e as zonas de concordância das ferramentas, enquanto a zona central traduz o estado do material localizado sobre a zona plana do punção, muito menos solicitado.

Mais atentamente, nota-se que os gráficos 19-21 (ver anexos), referentes aos casos sem freios, apresentam dois picos relativos a maior deformação logarítmicas, antes e depois da região associada a zona plana do punção, seguramente associadas as concordâncias da matriz e do punção. Nos gráficos 22-30 (ver anexos) surgem mais dois picos, relativos a mesma variável, que indiciam a existência dos freios, já que a dobragem da chapa nestas zonas promove dois ciclos flexão/deflexão por passagem.

Tanto a maior como a menor deformação (*Minor and Major Strain*) relacionam-se diretamente com o estiramento do material, o que favorece uma melhor avaliação dos limites de conformabilidade, importantes na definição da factibilidade do produto. Esta, por sua vez, encontra-se limitada pelos fenómenos mais comuns visíveis no final de cada uma das operações de estampagem, roturas e rugas, sendo duas das maiores preocupações das empresas fornecedoras de componentes estampados para a indústria automóvel.

Neste seguimento, quanto maior for a capacidade de deteção e resolução destes fenómenos, maior é a competitividade da empresa, face ao restante mercado.

7.4. Distribuição das Espessuras antes da Recuperação Elástica

Tal como para a distribuição da maior e menor deformação logarítmicas, os resultados numéricos para a distribuição das espessuras antes do retorno elástico, encontram-se em Anexo (Gráfico 31), pois não foi possível comparar os resultados numéricos com os resultados experimentais.

Este também é um parâmetro bastante importante uma vez que do ponto de vista industrial, torna-se indispensável para a previsão e prevenção de roturas, levando à redução do número de iterações no que toca à alteração de *design* dos componentes.

Como é possível verificar nas imagens dos gráficos em anexo, os resultados dos dois *softwares* seguem uma mesma tendência, mesmo no que se refere a pequenos efeitos, como é o caso de aumento ou redução pontuais da espessura, em determinados locais do provete.

7.5. Avaliação da Recuperação Elástica

Relativamente ao cálculo da recuperação elástica, as condições de fronteira aplicadas são muito importantes. São removidas as ferramentas e aplicadas as condições de fronteira a três nós do esboço, de forma a impedir a ocorrência de movimentos de corpo rígido. A figura 62 mostra a localização dos nós e respectivas condições aplicadas.

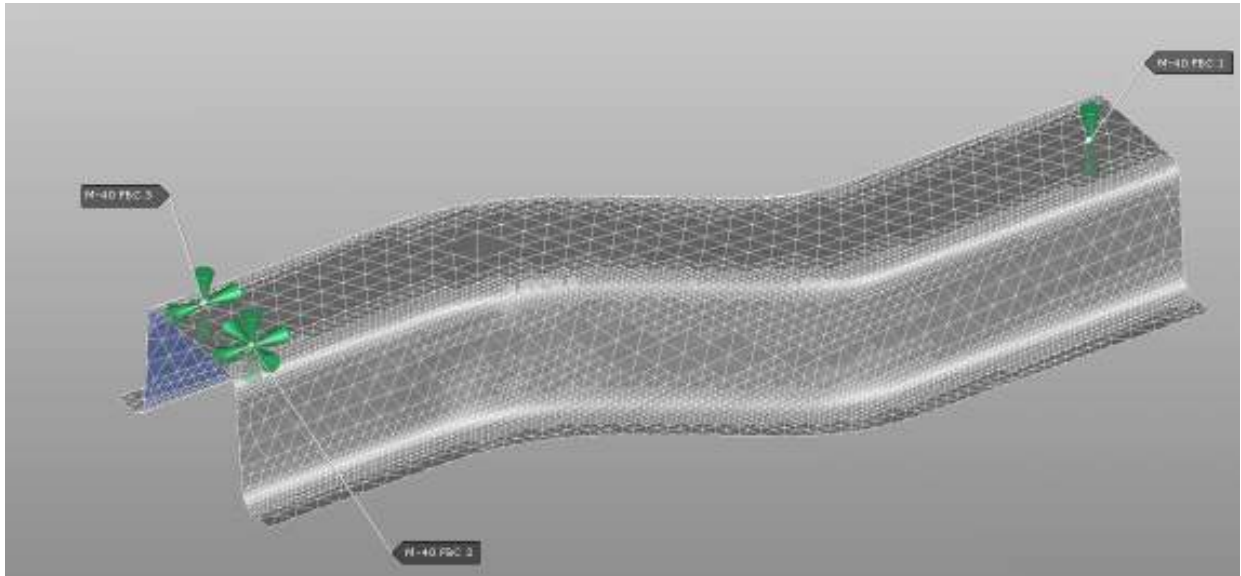


Figura 61: Modelo representativo das condições de *Springback*

Fixed Boundary Conditions (FBC)					
	Coordinates	X	Y	Z	Deactivate
FBC 1	-122 mm, 25 mm, 0.5 mm	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
FBC 2	122 mm, -13 mm, 0.5 mm	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
FBC 3	122 mm, -37 mm, 0.5 mm	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Figura 62: Condições de Fronteira para os modelos de *Springback*

Ao contrário das variáveis macro anteriormente apresentadas, seleccionou-se uma secção específica (A_0) para analisar o retorno elástico (Figura 64).

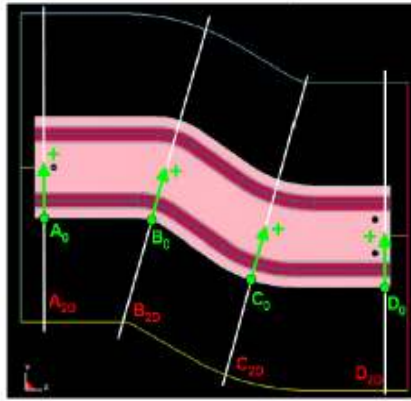


Figura 63: Perfil A_0 para validação dos modelos de *Springback*

7.5.1. Resultados de *Springback* - Influência dos freios como parâmetro de processo



Nos parágrafos seguintes apresentam-se os resultados numéricos obtidos e a respectiva comparação com o ensaio experimental.

Para os resultados experimentais, traçou-se uma secção comum a todos os esboços, e realizou-se a análise comparativa dos mesmos resultados, pretendendo-se demonstrar o interesse da aplicação da simulação virtual de ensaios no processo de embutidura durante a fase de otimização do processo.

A análise comparativa de resultados foi realizada em apenas uma secção (A_0), pois dada a confidencialidade dos resultados experimentais, apenas foi facultado o perfil nesta secção, não havendo acesso a resultados numéricos exaustivos, sendo a avaliação apenas feita visualmente.

As imagens seguintes representam as secções correspondentes a cada um dos modelos, em aço e alumínio.

LC1 HC260 LAD - Sem freios

-  Perfil *Springback* Autoform
-  Perfil *Springback* PAMStamp
-  Perfil *Springback* Experimental

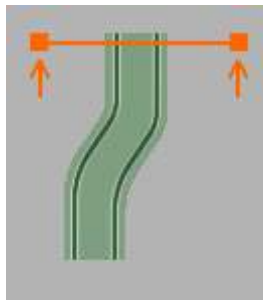


Figura 64: Secção de referência para análise de *Springback* (A_0)

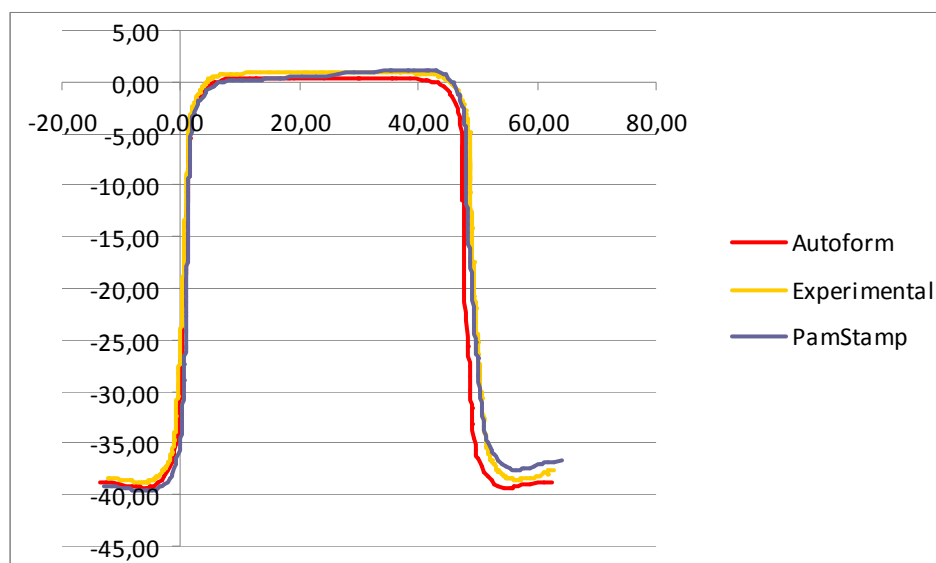


Figura 65: Comparação dos perfis de *Springback* - LC1 HC260LAD

Nas figuras 67 e 68 estão identificados os valores de máxima deformação plástica, para simulações em PAMStamp e Autoform. Neste tipo de processo (estampagem de materiais metálicos) a deformação plástica é usada para medir os diferentes níveis de estiramento. Maiores valores de estiramento minimizam a recuperação elástica - *Springback* [Banabic]:

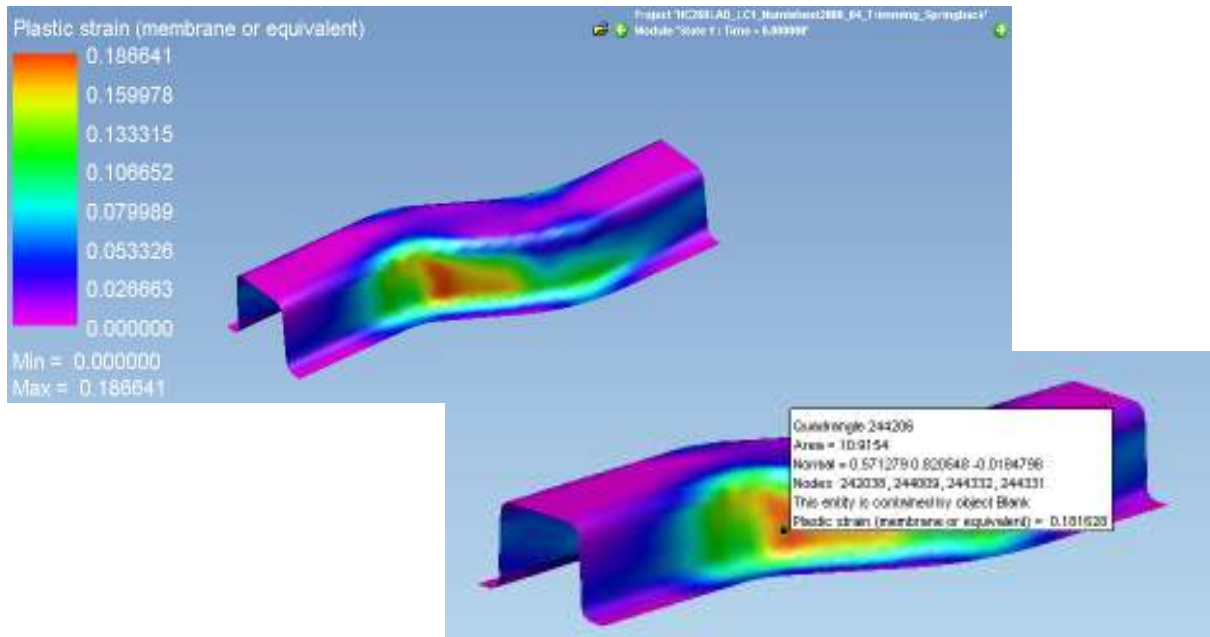


Figura 66: Resultado de *Plastic Strain* - PAMStamp

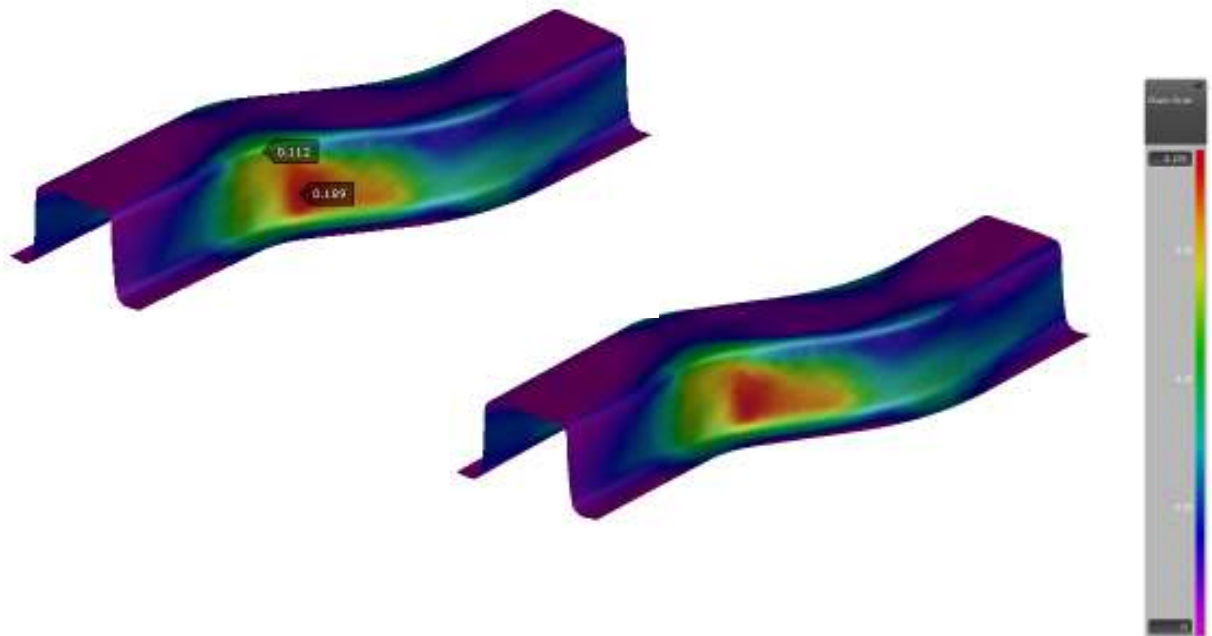





Figura 67: Resultado de *Plastic Strain* - Autoform

Da análise deste primeiro modelo, sem recurso à utilização de freios geométricos, podemos constatar que o comportamento à recuperação elástica segue uma mesma tendência, quer para o modelo em Autoform, quer para o modelo em PAMStamp. Os valores de *Plastic Strain*, comprovam esta mesma tendência, sendo verificado um máximo valor de 0,18% de deformação plástica.

Contudo, é possível constatar, pequenos fenómenos que diferem entre os dois modelos, nomeadamente uma pequena rotação do rail, mostrando-se mais evidente no modelo em PAMStamp.

Este fenómeno deve-se às diferenças existentes nas malhas dos dois modelos. Esta diferença provoca uma maior definição dos raios da matriz e do punção, levando assim a que o raio do punção do modelo PAMStamp esteja menos refinado e, desta forma, a zona sujeita ao diferencial de tensões entre as fibras externas e internas aumente, aumentando por sua vez o retorno elástico nessa zona.

LC2 HC260 LAD - Freios Geométricos Suaves

-  Perfil *Springback* Autoform
-  Perfil *Springback* PAMStamp
-  Perfil *Springback* Experimental

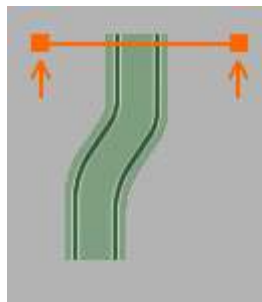


Figura 68: Secção de referência para análise de *Springback*

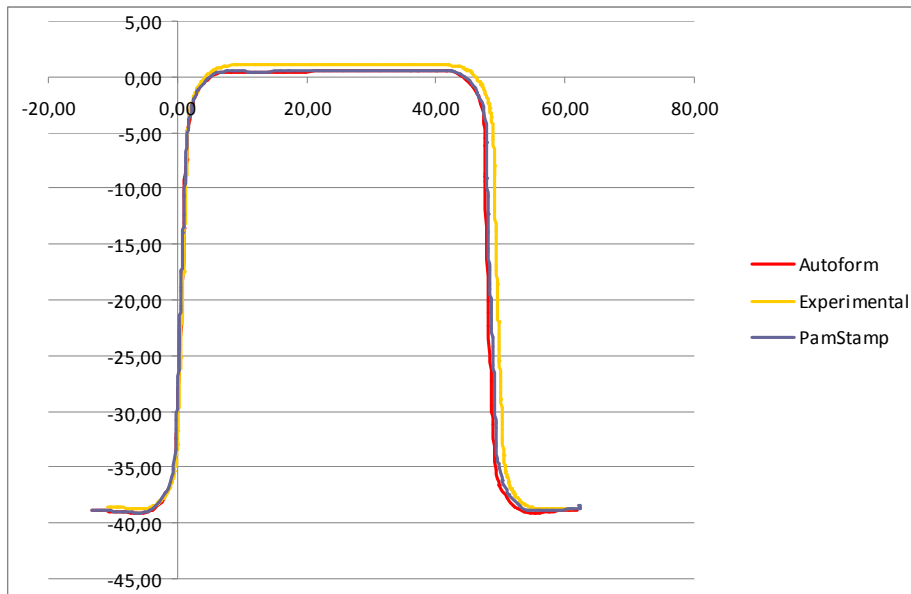


Figura 69: Comparação dos perfis de *Springback* - LC2 HC260LAD

Nas figuras 71 e 72 estão identificados os valores de máxima deformação plástica, para simulações em PAMStamp e Autoform. Neste tipo de processo (estampagem de materiais metálicos) a deformação plástica é usada para medir os diferentes níveis de estiramento. Maiores valores de estiramento minimizam a recuperação elástica - *Springback* [Banabic]:

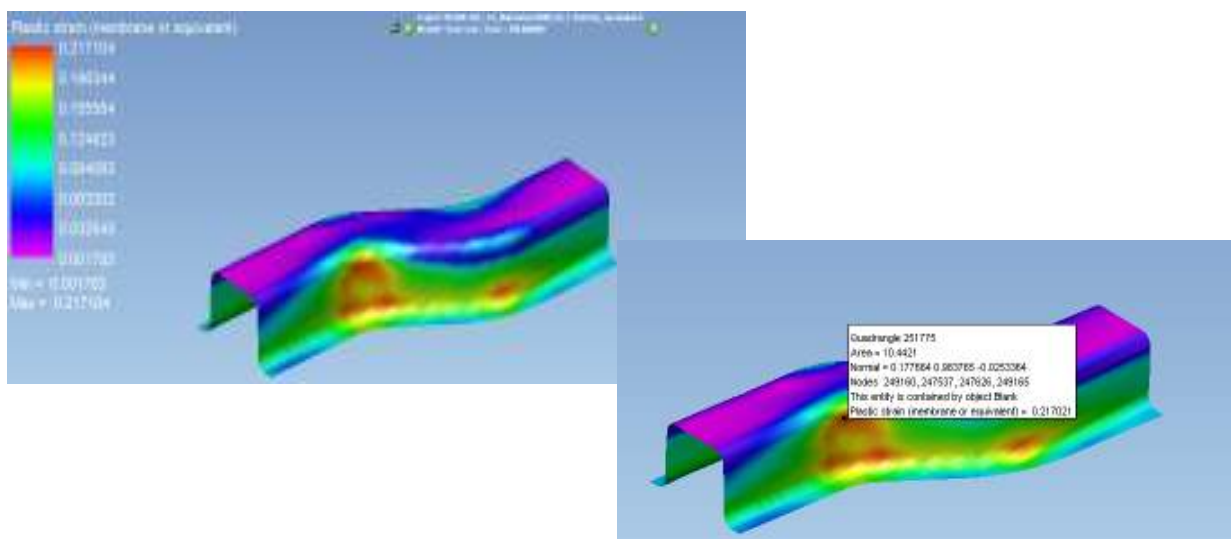


Figura 70: Resultado de *Plastic Strain* - PAMStamp

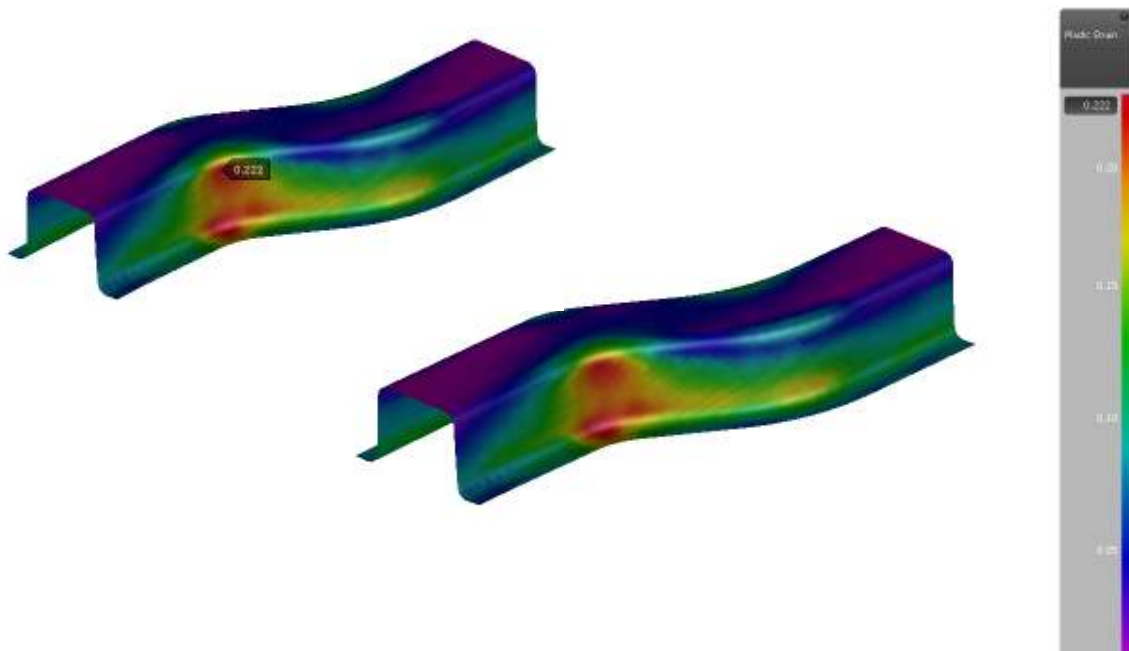


Figura 71: Resultado de *Plastic Strain* - Autoform

Neste segundo modelo, com recurso à utilização de freios geométricos suaves, é possível verificar que o comportamento à recuperação elástica segue uma mesma tendência, quer para o modelo em Autoform, quer para o modelo em PAMStamp. Os valores de *Plastic Strain*, comprovam esta mesma tendência, sendo verificado um máximo valor de 0,22% de deformação plástica.

LC3 HC260 LAD - Freios Geométricos de Retenção

- Perfil *Springback* Autoform
- Perfil *Springback* PAMStamp
- Perfil *Springback* Experimental

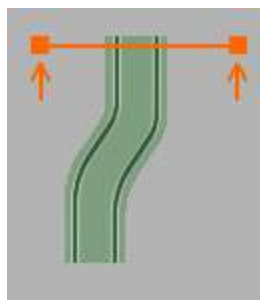


Figura 72: Secção de referência para análise de *Springback*

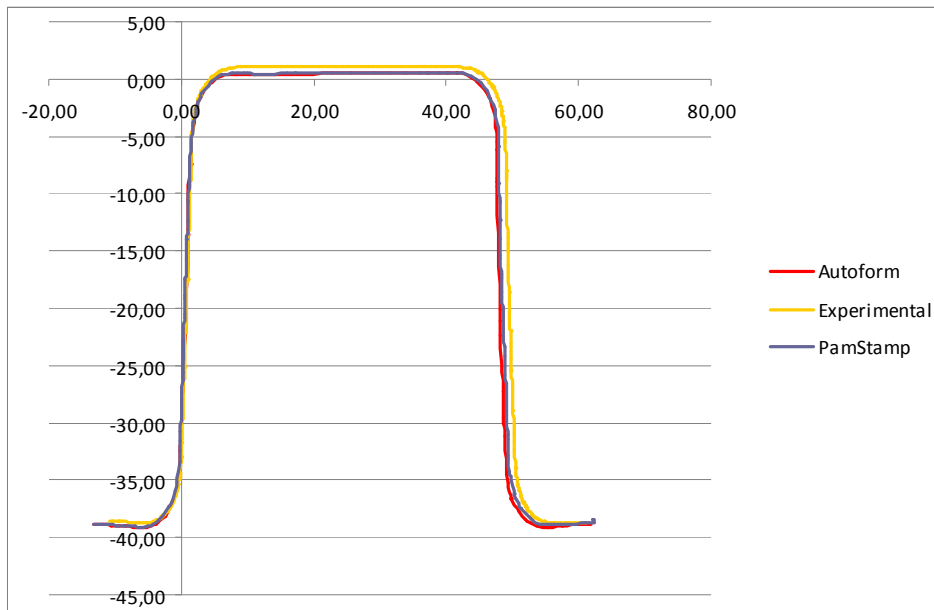


Figura 73: Comparação dos perfis de *Springback* - LC3 HC260LAD

Nas figuras 75 e 76 estão identificados os valores de máxima deformação plástica, para simulações em PAMStamp e Autoform. Neste tipo de processo (estampagem de materiais metálicos) a deformação plástica é usada para medir os diferentes níveis de estiramento. Maiores valores de estiramento minimizam a recuperação elástica - *Springback* [Banabic]:

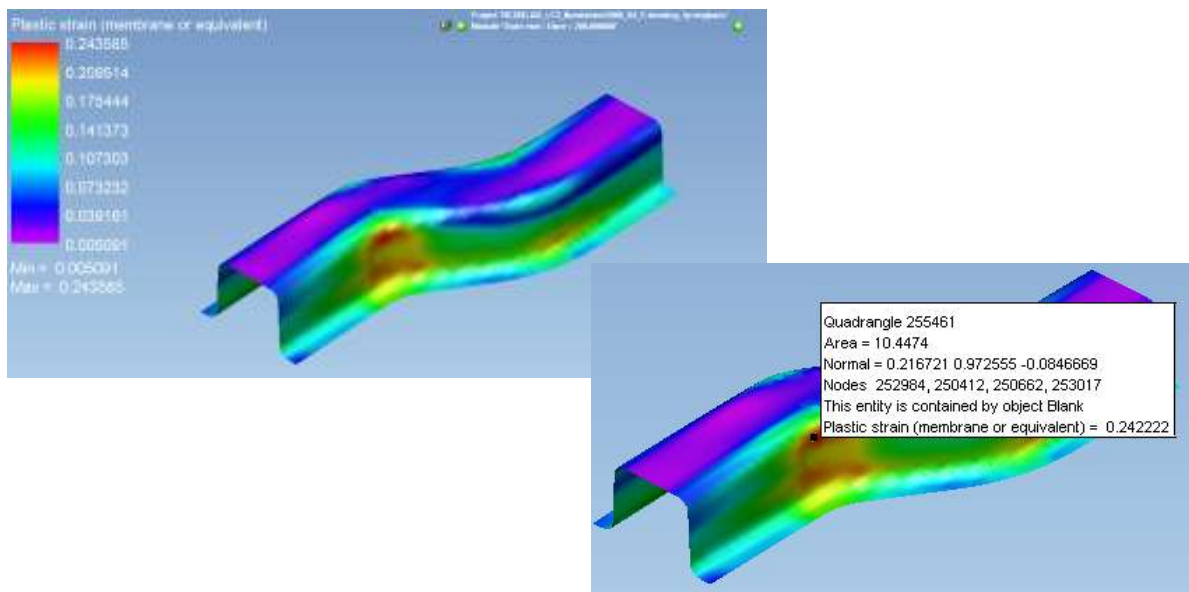


Figura 74: Resultado de *Plastic Strain* - PAMStamp

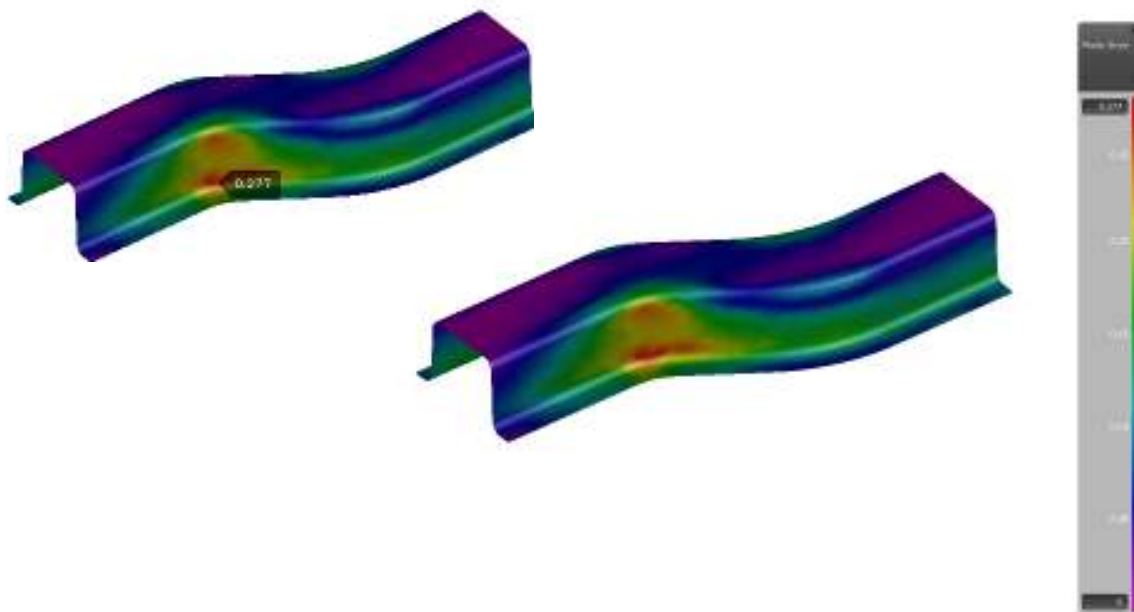


Figura 75: Resultado de *Plastic Strain* - Autoform

Neste terceiro modelo, com recurso à utilização de freios geométricos de retenção, é possível verificar que o comportamento à recuperação elástica segue uma mesma tendência. Neste caso, o modelo experimental apresenta uma maior recuperação elástica comparado com os modelos virtuais. Este aumento promove a redução do diferencial de tensões ao longo da espessura, principal responsável pela recuperação elástica na parede vertical.

Os valores de *Plastic Strain*, comprovam esta mesma tendência, sendo verificado um máximo valor de 0,24% de deformação plástica. no PAMStamp e 0.28% no Autoform.

O primeiro aspecto que salta a vista é essencialmente a importância dos freios na redução do efeito do retorno elástico evidenciado pelo aumento da deformação plástica verificada ao longo dos três modelos analisados com o material HC260LAD. Os freios incrementam a rigidez geométrica das abas pelas formas que possuem, melhorando assim o comportamento elástico do conformado. Por outro lado, pequenas alterações nas geometrias dos mesmos freios parecem ser significativas no efeito de retorno elástico, como é possível verificar no último perfil do modelo com freios de retenção, em Autoform.

LC1 AC170 - Sem freios

- Perfil *Springback* Autoform
- Perfil *Springback* PAMStamp
- Perfil *Springback* Experimental

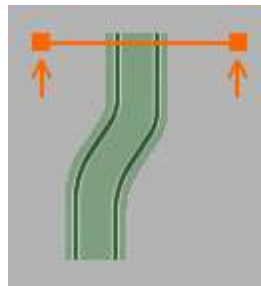


Figura 76: Secção de referência para análise de *Springback*

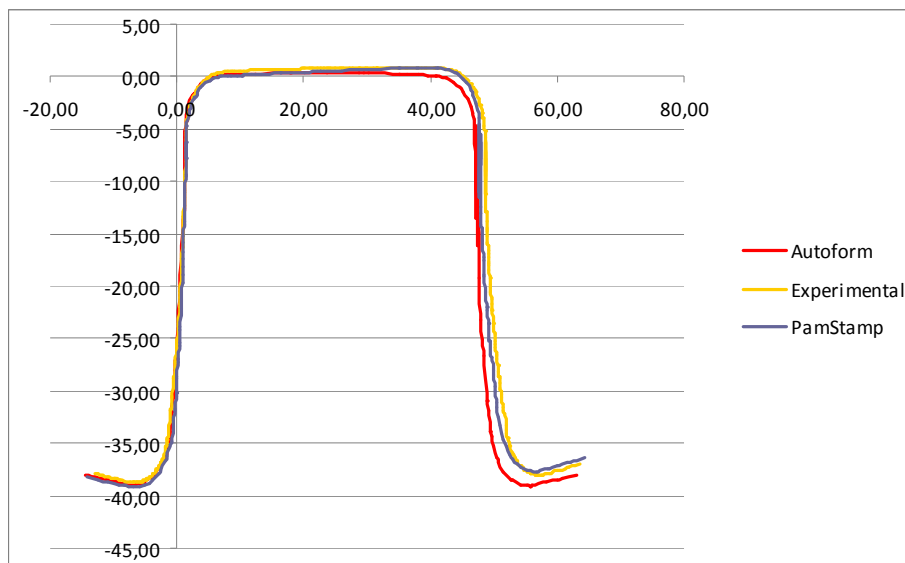


Figura 77: Comparação dos perfis de *Springback* - LC1 AC170

Nas figuras 79, 80 e 81 estão identificados os valores de máxima deformação plástica, para simulações em PAMStamp e Autoform. Neste tipo de processo (estampagem de materiais metálicos) a deformação plástica é usada para medir os diferentes níveis de estiramento. Maiores valores de estiramento minimizam a recuperação elástica - *Springback* [Banabic]:

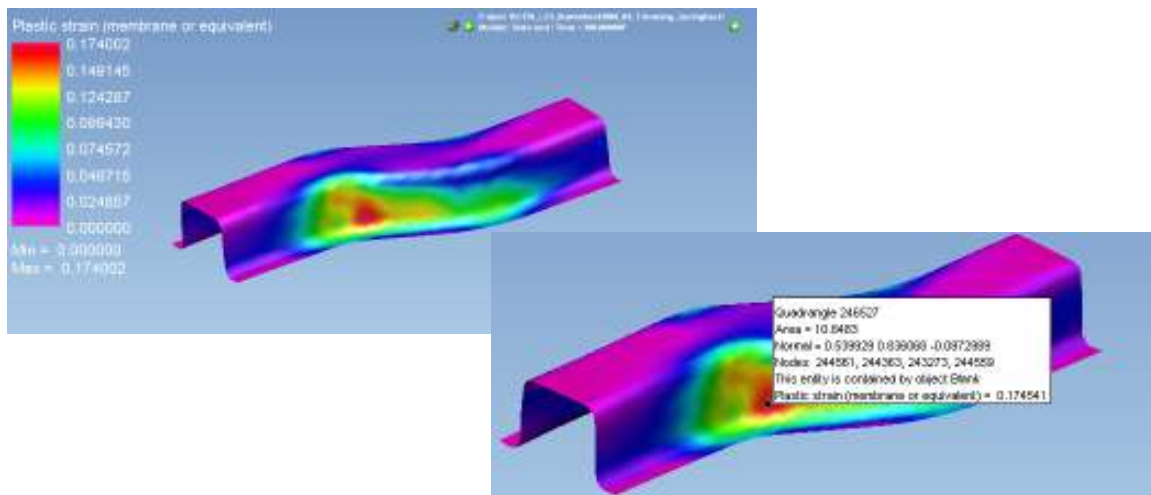


Figura 78: Resultado de *Plastic Strain* - PAMStamp

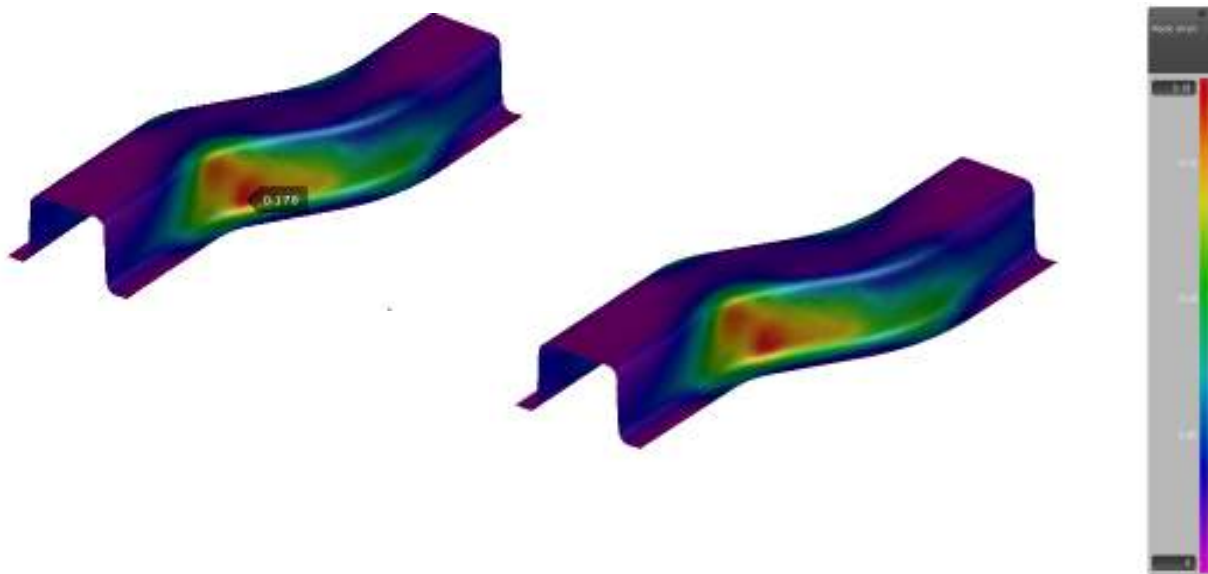


Figura 79: Resultado de *Plastic Strain* - Autoform

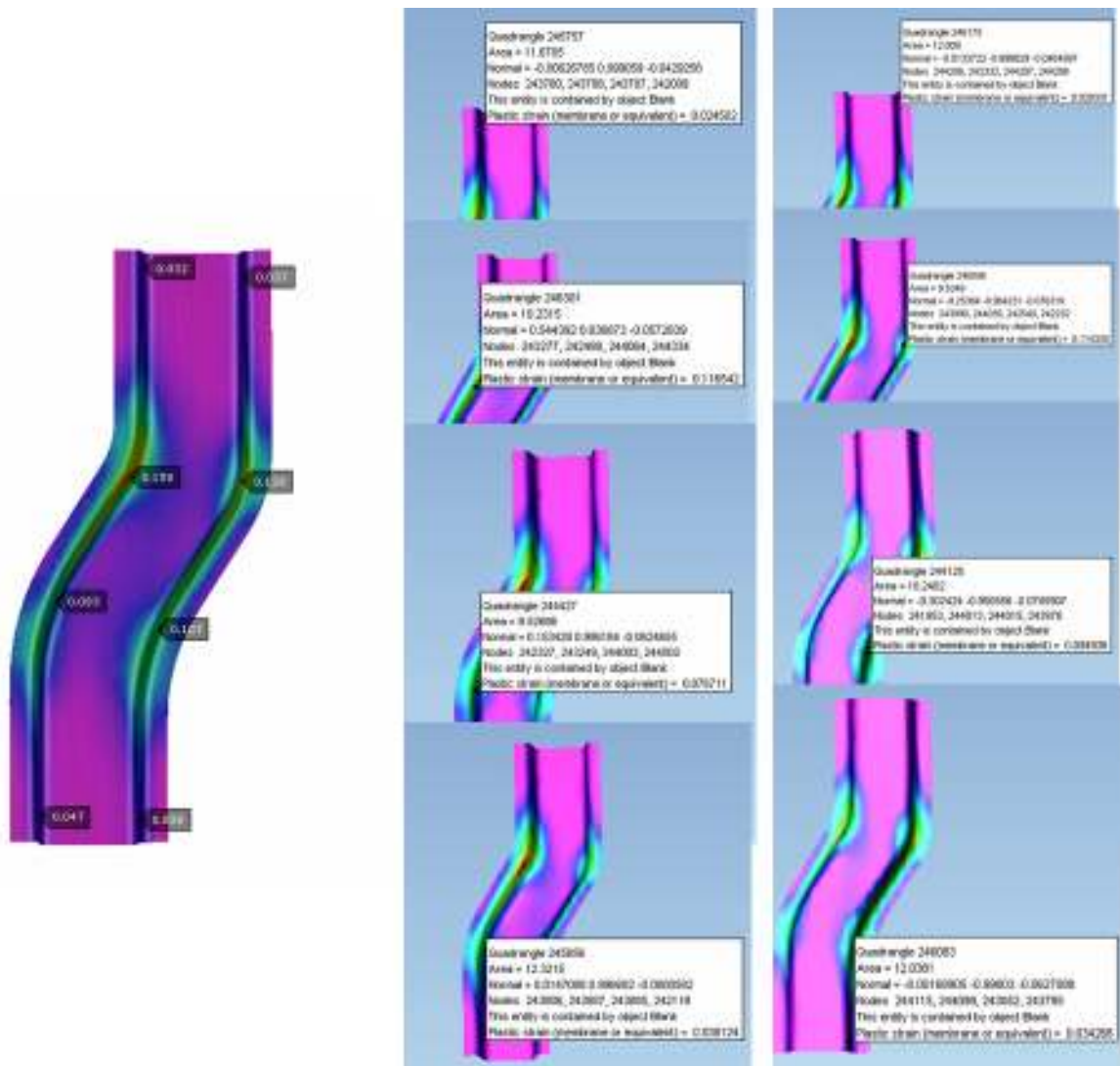





Figura 80: Resultados de *Plastic Strain* - Autoform vs PAMStamp

Da análise deste primeiro modelo, sem recurso à utilização de freios geométricos, podemos constatar que o comportamento à recuperação elástica não segue uma mesma tendência. No modelo em Autoform é visível uma melhor performance face à recuperação elástica, quando comparado com o modelo em PAMStamp. Este último, por sua vez, tem uma maior aproximação aos resultados experimentais.

A pequena rotação do esboço, mostra-se muito evidente no modelo em PAMStamp e deve-se às diferenças existentes nas malhas dos dois modelos. Esta diferença provoca uma maior definição dos raios da matriz e do punção, levando assim a que o raio do punção do modelo PAMStamp esteja menos refinado e, desta forma, a zona sujeita ao diferencial de tensões entre as fibras externas e internas aumente, aumentando por sua vez o retorno elástico nessa zona.

Embora a diferença na discretização geométrica persista, devido às diferenças nas malhas de cada *software*, o modelo em PAMStamp demonstra uma maior sensibilidade ao efeito do *Springback*, apresentando uma melhor correlação com o modelo experimental.

LC2 AC170 - Freios Suaves

-  Perfil *Springback* Autoform
-  Perfil *Springback* PAMStamp
-  Perfil *Springback* Experimental

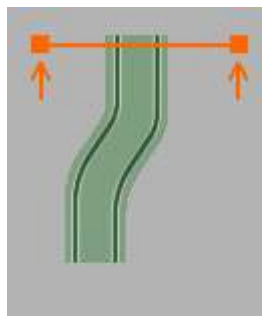


Figura 81: Secção de referência para análise de *Springback*

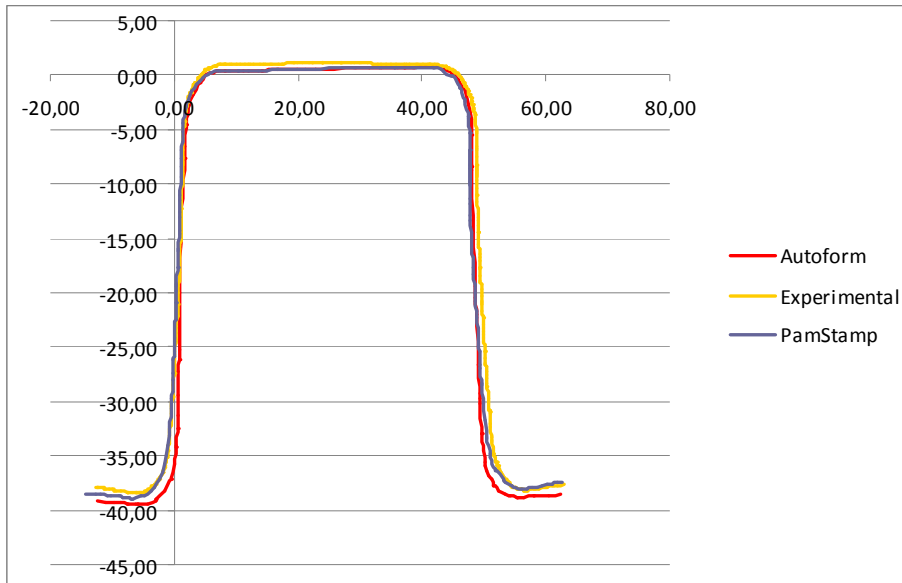


Figura 82: Comparação dos perfis de *Springback* - LC2 AC170

Nas figuras 84 e 85 estão identificados os valores de máxima deformação plástica, para simulações em PAMStamp e Autoform. Neste tipo de processo (estampagem de materiais metálicos) a deformação plástica é usada para medir os diferentes níveis de estiramento. Maiores valores de estiramento minimizam a recuperação elástica - *Springback* [Banabic]:

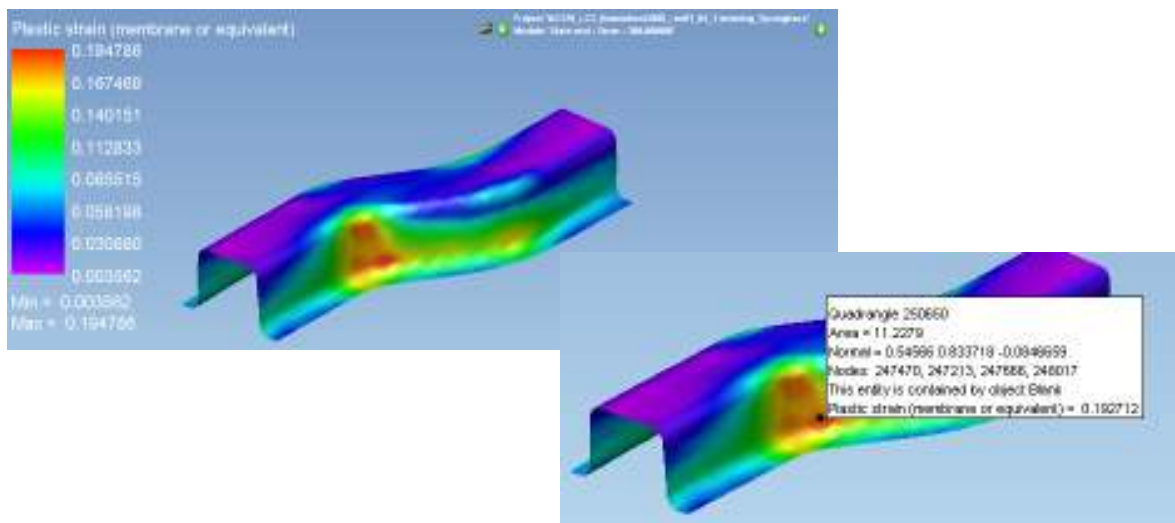


Figura 83: Resultado de *Plastic Strain* - PAMStamp

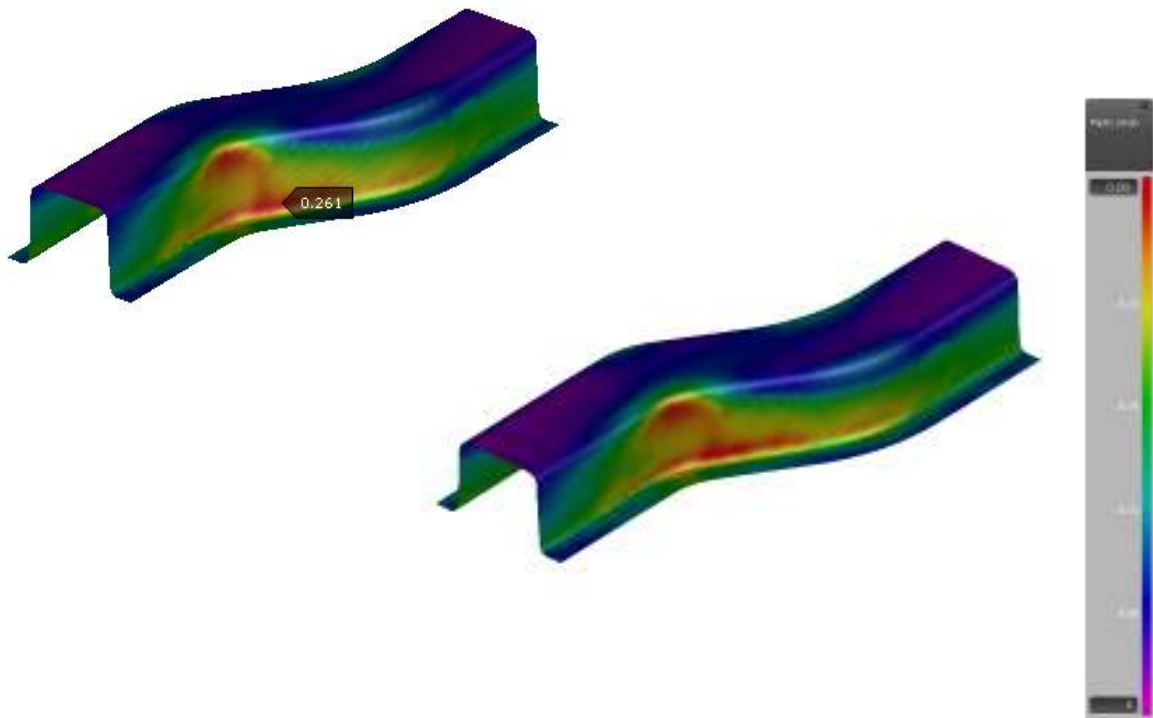





Figura 84: Resultado de *Plastic Strain* - Autoform

Neste segundo modelo, com recurso à utilização de freios geométricos suaves, a tendência do comportamento à recuperação elástica repete-se, mas de uma forma menos acentuada do que fora verificada para o primeiro esboço. O modelo em PAMStamp continua a demonstrar menores níveis de estiramento identificados por menores valores de deformação plástica, que comprovam esta mesma tendência de uma maior recuperação elástica, aproximando-se mais do modelo experimental. Na figura 84 podemos verificar a evolução dos valores de *plastic strain* ao longo de todo o perfil, sendo estes inferiores ao modelo em Autoform.

Os freios incrementam a rigidez geométrica das abas pelas formas que possuem, melhorando assim o comportamento elástico do conformado.

LC3 AC170 - Freios de Retenção

-  Perfil *Springback* Autoform
-  Perfil *Springback* PAMStamp
-  Perfil *Springback* Experimental

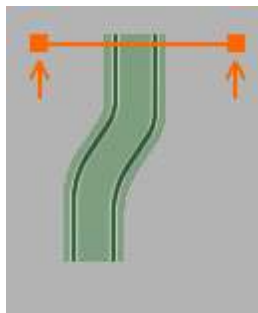


Figura 85: Secção de referência para análise de *Springback*

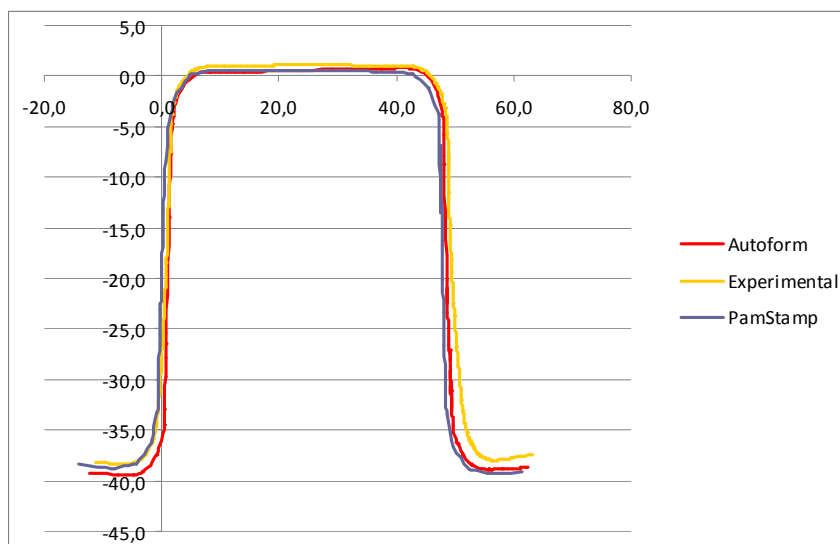


Figura 86: Comparação dos perfis de *Springback* - LC3 AC170

Nas figuras 88 e 89 estão identificados os valores de máxima deformação plástica, para simulações em PAMStamp e Autoform. Neste tipo de processo (estampagem de materiais metálicos) a deformação plástica é usada para medir os diferentes níveis de estiramento. Maiores valores de estiramento minimizam a recuperação elástica - *Springback* [Banabic]:

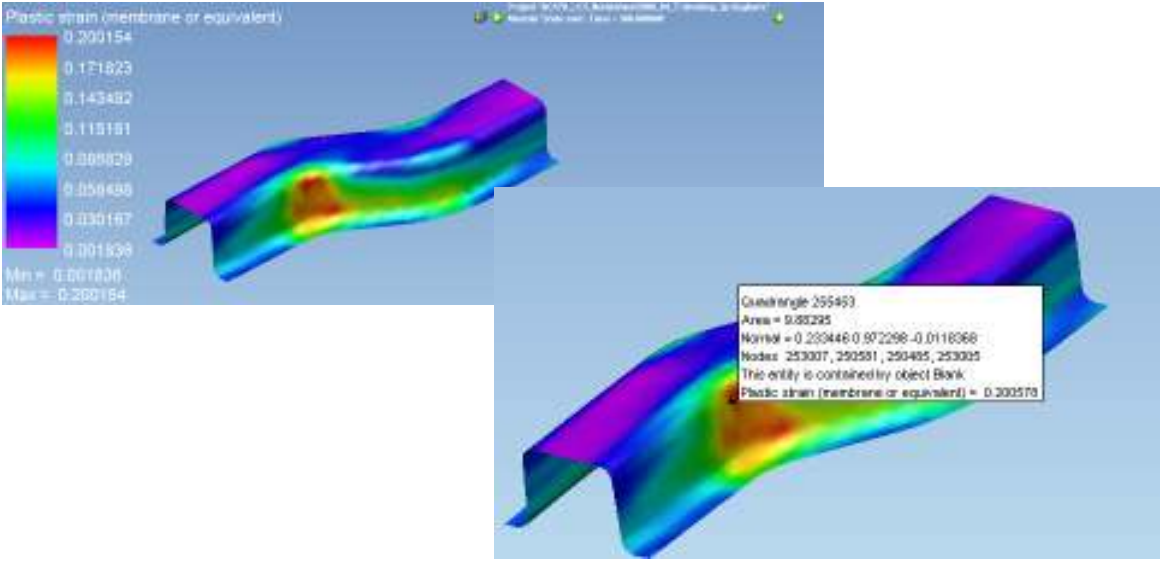


Figura 87: Resultado de *Plastic Strain* - PAMStamp

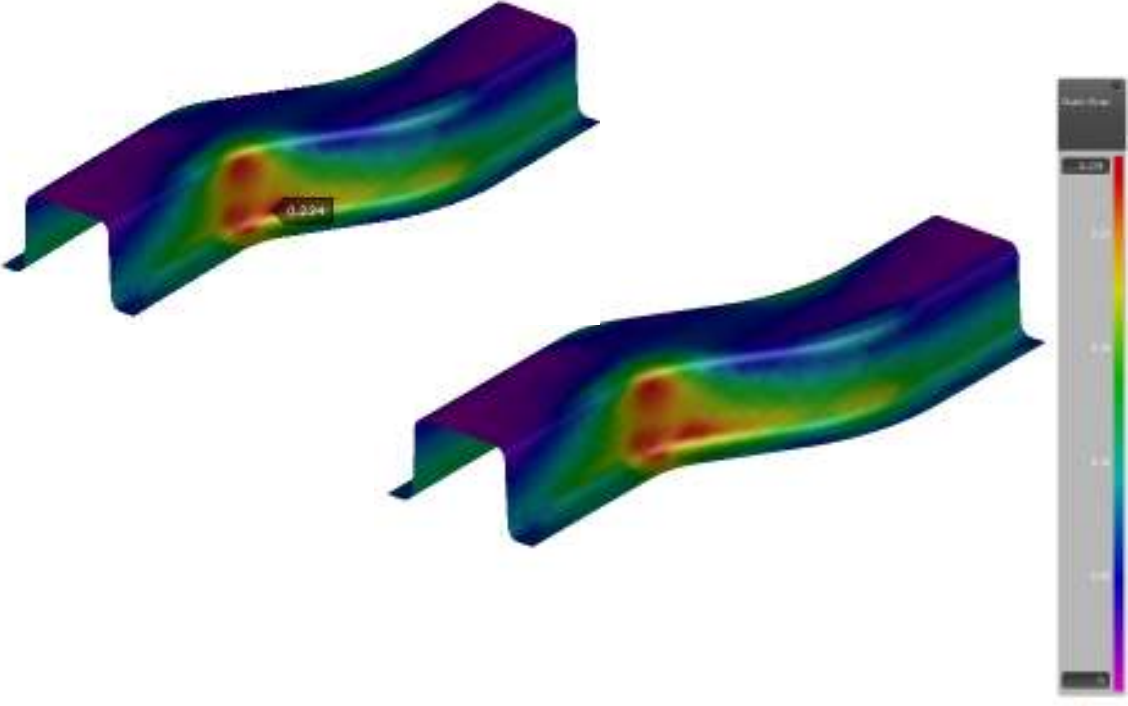


Figura 88: Resultado de *Plastic Strain* - Autoform

Tal como no segundo esboço, neste modelo, com recurso à utilização de freios geométricos de retenção, a tendência do comportamento à recuperação elástica diminui, comparativamente com o primeiro esboço. O modelo em PAMStamp continua a demonstrar uma maior sensibilidade à recuperação elástica. Os valores de *Plastic Strain*, comprovam esta mesma tendência, 0,20%, sendo verificado ao longo de todo o perfil, valores de deformação plástica inferiores ao modelo em Autoform, 0,23%.

A existência de freios de retenção tem um efeito preponderante no estiramento do material e por consequência na recuperação elástica. O aumento da força de cerra-chapas promove o aumento da força de retenção do esboço e consequentemente ao aumento da força do punção conduzindo a um aumento do nível de deformação plástica, reduzindo o diferencial de tensões ao longo da espessura, responsável pelo retorno elástico na parede vertical.

Embora a diferença na discretização geométrica persista, devido às diferenças nas malhas de cada *software*, o modelo em PAMStamp demonstra um maior valor de *Springback*, apresentando uma melhor aproximação com o modelo experimental.

Como era esperado, os resultados da análise de *Springback* para os modelos em aço revelaram-se mais estáveis, comparativamente aos modelos em alumínio.

O primeiro aspecto que salta a vista é essencialmente a importância dos freios na redução do efeito do retorno elástico evidenciado pela inclinação das abas. Os freios incrementam os níveis de estiramento, melhorando assim o comportamento elástico do conformado. Por outro lado, a intensidade da força do cerra-chapas não parece promover elevados níveis de estiramento, não contribuindo para reduzidos valores no efeito de retorno elástico.

Como era esperado, os resultados numéricos obtidos para a previsão do retorno elástico afastaram-se dos resultados experimentais. Ainda assim é visível uma boa correlação com o modelo em PAMStamp e um maior afastamento com o modelo em Autoform.

Uma das justificações já apresentadas para esta diferença, centra-se nas diferenças das malhas utilizadas em cada um dos *Softwares*, assim como nas diferentes leis constitutivas para a descrição dos materiais utilizados.

Assim, a obtenção de resultados mais exatos na previsão do retorno elástico passaria por uma malha mais rígida, ou seja, menos deformável no regime elástico. Para isso, seria apropriado aumentar o refinamento em espessura por acrescentar mais uma camada de elementos finitos, ou a utilização de elementos sólidos, que incrementariam o tempo e custo das simulações.

Desta análise da previsão do retorno elástico e tendo em conta o que foi realizado em todos os modelos, fica claro que, em termos qualitativos, os resultados numéricos tendem para representar o que acontece na realidade descrevendo corretamente a sensibilidade deste efeito aos parâmetros de conformação (geometria e solicitações mecânicas envolvidas).

Em resumo, a reprodutibilidade de resultados experimentais é um aspecto fundamental para a validação de novos desenvolvimentos na simulação numérica como sendo a utilização de diferentes modelos de caracterização dos materiais. Contudo, a obtenção desse tipo de resultados pode apresentar algumas dificuldades. No caso de alguns pares geometria/material podem ser necessários maiores requisitos de exigência nas condições experimentais. Essas condições poderão incluir uma padronização, não só das ferramentas, mas também da prensa a usar e eventualmente das condições ambiente.

A comparação deste tipo de perfis, permite concluir que os resultados do aço HC260 LAD aproximam-se mais do experimental do que os obtidos com o alumínio AC170. No entanto existe alguma dispersão do lado esquerdo, também verificada para a liga de alumínio, o que sugere uma investigação mais aprofundada quer dos resultados experimentais (eventual ocorrência do fenómeno de deslizamento, derivado da torção provocada pela geometria do perfil) quer das condições numéricas impostas neste *rail*.

8. Contribuição Industrial

Cada vez mais o modelo de produção industrial atual favorece uma produção em massa quase totalmente automatizada.

A necessidade de saber adaptar/customizar a produção em tempo menor que o praticado, torna-se cada vez mais uma constante.

A simulação numérica do processo produtivo tem assim, um impacto muito grande sobre o mesmo, tornando-se uma ferramenta diferenciadora, não só na indústria automóvel, como também nas restantes áreas.

Para realizar uma simulação deve-se conhecer o processo de produção profundamente, para que todo o estudo resulte em melhorias imediatas. Assim, com a simulação da produção, é possível modificá-la virtualmente, sem interferir no processo funcional e otimizá-la de acordo com um dado objetivo. Estes objetivos refletem-se sobretudo em aumentos de produção e/ou redução de custos.

Os novos produtos podem ser desenvolvidos em ambiente virtual, diminuindo o seu tempo de desenvolvimento, entrando em produção sem requerer gastos com testes experimentais em número considerável.

Um exemplo clássico deste impacto é a indústria automóvel. O tempo entre concepção de um carro e sua produção foi reduzido, tendo a montadora (OEM) mais tempo disponível para o desenvolvimento de inovação tecnológica e conseqüentemente, agilizar a sua introdução no mercado.

Todo este trabalho apresentado vem demonstrar todos os benefícios da implementação do processo de simulação.

9. Conclusões

Todo o trabalho apresentado nesta dissertação insere-se dentro dos parâmetros desenvolvidos para o *Benchmark* BM02 proposto na 7ª conferência internacional Numisheet 2008.

O objetivo principal foi assim, desenvolver todas as análises numéricas propostas, comparando os dois *Softwares* existentes, Autoform e PAMStamp. Estas análises serviram para prever corretamente as tensões originadas em zonas de deformação complexa e avaliar com a maior precisão e rigor possível o efeito do retorno elástico e desta forma, seleccionar o *software* mais competitivo do mercado.

Esta comparação visou essencialmente colmatar as lacunas identificadas pelo CT, e assim contribuir para o aumento da sua competitividade e capacidade de geração de valor, quer a nível nacional como internacional.

Neste sentido foi usado o *Benchmark* experimental do congresso Numisheet 2008, designado por "*Influence of Draw Beads on the Springback Behavior*" e que se encontra em anexo.

Ao nível dos resultados analisados, foi possível verificar que os valores apresentados pelo Autoform e pelo PAMStamp mostram-se compatíveis relativamente à força do punção, ao *draw-in*, à maior e menor deformação e à redução de espessura.

A correta previsão das forças de conformação tem uma íntima ligação com a previsão do *draw-in* sendo que, o escoamento sofrido pelo material é resultado das forças de retenção existentes que, por sua vez, se reflectem no valor da força exercida pelo punção.

Contudo, este não é o único fenómeno envolvido já que se o material é sujeito a solicitações multi-axiais. Por conseguinte, o escoamento dependerá não apenas do tipo de solicitação mecânica envolvida como também da resposta plástica do próprio material, ou, por outras palavras, da sua capacidade de deformação. Estando a redução de espessura diretamente relacionada com os parâmetros anteriormente referidos, torna-se indispensável para a previsão e prevenção de roturas. Os resultados obtidos para os dois *softwares* seguiram uma mesma tendência, mesmo no que se refere a pequenos efeitos, como é o caso de aumento ou redução pontuais da espessura, em determinados locais do *rail*.

O *Springback* foi o único parâmetro que para além de se afastar dos dos resultados experimentais, mostrou-se ligeiramente diferente entre os dois *Softwares*.

Uma das justificações já apresentadas para esta diferença, centra-se nas diferenças das malhas utilizadas em cada um dos *Softwares*, assim como nas diferentes leis constitutivas usadas para a descrição dos materiais utilizados.

Devido à existência de muitos fenómenos envolvidos no processo de estampagem de materiais metálicos, muitas vezes os resultados numéricos não correspondem ao comportamento real. Em consequência desta situação, a preocupação em obter resultados cada vez mais próximos da realidade torna-se numa rotina diária, de busca de novos modelos constitutivos de caracterização mecânica, resultados mais rápidos, num tempo aceitável do ponto de vista industrial e económico, maior acuracidade da previsão das deformações e dos efeitos do retorno elástico, de forma a responder aos requisitos colocados pela indústria.

A repetibilidade de resultados entre *softwares* é um aspecto positivo a apontar, contudo, pode apresentar algumas dificuldades, devido às diferenças macro entre os mesmos. Estas diferenças macro (tipo de malha, *software* implícito/explicito, parâmetros de controlo do processo - velocidade do punção, atrito, lubrificação) poderão conduzir a desenvolvimentos que se centram no estabelecimento de métodos capazes de lidar com a complexa interatividade que existe entre as alterações de geometria do componente e a correspondente geometria da ferramenta conjuntamente com as condições do processo.

Concluimos, que para a maioria dos parâmetros analisados os dois *softwares* são compatíveis, exceto para a previsão do *springback*.

O PAMStamp apresentou uma melhor correlação com o resultado experimental, demonstrando uma maior estabilidade face ao Autoform.

Do ponto de vista de rapidez de cálculo, o Autoform encontra-se em vantagem, mostrando uma maior recuperação de tempo despendido ao nível do *solver*. Ao nível da facilidade de pré e pós processamento, o Autoform também se encontra em vantagem, sendo bastante fácil e intuitivo para a preparação das simulações.

Esta é uma vantagem bastante importante do ponto de vista industrial, uma vez que, cada vez mais o tempo despendido em actividades não-produtivas se torna uma lacuna para as empresas, do ponto de vista financeiro.

Para o Grupo Sodecia, as exigências específicas deste trabalho, proporcionaram uma excelente dinâmica em diferentes áreas, como a de metodologias de desenvolvimento de processo, caracterização de materiais, conhecimento de diferentes processos tecnológicos, e capacitação para a realização de diferentes ensaios, tanto físicos como virtuais, e aquisição de know-how, principalmente nos processos de estampagem e seus derivados.

10. Sugestão para Trabalhos Futuros

Para um conhecimento mais profundo dos temas apresentados, seria interessante continuar este trabalho nas diversas áreas. Para tal, são sugeridos os seguintes trabalhos futuros:

State of the Art dos *Benchmarks* existentes:

- Efectuar a seleção de resultados dos '*Benchmarks*' experimentais que permitam criar uma base de dados de referência para validação de resultados numéricos.
- Estudar a variação do coeficiente de atrito e a sua relação com a velocidade da prensa.
- Procurar dados de referência experimentais quanto à evolução da força de punção versus deslocamento. Estudar e compreender os limites de variação de força do punção que não produzem variação da geometria final do componente.

Simulação numérica:

- Implementar novos modelos constitutivos no PAMStamp e no Autoform para melhor descrever o comportamento plástico dos materiais.
- Estudar a influência de variáveis numéricas na previsão do retorno elástico.
- Novas iterações numéricas, procedendo à redução do raio da matriz e ao aumento da força de cerra-chapas, uma vez que estas variáveis estas que traduzem uma maior influência neste comportamento.

Compensação do retorno elástico:

-Estudar a novos métodos de compensação em componentes industriais com geometria complexa.

- Estabelecer métodos de seleção e identificação de parâmetros geométricos do componente para a melhorar a compensação de retorno elástico.

- Estudar a possibilidade de criar novos mecanismos de comparação dos resultados, entre diferentes *softwares*.

Previsão da estrição localizada:

-Implementar trajetórias de deformação em vez de trajetórias de tensão, como base para a previsão da estrição localizada.

-Implementar novos modelos constitutivos de caracterização mecânica dos materiais (novos critérios de plasticidade e encruamento cinemático).

11. Referências

- Banabic, et al. (2010). *Sheet Metal Forming Processes – Constitutive Modelling and Numerical Simulation*, Springer- Verlag Berlin Heidelberg, 2010.
- Engelmark, M. (2009). *Usability of the Fibrous Core Sandwich Material HYBRIX for Automobile Body Applications*. Master of Science Thesis MMK 2009:47 MKN 012, KTH Industrial Eng. and Management, Sweden.
- Hedrick, A., (2011) Attempting to Defy the Laws of Physics – Part I. Variables Make Part Tolerancing a Pipe Dream. *Stamping Journal*, Mar/April, 10, 11.
- Hedrick, A., (2011) Attempting to Defy the Laws of Physics – Part II. Unrealistic Part Features. *Stamping Journal*, May/Jun, 10, 11.
- Hora, P. (ed) (2008) *Proceedings of the 7th International and Workshop on Numerical Simulation of 3D Sheet Metal Forming Processes – Verification of Simulation with Experiment*, Numisheet 2008, Interlaken
- Jackson K.P, Allwood J.M., Landert M. (2008). Incremental forming of sandwich panels. *Journal of Materials Processing Technology* 204, 290-303
- Jiang D., Shu D. (2005). Local displacement of core in two-layer sandwich composite structures subjected to low velocity impact. *Composite Structures* 71, 53-60.
- Johnson, C.D., Kienholz, D.A. (1982). Finite element prediction of damping in structures with constrained viscoelastic layers. *AIAA J* 20:1284-90.
- Kant, T., Swaminathan, K. (2001) Free Vibration of Isotropic, Orthotropic and Multilayer Plates Based on Higher Order Refined Theories. *Journal of Sound and Vibrations* 241(2): 319-327.
- Kant, T., Swaminathan, K. (2008) Analytical Solutions Using Higher Order Refined Theory for the Stability Analysis of Laminated Composite and Sandwich Plates. *Structural Engineering and Mechanics* 82 277-289.
- Kilian, J.W., Lu, Y.P. (1984). A finite element modeling approximation for

damping material used in constrained damped structures. *J Sound Vib* 97:352-4.

- Kim, K.J., Kim D, Choi S.H., Chung K., Shin K.S, Barlat F., Oh K.H., Youn J.R. (2003). Formability of AA5182/polypropylene/AA5182 sandwich sheets. *Journal of Materials Processing Technology* 139, 1-7.
- Moreira, R.A.S., Rodrigues, J.D. (2004). Constrained damping layer treatments: finite element modeling. *J Vib Control* 10:575-95.
- Moreira, R.A.S., Rodrigues, J.D, Ferreira, A.J.M. (2006). A Generalized Layerwise Finite Element for Multi-Layer Damping Treatments. *Computational Mechanics* 37 426-444.
- Moreira, R.A.S., Rodrigues, J.D. (2006). A Layerwise Model for Thin Soft Core Sandwich Plates. *Computational and Structures* 84 1256-1263.
- Moreira, R.A.S., Alves S. R. J., Valente R.A.F. (2010). A solid-shell layerwise finite element for non-linear geometric and material analysis. *Composites Structures* 92, 1517-1523
- Oh, J., Cho, M., Kim, J.S., Grédiac, M. (2008) A Finite Element Formulation Based on an Enhanced First Order Shear Deformation Theory for Composite and Sandwich Structures. *Journal of Mechanical Science and Technology* 22 871-878.
- Pandya, B.N., Kant, T. (1988) Higher-Order Shear Deformable Theories for Flexure of Sandwich Plates-Finite Element Evaluations. *International Journal of Solid Structures* 24: 1267-1286.
- Rah, K., Van Paepegen, W., Habraken, A.M., Alves de Sousa, R.J., Valente, R.A.F. (2009) Evaluation of Different Advanced Finite Element Concepts for Detailed Stress Analysis of Laminated Composite Structures. *International Journal of Material Forming*, Vol.2 Suppl 1:943-947.
- Roll, K., Lemke T, Wiegand K (2005) Possibilities and strategies for simulation and compensation for *Springback*. In: Smith LM, Pourboghrat F, Yoon JW, Stoughton TAMBÉM (eds) *Proceedings of the 6th International and Workshop on Numerical Simulation of 3D Sheet Metal Forming Processes – Verification of Simulation with Experiment*, Numisheet 2005, 295-302
- Roll, K., (2008) Simulation of sheet metal forming – Necessary developments in the future. *Proceedings of the 7th International and Workshop on Numerical Simulation of 3D Sheet Metal Forming Processes – Verification of Simulation with Experiment*, Numisheet 2008, Interlaken.
- Scharwrtz-givli, H., Rabinovitch, O., Frostig, Y. (2007). High-order nonlinear contact effects in cyclic loading of delaminated sandwich panels. *Composites:*

- Schoenbach, T., Bauer, T. (2008). New method to calculate and compensate *Springback*. In: Hora P (ed) (2008) *Proceedings of the 7th International and Workshop on Numerical Simulation of 3D Sheet Metal Forming Processes – Verification of Simulation with Experiment*, Numisheet 2008, Interlaken, 515-520
- Schwarze, M., Vladimirov, I.N., Reese, S (2009). On the Implementation of the EAS and ANS Concept Into a Reduced Integration Continuum Shell Element and Applications to Sheet Forming. *International Journal of Material Forming*, Vol.2 Suppl 1:919-922.
- Smith L.M., Pourboghrat F., Yoon J.W, Stoughton T.B (eds) (2005) *Proceedings of the 6th International and Workshop on Numerical Simulation of 3D Sheet Metal Forming Processes – Verification of Simulation with Experiment*, Numisheet 2005, Detroit.
- Suzuki, K., Kageyama, K., Kimpara, I., Hotta, S., Ozawa, T., Kabashima, S., et al. (2003) Vibration and Damping Prediction of Laminates With Constrained Viscoelastic Layers-Numerical Analysis by a Multilayer Higher-Order-Deformable Finite Element and Experimental Observations. *Journal of Mechanics of Advanced Materials and Structures* 10:43-75.
- Trinh, V.D., Abed-Meraim, F., Combescure, A. (2011) A New Assumed Strain Solid-Shell Formulation “SHB6” for the Six-Node Prismatic Finite Element. *Journal of Mechanical Science and Technology* 25 2345-2364.
- Valente, R.A.F., Alves de Sousa, R.J., Natal Jorge, R.M. (2009) Enhanced Finite Element Formulation On The Numerical Simulation Of Tailor-Welded Hydroformed Products. *International Journal of Material Forming*, Vol.2 Suppl 1:927-929.
- Yang, X., Kardes, N., Choi, C., Altan, T. (2010) Investigating *Springback* in Bending of Advanced High Strength Steel – Part I. V-Bending and Finite Element Analysis. *Stamping Journal*, Nov/Dec, 8,9.
- Yang, X., Kardes, N., Choi, C., Altan, T. (2011) Investigating *Springback* in Bending of Advanced High Strength Steel – Part II. *Springback* Prediction. *Stamping Journal*, Jan/Fev, 9,10.
- Zhang, Q., Dean, T.A., Wang, Z.R. (2006). Numerical Simulation of Deformation in Multi-Point Sandwich Forming. *Machine Tools and Manufacture* 46 699-707.
- Zhen, W., Cheung, Y.K., Lo, S.H, Wanji, C. (2008) Effects of Higher Order

Global-Local Shear Deformations on Bending, Vibration and Buckling of Multilayered Plates. *Composite Structures* 82 277-289.

- (<http://www.worldautosteel.org/Environment/Part-2-Implementation-of-AHSS-in-Vehicle-Structures.aspx>)

Anexo A. Resultados dos testes efectuados

A1) Avaliação da Maior e Menor Deformação e Redução de Espessura

O Anexo A1 contempla os resultados obtidos no capítulo 7.3.

LC1

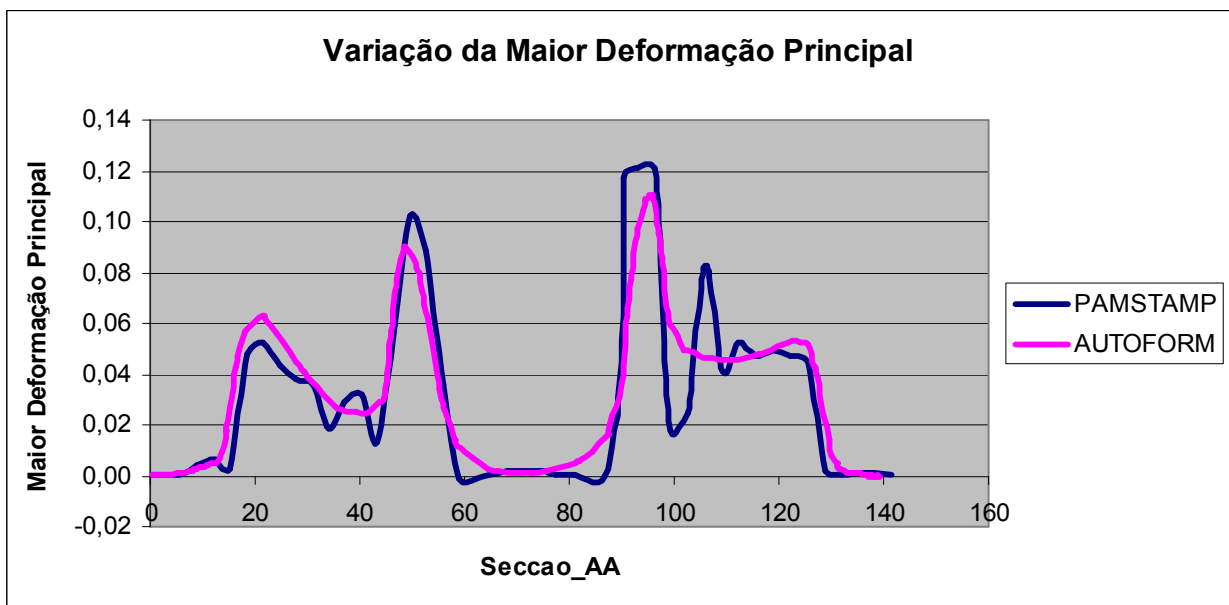


Gráfico 19: Evolução das deformações logarítmicas na secção A2D para LC1 (HC260LAD)

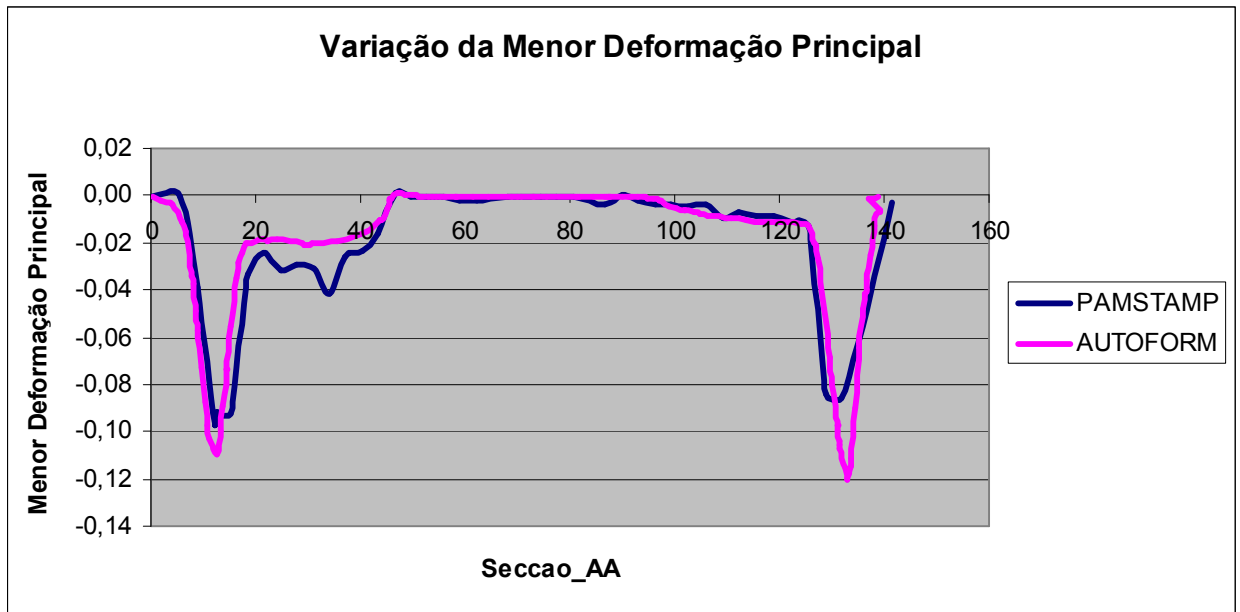


Gráfico 20: Evolução das deformações logarítmicas na secção A2D para LC1 (HC260LAD)

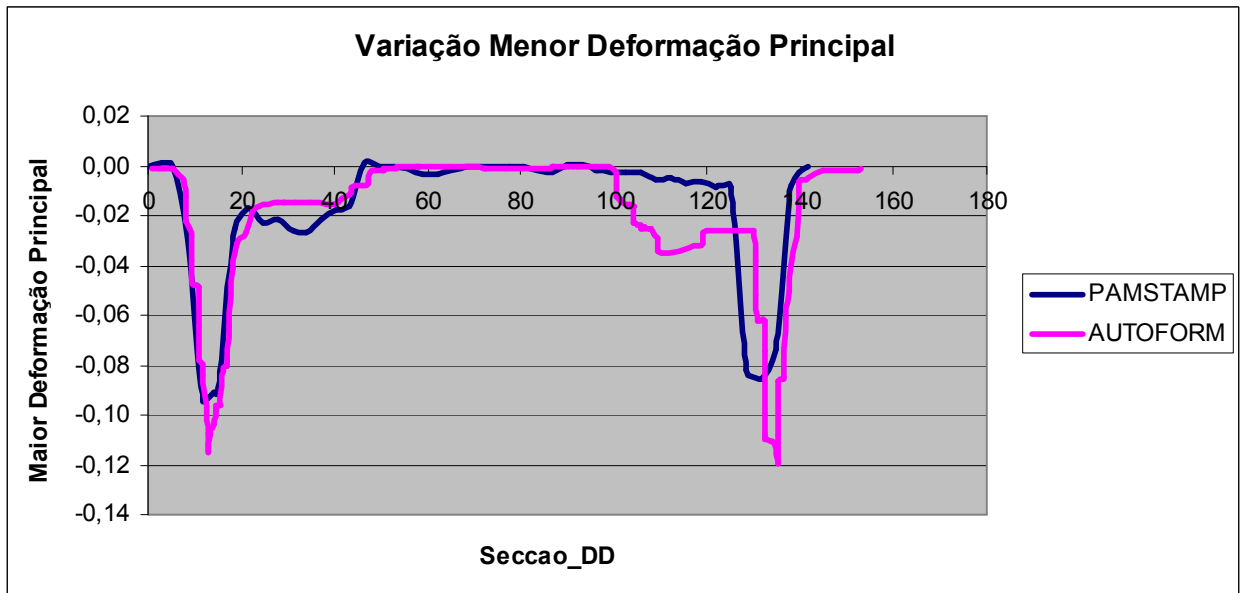


Gráfico 21: Evolução das deformações logarítmicas na secção D2D para LC1 (HC260LAD)

LC2

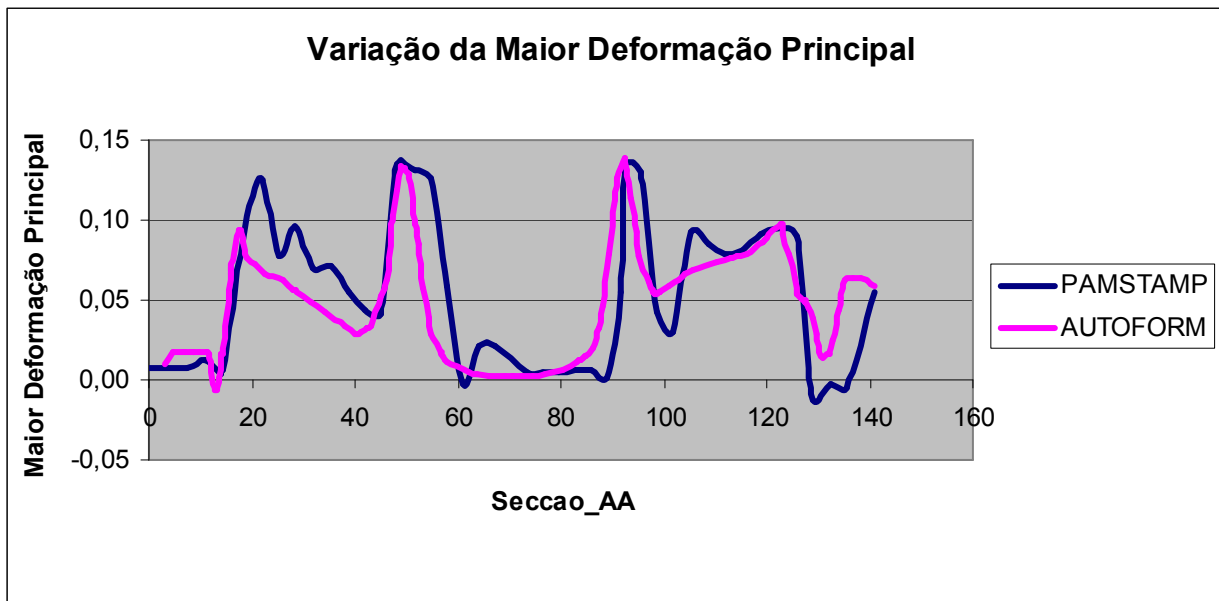


Gráfico 22: Evolução das deformações logarítmicas na secção A2D para LC2 (HC260LAD)

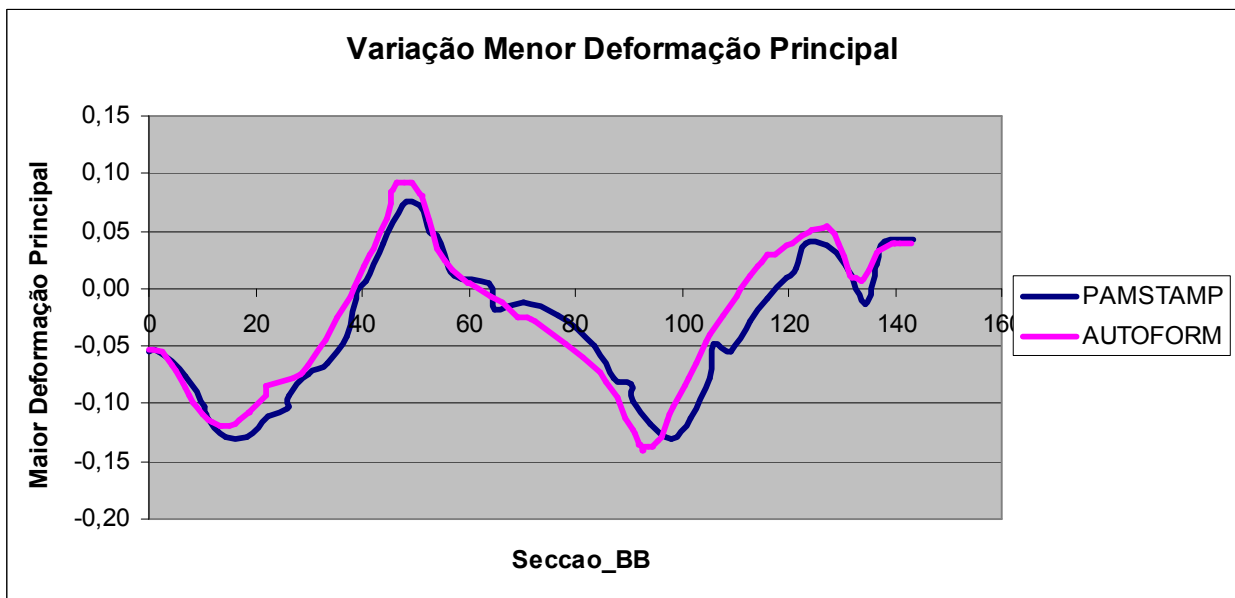


Gráfico 23: Evolução das deformações logarítmicas na secção B2D para LC2 (HC260LAD)

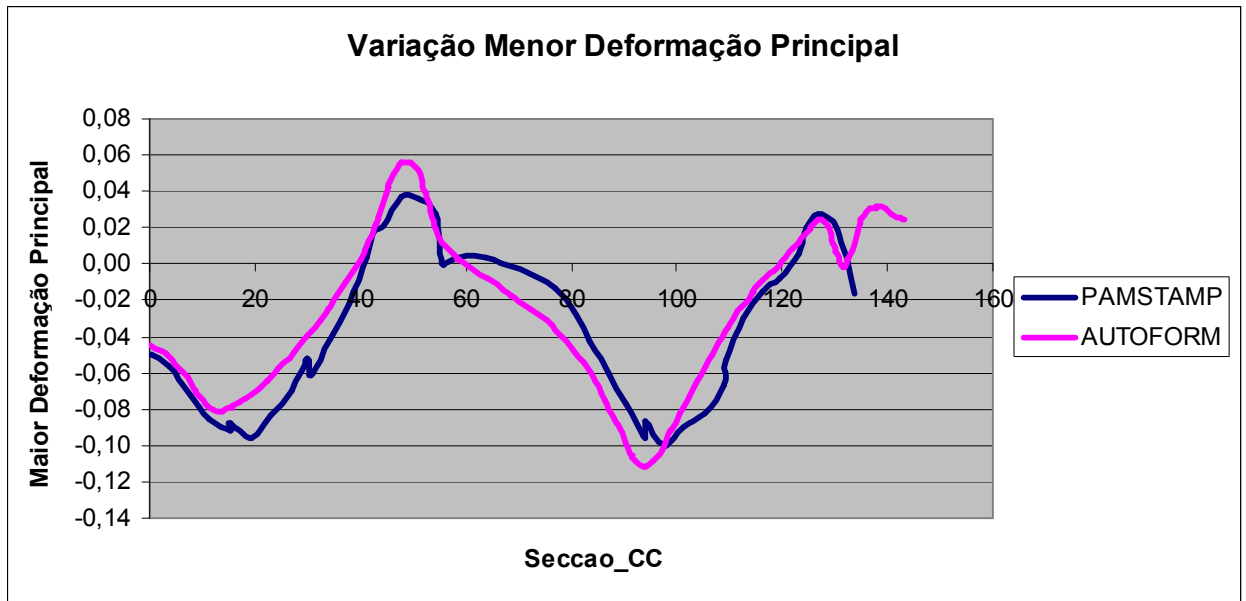


Gráfico 24: Evolução das deformações logarítmicas na secção C2D para LC2 (HC260LAD)

LC3

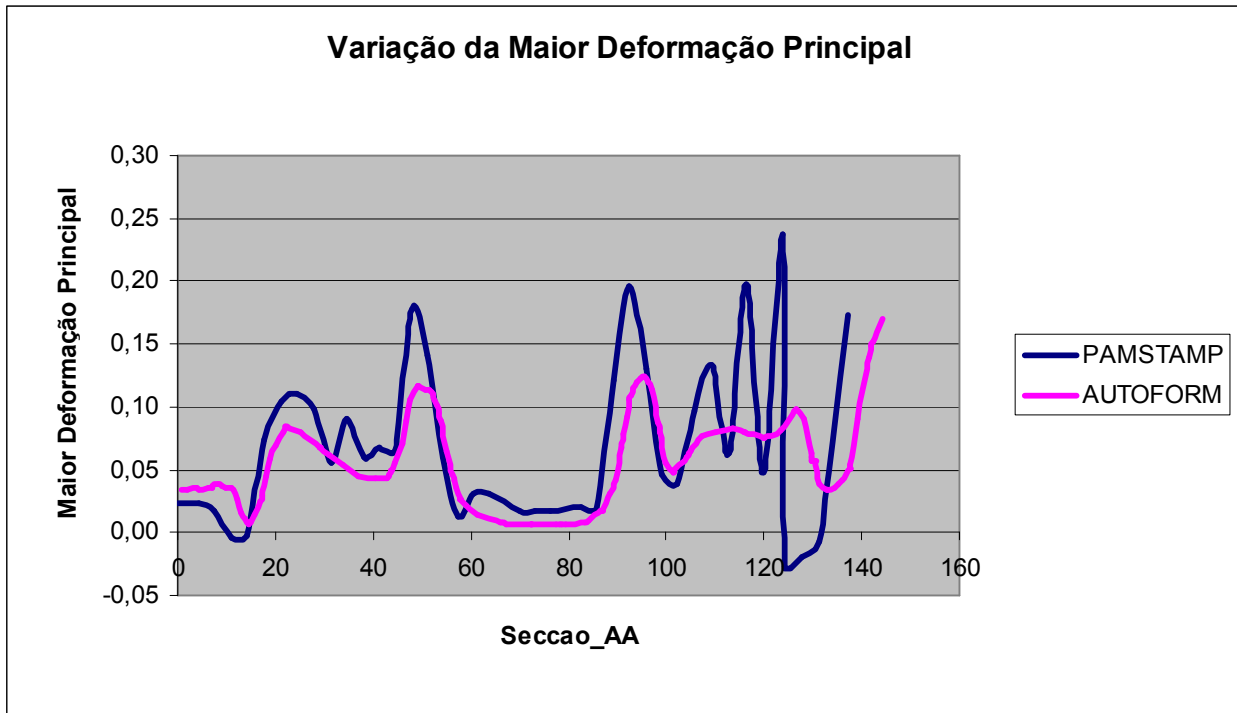


Gráfico 25: Evolução das deformações logarítmicas na secção A2D para LC3 (HC260LAD)

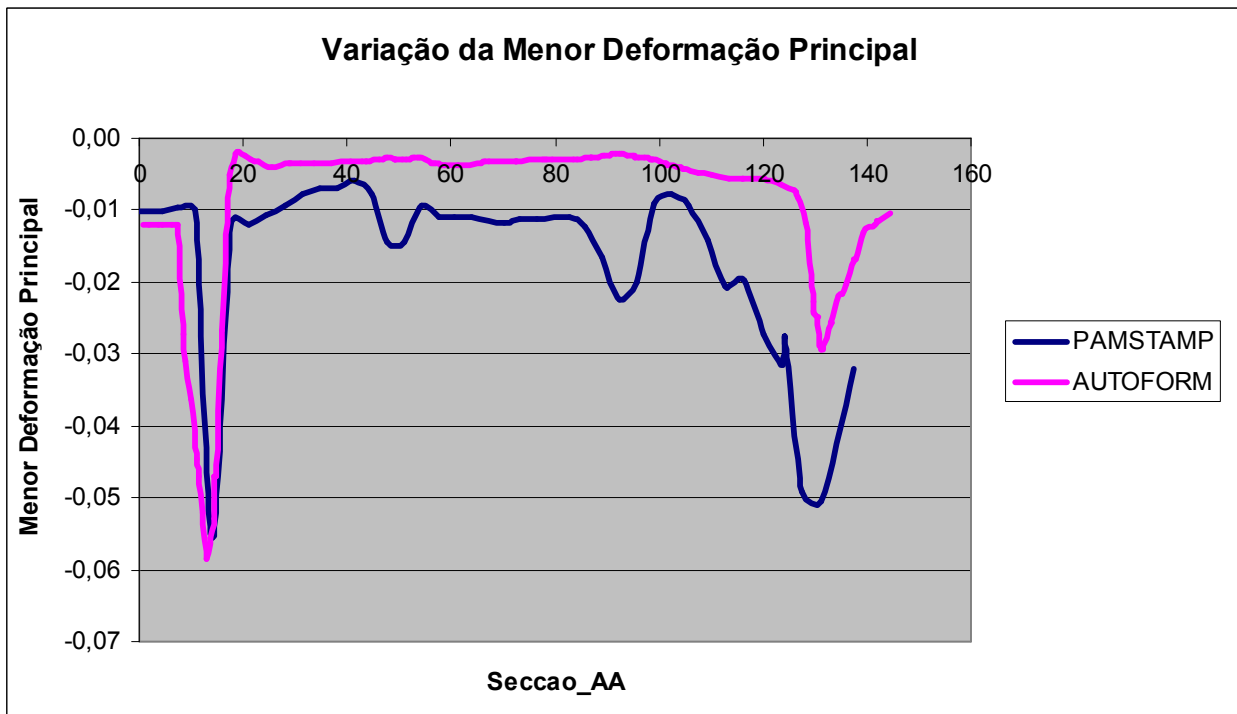


Gráfico 26: Evolução das deformações logarítmicas na secção A2D para LC3 (HC260LAD)

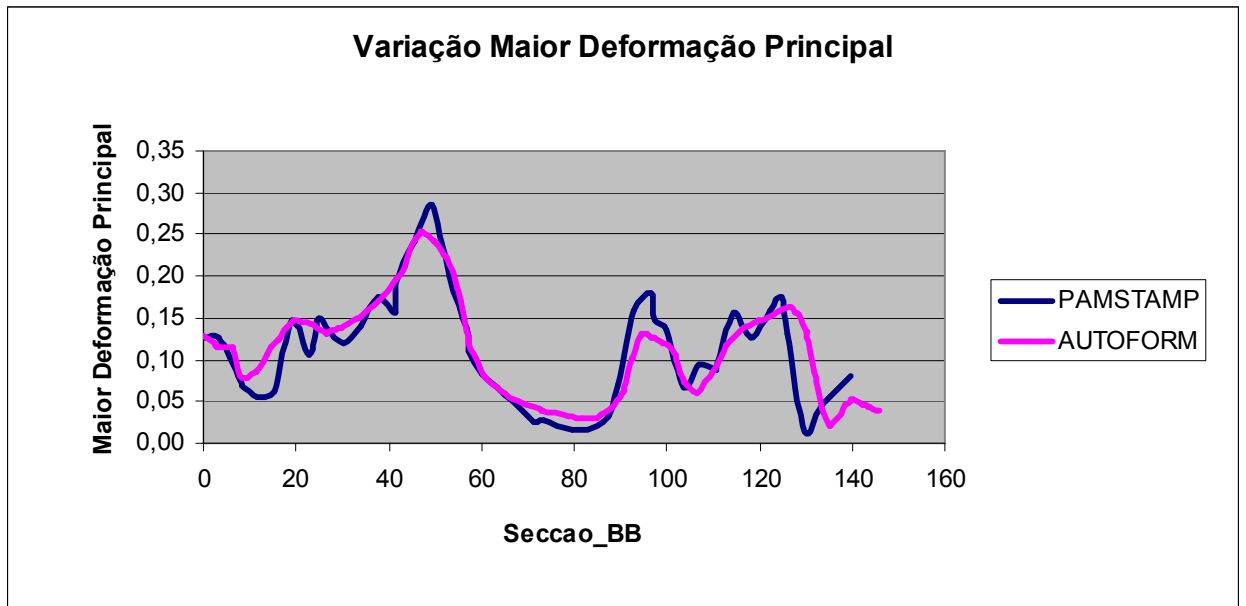


Gráfico 27: Evolução das deformações logarítmicas na secção B2D para LC3 (HC260LAD)

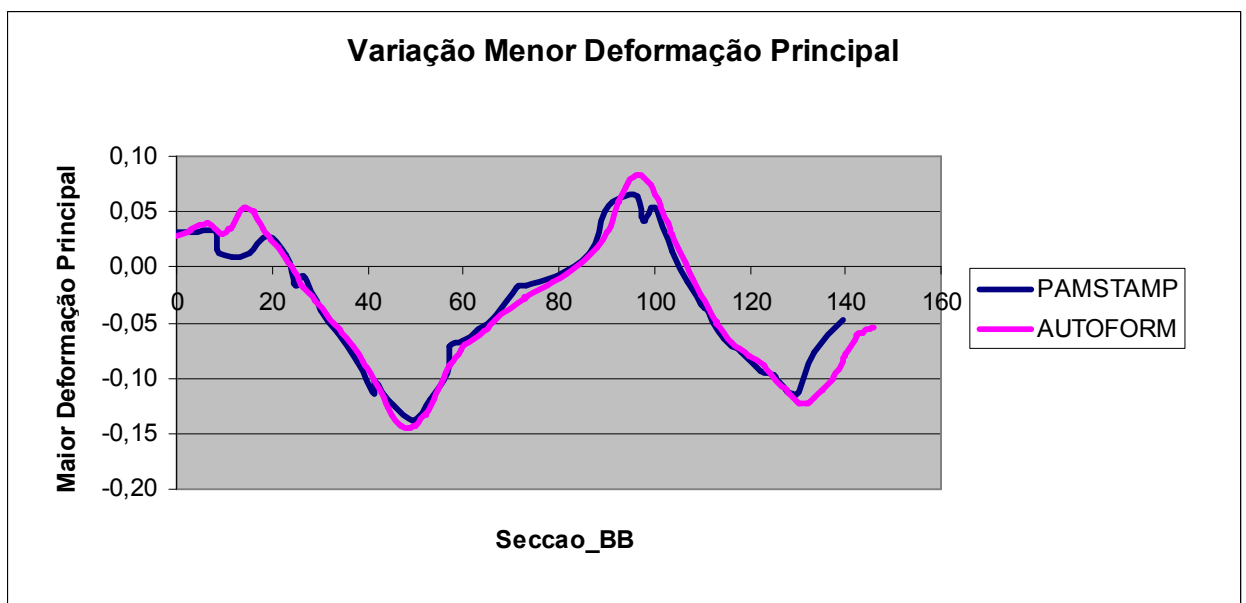


Gráfico 28: Evolução das deformações logarítmicas na secção B2D para LC3 (HC260LAD)

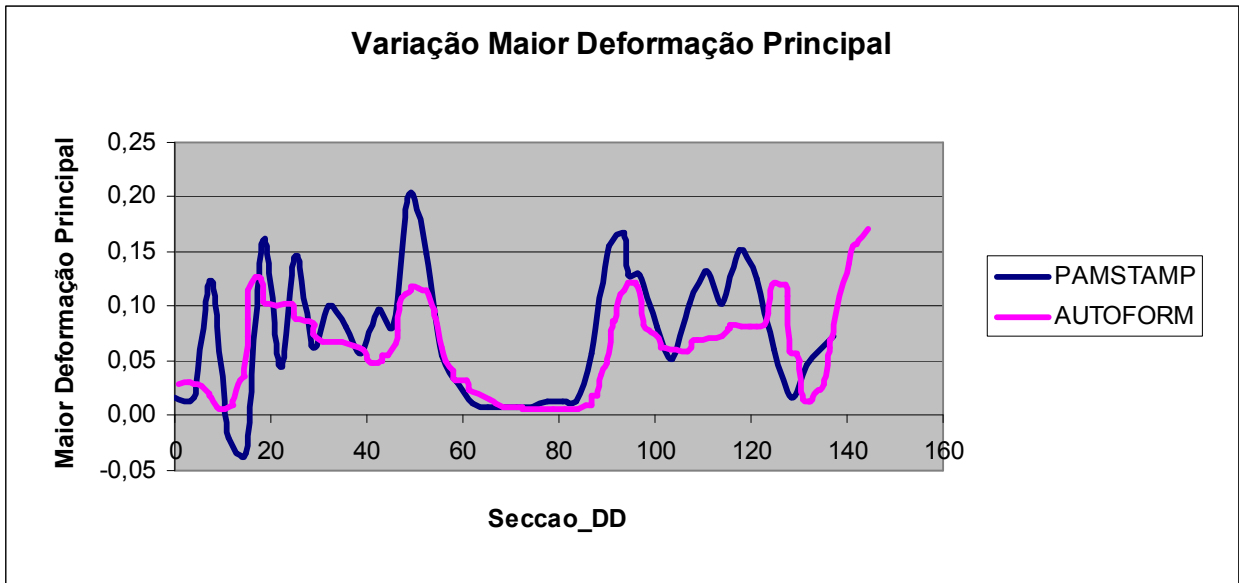


Gráfico 29: Evolução das deformações logarítmicas na secção D2D para LC3 (HC260LAD)

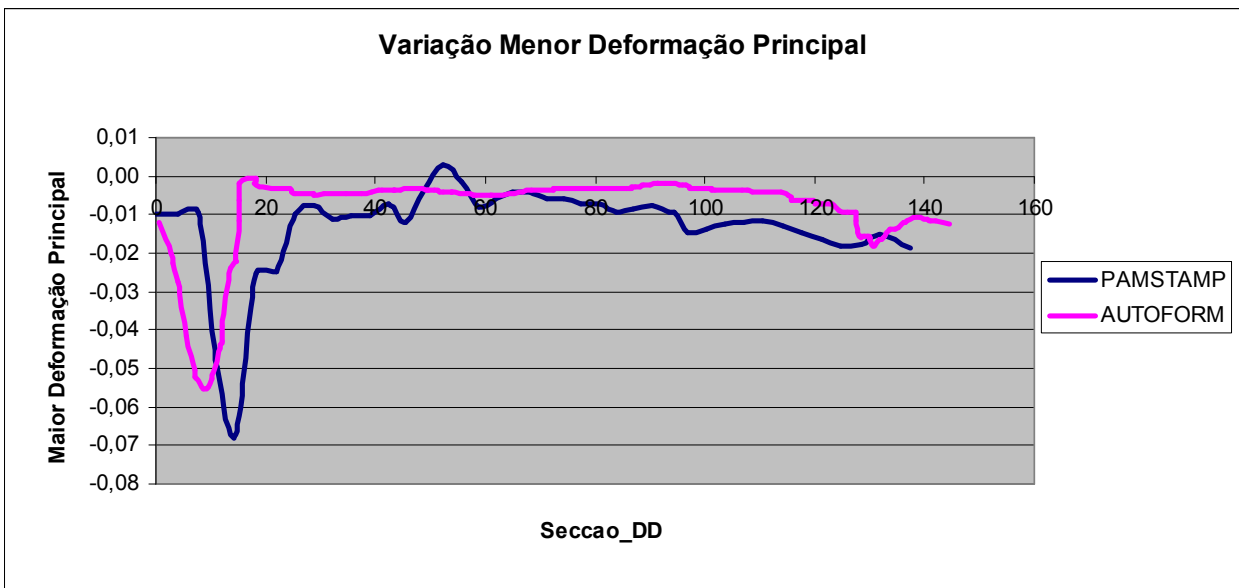


Gráfico 30: Evolução das deformações logarítmicas na secção D2D para LC3 (HC260LAD)

Distribuição das espessuras antes do retorno Elástico

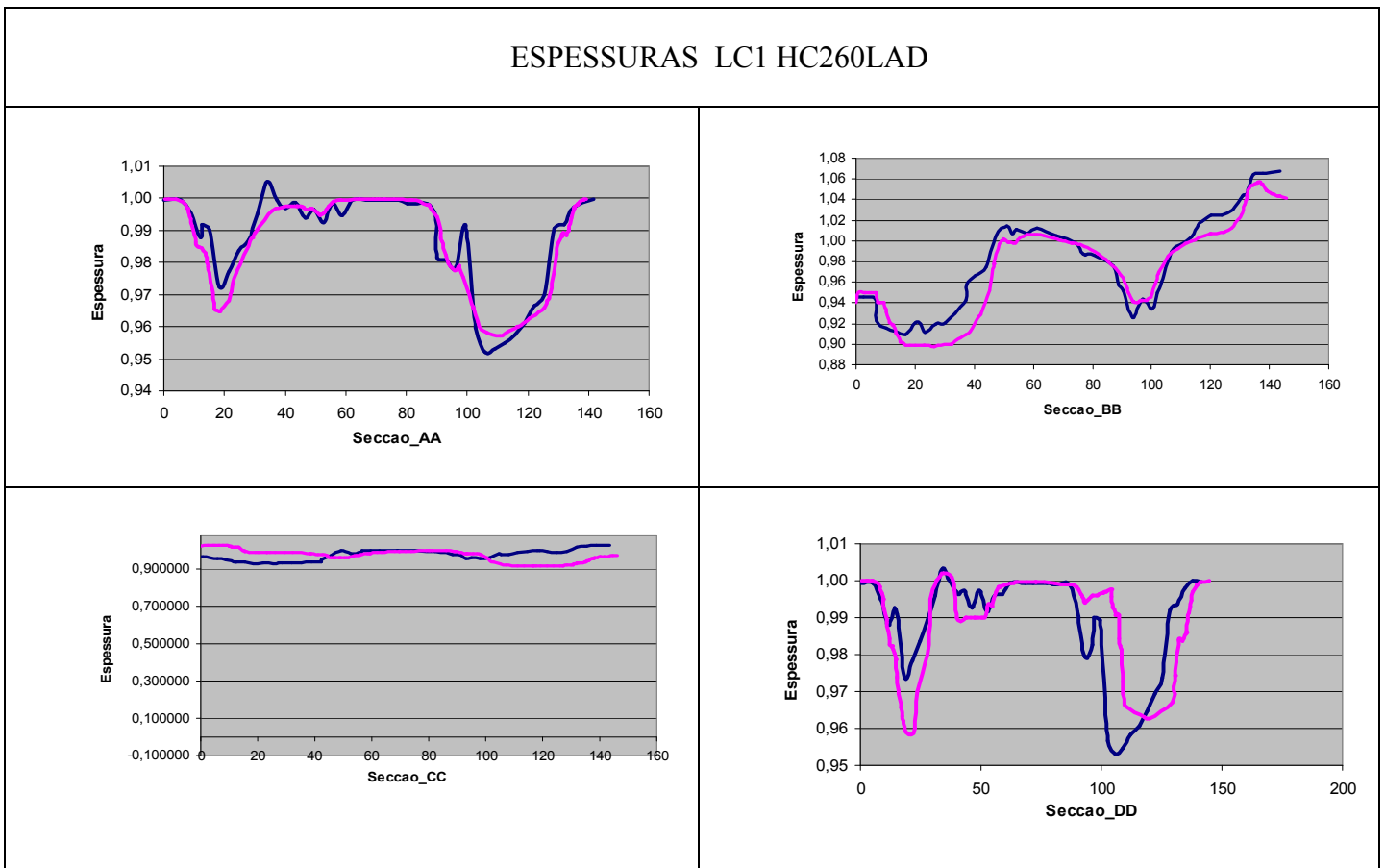


Gráfico 31: Evolução das espessuras ao longo das secções

