



FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA

Melhoria da previsão do fenómeno de retorno elástico em processos de estampagem multi-etapa

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

Autor

Óscar Fernando Barroso Pires

Orientadores

Mário António Santos

Marta Cristina Cardoso Oliveira

Júri

Presidente Professor Doutor Luís Filipe Martins Menezes
Professor Catedrático da Universidade de Coimbra

Vogais Professor Doutor José Luís Alves
Professor Auxiliar da Universidade do Minho

Orientador Engenheiro Mário António Santos
Coordenador de Desenho de Ferramentas na Volkswagen
Autoeuropa

Colaboração Institucional



**Volkswagen
Autoeuropa**

Coimbra, Julho, 2014

“O objectivo não é ver aquilo que ninguém viu, mas pensar o que ainda
ninguém pensou sobre aquilo que toda a gente vê”

Arthur Schopenhauer

Aos meus queridos pais, irmão e à Rita...

Agradecimentos

A realização deste trabalho apenas foi possível graças ao apoio incondicional da minha família, nomeadamente da minha mãe, irmão e do meu pai. A eles, um agradecimento sentido e muito profundo por todo o esforço, carinho, apoio e confiança que sempre demonstraram.

Um especial agradecimento há minha sempre presente namorada por tudo o que é e por todo o esforço adoptado quer nas boas quer nas más situações. A ti, um obrigado muito especial.

Não poderia deixar de agradecer à restante família que, de uma forma mais evidente ou mais discreta, sempre me apoiou. Em especial, uma gratulação mais sentida aos primos que sempre me deram força para continuar.

Aos meus amigos e colegas um muito obrigado pelo companheirismo, amizade, pelas aventuras, convívios e conselhos que sempre conferiram.

Relativamente à instituição que me acolheu, a Volkswagen Autoeuropa, que de forma exemplar me facultou todos os serviços necessários sem hesitação e financiando todo o processo adjacente ao meu estágio apenas tenho de agradecer a todo o colectivo envolvido.

À Unidade de Negócios de Cunhos e Cortantes, inserida no departamento das Prensas, especialmente ao meu orientador Mário Santos, à Susana Taveira, ao Luís B. Oliveira, ao João Teixeira, ao Bernardo Oliveira, ao Rui Pires, ao Tiago Ribeiro, ao Rodrigo Leal, ao André Soares e sem, de forma alguma, menosprezar nenhum dos restantes colegas que sempre me fizeram sentir bem-vindo, um muito obrigado pelo acolhimento, companheirismo e auxílio sempre prestado.

À empresa AutoForm[®] nomeadamente ao Sr.Mário Marques que facilitou o programa AutoForm[®] versão 3.1.1. assim como o seu licenciamento, um muito obrigado não só pela disponibilização do programa assim como o apoio sempre presente e disponível.

À professora Marta Oliveira, que como orientadora sempre me ajudou e elucidou nas dúvidas e certezas durante todo o projecto, expresse o meu agradecimento.

Por fim gostaria de prestar o meu agradecimento à instituição de ensino, a Universidade de Coimbra, mais concretamente ao Departamento de Engenharia Mecânica, por todos os anos que me acolheu.

Resumo

O foco deste estudo visa a melhoria da previsão do fenómeno de retorno elástico em processos de estampagem multi-etapa. A metodologia adoptada consiste em simular os vários processos a que a chapa está sujeita (embutidura, corte e dobragens) com diferentes combinações dos parâmetros numéricos disponíveis no programa AutoForm[®] de modo a controlar todo o processo de embutidura. O estudo considera uma chapa de um aço de alta resistência (HX) que apresenta propriedades ortotrópicas. Os parâmetros numéricos seleccionados (*radius penetration*, *max element angle*, *initial element size* e *max refinement level*) foram analisados de forma isolada, e a sua influência na previsão do retorno elástico determinada com base na comparação com a geometria nominal. A análise efectuada permitiu identificar uma forte interacção entre os parâmetros seleccionados. O posterior estudo, realizado com base na comparação dos resultados numéricos com experimentais, permitiu concluir que o parâmetro que apresenta um maior impacto é o *initial element size*. Os resultados indicam que a adopção de um menor valor inicial permite obter maior precisão na previsão do retorno elástico. No entanto, tal acarreta custos de computação e espaço virtual necessário. Assim, o refinamento recomendado corresponde a um compromisso entre a precisão e o custo, e corresponde a um tamanho de elemento inicial de 5 e um nível de refinamento máximo de 5. De referir que a indústria prefere obter maior precisão na previsão do retorno elástico em detrimento do tempo computação.

Palavras-chave: Retorno elástico, AutoForm, simulação multi-etapa, aços de elevada resistência.

Abstract

The main goal of this study is the improvement of springback prediction in multi-stage sheet metal forming processes. The method adopted consists in the simulation of the various processes undertaken by the blank (stamping, cutting and flanging) with different combinations for the numerical parameters available in AutoForm[®], in order to control all the stamping process. The study is performed considering a high strength steel sheet (HX) that presents orthotropic properties. The selected numerical parameters (*radius penetration, max element angle, initial element size* and *max refinement level*) were analyzed separately and their influence in springback prediction was analyzed based on the comparison with the reference geometry for the selected component. The analysis indicates a strong interaction between the selected parameters. The subsequent study performed, based on the comparison of the experimental results with numerical ones, allowed to conclude that the parameter that had the most influence is the initial element size. The results shows that the adoption of a smaller initial finite element size permits the improvement of the precision in springback prediction. Nevertheless, this corresponds to higher computation costs and virtual space demands. Thus, the recommended refinement (with an initial finite element size of 5 and a maximum refinement level of 5) presents the best compromise between precision and cost. Industry prefers to gain in results improvement as long as the computational costs remains within admissible values.

Keywords Springback, AutoForm, multi-step simulation, high strength steel

Índice

Índice de Figuras	ix
Índice de Tabelas	xiii
Índice de Gráficos.....	xv
Simbologia e Siglas	xvii
Simbologia.....	xvii
Siglas	xvii
1. PREVISÃO DO RETORNO ELÁSTICO.....	19
1.1. Introdução	19
1.2. Análise do retorno elástico.....	21
1.3. Melhorias na previsão do retorno elástico	26
1.4. Modelo Constitutivo do Material.....	29
1.4.1. Curva de encruamento do material	30
1.4.2. Encruamento cinemático	32
1.4.3. Critérios de plasticidade	33
1.4.4. Curva Limite de Embutidura	36
1.5. Parâmetros numéricos.....	39
1.5.1. Tipo de elemento: Casca.....	39
1.5.2. Discretização da chapa	40
1.5.2.1. Penetração radial	41
1.5.2.2. Número máximo de elementos por ângulo	41
1.5.2.3. Tamanho do elemento inicial	42
1.5.2.4. Nível de refinamento máximo.....	42
1.6. Resumo	43
2. PROCESSO MULTI-ETAPA	44
2.1. Etapa 1	46
2.2. Etapa 2	46
2.3. Etapa 3	47
2.4. Etapa 4	48
2.5. Etapa 5	49
3. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	51
3.1. Análise individualizada.....	51
3.1.1. Tratamento dos resultados	52
3.1.2. “Initial Element size” (“Max Refinement Level” de 5)	55
3.1.3. “Initial Element size” (“Max Refinement Level” de 7)	56
3.1.4. “Max Element angle” (“Max Refinement Level” de 5).....	59
3.1.5. “Max Element angle” (“Max Refinement Level” de 7).....	60
3.1.6. “Radius penetration” (“Max Refinement Level” de 5)	62
3.1.7. “Radius penetration” (“Max Refinement Level” de 7)	63
3.1.8. Tabela resumo.....	65

3.2. Análise global	66
3.2.1. Secções Horizontais.....	69
3.2.1.1. Secção A.....	69
3.2.1.2. Secção B.....	71
3.2.1.3. Secção C.....	73
3.2.1.4. Restantes secções horizontais.....	74
3.2.2. Secções Verticais.....	76
3.2.2.1. Secção G.....	76
3.2.2.2. Secção H.....	77
3.2.2.3. Secção I.....	78
3.2.2.4. Secção J.....	79
3.2.2.5. Secção L.....	79
3.2.2.6. Secção M.....	80
4. CONCLUSÕES.....	81
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	83
ANEXO A: Tabela integral das simulações	86
ANEXO B: Medições experimentais	88
ANEXO C: Comparativo dos refinamentos	97
ANEXO D: Secções e subsequentes subsecções.....	106

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 - Processo esquemático desde a concepção até ao modelo final (Burchitz, 2008)	20
Figura 1-2 Vista da peça de estudo no plano XZ	21
Figura 1-3 Elementos finitos triangulares (Borgmann, 2012)	21
Figura 1-4 Evolução da utilização dos aços na Indústria Automóvel Europeia (adaptada de (Malheiro, 2012))	24
Figura 1-5 Diferença do retorno elástico entre um aço macio e aço de elevada resistência (adaptada de (Haus, 2011))	24
Figura 1-6 Representação esquemática da influência no retorno elástico do(a): a – Módulo de elasticidade; b – Nível de deformação ou de tensão; c – Tensão limite de elasticidade (adaptada de (Duarte, 1997))	25
Figura 1-7 Exemplificação de alteração angular e ondulação lateral (adaptada de (Haus, 2011))	25
Figura 1-8 Curva ilustrativa do efeito de Bauschinger, comportamento transiente, suavização permanente e módulo de descarregamento não-linear (Zang et al., 2013)	27
Figura 1-9 Diferenças entre vários modelos de encruamento (adaptada de (Zhu et al., 2012))	27
Figura 1-10 Formas geométricas colocadas na peça de modo a aumentar o estiramento da peça	28
Figura 1-11 - Curva típica de tensão-deformação de um aço dúctil (Verterra, 2014)	30
Figura 1-12 Curva de tensão-deformação real de um aço com deformação plástica (ϵ_{pl}) (AutoForm [®])	30
Figura 1-13 Parâmetros para a determinação da curva de encruamento através do ensaio de tracção uniaxial (AutoForm [®])	31
Figura 1-14 Dados de entrada do material provenientes do ensaio de tracção (AutoForm)	32
Figura 1-15 Diferenças entre encruamento isotrópico e cinemático (adaptada de (Alves, 2003))	33
Figura 1-16 Comparação entre os resultados experimentais e curvas dos critérios de Von Mises, Hill 1948 e Hill 1993 para aço (Grilo, 2011)	34
Figura 1-17 Provetes orientados nas três direcções, 90° , 45° e 0° , em relação à direcção de laminagem (AutoForm [®])	35
Figura 1-18 Determinação do gradiente de deformação na zona de fissura (Malheiro, 2013)	36
Figura 1-19 Determinação da CLE (Malheiro, 2013)	37

Figura 1-20 Deformações típicas das células para diferentes trajectórias de deformação (Malheiro, 2013).....	37
Figura 1-21 Traçado típico de uma curva limite de embutidura (AutoForm®).....	38
Figura 1-22 Exemplo de fissuração e de enrugamento numa embutidura (Sun et al., 2010)	38
Figura 1-23 Formabilidade de um material genérico (AutoForm®).....	39
Figura 1-24 Parâmetros nodais do tipo de elemento: casca (Ferreira, 1990).....	40
Figura 1-25 Parâmetro do limite da penetração da ferramenta na platina (“ <i>Radius penetration</i> ”).....	41
Figura 1-26 Diferentes limites para o controlo dos elementos em função do ângulo: I-Max element angle =45; II-Max element angle =30 e III-Max element angle =22,5 (AutoForm®).....	41
Figura 1-27 Detalhes de refinamentos de malha com tamanho de elemento inicial de (a) 20 e (b) 5.....	42
Figura 1-28 Demonstração do parâmetro de controlo para um nível igual a 3 (AutoForm®)	43
Figura 2-1 Prensa TANDEM com processo multi-etapa (cortesia Volkswagen AutoEuropa)	44
Figura 2-2 Peça final em vista isométrica	45
Figura 2-3 (a) Vista superior representativa da primeira etapa e (b) peça virtual após primeira embutidura	46
Figura 2-4 (a) Vista superior representativa da segunda etapa e (b) peça virtual após segunda embutidura.....	47
Figura 2-5 (a) Vista superior representativa da terceira etapa e (b) peça virtual após primeira operação de corte	48
Figura 2-6 (a) Vista superior representativa da última etapa de corte e (b) peça virtual após a última operação de corte.....	49
Figura 2-7 (a) Peça final e (b) vista da peça final no plano Oxz	50
Figura 2-8 Distribuição de tensão ao longo da espessura (Tutelman et al,2014).....	50
Figura 3-1 - Grelha de marcação fase 1.....	53
Figura 3-2 Pontos da grelha de marcação no refinamento 5	54
Figura 3-3 Locais de fixação da peça para medição.....	67
Figura 3-4 Grelha de medição fase 2.....	68
Figura 3-5 (a) Grelha de secções horizontais e (b) grelha de secções verticais	68
Figura 3-6 Secção horizontal A e subsequentes secções 1, 2, 3, 4 e 5	69
Figura 3-7 (a) Deformação plástica equivalente para o refinamento V e (b) formabilidade da peça para o refinamento V.....	71
Figura 3-8 - Secção horizontal B e subsequentes secções 1, 2 e 3	71

Figura 3-9 - Secção horizontal C e subsequentes secções 1, 2, 3, 4, 5 e 6	73
Figura 3-10 - Secção horizontal D e subsequentes secções 1, 2, 3, 4 e 5	74
Figura 3-11 - Secção horizontal E e subsequentes secções 1 e 2	75
Figura 3-12 - Secção horizontal F e subsequentes secções 1, 2, 3 e 4	76
Figura 3-13 Secções (G, H, I, J, L e M) e subsecções (1, ..., 3) verticais.....	76

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2-1 – Propriedades elásticas e plásticas do aço HX180.....	45
Tabela 3-1 - Tabela parcial da <i>Guide Line</i>	52
Tabela 3-2 - Digitalização dos pontos do refinamento 5.....	55
Tabela 3-3 - Selecção dos refinamentos V, 4, 5 e 6	56
Tabela 3-4 - Selecção dos refinamentos 3, 33, 34 e 35	57
Tabela 3-5 - Selecção dos refinamentos V, 7, 8, 9, 10, 11 e 12	59
Tabela 3-6 - Selecção dos refinamentos A, 20, 21, 22, 23, 24 e 25	60
Tabela 3-7 - Selecção dos refinamentos V, 14, 15, 16, 17, 18 e 19	62
Tabela 3-8 - Selecção dos refinamentos A, 27, 28, 29, 30, 31 e 32	63
Tabela 3-9 - Tabela resumo dos refinamentos seleccionados	66

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 2-1 – Curva de encruamento do material HX180.....	45
Gráfico 3-1 - Secção H dos refinamentos V, 4, 5 e 6	56
Gráfico 3-2 - Secção H dos refinamentos 3, 33, 34 e 35	58
Gráfico 3-3- Médias comparativas entre os refinamentos: 3 vs V, 33 vs 4, 34 vs 5 e 35 vs 6 das secções H.....	58
Gráfico 3-4 Desvios-padrão comparativos entre os refinamentos: 3 vs V, 33 vs 4, 34 vs 5 e 35 vs 6 das secções H.....	58
Gráfico 3-5 - Secção H dos refinamentos V, 7, 8, 9, 10, 11 e 12	59
Gráfico 3-6 - Secção H dos refinamentos A, 20, 21, 22, 23, 24 e 25	61
Gráfico 3-7 - Médias comparativas entre os refinamentos: V vs A, 7 vs 20, 8 vs 21, 9 vs 22, 10 vs 23, 11 vs 24 e 12 vs 25 das secções H	61
Gráfico 3-8 – Desvios padrão comparativos entre os refinamentos: V vs A, 7 vs 20, 8 vs 21, 9 vs 22, 10 vs 23, 11 vs 24 e 12 vs 25 das secções H	61
Gráfico 3-9 - Secção H dos refinamentos V, 14, 15, 16, 17, 18 e 19	62
Gráfico 3-10 - Secção H dos refinamentos A, 27, 28, 29, 30, 31 e 32	64
Gráfico 3-11 - Médias comparativas entre os refinamentos: V vs A, 14 vs 27, 15 vs 28, 16 vs 29, 17 vs 30, 18 vs 31 e 19 vs 32 das secções H.....	64
Gráfico 3-12– Desvios padrão comparativos entre os refinamentos: V vs A, 14 vs 27, 15 vs 28, 16 vs 29, 17 vs 30, 18 vs 31 e 19 vs 32 das secções H.....	64
Gráfico 3-13 - Secção horizontal A1 com os refinamentos pré-seleccionados para a segunda fase	70
Gráfico 3-14 - Secção horizontal A5 com os refinamentos pré-seleccionados para a segunda fase	70
Gráfico 3-15- Secção horizontal B1 com os refinamentos pré-seleccionados para a segunda fase.....	72
Gráfico 3-16 - Secção horizontal B2 com os refinamentos pré-seleccionados para a segunda fase	73
Gráfico 3-17 - Secção horizontal C2 com os refinamentos pré-seleccionados para a segunda fase	74
Gráfico 3-18 - Secção horizontal D4 com os refinamentos pré-seleccionados para a segunda fase	75
Gráfico 3-19- Secção vertical G1 com os refinamentos pré-seleccionados para a segunda fase.....	77

Gráfico 3-20- Secção vertical H2 com os refinamentos pré-seleccionados para a segunda fase.....	78
Gráfico 3-21 - Secção vertical I1 com os refinamentos pré-seleccionados para a segunda fase.....	78
Gráfico 3-22 - Secção vertical J1 com os refinamentos pré-seleccionados para a segunda fase.....	79
Gráfico 3-23 - Secção vertical L2 com os refinamentos pré-seleccionados para a segunda fase.....	80
Gráfico 3-24 - Secção vertical M2 com os refinamentos pré-seleccionados para a segunda fase.....	80

SIMBOLOGIA E SIGLAS

Simbologia

r – Raio da ferramenta

t – Espessura da chapa

ε_{pl} – Deformação plástica

ε_{el} – Deformação elástica

P – Volume final

P_0 – Volume inicial

A – Área final

A_0 – Área inicial

l – Comprimento final

l_0 – Comprimento inicial

F – Força

σ – Tensão

\ln – Logaritmo neperiano

n – Expoente de encruamento

μ – Coeficiente de atrito

E – Módulo de elasticidade

Y – Tensão limite de elasticidade em tracção uniaxial

F, G, H, L, M e N – Parâmetros de anisotropia do critério de Hill'48

Siglas

DEM – Departamento de Engenharia Mecânica

FCTUC – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

CAD – Computer Aided Design

E-DA – Enhanced Displacement Adjustment

E-DA-3D – Enhanced Displacement Adjustment 3 Dimensions

TRIP – Transformation Induced Plasticity

TEIP – Total Elastic Incremental Plastic

FLC – Forming Limit Curve

AHSS - Advanced High Strength Steel

1. PREVISÃO DO RETORNO ELÁSTICO

1.1. Introdução

O processo de estampagem multi-etapa é, como o próprio nome indica, um processo em que a chapa passa por várias etapas a fim de se obter a forma final desejada. Um dos grandes problemas deste processo é o retorno elástico pois, havendo uma alteração de forma quando a peça transita de uma etapa para a etapa posterior, o posicionamento é alterado, o que pode conduzir a uma deformação não desejada. O retorno elástico é definido como a diferença entre a chapa na fase final e na nominal (i.e. a fase final de conformação, antes da remoção das ferramentas). Este é um fenómeno complexo pois depende de vários factores, tais como: dimensão e forma da peça; condições de contacto (atrato); propriedades do material; espessura da chapa (Panthi, Ramakrishnan, Ahmed, Singh, & Goel, 2010); temperatura e travamentos (Haus, 2011). Os processos multi-etapa são amplamente utilizados na indústria automóvel, na indústria aeronáutica, na produção de vários utensílios usados quotidianamente e em outras áreas. As etapas podem envolver:

- Deformação;
- Dobragem;
- Corte.

A optimização de processos multi-etapa é fundamental na indústria automóvel uma vez que, do custo total de uma viatura nova, cerca de 20% é devido à incorporação de componentes conformados em chapa (Alves, 2003). Por outro lado, as formas dos painéis tanto exteriores como interiores são cada vez mais complexas. Acresce ainda o aumento das restrições associadas às questões ambientais e de segurança que têm conduzido à crescente utilização de aços de alta resistência. Contudo, este tipo de aços apresentam menor formabilidade e maior retorno elástico do que aços macios (Haus, 2011).

Para combater as adversidades provocadas por estas características assim como, diminuir custos, aumentar a eficiência e a rapidez de todo o processo, a utilização de programas de simulação é parte integrante e imprescindível. Estes são baseados no método dos elementos finitos (doravante denominado por MEF), que para além de possibilitarem a

determinação do estado de tensão e de deformação de um sólido de geometria arbitrária sujeito a acções exteriores (Azevedo, 2003), possibilita a análise de alterações sem que acarrete custos avultados (Burchitz, 2008). A simulação numérica baseada no MEF pode servir para identificar e prever eventuais problemas durante o fabrico (Teixeira-Dias, 2010).

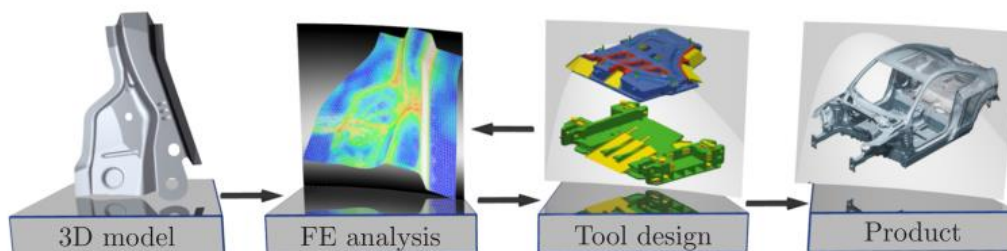


Figura 1-1 - Processo esquemático desde a concepção até ao modelo final (Burchitz, 2008)

Na concepção de peças com recurso ao MEF, o retorno elástico é, ainda hoje, um problema grave e presente para os projectistas na conformação de peças com maior ou menor complexidade. A Figura 1-1 apresenta esquematicamente o processo de concepção de uma peça desde o modelo 3D até ao produto final. Este fenómeno é um dos principais factores que determina a forma final das ferramentas e, conseqüentemente, do produto. Muitas vezes, este defeito dimensional apenas é resolvido com recurso a processos de tentativa erro já em plena fase de *try-out* experimental das ferramentas. Estes processos, para além de serem morosos, acarretam custos elevados, não só em termos materiais como temporais. Apesar de extensas pesquisas e casos de estudo realizados anteriormente, quer para a análise da influência de parâmetros numéricos, quer de modelos de comportamento do material, a precisão na previsão deste fenómeno ainda não é a exigida. A diferença entre resultados numéricos e experimentais é mais notória em peças mais complexas. A baixa eficácia na previsão deste defeito deve-se à falta de compreensão deste fenómeno e ao uso de modelos numéricos e constitutivos dos materiais que recorrem a simplificações (Burchitz, 2008).

O caso de estudo seleccionado é uma peça complexa que contempla: duas embutiduras em direcções opostas, furos, cortes e dobras (ver Figura 1-2). O objectivo deste trabalho é analisar a influência de parâmetros numéricos na previsão do fenómeno de retorno elástico. Neste contexto, a peça e as condições de análise foram seleccionadas de modo a descrever um caso de estudo industrial. Uma vez que foi utilizado o programa AutoForm[®] (versão 3.1.1.) para simular o processo, nas secções seguintes deste capítulo abordam-se alguns aspectos teóricos relacionados com o fenómeno do retorno elástico e com os modelos,

de modo a evidenciar as potencialidades e limitações do programa comercial seleccionado. Os parâmetros numéricos seleccionados são também descritos em detalhe.



Figura 1-2 Vista da peça de estudo no plano XZ

1.2. Análise do retorno elástico

Ao longo dos últimos anos, existiu uma constante preocupação no desenvolvimento de modelos constitutivos que permitam descrever correctamente o comportamento mecânico do material durante a embutidura. O princípio do MEF consiste na divisão do domínio (meio contínuo) do problema em sub-regiões de geometrias simples (ver Figura 1-3) as quais podem ser triangulares, quadrilaterais, cúbicas, etc. O objectivo passa por resolver um problema complexo, subdividindo-o numa série de problemas mais simples. Os elementos finitos utilizados na discretização são conexos entre si através de determinados pontos, denominados por nós ou pontos nodais, conforme se pode ver na figura seguinte. Ao conjunto de elementos finitos e pontos nodais dá-se o nome de malha de elementos (Borgmann, 2012).

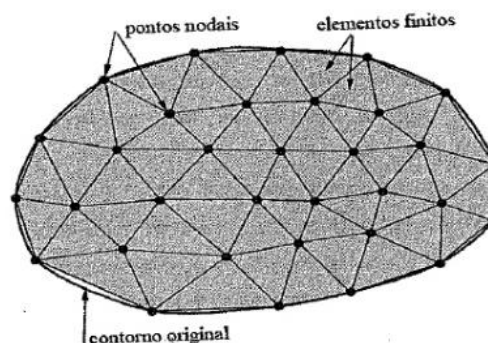


Figura 1-3 Elementos finitos triangulares (Borgmann, 2012)

De facto, os esforços para prever correctamente desvios dimensionais, vulgarmente denominados por retorno elástico, e defeitos geométricos exigem o desenvolvimento de

modelos constitutivos mais precisos. Tal como referencia Burchitz (2008), o retorno elástico pode ser definido como uma alteração elástica de forma que tem lugar aquando da remoção das cargas externas. Este é um defeito de forma não desejado e tem sido objecto de estudo por vários autores. Tomemos por exemplo Asgari (2008) que efectuou um estudo no qual demonstra que o número de pontos de integração na direcção da espessura tem um impacto significativo na previsão do retorno elástico de aços TRIP, utilizando tanto métodos implícitos como métodos explícitos. Também nesse estudo Asgari demonstrou que, em simulações, existem vários parâmetros que podem infligir desconformidades na previsão do retorno elástico, nomeadamente, o *offset* da ferramenta que tem impacto acentuado quando se modela este tipo de aços utilizando métodos explícitos e implícitos combinados; o módulo de elasticidade (E) e o coeficiente de atrito (μ). De modo a concluir, Asgari refere que os programas existentes são robustos para determinar uma correcta previsão do retorno elástico porém, quando se trata de aços AHSS (“*Advanced High Strength Steel*”), é necessário ter ainda mais atenção aos pequenos detalhes utilizados (correcta introdução das características dos materiais, modelo constitutivo, etc.) referentes aos materiais.

Burchitz (2008) determinou que para melhorar a precisão, o erro da discretização tem que ser minimizado, isto é, um correcto refinamento da malha descreve com maior precisão o estado de tensões no final das embutiduras. Também menciona que para minimizar o erro deve ser utilizado um nó por cada 9° de ângulo entre elementos adjacentes.

Um estudo efectuado por Haus (2011), no qual avaliou o impacto da modelação do efeito de Bauschinger no retorno elástico, concluiu que este é mais acentuado para aços TRIP em comparação com os aços macios (DC). Também verificou, experimentalmente, que os raios de curvatura e folgas entre a matriz e punção também têm impacto no retorno elástico. Meinders (2008) sugere regras para a discretização da chapa, nas quais indica 10 elementos para descrever, com mais precisão, os raios e demonstrou o potencial da utilização da integração adaptativa através da espessura. Para além deste melhoramento, Mendeirs utilizou o MEF para adaptar a geometria das ferramentas de modo a compensar o retorno elástico da peça. Nesse trabalho também é desenvolvida uma ferramenta que permite modificar a geometria CAD automaticamente. Esta geometria é baseada na compensação de modo a que após o defeito dimensional da peça, esta fique com a forma pretendida. Em resumo, Meinders determinou os melhores parâmetros para a correcta discretização da

chapa, adaptou a geometria das ferramentas e automaticamente compensou estas em formato CAD.

Cafuta et. al (2012) propuseram a utilização do método E-DA (“*Enhanced Displacement Adjustment*”), o qual se baseia na otimização das ferramentas de embutidura, com base na comparação entre a geometria prevista pela simulação numérica e a geometria final pretendida. A geometria das ferramentas é corrigida iterativamente até que a diferença entre a geometria final prevista e a pretendida seja mínima. Os autores designam este método de melhorado porque estabelece uma melhor relação entre a geometria discretizada do componente pretendido e a geometria das ferramentas, de modo a avaliar de forma mais eficiente as correções a introduzir com base na geometria prevista. O processo disponibiliza a determinação das ferramentas para que após a embutidura das peças, estas apresentem a forma pretendida. Para segurar este procedimento, o método tem em consideração o retorno elástico ocorrido após a libertação das ferramentas assim como o impacto da variação da espessura. Mole et al, (2014) introduziram um melhoramento a este método (E-DA-3D), de modo a poder ser utilizado em problemas complexos tridimensionais.

Panthi et al. (2010) utilizaram o algoritmo TEIP (“*Total Elastic Incremental Plastic*”) com o intuito de investigar a influência de alguns parâmetros no fenómeno do retorno elástico. Concluíram que este fenómeno é muito dependente das propriedades dos materiais (tensão de cedência, módulo de Young, encruamento) e de parâmetros geométricos (espessura da chapa, relação r/t (relação entre raio de curvatura (r) e a espessura (t)).

A crescente utilização de aços de alta resistência surge associada à salvaguarda das gerações futuras e à garantia da segurança dos condutores e transientes. Na Figura 1-4 pode contemplar-se a evolução da escolha dos aços em função dos desenvolvimentos tecnológicos. O problema que advém do uso destes aços resulta do aumento da sua resistência (tensão limite de elasticidade), o que implica um maior retorno elástico, tal como se pode constatar na Figura 1-5. Quanto maior for o limite elástico do material, maior será a diferença dimensional. Por outro lado, a crescente preocupação com a redução do peso do veículo (menor poluição o que implica maior rendimento) faz com que sejam utilizadas chapas cada vez mais finas, o que incrementa um aumento da alteração dimensional (Haus, 2011).

Mangas (2006) realizou um estudo no qual avalia diferentes parâmetros, nomeadamente: pontos de integração, tipo de elementos, tipo de malha, força do pisador e

leis de encruamento (isotrópico e cinemático). O trabalho consistiu em analisar estes parâmetros conformando o componente de forma em U numa única etapa. Neste estudo concluiu que os parâmetros que mais influência têm no retorno elástico são o coeficiente de atrito e as leis constitutivas dos materiais, mais concretamente a evolução do módulo de Young. Para além disso, também faz referência à importância da melhor modelação do comportamento do material através do encruamento cinemático. Contudo, este parâmetro parece ser mais influente no caso da previsão da ondulação lateral (ver Figura 1-7).

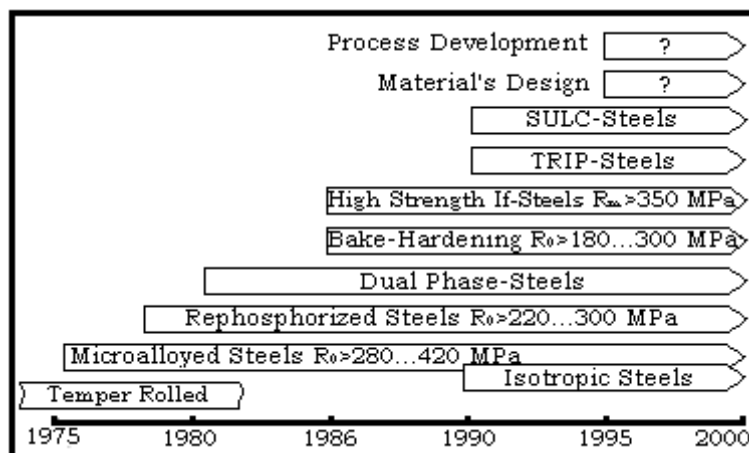


Figura 1-4 Evolução da utilização dos aços na Indústria Automóvel Europeia (adaptada de (Malheiro, 2012))

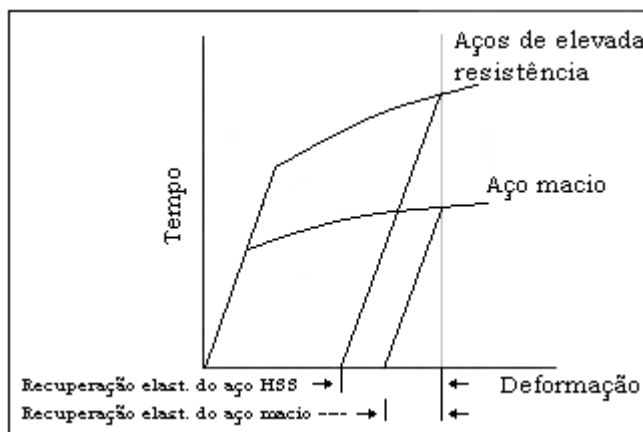


Figura 1-5 Diferença do retorno elástico entre um aço macio e aço de elevada resistência (adaptada de (Haus, 2011))

Como irá ser discutido no Capítulo 2, nos processos multi-etapa, em cada operação ocorre libertação da ferramenta e, conseqüentemente, retorno elástico. Com efeito, a peça sofre este fenômeno entre todas as operações, com maiores ou menores alterações dimensionais, consoante a etapa realizada. Como já foi referido, os problemas dimensionais

são decorrentes de vários factores, tais como formas e dimensões da geometria e da ferramenta; condições de atrito e contacto; propriedades do material; espessura da chapa (Haus, 2011); sensibilidade do material ao efeito de Bauschinger; relação entre o raio da ferramenta e espessura da chapa (r/t) (Burchitz, 2008); temperatura, entre outros. Para além destes parâmetros afectarem isoladamente este fenómeno, como se ilustra esquematicamente na Figura 1-6, a sua combinação torna ainda mais difícil a sua correcta previsão.

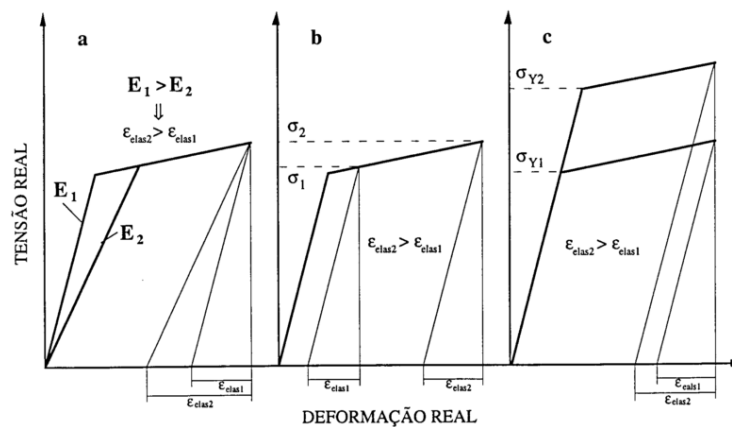


Figura 1-6 Representação esquemática da influência no retorno elástico do(a): a – Módulo de elasticidade; b – Nível de deformação ou de tensão; c – Tensão limite de elasticidade (adaptada de (Duarte, 1997))

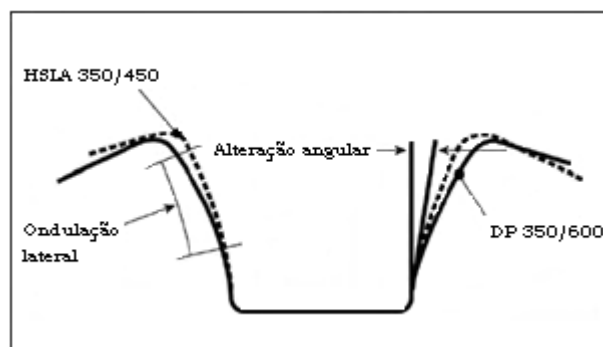


Figura 1-7 Exemplificação de alteração angular e ondulação lateral (adaptada de (Haus, 2011))

A nomenclatura do tipo de retorno elástico varia de autor para autor mas o conceito mantém-se. Por exemplo, Haus (2011) considera haver três variantes deste fenómeno: alteração angular; ondulação lateral e torção. Para um exemplo de um perfil em U, dois destes tipos de retorno elástico, alteração angular e ondulação lateral, podem ser visualizados na Figura 1-7. Este tipo de componente é o mais utilizado para estudar estes dois tipos de

retorno elástico, uma vez que pode ser analisado considerando condições de deformação plana (análise bidimensional).

Burchitz (2008) refere que o retorno elástico pode ser do tipo:

- Dobragem;
- Membrana;
- Torção;
- Dobragem e membrana combinado.

Existem outros tipos de nomenclaturas porém o problema é consensual e a sua previsão e consequente resolução é ainda difícil.

1.3. Melhorias na previsão do retorno elástico

A correcta previsão do retorno elástico implica obrigatoriamente uma correcta modelação de todas as operações, de modo a prever os estados finais de tensões e deformações. Esta modelação é um problema árduo de ultrapassar devido à grande dificuldade de descrever todas as variáveis presentes numa embutidura multi-etapa. Desde formas complexas até à utilização de aços de alta resistência, da previsão da distribuição das forças/pressões, passando pelos diferentes detalhes associados ao comportamento do material, *etc.*, a constante evolução dos modelos numéricos utilizados têm fomentado o crescimento económico assim como o investimento na investigação. Esta procura pela melhoria contínua é importante na medida em que mais e melhores modelos são estudados. Tome-se por exemplo Zhu et al. (2012) que considera que para haver uma correcta previsão o modelo tem de contemplar: (1) a variação do módulo de elasticidade e a recuperação não linear; (2) a inclusão do efeito de Bauschinger no modelo de comportamento, uma vez que a utilização de encruamento isotrópico conduz a uma previsão de retorno elástico majorada; (3) os correctos parâmetros anisotrópicos do material. Wagoner, Lim, & Lee (2013) mencionam os requisitos para uma boa previsão do retorno elástico, nomeadamente: o modelo constitutivo do material; variação do módulo de Young e correcta previsão do gradiente de tensões na direcção da espessura. No âmbito das leis constitutivas do material, Zang et al.(2013) considera que os modelos devem ser capazes de representar o efeito de Bauschinger, o comportamento transiente e a suavização permanente, assim como a descarga

não linear, como se ilustra na Figura 1-8. A utilização de uma parametrização detalhada do modelo é extremamente importante para uma boa previsão do retorno elástico.

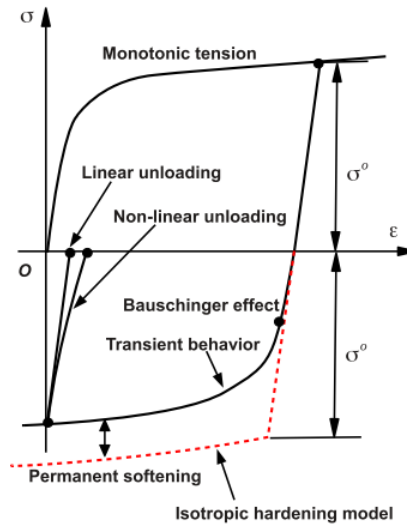


Figura 1-8 Curva ilustrativa do efeito de Bauschinger, comportamento transiente, suavização permanente e módulo de descarregamento não-linear (Zang et al., 2013)

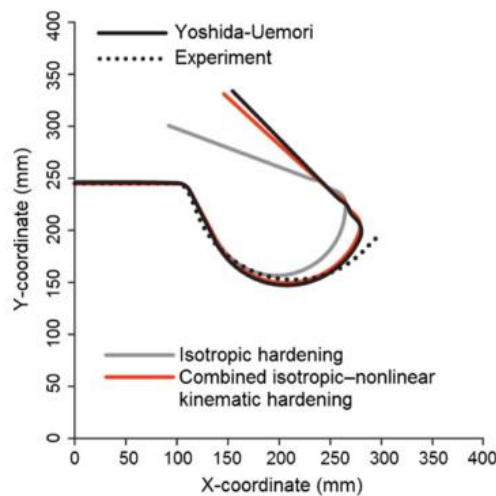


Figura 1-9 Diferenças entre vários modelos de encruamento (adaptada de (Zhu et al., 2012))

De modo a obter uma previsão mais correcta, as considerações referenciadas têm de ser tomadas individualmente e, mais importante, devem ser tomadas em conjunto. A título de exemplo, na Figura 1-9 observa-se a discrepância entre resultados experimentais e de diferentes modelos de encruamento (encruamento isotrópico, combinação entre encruamento isotrópico e cinemático não linear e o modelo de Yoshida-Uemori). Neste exemplo, o modelo cinemático contempla o efeito de Bauschinger apenas por um modelo

não linear. Se a porção de chapa que passa pela zona de travamento é incluída na forma final da peça, este efeito tem de ser tido em conta (Oliveira, 2006). Este comportamento não é descrito pelo modelo isotrópico uma vez que este não permite descrever a alteração da tensão de escoamento após uma pré-deformação (Yoshida, 2006). Este efeito ocorre com mais ênfase nos travamentos em que, para assegurar um escoamento da chapa contínuo, estes impõem várias dobragens em sentidos opostos, induzindo níveis de tensões plásticas equivalentes elevadas (Alves, 2006).

Em relação ao tipo de elementos finitos, alguns estudos indicam melhorias na previsão do retorno elástico quando se utilizam elementos do tipo 3D sólidos (Padmanabhan, 2007), em particular para pequenas relações r/t . Contudo, com este tipo de elemento os custos computacionais aumentam significativamente, pelo que os programas comerciais utilizam sobretudo elementos do tipo casca.

Actualmente o retorno elástico é controlado através de dois métodos:

- Aumentar a tensão na chapa, seja aumentando a força do pisador ou colocando formas geométricas (Figura 1-10);
- Compensando a forma das ferramentas para no final se obter a dimensão pretendida.

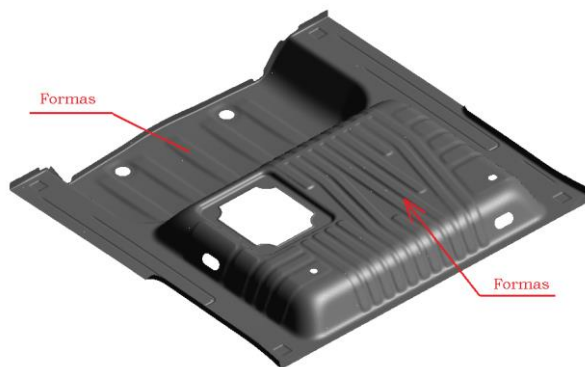


Figura 1-10 Formas geométricas colocadas na peça de modo a aumentar o estiramento da peça

Tal como foi referido anteriormente, foram propostos algoritmos de compensação da geometria das ferramentas de modo a minimizar o seu efeito. Mole et al. (2014) introduziram um melhoramento do método E-DA, que tem em consideração a remoção das ferramentas e o impacto da diminuição da espessura da chapa. Este último parâmetro tem um impacto significativo uma vez que o gradiente de tensões é tido em consideração. No entanto, para

que estes algoritmos sejam robustos é necessário garantir a correcta previsão do fenómeno de retorno elástico.

Uma outra forma de contornar o problema pode também passar por uma embutidura a quente. Isto é, a platina é aquecida a uma temperatura de cerca de 900 °C antes do processo de embutidura. Durante o processo o material encontra-se na fase austenítica e a baixa temperatura das ferramentas asseguram que a chapa tem um rápido arrefecimento de modo a obter uma estrutura martensítica. Este processo confere uma boa formabilidade e um baixo retorno elástico contudo, o grande conhecimento necessário sobre o processo e o comportamento do material com a temperatura é fundamental (A. Turetta, 2006). Para além disso, este processo acarreta maior investimento.

1.4. Modelo Constitutivo do Material

Na análise dos processos de conformação plástica é fulcral ter-se a capacidade de descrever correctamente o comportamento plástico dos materiais. A superfície de plasticidade inicial e a sua evolução, que é em geral traduzida pela lei de encruamento, são características mecânicas relevantes que servem para descrever a resposta e o comportamento mecânico dos materiais metálicos quando sujeitos a esforços em diferentes direcções. De um ponto de vista macroscópico, os modelos fenomenológicos descrevem o comportamento plástico de um material com base em leis que se aproximam dos resultados experimentais. 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. Por conseguinte, esta secção dá ênfase à vertente do comportamento dos materiais, nomeadamente:

- Curva de encruamento do material;
- Encruamento cinemático;
- Critérios de plasticidade;
- Curva Limite de Embutidura.

1.4.1. Curva de encruamento do material

Os materiais metálicos caracterizam-se por apresentar um regime de deformação elástica e plástica. Em geral, para descrever este comportamento recorre-se a um diagrama de tensão-deformação, que tanto pode ser convencional ou real, como se mostra na Figura 1-11. Com base nestes diagramas podem ser obtidos os valores para a tensão de rotura e para a tensão limite de elasticidade, real ou convencional. O aumento da tensão de escoamento durante a deformação plástica designa-se por encruamento.

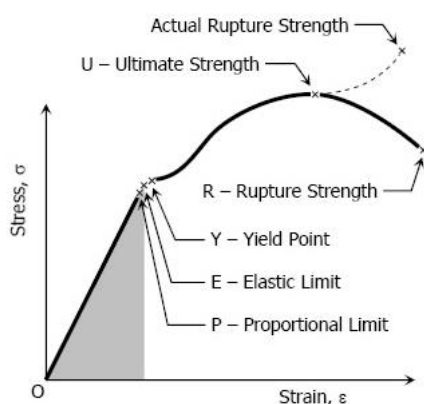


Figura 1-11 - Curva típica de tensão-deformação de um aço dúctil (Verterra, 2014)

A deformação mais interessante para a simulação numérica de processos de conformação de chapas metálicas é a plástica pois, em geral, os materiais metálicos apresentam pequenas deformações elásticas e a plástica é a que corresponde a uma deformação permanente. Contudo, a componente elástica tem um grande impacto no que concerne à previsão de retorno elástico, na medida em que quanto maior for a tensão limite elástica, maior será o retorno elástico.

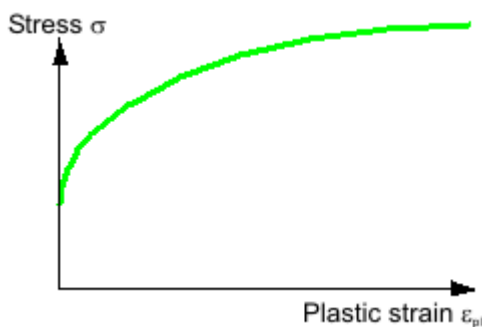


Figura 1-12 Curva de tensão-deformação real de um aço com deformação plástica (ϵ_{pl}) (AutoForm®)

A descrição do encruamento isotrópico é normalmente realizada com base na curva tensão equivalente *versus* deformação plástica equivalente, tal como se mostra na Figura 1-12. Esta curva é tipicamente obtida com base num ensaio de tracção uniaxial, cujas principais variáveis são apresentadas na Figura 1-13.

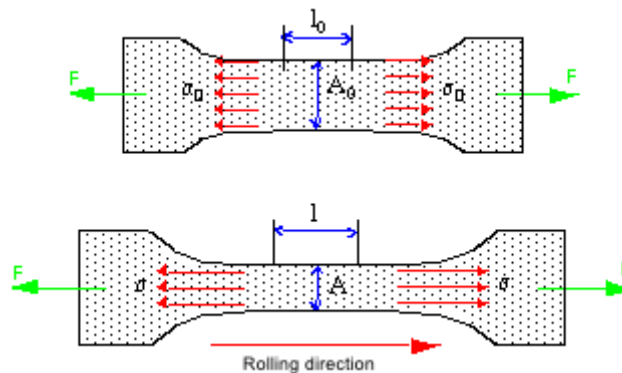


Figura 1-13 Parâmetros para a determinação da curva de encruamento através do ensaio de tracção uniaxial (AutoForm®)

O ensaio de tracção uniaxial permite determinar a tensão com base na medição da força e da deformação ao longo do ensaio. A determinação da tensão baseia-se, essencialmente, na condição de deformação uniforme da zona útil e na hipótese de conservação de volume.

$$P_0 = P \Leftrightarrow A_0 \times l_0 = A \times l \quad (1.1)$$

em que P é o volume em cada instante, definido em função da área em cada instante A e do comprimento l , sendo o índice 0 utilizado para definir as variáveis no início do ensaio. A deformação plástica ε_{pl} é determinada em função da variação de comprimento do provete.

$$\varepsilon_{pl} = \ln\left(\frac{l}{l_0}\right) - \varepsilon_{el} \quad (1.2)$$

em que ε_{el} é a deformação elástica. A tensão real é determinada como:

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{F}{A_0 \times e^{-\varepsilon_{pl}}} \quad (1.3)$$

Existem várias leis fenomenológicas que podem ser utilizadas para descrever o encruamento isotrópico. No AutoForm[®] as leis disponíveis são as de Swift, Ludwik, Gosh, Hockett-Sherby, a combinação da lei de Swift com a lei de Hockett-Sherby (S-H), entre outras. No entanto, a informação também pode ser introduzida directamente do ensaio de tracção, i.e., com base na tensão-deformação definida por um conjunto de pontos introduzidos pelo utilizador através de uma tabela, tal como mostra a Figura 1-14. Neste caso, os valores intermédios são interpolados, sendo que para os valores de deformação plástica maiores do que os tabelados, é realizada a extrapolação.

Strain	Stress
x1	y1
x2	y2
x3	y3
...	...

Figura 1-14 Dados de entrada do material provenientes do ensaio de tracção (AutoForm)

1.4.2. Encruamento cinemático

A correcta previsão do retorno elástico depende fortemente da lei de encruamento utilizada na simulação numérica do processo (Burchitz, 2008). A evolução da superfície de plasticidade do material pode ser modelada considerando apenas o encruamento isotrópico, caso as solicitações em causa não envolvam inversões de trajectória. Se o processo envolve inversões de trajectória e o material for sensível ao efeito de Bauschinger, é necessário combinar com a lei de encruamento isotrópico uma lei de encruamento cinemático. Por outras palavras, o encruamento isotrópico impõe que a superfície de plasticidade evolua com a deformação plástica de tal modo que o seu centro nunca muda de posição, ou seja, a superfície expande homoteticamente. Este pressuposto despreza alguns aspectos fundamentais para que se obtenha uma correcta previsão do retorno elástico pois despreza, por exemplo, o efeito de Bauschinger, como se verifica na Figura 1-15, ou outros efeitos associados à alteração de trajectória (Alves, 2003). Relativamente ao encruamento cinemático este assume que, durante a deformação plástica, a superfície se desloca no espaço das tensões conduzindo assim, a que as superfícies de plasticidade possam ou não ficar coincidentes. Esta lei já contempla mudanças de trajectória na deformação. Vladimirov

(2006) relata que ter em conta o encruamento isotrópico e negligenciar o encruamento cinemático é um passo dado para a incorrecta previsão do retorno elástico.

A lei adoptada neste estudo considera apenas o encruamento isotrópico, pois não existem dados disponíveis acerca do comportamento do material que permitam caracterizar o encruamento cinemático.

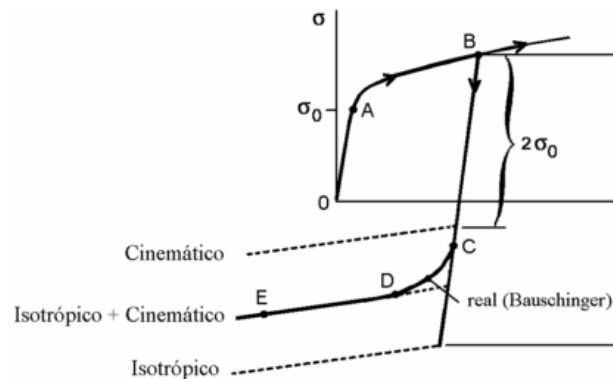


Figura 1-15 Diferenças entre encruamento isotrópico e cinemático (adaptada de (Alves, 2003))

1.4.3. Critérios de plasticidade

A superfície de cedência pode ser definida como uma superfície delimitadora entre a região elástica e plástica num espaço multi-axial. De toda a panóplia de aços disponíveis, quase todos eles apresentam comportamentos anisotrópicos, já que as suas propriedades dependem da orientação do provete em relação à direcção de laminagem (Burchitz, 2008). Dado que se trata de uma chapa de metal, a espessura é muito inferior às restantes dimensões pelo que, em geral, se considera um comportamento de anisotropia planar.

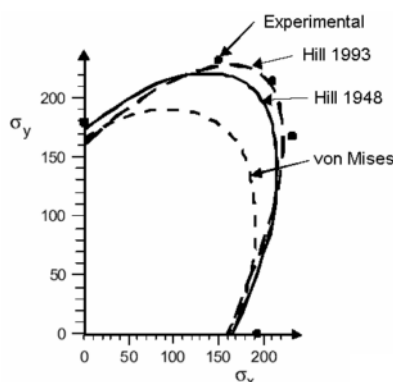


Figura 1-16 Comparação entre os resultados experimentais e curvas dos critérios de Von Mises, Hill 1948 e Hill 1993 para aço (Grilo, 2011)

Existem vários critérios de plasticidade que descrevem o comportamento dos aços (Alves, 2003), nomeadamente: Hill (1948, 1979, 1990 e 1993), Tresca (1864), Von Mises (1913), Drucker (1949), Hershey (1954), Hosford (1972), Budiansky (1984), Barlat *et al.* (1989, 1991, 1994, 1997 e 2000) utilizado essencialmente para descrever o comportamento dos alumínio, Karafillis & Boyce (1993), Vegter *et al.* (1998), Banabic *et al.* (2000) e Cazacu e Barlat (2001). Na Figura 1-16 pode observar-se as diferenças entre alguns critérios de plasticidade e resultados experimentais.

O critério de plasticidade mais utilizado pelos programas de simulação para descrever o comportamento ortotrópico dos aços é o critério de Hill 1948, uma vez que: (i) descreve adequadamente a anisotropia inicial da chapa; (ii) aplica-se a qualquer estado de tensão e (iii) é simples de implementar (Oliveira, 2005). No programa AutoForm, os critérios disponíveis são: Hill 1948, Hill 1990, Barlat 1989 e Banabic 2005. No referencial de ortotropia, $Oxyz$, a seguinte função quadrática expressa o critério de plasticidade proposto por Hill em 1948

$$F(\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 + G(\sigma_{zz} - \sigma_{xx})^2 + H(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + 2L\sigma_{yz}^2 + 2M\sigma_{xz}^2 + 2N\sigma_{xy}^2 = Y^2 \quad (1.4)$$

em que F , G , H , L , M e N são parâmetros de anisotropia e Y designa a tensão limite de elasticidade em tracção uniaxial. A determinação destes parâmetros envolve a realização de pelo menos três ensaios de tracção uniaxial, em que o eixo de sollicitação faz 0° , 45° e 90° com a direcção de laminagem (Figura 1-17).

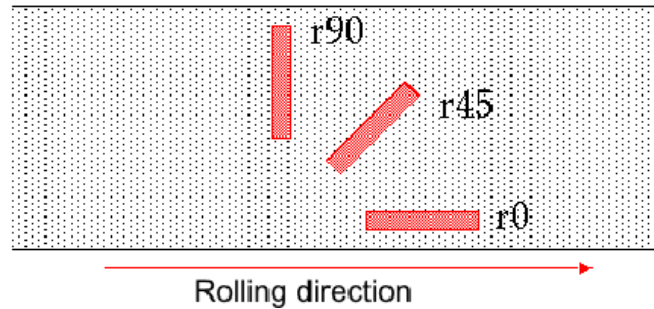


Figura 1-17 Provetes orientados nas três direcções, 90°, 45° e 0°, em relação à direcção de laminação (AutoForm®)

Com os dados resultantes destes ensaios determinam-se os coeficientes de anisotropia para:

- r_0 ;
- r_{45} ;
- r_{90} .

Baseados nestes três valores, os materiais podem apresentar:

- ❖ Isotropia: $r_0 = r_{45} = r_{90} = 1$;
- ❖ Anisotropia transversa: $r_0 = r_{45} = r_{90} < 1$;
- ❖ Anisotropia planar: $r_0 < r_{45} < r_{90}$.

Obtidos os coeficientes de anisotropia, podem definir-se os parâmetros de anisotropia através das seguintes relações:

$$F = \frac{H}{r_{90}}, \quad G = \frac{1}{r_0 + 1}, \quad H = r_0 G \quad e \quad N = \frac{1}{2} \frac{(r_0 + r_{90})(2r_{45} + 1)}{r_{90}(r_0 + 1)} \quad (1.5)$$

A determinação dos coeficientes de anisotropia com o auxílio das expressões apresentadas em (1.5) impõe que $G + H = 1$, ou seja, que a tensão equivalente corresponda à tensão para o ensaio com o provete orientado segundo a direcção de laminação. No caso de chapas metálicas não é possível determinar experimentalmente os parâmetros de anisotropia L e M. Portanto, de modo a simplificar, estes podem ser considerados iguais a N, o que corresponde a admitir tensões limite de elasticidade ao corte idênticas para os planos

O_{xy} , O_{xz} e O_{yz} . Alternativamente L e M podem ser considerados iguais a 1,5, valor que corresponde à situação de isotropia.(Oliveira, 2005).

1.4.4. Curva Limite de Embutidura

A curva limite de embutidura é uma ferramenta de análise importante para identificar potenciais falhas durante a conformação de chapas metálicas. Para cada material e respectiva espessura, a curva limite de embutidura pode ser obtida experimentalmente ou prevista numericamente. A determinação experimental pode ser realizada através de ensaios de Nakajima, que consistem em levar à rotura provetes que podem ser marcados com uma grelha para a melhor visualização das deformações (Malheiro, 2013). Um exemplo deste ensaio pode ser visualizado na Figura 1-18. Posteriormente à realização dos ensaios, são obtidos os valores das deformações no momento da estrição e estes são representados no espaço das deformações (Vaz, 2013), criando assim o gráfico da curva limite de embutidura (CLE), como se mostra na Figura 1-19.

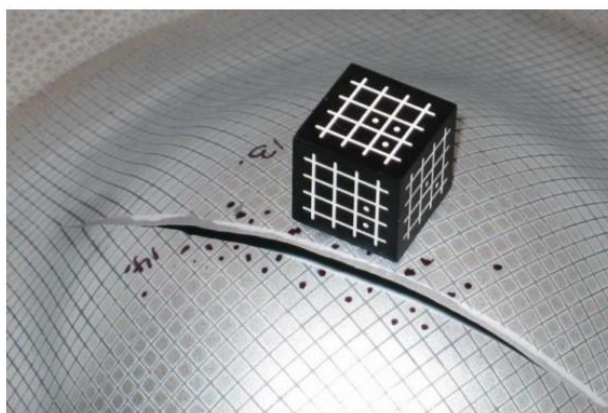


Figura 1-18 Determinação do gradiente de deformação na zona de fissura (Malheiro, 2013)

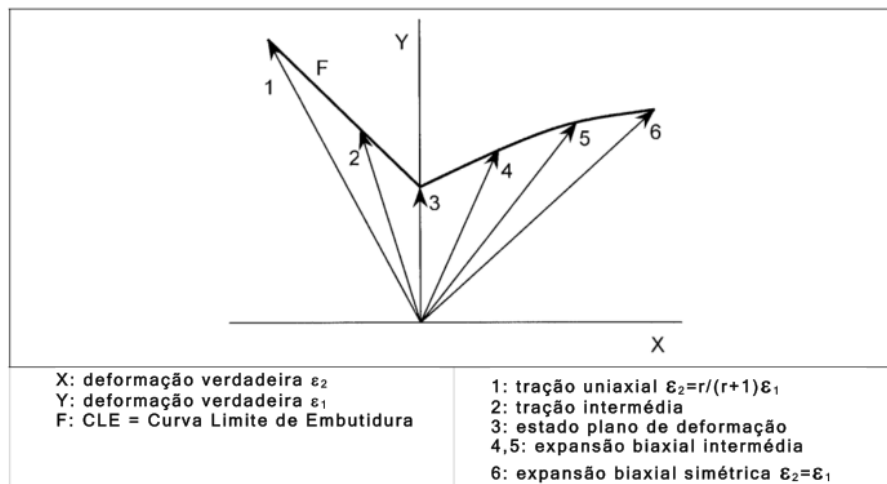


Figura 1-19 Determinação da CLE (Malheiro, 2013)

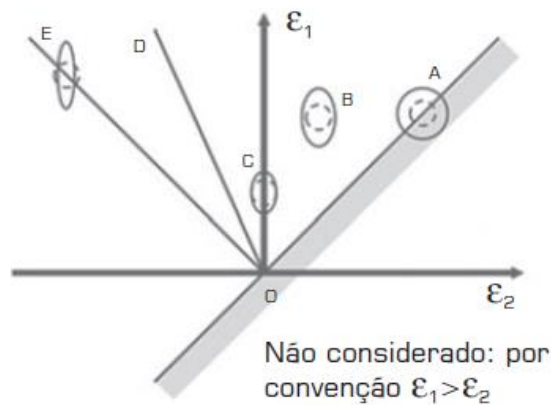


Figura 1-20 Deformações típicas das células para diferentes trajetórias de deformação (Malheiro, 2013)

A deformação da célula “E” presente na Figura 1-20 corresponde à tração uniaxial (ponto 1 da Figura 1-19), a deformação “C” diz respeito à deformação plana (ponto 3 da Figura 1-19) e a célula “A” corresponde à expansão biaxial simétrica (ponto 6 da Figura 1-19). Após a determinação da curva limite de embutadura (ou o termo anglo-saxónico *Forming Limit Curve* (FLC)), a previsão da rotura do material é facilitada, uma vez que, visualmente, se pode depurar se há risco de falha do material.

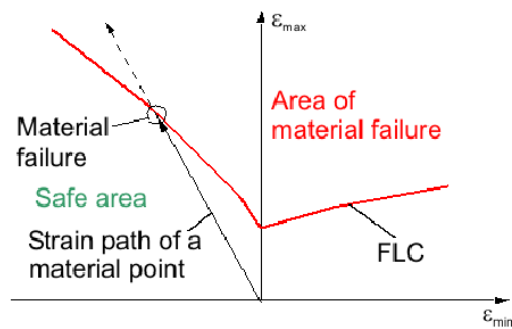


Figura 1-21 Traçado típico de uma curva limite de embutadura (AutoForm®)

Tal como se pode observar na Figura 1-21, a área inferior à curva limite de embutadura corresponde a uma zona segura em termos de ocorrência de estricção ou fissuras. No entanto, para que o componente embutido não apresente problemas, incluindo fissuras e enrugamentos (ver Figura 1-22), as deformações obtidas para cada ponto da chapa devem estar contidas naquilo a que o AutoForm® designa de zona segura (verde) da formabilidade. Este requerimento pode ser visualizado com o auxílio de uma curva limite de embutadura associado a zonas delimitadas pelo utilizador no programa AutoForm®, como se demonstra na Figura 1-23. Se todos os pontos se encontrarem dentro do domínio a verde, a peça encontra-se bem estirada, minimizando assim o risco de ocorrência de rugas.



Figura 1-22 Exemplo de fissuração e de enrugamento numa embutadura (Sun et al., 2010)

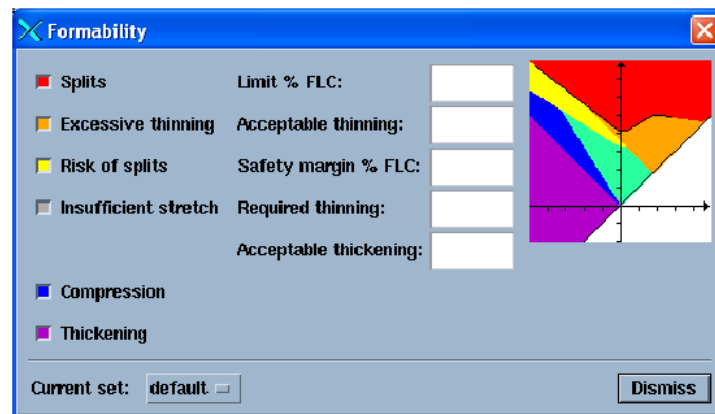


Figura 1-23 Formabilidade de um material genérico (AutoForm®)

1.5. Parâmetros numéricos

Neste subcapítulo são apresentados alguns dos parâmetros numéricos disponíveis no programa AutoForm® para o controlo do refinamento da malha.

1.5.1. Tipo de elemento: Casca

O tipo de elemento finito utilizado é um parâmetro essencial para que a correcta previsão dos resultados de simulação, utilizando métodos de elementos finitos, seja levada a cabo. Dependendo do tipo de problema e da geometria da chapa, diferentes tipos de elementos podem ser utilizados (Duarte, 1997), incluindo:

- Membrana;
- Casca;
- Sólido.

No caso específico de chapas metálicas, como a dimensão da espessura é muito inferior comparativamente às outras dimensões, o elemento normalmente utilizado é do tipo casca (ver Figura 1-24). Este tipo de elemento é comumente utilizado em simulações numéricas devido à eficiência computacional. A teoria assume que a chapa está sujeita a um estado plano de tensões, pelo que este pode ser representado pelo plano médio da chapa. Tal permite reduzir os graus de liberdade quando comparados com os associados aos elementos finitos sólidos. Um elemento do tipo casca tem 5 graus de liberdade, por nó: três deslocamentos e duas rotações da normal, como se ilustra na Figura 1-24 (Ferreira, 1990). O programa AutoForm® utiliza elementos finitos de topologia triangular, lineares, i.e., com

três nós por elemento. Contudo, utilizar este tipo de elemento é de difícil análise podendo pequenas alterações da geometria estrutural, das condições de fronteira e até do refinamento da malha de elementos finitos, levar à obtenção de resultados díspares (Alves, 2003).

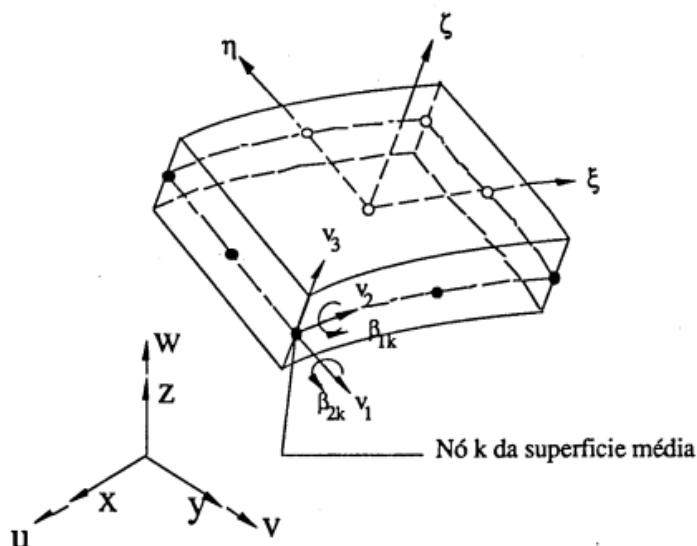


Figura 1-24 Parâmetros nodais do tipo de elemento: casca (Ferreira, 1990)

1.5.2. Discretização da chapa

No AutoForm[®] as simulações são realizadas assumindo refinamento automático da malha. No entanto, constata-se que os resultados das simulações são afectados por pequenas alterações nos parâmetros de controlo do refinamento. Assim, o foco deste trabalho passou pela análise dos resultados aquando da alteração de cada um dos seguintes parâmetros para o refinamento da malha:

- Penetração radial (“*Radius Penetration*”);
- Número máximo de elementos por ângulo (“*Max Element Angle*”);
- Tamanho do elemento inicial (“*Initial Element Size*”);
- Nível de refinamento máximo (“*Max Refinement Level*”).

Cada um dos parâmetros supra mencionados são descritos nos subcapítulos seguintes.

1.5.2.1. Penetração radial

Este parâmetro define a penetração máxima da ferramenta na platina. No caso da penetração da ferramenta na platina exceder o limite, a malha é refinada localmente. Este parâmetro de controlo é introduzido pelo utilizador (ver Figura 1-25) e a medida utilizada é o milímetro.

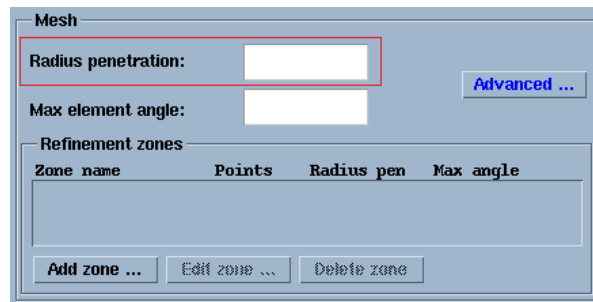


Figura 1-25 Parâmetro do limite da penetração da ferramenta na platina (“Radius penetration”)

1.5.2.2. Número máximo de elementos por ângulo

No que concerne a este parâmetro de controlo, este define o ângulo máximo entre dois elementos adjacentes. Tal como no parâmetro anterior, quando o valor máximo do ângulo pré-definido pelo utilizador for ultrapassado, o elemento é refinado. Na figura seguinte exemplifica-se a variação deste parâmetro.

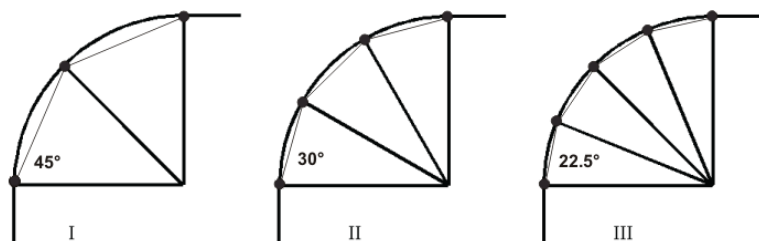


Figura 1-26 Diferentes limites para o controlo dos elementos em função do ângulo: I-Max element angle =45; II-Max element angle =30 e III-Max element angle =22,5 (AutoForm®)

1.5.2.3. Tamanho do elemento inicial

Com este parâmetro, o utilizador especifica o comprimento máximo do elemento. Ou seja, quanto menor for o valor para este parâmetro, maior será o refinamento da malha inicial. A título demonstrativo, na Figura 1-27 (a) e (b) apresenta-se uma malha com um tamanho de elemento máximo de 20 e de 5, respectivamente. De notar que na figura seguinte, os tamanhos do detalhe das malhas é o mesmo. Daqui se pode depurar que a malha é, de facto, muito mais refinada. O tamanho do elemento é um parâmetro que tem uma influência considerável tanto no tempo de computação como na precisão de resultados, aspecto que será realçado no capítulo de análise de resultados. No entanto, uma vez que em todas as simulações numéricas realizadas é utilizado refinamento automático, a dimensão média dos elementos finitos em cada incremento não depende apenas do valor inicial. De facto, a selecção de um tamanho inicial maior apenas garante que nas zonas planas a dimensão global média no final será maior, desde que não sejam violadas as condições impostas pelos parâmetros seleccionados para a penetração radial e número máximo de elementos por ângulo.

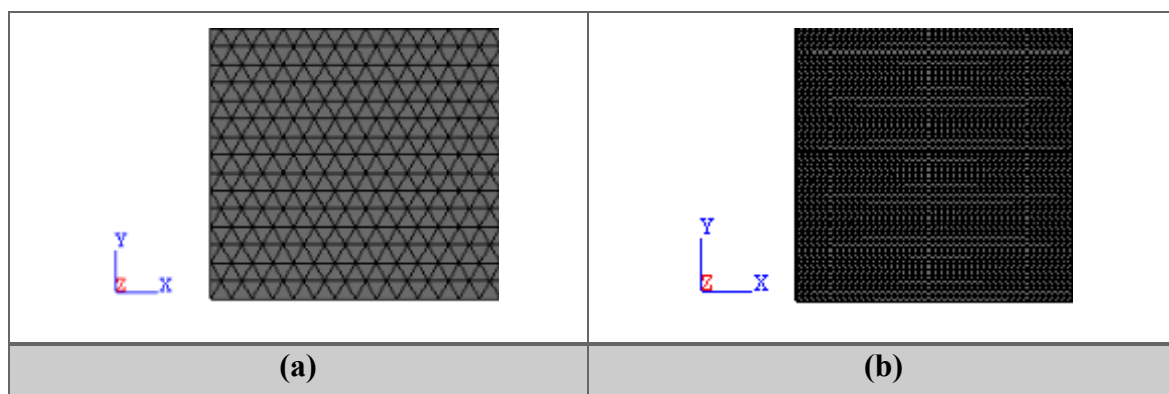


Figura 1-27 Detalhes de refinamentos de malha com tamanho de elemento inicial de (a) 20 e (b) 5.

1.5.2.4. Nível de refinamento máximo

Este parâmetro especifica, tal como o nome indica, o nível de refinamento máximo. Este relaciona-se com os anteriores na medida em que limita o refinamento. Por exemplo, se o limite de refinamento (“*Max refinement level*”) for de 3, a malha apenas refina três triângulos dentro do elemento inicial (“*Initial element size*”). Na Figura 1-28 pode observar-

se o efeito deste parâmetro no refinamento da malha. Este parâmetro confina os restantes na medida que limita o refinamento da malha.

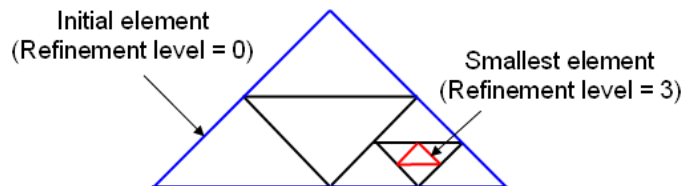


Figura 1-28 Demonstração do parâmetro de controlo para um nível igual a 3 (AutoForm®)

1.6. Resumo

Os aspectos abordados no decorrer do presente capítulo evidenciam os pontos em que o programa AutoForm® se baseia para a realização da simulação. No que diz respeito à lei de encruamento do material, a curva tensão-deformação é obtida por um conjunto de pontos introduzidos pelo utilizador. Relativamente ao encruamento, apesar de vários estudos ((Zhu et al., 2012), (Haus, 2011), (Alves, 2003), (Zang et al., 2013), (Zhao, Zhai, Qian, & Ma, 2013), (Burchitz, 2008), entre outros) efectuados fazerem uso do encruamento cinemático, o comportamento adoptado é apenas isotrópico. Também outro aspecto abordado durante o decorrer do presente capítulo é o critério de plasticidade utilizado. Visto que é um processo de embutidura de uma chapa de aço (HX), o critério adoptado foi o de Hill 1948, uma vez que é de simples aplicação e tem uma boa aproximação ao comportamento do material. Por fim, o tipo de elemento adoptado é do tipo casca pois visa uma boa eficiência computacional.

Os parâmetros de controlo para o refinamento da malha utilizados no decorrer deste estudo também foram descritos. O impacto que se observa com cada alteração paramétrica é analisado no Capítulo 3, onde são descritas as simulações efectuadas.

2. PROCESSO MULTI-ETAPA

Um processo multi-etapa traduz-se por um processo completo de embutidura de uma chapa em diferentes etapas. Actualmente, a maioria das embutiduras de peças complexas recorrem a este método. Apesar de ser uma metodologia com um investimento mais elevado, pois necessita de mais ferramentas (matriz, pisador e punção para cada operação), prensas maiores, mais energia consumida, entre outros, a longo prazo, este método torna-se rentável, na medida em que simplifica todo o processo. Para além disso, a rapidez deste é significativamente mais elevada, pois não necessita de parar a linha de produção para que se efectue a troca de ferramentas. Na Figura 2-1 pode-se observar uma prensa que é utilizada na Volkswagen AutoEuropa para a realização de processos de estampagem multi-etapa.



Figura 2-1 Prensa TANDEM com processo multi-etapa (cortesia Volkswagen AutoEuropa)

A utilização deste processo minimiza os efeitos não desejados (fissuras, enrugamentos, retorno elástico) assim como os custos associados. Neste trabalho, a peça em análise é um projecto ambicioso (ver Figura 2-2), pois apresenta bastante complexidade. No total, o processo é realizado em 5 etapas que são descritas nos subcapítulos seguintes.



Figura 2-2 Peça final em vista isométrica

O material utilizado é um aço HX180 com 0,7 milímetros de espessura, cujas propriedades elásticas e plásticas, de acordo com a informação disponibilizada pelo AutoForm®, são apresentadas na Tabela 2-1 e a curva de encruamento pode ser observada no Gráfico 2-1.

Tabela 2-1 – Propriedades elásticas e plásticas do aço HX180

Parâmetros elásticos		Propriedades plásticas	
Módulo de Young	2,10E+05 Pa	Tensão de rotura	367,3 MPa
Coefficiente de Poisson	0,3	n	0,26
Coeficientes de anisotropia		Tensões limite de elasticidade	
r ₀	1,31	σ ₀	187 MPa
r ₄₅	2	σ ₄₅	178,3 MPa
r ₉₀	1,99	σ ₉₀	200,4 MPa

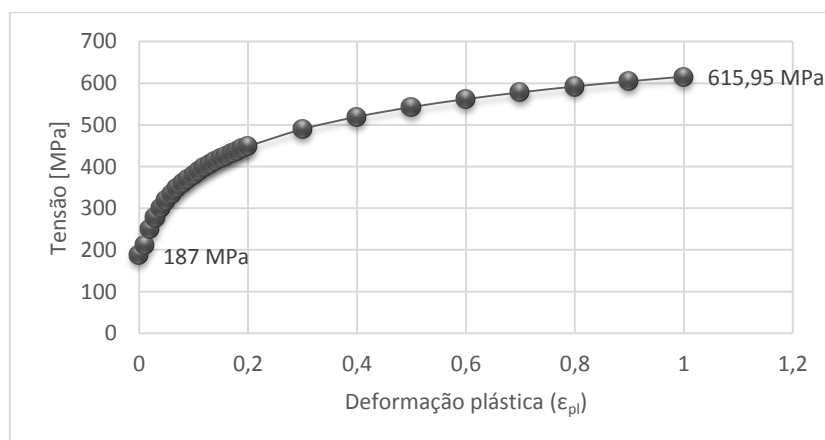


Gráfico 2-1 – Curva de encruamento do material HX180

2.1. Etapa 1

Nesta fase inicial da estampagem, a chapa sofre uma deformação no sentido positivo do eixo Oxz como se pode ver na Figura 2-3 (a) e (b). É uma etapa crítica pois a peça, para além de apresentar pequenos detalhes geométricos complexos, sofre uma deformação com uma elevada profundidade. De modo a simular os travamentos, a abordagem seleccionada concentrou-se na utilização dos travamentos do AutoForm (linhas a vermelho, ver Figura 2-3-b). No final desta etapa, a peça é liberta e por conseguinte verifica-se o primeiro retorno elástico.

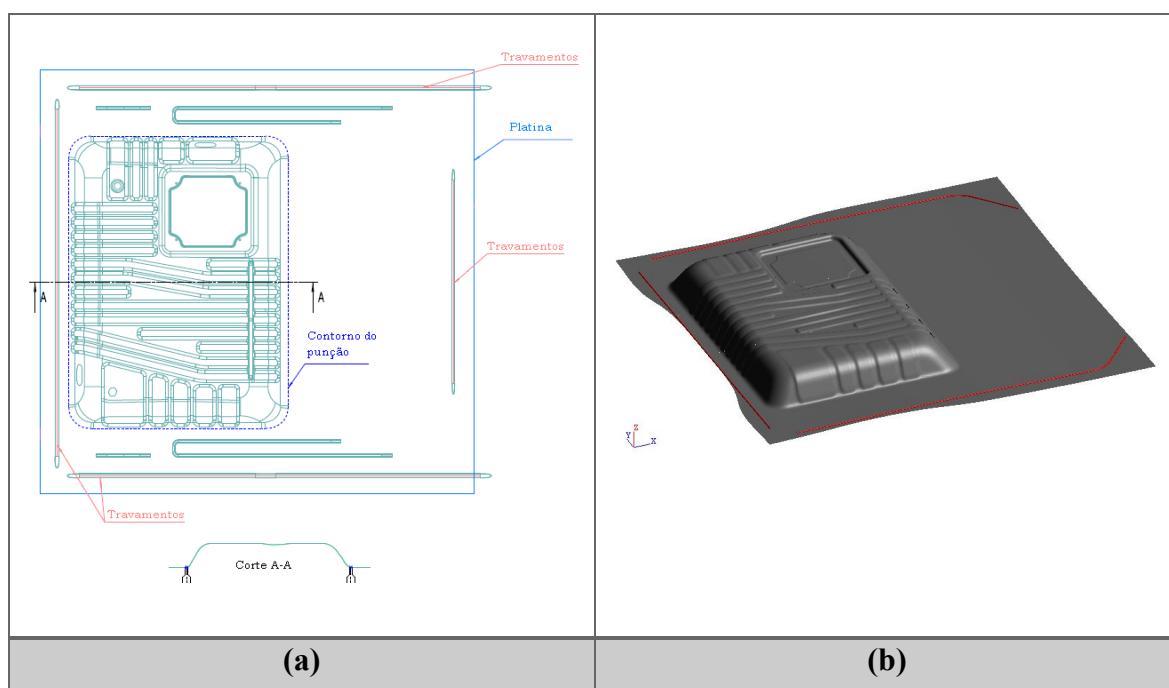


Figura 2-3 (a) Vista superior representativa da primeira etapa e (b) peça virtual após primeira embutidura

2.2. Etapa 2

Na segunda etapa do processo a peça sofre uma outra deformação, também com uma elevada profundidade no sentido inverso (sentido negativo do eixo Oxz), na metade da peça que não foi embutida, tal como se indica na Figura 2-4 (a) e (b). Nesta operação a peça não tem formas tão complexas como na primeira etapa.

Com o término desta operação, a peça não sofre mais operações de embutidura. A maioria das formas geométricas de pequenas dimensões introduzidas na chapa têm como finalidade o maior estiramento da chapa, de modo a minimizar o retorno de elástico e conferir

uma maior rigidez à peça. Após a libertação das ferramentas, a peça volta a sofrer retorno elástico.

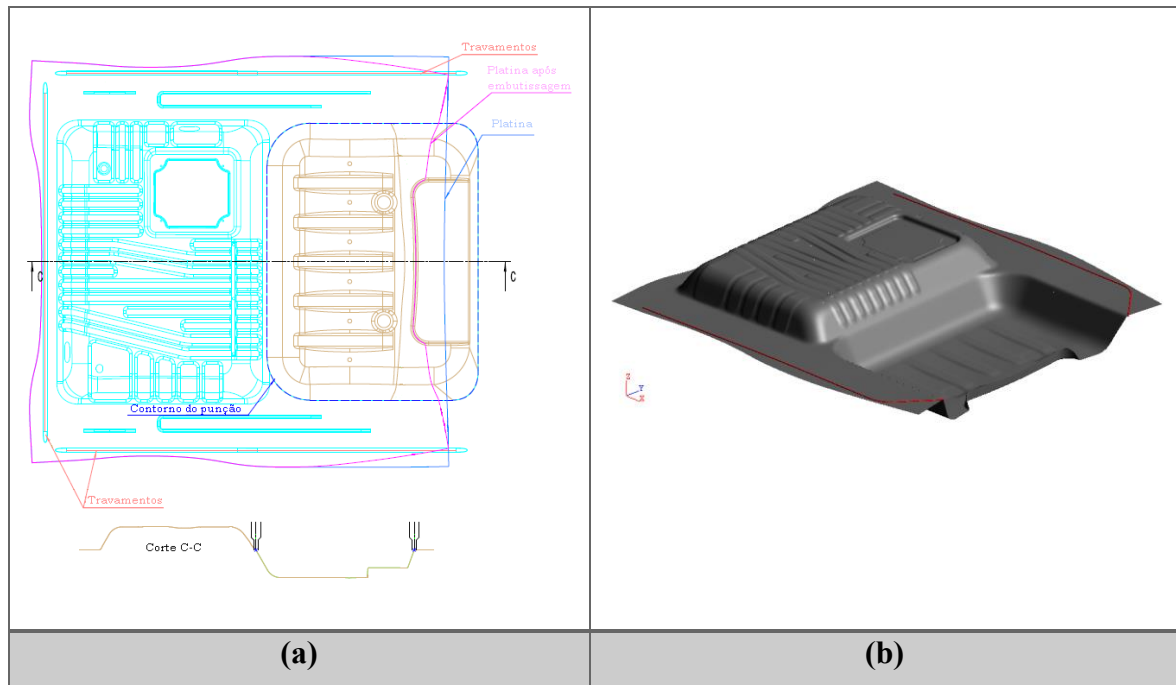


Figura 2-4 (a) Vista superior representativa da segunda etapa e (b) peça virtual após segunda embutidura

2.3. Etapa 3

No decorrer desta etapa, é realizada a primeira operação de corte que é efectuada na direcção negativa do eixo Oxz . As Figura 2-5 (a) e (b) demonstram os cortes que são efectuados nesta etapa.

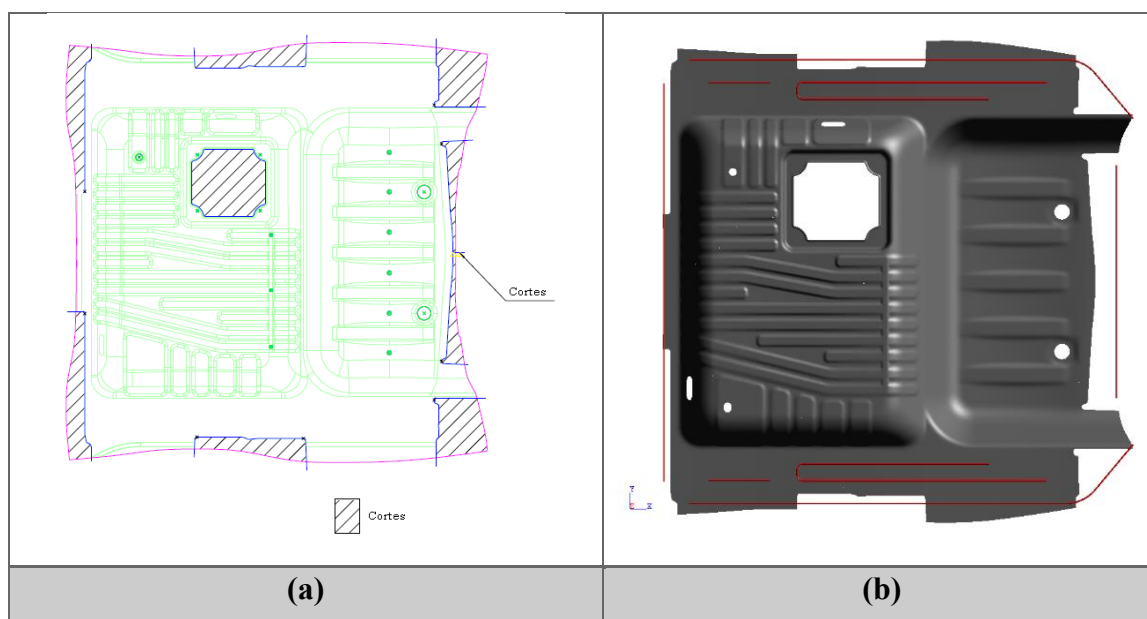


Figura 2-5 (a) Vista superior representativa da terceira etapa e (b) peça virtual após primeira operação de corte

2.4. Etapa 4

Durante esta operação é efectuada a segunda e última operação de corte. Os cortes não são todos efectuados numa mesma etapa por duas razões: (1) a ferramenta seria muito complexa construtivamente e (2) a saída da sucata não seria possível devido às suas dimensões. Nas Figura 2-6 (a) e (b) observam-se os cortes e furos que são realizados nesta etapa.

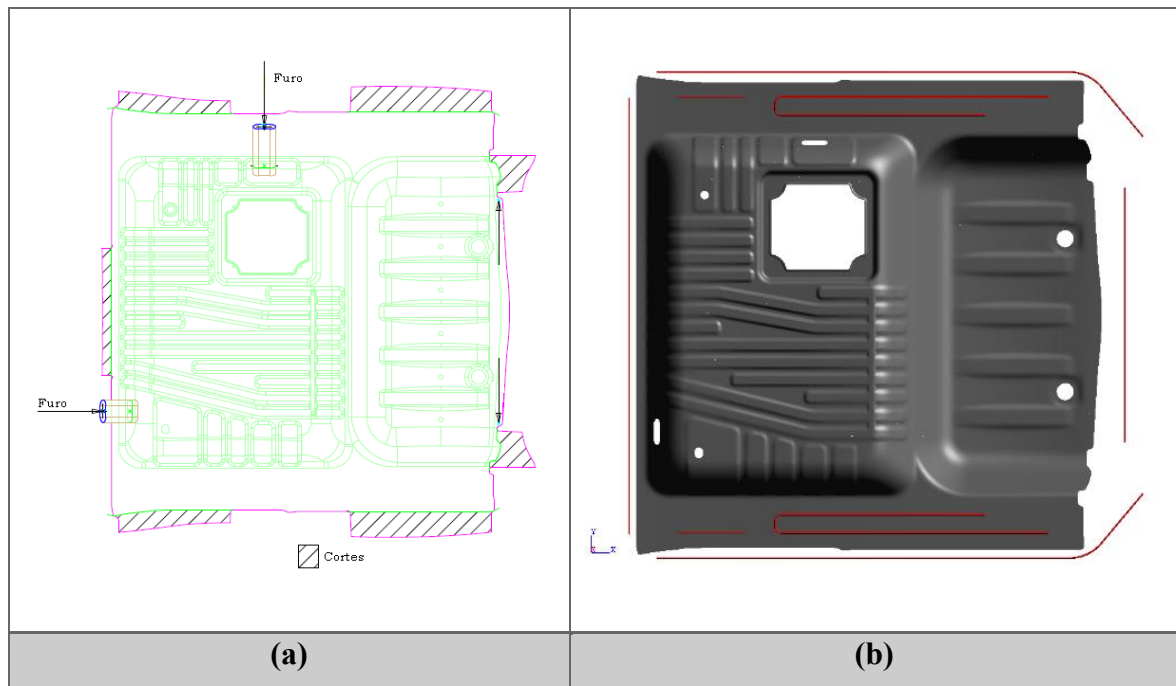


Figura 2-6 (a) Vista superior representativa da última etapa de corte e (b) peça virtual após a última operação de corte

2.5. Etapa 5

Para finalizar o processo, a peça sofre uma operação de dobragem (ver Figura 2-7 (a) e (b)). Os esforços aplicados para efectuar as dobras irão provocar a flexão da peça. Deste modo, na superfície externa do raio de dobragem, a peça sofra tensões de tracção e na superfície interna tensões de compressão, como se pode ver pela Figura 2-8. Com efeito, os processos de dobragem podem ter um efeito considerável no fenómeno de retorno elástico.

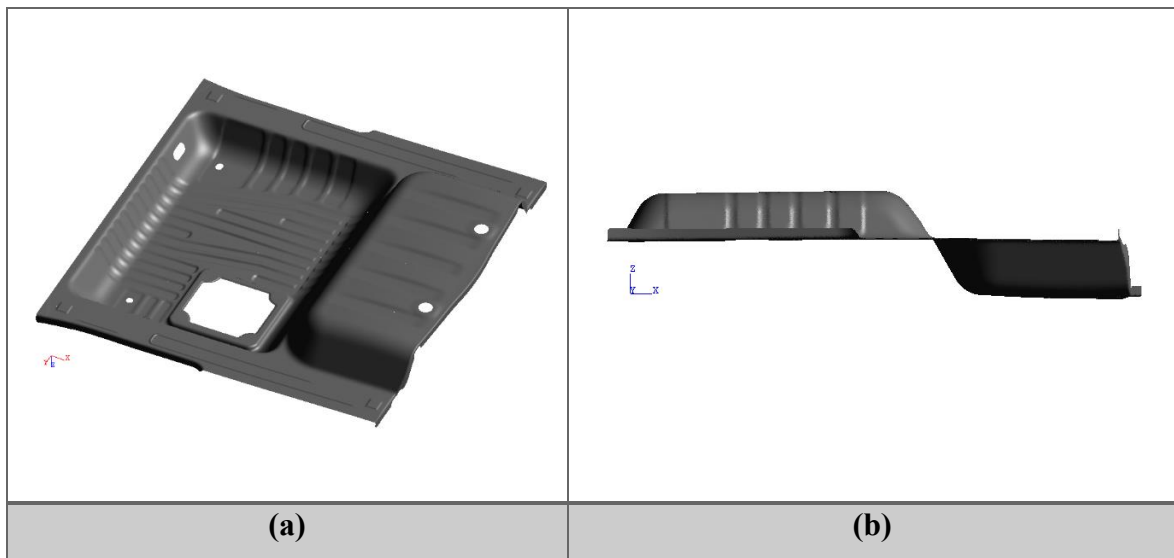


Figura 2-7 (a) Peça final e (b) vista da peça final no plano Oxz

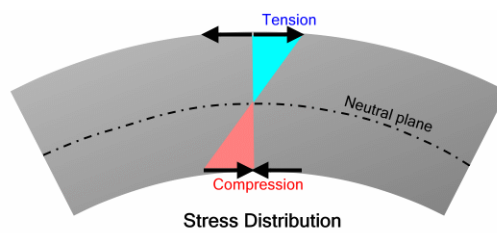


Figura 2-8 Distribuição de tensão ao longo da espessura (Tutelman et al,2014)

3. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A metodologia adoptada neste estudo recorreu a duas fases. Numa primeira fase procedeu-se à alteração de cada um dos parâmetros mencionados no subcapítulo 1.5.2 individualmente, de modo a avaliar o impacto na previsão do retorno elástico. Com base nos resultados obtidos nesta primeira fase foram estabelecidos os domínios mais relevantes para cada um dos parâmetros numéricos em análise. Na segunda fase do estudo foram realizadas simulações numéricas considerando estes domínios e os resultados numéricos foram comparados com resultados experimentais. Em toda a análise, as medições das peças (numéricas e experimental) são efectuadas na direcção normal à superfície. Neste capítulo apresenta-se a discussão dos resultados obtidos.

3.1. Análise individualizada

Como foi referido anteriormente, a metodologia adoptada numa primeira fase baseou-se na alteração de apenas um dos parâmetros numéricos disponíveis no programa e a consequente realização das simulações apenas com essa alteração. Para cada parâmetro numérico foi pré-definida uma gama de variação em torno dos valores considerados como referência para a Unidade de Negócios de Cunhos e Cortantes, designado como Refinamento V. A tabela correspondente ao total das 37 simulações realizadas é apresentada no Anexo A de forma integral. A Tabela 3-1 é uma versão parcial da tabela integral apresentada para ilustrar a metodologia utilizada. Nesta apresenta-se o conjunto de simulações consideradas para a análise do parâmetro “*Max element angle*” e do “*Max refinement level*”. No caso do parâmetro “*Max element angle*” o valor de referência é de 22.5 e foram analisados apenas valores inferiores a este. Para o parâmetro “*Max refinement level*”, devido à interacção entre este parâmetro e os outros, apenas foram considerados os níveis, 5, 6 e 7, para avaliar o impacto do nível de refinamento. Para este parâmetro e para o “*Initial element size*” foi realizada uma simulação que considera o parâmetro no nível Auto. No entanto, uma vez que não foi possível confirmar a que corresponde esta opção, para cada um dos parâmetros, optou-se por não incluir os

resultados na análise individualizada. Os parâmetros foram considerados constantes para a simulação das cinco etapas do processo de fabrico do componente.

Tabela 3-1 - Tabela parcial da *Guide Line*

Simulações	Malha		Parâmetros de malha avançados		Tempo de computação	Espaço em disco
	Radius penetration (mm)	Max element angle (°)	Initial element size (mm)	Max refinement level	(minutos)	GB
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
Refinamento 7	0,22	20	20	5	666	7,43
Refinamento 8	0,22	18	20	5	688	8,82
Refinamento 9	0,22	16	20	5	830	10,6
Refinamento 10	0,22	14	20	5	907	12,9
Refinamento 11	0,22	12	20	5	1152	16,5
Refinamento 12	0,22	10	20	5	1606	21,3
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
Refinamento 20	0,22	20	20	7	504	7,73
Refinamento 21	0,22	18	20	7	581	8,76
Refinamento 22	0,22	16	20	7	684	10,8
Refinamento 23	0,22	14	20	7	903	13,1
Refinamento 24	0,22	12	20	7	1237	17,4
Refinamento 25	0,22	10	20	7	1653	23,6
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

3.1.1. Tratamento dos resultados

Para cada uma das 37 simulações numéricas realizadas foram registados os tempos de cálculo (ver Anexo A) e foi avaliado o retorno elástico, por comparação com a geometria CAD de referência. Para facilitar a análise do retorno elástico foi construída uma grelha de marcação (ver Figura 3-1), em que cada intersecção das linhas horizontais (identificadas com uma letra maiúscula) com as linhas verticais (identificadas com um algarismo) define um ponto. Para cada um destes pontos foi determinada a distância à geometria de referência, como se mostra, a título de exemplo, na Figura 3-2 para o refinamento 5. Tal permitiu definir para cada secção horizontal a média do desvio em relação à geometria de referência, bem como o desvio padrão, tal como se mostra na Tabela 3-2, para o refinamento 5. A análise

dos resultados foi realizada com base na comparação dos resultados previstos para cada uma das secções, tendo em conta o parâmetro numérico alterado.

Da tabela global seleccionaram-se os seguintes refinamentos para análise individualizada da influência dos parâmetros:

- – “Initial Element size” (“Max Refinement Level” de 5): Refinamentos V, 4, 5 e 6;
- “Initial Element size” (“Max Refinement Level” de 7): Refinamentos 3, 33, 34 e 35;
- “Max Element angle” (“Max Refinement Level” de 5): Refinamentos V, 7, 8, 9, 10, 11 e 12;
- “Max Element angle” (“Max Refinement Level” de 7): Refinamentos A, 20, 21, 22, 23, 24 e 25;
- “Radius penetration” (“Max Refinement Level” de 5): Refinamentos V, 14, 15, 16, 17, 18 e 19;
- “Radius penetration” (“Max Refinement Level” de 7): Refinamentos A, 27, 28, 29, 30, 31 e 32.

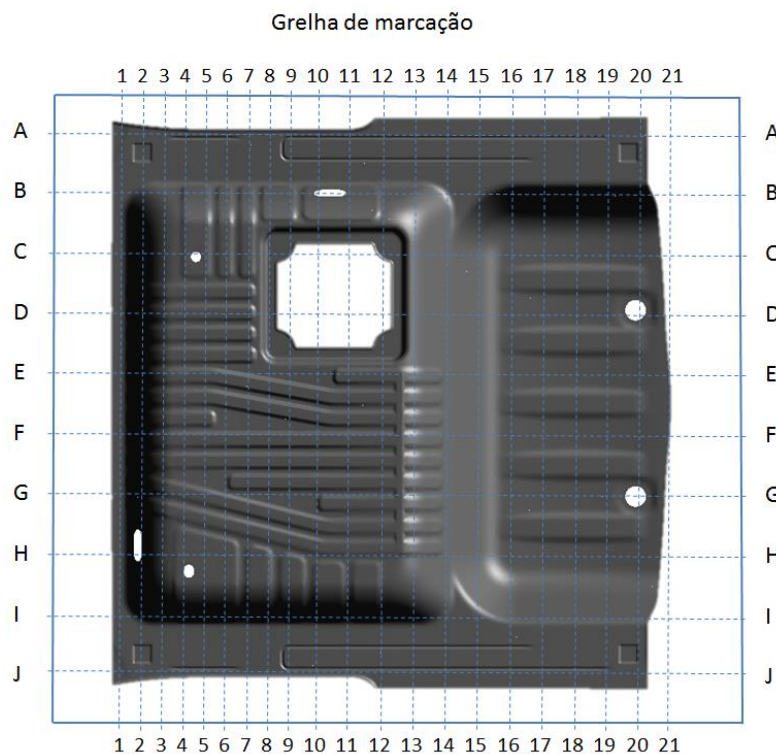


Figura 3-1 - Grelha de marcação fase 1

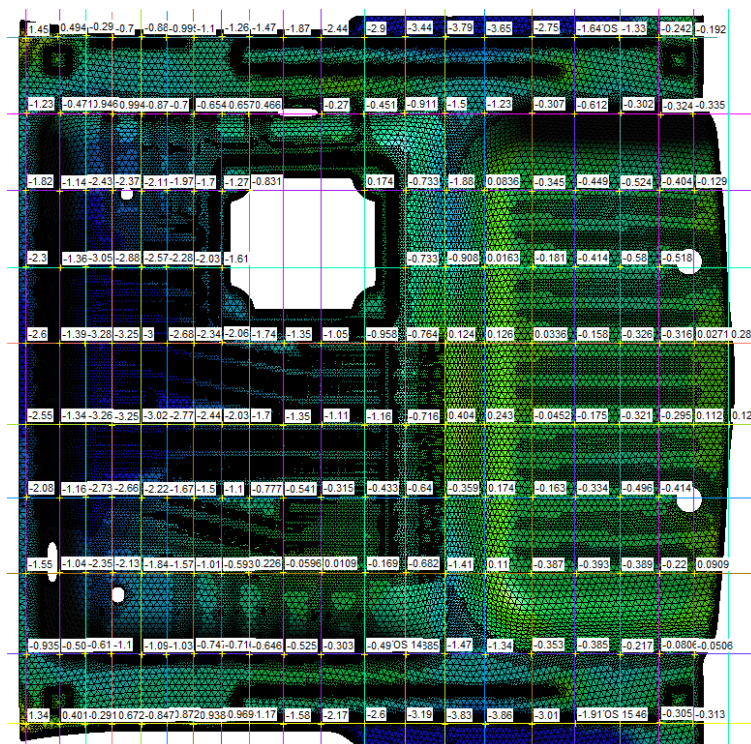


Figura 3-2 Pontos da grelha de marcação no refinamento 5

Importa referir que, no geral, os resultados numéricos apresentam uma maior diferença em relação à geometria nominal para as secções horizontais mais próximas dos bordos livres (secções A e J) ou que incluam uma zona pouco restringida (caso das secções E e F). Ou seja, o comportamento apresentado na Tabela 3-2 é representativo dos resultados obtidos nas diferentes simulações numéricas realizadas. De facto, uma vez que apenas foram alterados parâmetros numéricos, a previsão do retorno elástico apresenta globalmente a mesma tendência para as várias secções analisadas. Nas secções seguintes, analisam-se os parâmetros de forma individual para tentar estabelecer um conjunto de simulações mais reduzido, para a realização da segunda etapa de análise.

Tabela 3-2 - Digitalização dos pontos do refinamento 5

<i>Diferença para a nominal (mm)</i>										
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	1,45	-1,23	-1,82	-2,3	-2,6	-2,55	-2,08	-1,55	-0,935	1,34
2	0,494	-0,471	-1,14	-1,36	-1,39	-1,34	-1,16	-1,04	-0,501	0,401
3	-0,293	-0,946	-2,43	-3,05	-3,28	-3,26	-2,73	-2,35	-0,611	-0,291
4	-0,7	-0,994	-2,37	-2,88	-3,25	-3,25	-2,66	-2,13	-1,1	-0,672
5	-0,889	-0,87	-2,11	-2,57	-3	-3,02	-2,22	-1,84	-1,09	-0,847
6	-0,995	-0,7	-1,97	-2,28	-2,68	-2,77	-1,67	-1,57	-1,03	-0,872
7	-1,1	-0,654	-1,7	-2,03	-2,34	-2,44	-1,5	-1,01	-0,747	-0,938
8	-1,26	-0,657	-1,27	-1,61	-2,06	-2,03	-1,1	-0,593	-0,716	-0,969
9	-1,47	-0,466	-0,831	-	-1,74	-1,7	-0,777	-0,226	-0,646	-1,17
10	-1,87	-	-	-	-1,35	-1,35	-0,541	-0,0596	-0,525	-1,58
11	-2,44	-0,27	-	-	-1,05	-1,11	-0,315	0,0109	-0,303	-2,17
12	-2,9	-0,451	-0,174	-	-0,958	-1,16	-0,433	-0,169	-0,49	-2,6
13	-3,44	-0,911	-0,733	-0,733	-0,764	-0,716	-0,64	-0,682	-0,885	-3,19
14	-3,79	-1,5	-1,88	-0,908	0,124	0,404	-0,359	-1,41	-1,47	-3,83
15	-3,65	-1,23	-0,0836	0,0163	0,126	0,243	0,174	0,11	-1,34	-3,86
16	-2,75	-0,307	-0,345	-0,181	0,0336	-0,0452	-0,163	-0,387	-0,353	-3,01
17	-1,64	-0,612	-0,449	-0,414	-0,158	-0,175	-0,334	-0,393	-0,385	-1,9
18	-1,33	-0,302	-0,524	-0,58	-0,326	-0,321	-0,496	-0,389	-0,217	-1,46
19	-0,242	-0,324	-0,404	-0,518	-0,316	-0,295	-0,414	-0,22	-0,0806	-0,305
20	-0,192	-0,335	-0,129	-	0,0271	0,112	-	0,0909	-0,0506	-0,313
21	-	-	-	-	0,288	0,12	-	-	-	-
Média	-1,45	-0,70	-1,13	-1,43	-1,27	-1,27	-1,02	-0,79	-0,67	-1,41
Desvio-padrão	1,36	0,35	0,80	1,00	1,19	1,21	0,85	0,75	0,39	1,34

3.1.2. “Initial Element size” (“Max Refinement Level” de 5)

Nesta secção é realizada a análise comparativa entre os refinamentos V, 4, 5 e 6, para os quais apenas é alterado o “Initial element size”, considerando um “Max Refinement Level” igual a 5 (ver Tabela 3-3).

Após a análise dos gráficos correspondentes a cada secção (ver Anexo C, 1.a), concluiu-se que os refinamentos a seleccionar seriam os refinamentos V, 4 e 6. De facto, como se mostra a título de exemplo no Gráfico 3-1, o refinamento 4 conduz a menores desvios em relação à geometria de referência, enquanto o refinamento 6 resulta nos maiores desvios. Neste caso, observa-se que a influência do tamanho inicial do elemento traduz-se num aumento global do desvio em relação há geometria nominal.

Tabela 3-3 - Selecção dos refinamentos V, 4, 5 e 6

Simulações	Malha		Parâmetros de malha avançados		Tempo de computação (minutos)	Espaço em disco GB
	Radius penetration (mm)	Max element angle (°)	Initial element size (mm)	Max refinement level		
V	0,22	22,5	20	5	347	5,75
Refinamento 4	0,22	22,5	15	5	422	6,39
Refinamento 5	0,22	22,5	10	5	452	6,44
Refinamento 6	0,22	22,5	5	5	860	9,62

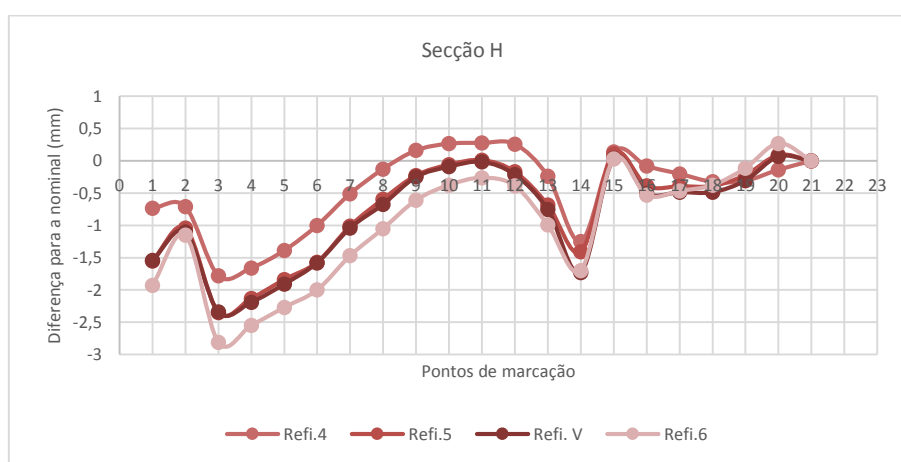


Gráfico 3-1 - Secção H dos refinamentos V, 4, 5 e 6

3.1.3. “Initial Element size” (“Max Refinement Level” de 7)

Nesta secção o comparativo é realizado entre os refinamentos 3, 33, 34 e 35. Nestes refinamentos é alterado o “Initial element size” e o “Max refinement level” é mantido constante, mas igual a 7 (ver Tabela 3-4). A comparação dos resultados de tempo de computação apresentados na Tabela 3-3 com os apresentados na Tabela 3-4 mostra que com o aumento do tamanho inicial do elemento finito a diferença relativa entre o nível de refinamento 5 e 7 se vai reduzindo, sendo que para um tamanho inicial de 5 o tempo de computação associado ao nível 5 é maior do que o associado ao nível 7. De facto, quanto maior é o tamanho inicial do elemento, maior é a probabilidade de ser violada a condição imposta para a penetração radial e para o ângulo máximo entre elementos. Assim, é expectável que para tamanhos iniciais maiores o aumento do nível máximo de refinamento se traduza numa maior divisão dos elementos, ou seja, numa redução global da dimensão média do elemento e conseqüente aumento do tempo de computação. Para menores

dimensões iniciais do elemento, a probabilidade de ser violada a condição imposta para a penetração radial e para o ângulo máximo entre elementos reduz-se. Tal poderia indicar que a influência do nível de refinamento seria reduzida. No entanto, o facto de o problema em análise ser fortemente não linear e muito sensível aos problemas de detecção de contacto, parece conduzir a um resultado contraditório com esta análise mais simples. De facto, ao aumentar o nível de refinamento máximo admissível a dimensão admissível para os elementos finitos reduz-se nas zonas de forte curvatura. Este facto pode traduzir-se numa maior estabilidade do processo de cálculo, o que pode resultar num menor tempo de computação.

Tabela 3-4 - Selecção dos refinamentos 3, 33, 34 e 35

Simulações	Malha		Parâmetros de malha avançados		Tempo de computação (minutos)	Espaço em disco GB
	Radius penetration (mm)	Max element angle (°)	Initial element size (mm)	Max refinement level		
Refinamento 3	0,22	22,5	20	7	398	6,1
Refinamento 33	0,22	22,5	15	7	429	6,71
Refinamento 34	0,22	22,5	10	7	472	5,99
Refinamento 35	0,22	22,5	5	7	722	9,12

Da análise dos gráficos presentes em anexo (Anexo C, 1.b) retira-se que os refinamentos que apresentam maiores variações em relação à geometria nominal são o refinamento 33 e o refinamento 35, tal como se ilustra a título de exemplo no Gráfico 3-2. O Gráfico 3-3 apresenta a diferença média e o Gráfico 3-4 o desvio padrão médio, obtido para cada simulação, em relação à geometria nominal. A comparação é realizada para os dois níveis de refinamento. Globalmente, observa-se que o aumento do nível de refinamento tem um impacto reduzido nos resultados, em particular para as simulações realizadas com as dimensões intermédias de tamanho de elemento finito. Estes resultados confirmam a sensibilidade à dimensão inicial do elemento finito, mesmo quando se recorre a refinamento automático.

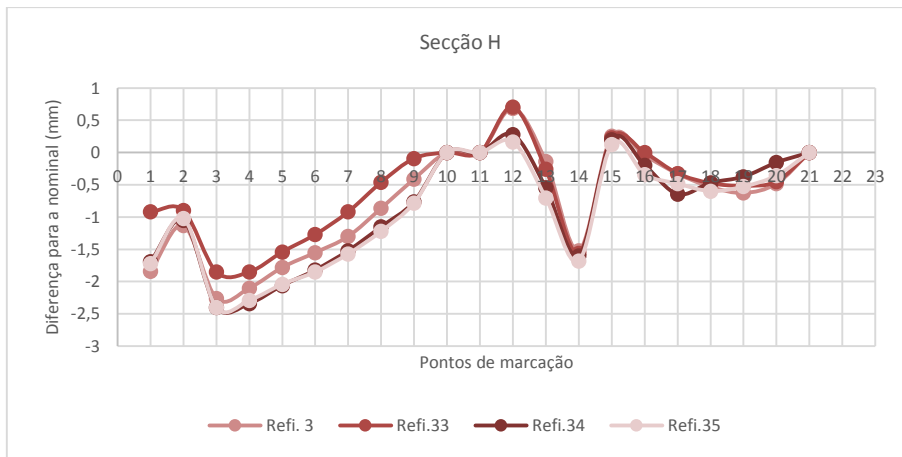


Gráfico 3-2 - Secção H dos refinamentos 3, 33, 34 e 35

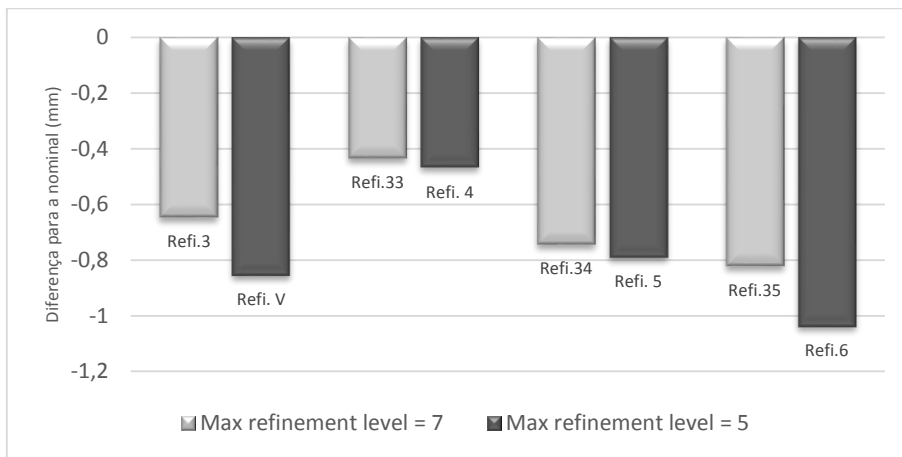


Gráfico 3-3- Médias comparativas entre os refinamentos: 3 vs V, 33 vs 4, 34 vs 5 e 35 vs 6 das secções H

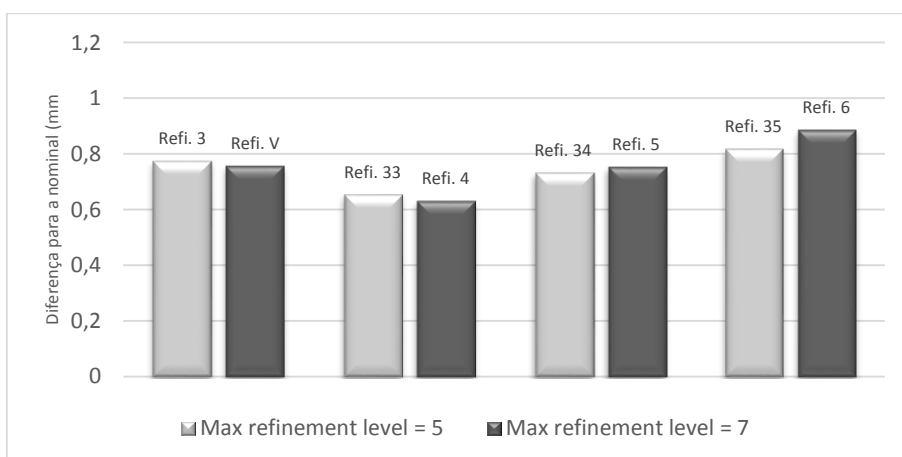


Gráfico 3-4 Desvios-padrão comparativos entre os refinamentos: 3 vs V, 33 vs 4, 34 vs 5 e 35 vs 6 das secções H

3.1.4. “Max Element angle” (“Max Refinement Level” de 5)

A comparação para o “Max element angle” é também realizada para os dois níveis de refinamento. Nesta secção consideram-se apenas os resultados obtidos para um nível de refinamento igual a 5, cujos parâmetros são apresentados na Tabela 3-5. Da análise do tempo de computação observa-se que o aumento é praticamente exponencial com a diminuição do ângulo máximo entre elementos. Ou seja, esta alteração do limite máximo do ângulo tem um impacto maior no tempo de computação do que a dimensão inicial do elemento, que aumenta de forma praticamente linear com a diminuição do tamanho inicial (excepto quando este parâmetro toma o valor de 5).

Tabela 3-5 - Seleção dos refinamentos V, 7, 8, 9, 10, 11 e 12

Simulações	Malha		Parâmetros de malha avançados		Tempo de computação (minutos)	Espaço em disco (GB)
	Radius penetration (mm)	Max element angle (°)	Initial element size (mm)	Max refinement level		
V	0,22	22,5	20	5	347	5,75
Refinamento 7	0,22	20	20	5	666	7,43
Refinamento 8	0,22	18	20	5	688	8,82
Refinamento 9	0,22	16	20	5	830	10,6
Refinamento 10	0,22	14	20	5	907	12,9
Refinamento 11	0,22	12	20	5	1152	16,5
Refinamento 12	0,22	10	20	5	1606	21,3

As simulações que conduzem a variações mais acentuadas de previsão de retorno elástico são os refinamentos V, 8 e 9, como se mostra a título de exemplo no Gráfico 3-5. Os restantes gráficos encontram-se no Anexo C, na subsecção 2.a.

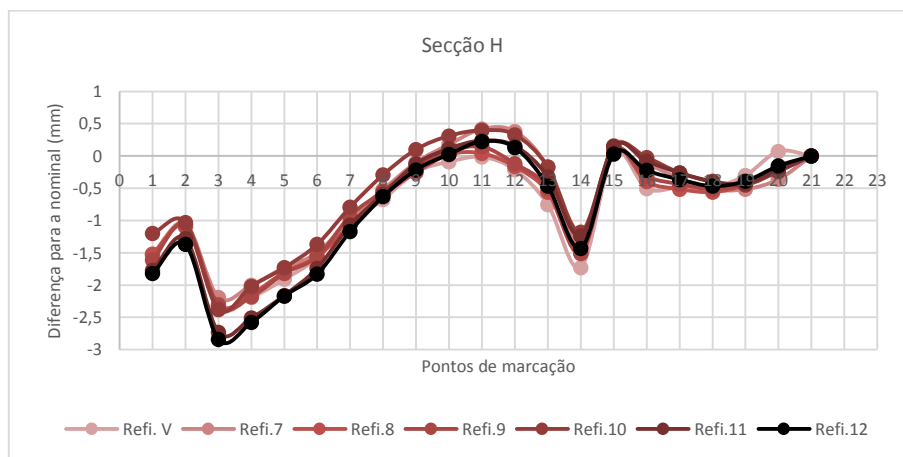


Gráfico 3-5 - Secção H dos refinamentos V, 7, 8, 9, 10, 11 e 12

3.1.5. “Max Element angle” (“Max Refinement Level” de 7)

Nesta secção analisa-se a influência do parâmetro “Max element angle” para o “Max refinement level” igual a 7, cujos parâmetros são sumariados na Tabela 3-6. Em termos de tempo de computação observa-se também um aumento exponencial com a diminuição do ângulo máximo entre elementos. No entanto, também neste caso com o aumento do nível de refinamento, o impacto do ângulo máximo entre elementos é ligeiramente mais reduzido.

Tabela 3-6 - Selecção dos refinamentos A, 20, 21, 22, 23, 24 e 25

Simulações	Malha		Parâmetros de malha avançados		Tempo de computação	Espaço em disco
	Radius penetration (mm)	Max element angle (°)	Initial element size (mm)	Max refinement level	(minutos)	GB
A	0,22	22,5	20	6	357	5,81
Refinamento 20	0,22	20	20	7	504	7,73
Refinamento 21	0,22	18	20	7	581	8,76
Refinamento 22	0,22	16	20	7	684	10,8
Refinamento 23	0,22	14	20	7	903	13,1
Refinamento 24	0,22	12	20	7	1237	17,4
Refinamento 25	0,22	10	20	7	1653	23,6

Os refinamentos A, 24 e 25 são os que apresentam maiores variações em relação à geometria nominal, como se mostra a título de exemplo no Gráfico 3-6. No Gráfico 3-7 e Gráfico 3-8, observa-se que estes refinamentos apresentam as diferenças máximas e mínimas em relação à geometria nominal da peça (geometria CAD de referência). Assim, estes são os seleccionados para a próxima fase. Globalmente, também neste caso o nível de refinamento apresenta uma influência reduzida nos resultados obtidos, excepto para as simulações realizadas com o valor máximo admissível para o ângulo (22.5°) e para um ângulo de 18°. No entanto, também neste caso, esta maior sensibilidade para estes casos, pode resultar da interacção com o valor pré-definido para a penetração máxima.

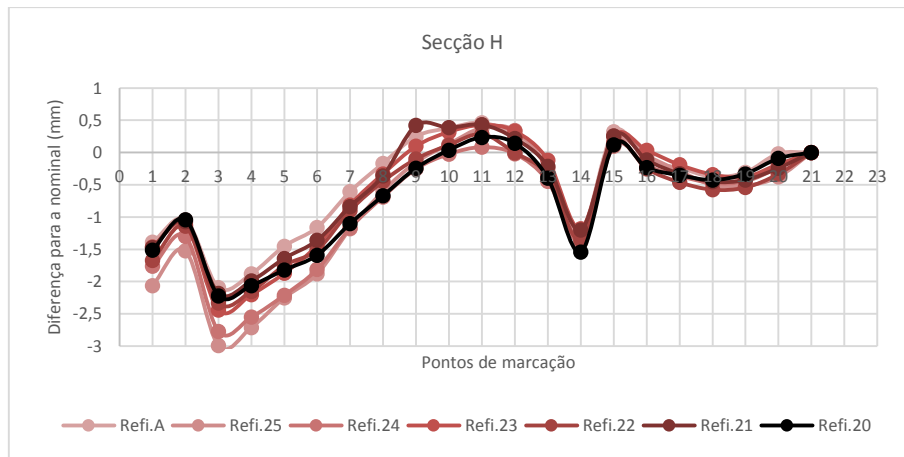


Gráfico 3-6 - Secção H dos refinamentos A, 20, 21, 22, 23, 24 e 25

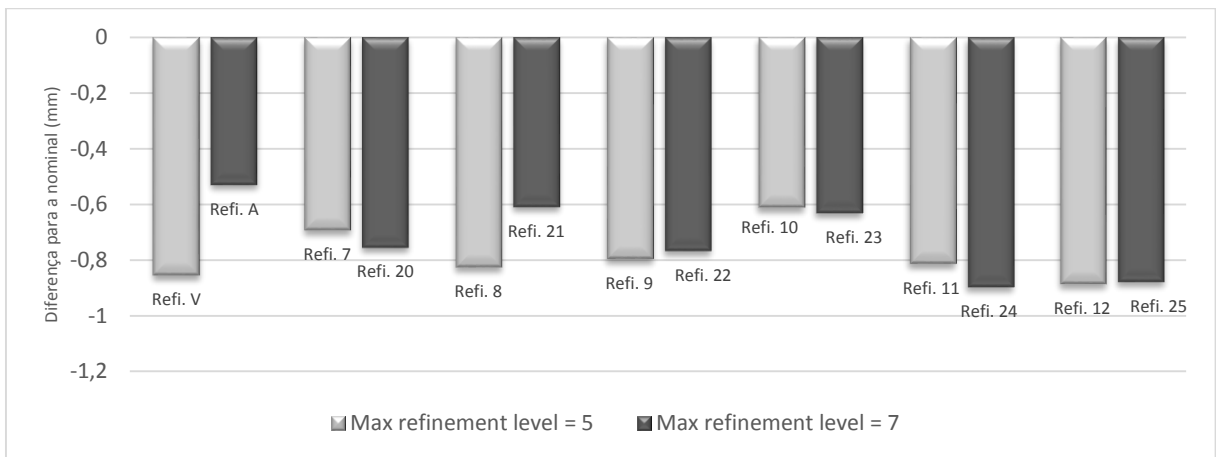


Gráfico 3-7 - Médias comparativas entre os refinamentos: V vs A, 7 vs 20, 8 vs 21, 9 vs 22, 10 vs 23, 11 vs 24 e 12 vs 25 das secções H

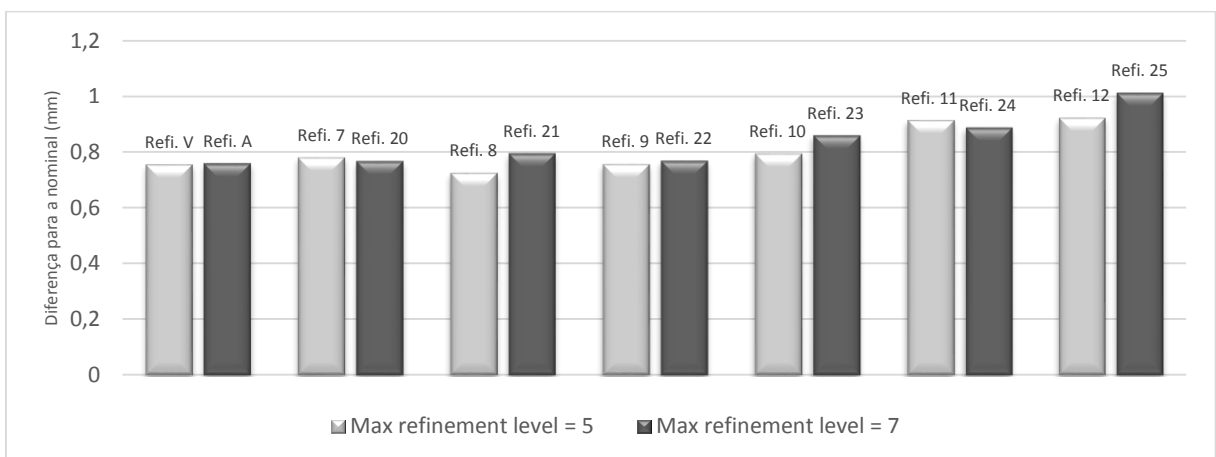


Gráfico 3-8 - Desvios padrão comparativos entre os refinamentos: V vs A, 7 vs 20, 8 vs 21, 9 vs 22, 10 vs 23, 11 vs 24 e 12 vs 25 das secções H

3.1.6. “Radius penetration” (“Max Refinement Level” de 5)

Nesta secção analisam-se as simulações nas quais se alterou o parâmetro “Radius penetration”, considerando um “Max Refinement Level” igual a 5. Na Tabela 3-7 são apresentados os parâmetros dos refinamentos em causa. O tempo de computação apresenta uma evolução praticamente linear, aumentando com a diminuição deste parâmetro.

Tabela 3-7 - Selecção dos refinamentos V, 14, 15, 16, 17, 18 e 19

Simulações	Malha		Parâmetros de malha avançados		Tempo de computação (minutos)	Espaço em disco (GB)
	Radius penetration (mm)	Max element angle (°)	Initial element size (mm)	Max refinement level		
V	0,22	22,5	20	5	347	5,75
Refinamento 14	0,2	22,5	20	5	382	5,94
Refinamento 15	0,18	22,5	20	5	398	6,09
Refinamento 16	0,16	22,5	20 </td <td>5</td> <td>455</td> <td>6,89</td>	5	455	6,89
Refinamento 17	0,14	22,5	20	5	499	7,27
Refinamento 18	0,12	22,5	20	5	580	7,92
Refinamento 19	0,1	22,5	20	5	654	8,51

O Gráfico 3-9 é representativo das diferenças observadas para este parâmetro, sendo possível verificar que os refinamentos que apresentam maiores variações são os V, 15, 16 e 19. Os restantes gráficos encontram-se no Anexo C.

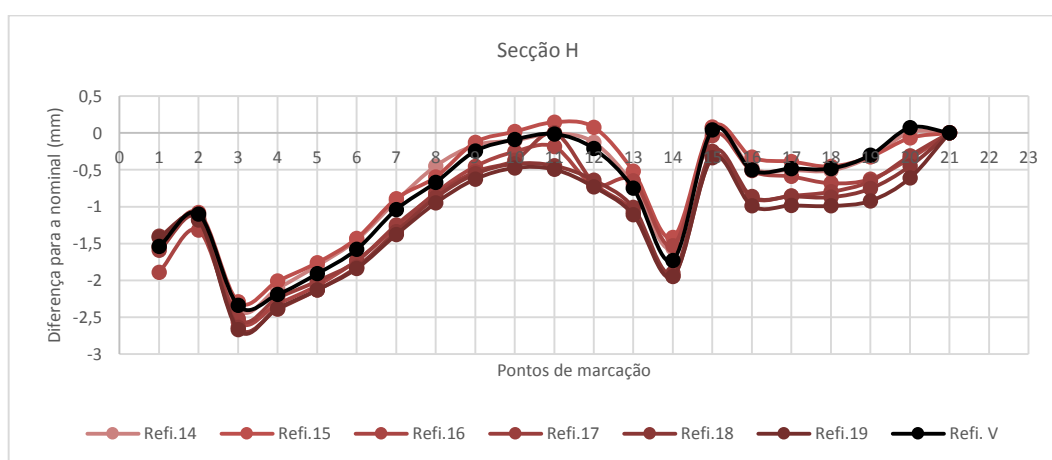


Gráfico 3-9 - Secção H dos refinamentos V, 14, 15, 16, 17, 18 e 19

3.1.7. “Radius penetration” (“Max Refinement Level” de 7)

A análise da influência do “Radius penetration” é concluída com base nos refinamentos A, 27, 28, 29, 30, 31 e 32, que foram realizados com um “Max refinement level” igual a 7. A Tabela 3-8 apresenta as principais características destes refinamentos. Também neste caso o aumento do tempo de computação evolui de forma aproximadamente linear com a diminuição do valor da penetração radial, sendo mais uma vez observado que com o aumento do nível de refinamento para menores valores da penetração radial o impacto deste parâmetro é mais reduzido (todos os gráficos se encontram no Anexo C).

Neste caso, os refinamentos que apresentam maiores variações em relação à geometria nominal são o A, 29 e 32, como se ilustra no Gráfico 3-10. Tal como vem sido mencionado, os restantes gráficos encontram-se no Anexo C. No Gráfico 3-11 e no Gráfico 3-12, verifica-se que estes refinamentos (29 e 32) são os que mais se desviam da geometria nominal (maior média) e o A é o que menos se desvia. Globalmente, também neste caso o nível de refinamento admissível apresenta uma influência reduzida, excepto para o refinamento com maior valor admissível de penetração radial. No entanto, também neste caso parece existir interferência entre os parâmetros numéricos, uma vez que a influência do nível de refinamento é mais reduzido para uma penetração admissível de 0.2 e 0.18 do que para valores mais reduzidos.

Tabela 3-8 - Selecção dos refinamentos A, 27, 28, 29, 30, 31 e 32

Simulações	Malha		Parâmetros de malha avançados		Tempo de computação	Espaço em disco
	Radius penetration (mm)	Max element angle (°)	Initial element size (mm)	Max refinement level	(minutos)	GB
A	0,22	22,5	20	6	357	5,81
Refinamento 27	0,2	22,5	20	7	425	6,01
Refinamento 28	0,18	22,5	20	7	435	6,44
Refinamento 29	0,16	22,5	20	7	481	6,91
Refinamento 30	0,14	22,5	20	7	521	7,42
Refinamento 31	0,12	22,5	20	7	546	7,72
Refinamento 32	0,1	22,5	20	7	622	8,41

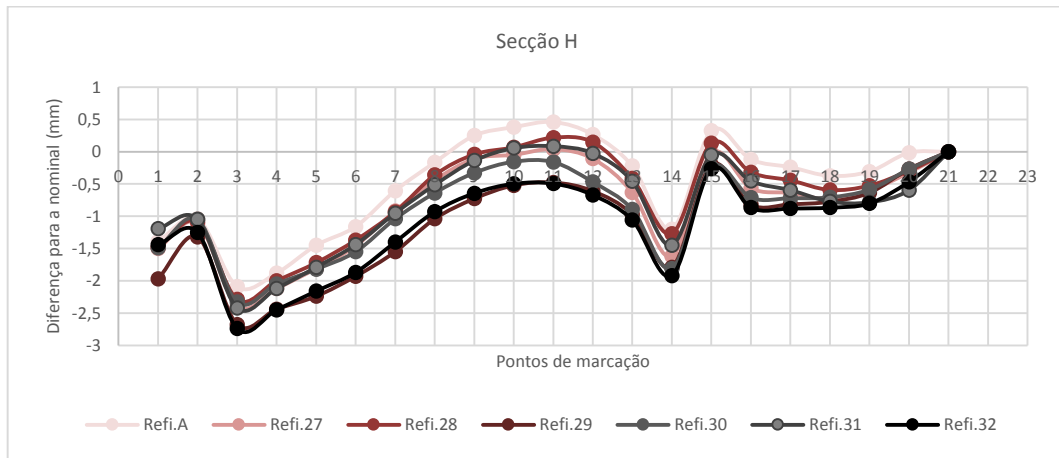


Gráfico 3-10 - Secção H dos refinamentos A, 27, 28, 29, 30, 31 e 32

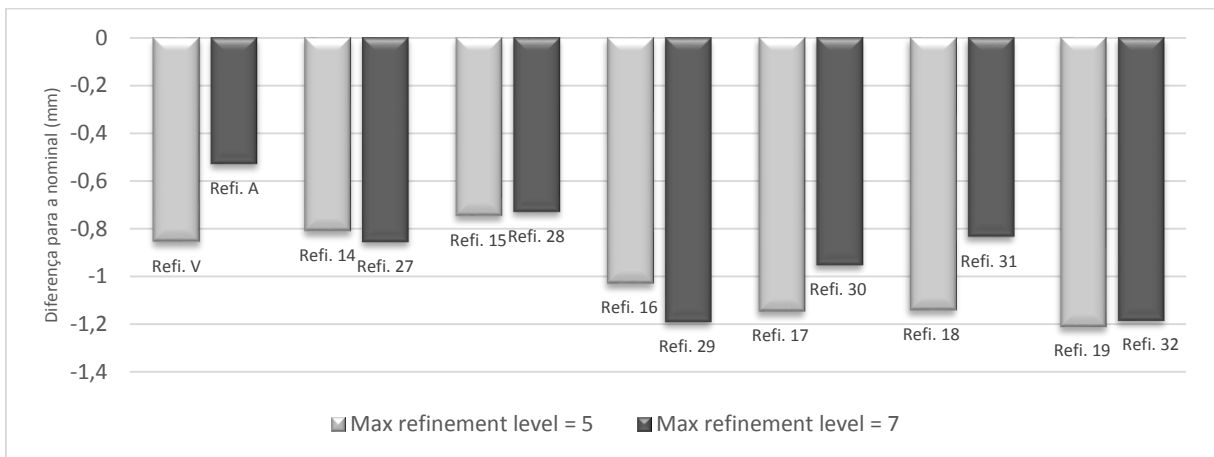


Gráfico 3-11 - Médias comparativas entre os refinamentos: V vs A, 14 vs 27, 15 vs 28, 16 vs 29, 17 vs 30, 18 vs 31 e 19 vs 32 das secções H

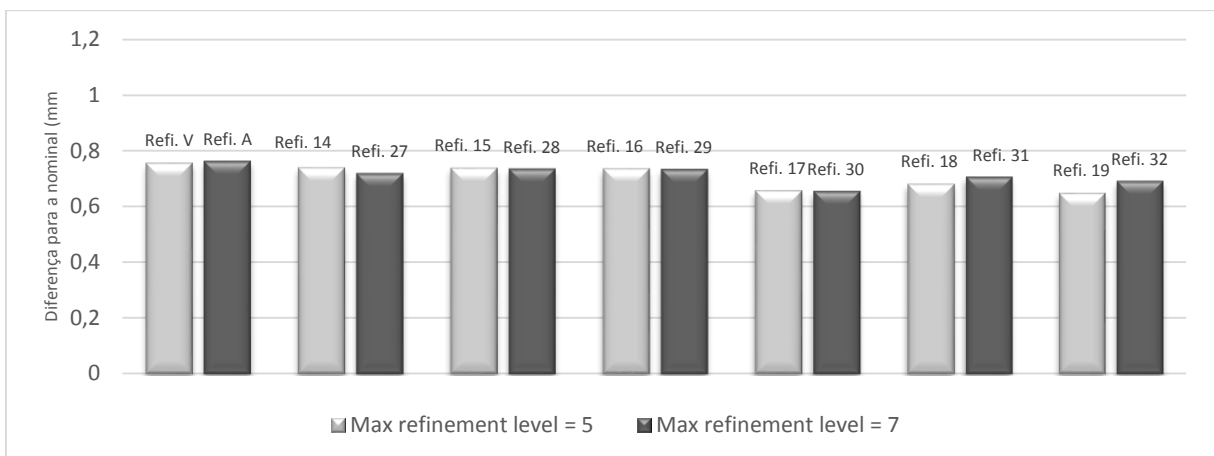


Gráfico 3-12- Desvios padrão comparativos entre os refinamentos: V vs A, 14 vs 27, 15 vs 28, 16 vs 29, 17 vs 30, 18 vs 31 e 19 vs 32 das secções H

3.1.8. Tabela resumo

Na Tabela 3-9 apresenta-se o resumo dos refinamentos seleccionados para a segunda etapa de análise. A interacção entre os parâmetros numéricos observados na primeira etapa permitiu reduzir de forma mais eficaz o número de simulações a realizar. De uma forma geral, observa-se que os parâmetros “*Radius penetration*” e o “*Max element angle*” não têm tanto impacto como o “*Initial element size*” e o “*Max refinement level*”. No entanto, a influência do nível de refinamento não permite retirar conclusões seguras. Assim, na segunda etapa realizaram-se as simulações descritas na Tabela 3-9, que apresenta também os tempos de computação obtidos assim como o número total de elementos presentes no final de cada simulação. Na última coluna desta tabela observa-se que o número de elementos é maior nos casos em que são utilizados menores valores para o parâmetro “*Max element angle*” em consonância com valores mais elevados para o “*Max refinement level*”. Isto é, como o primeiro parâmetro (“*Max element angle*”) define o ângulo máximo entre dois elementos adjacentes, quanto menor for o limite, maior será o refinamento da malha (1.5.2.2.). Contudo, este é limitado pelo segundo parâmetro “*Max refinement level*”, uma vez que este dita o nível máximo de refinamento. Assim, quanto maior for o “*Max refinement level*”, mais refinada pode ser a malha (1.5.2.4.). Verifica-se também que as simulações com maior número de elementos são precisamente os refinamentos 24 e 25, com o menor valor de “*Max element angle*” e maior valor de “*Max refinement level*”. O número de elementos aumenta de forma considerável aquando da inclusão de formas com raios pequenos ($r \approx 3$ mm) (por exemplo na Etapa 1, ver subcapítulo 2.1.) e nas dobragens (ver Etapa 5). Como se depreende da tabela, os refinamentos dos parâmetros implicam custos de computação. Porém, dado que a indústria trabalha cada vez mais com parâmetros de exigência mais apertados (limite aceitável de 0,4 milímetros), este custo justifica-se pela precisão obtida nas simulações. Para além deste custo, acresce o custo em unidade virtual. Ou seja, também como se pode observar na tabela seguinte, quanto mais refinada é a malha mais espaço ocupa, o que conduz a um espaço virtual ocupado de maiores proporções. O parâmetro de controlo que aumenta mais, tanto o tempo de computação como o espaço ocupado (em relação às simulações V e A), é o “*Max refinement level*” em conjunto com o “*Max element angle*”. Este facto ocorre devido à discretização da chapa ser muito mais detalhada. De facto, os resultados indicam uma correlação próxima da linear entre o tempo de computação e o

espaço necessário em disco virtual para armazenar os resultados, consequência do aumento da dimensão do problema.

Tabela 3-9 - Tabela resumo dos refinamentos seleccionados

Simulações	Malha		Parâmetros de malha avançados		Tempo de computação	Espaço em disco	Número total de elementos finais
	Radius penetration (mm)	Max element angle (°)	Initial element size (mm)	Max refinement level	(minutos)	GB	
V	0,22	22,5	20	5	347	5,75	217426
A	0,22	22,5	20	6	357	5,81	219423
Refinamento 4	0,22	22,5	15	5	422	6,39	245562
Refinamento 6	0,22	22,5	5	5	860	9,62	260479
Refinamento 8	0,22	18	20	5	688	8,82	306566
Refinamento 9	0,22	16	20	5	830	10,6	412865
Refinamento 15	0,18	22,5	20	5	398	6,09	223802
Refinamento 16	0,16	22,5	20	5	455	6,89	247836
Refinamento 19	0,1	22,5	20	5	654	8,51	298260
Refinamento 24	0,22	12	20	7	1237	17,4	657528
Refinamento 25	0,22	10	20	7	1653	23,6	860698
Refinamento 29	0,16	22,5	20	7	481	6,91	247295
Refinamento 32	0,1	22,5	20	7	622	8,41	298147
Refinamento 33	0,22	22,5	15	7	429	6,71	246348
Refinamento 35	0,22	22,5	5	7	722	9,12	260479

3.2. Análise global

Neste subcapítulo os refinamentos que foram seleccionados anteriormente serão abordados com mais detalhe. Os resultados numéricos são comparados com os experimentais. Para tal, realizou-se a medição da peça recorrendo à máquina DEA-ALPHA IMAGE, sendo que todos os resultados obtidos são apresentados no Anexo B. A medição do retorno elástico da peça é realizada considerando a sua fixação em 9 locais (ver Figura 3-3), quer na análise experimental quer na análise numérica.

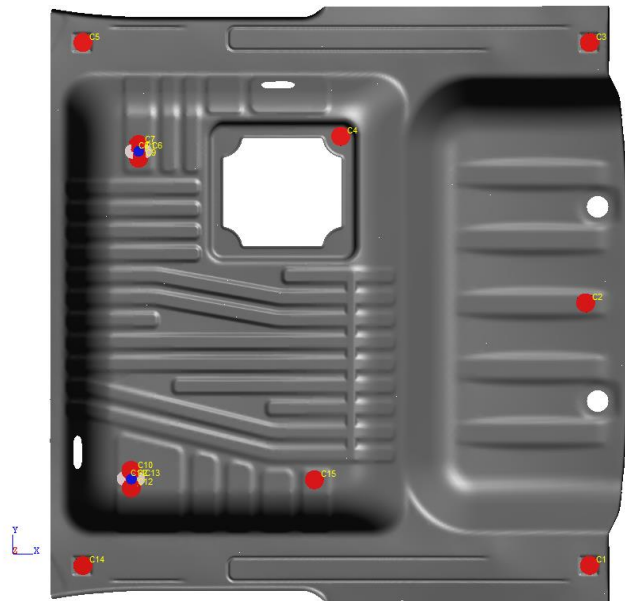


Figura 3-3 Locais de fixação da peça para medição

Para que fosse possível tratar a informação, foi utilizada a mesma nuvem de pontos, tanto na peça medida experimentalmente como nas simulações, para efectuar a comparação do retorno elástico. No entanto, como se mostra na Figura 3-4, a medição experimental é realizada em pontos pré-definidos que não estão organizados em grelha. Para facilitar a análise, optou-se por criar uma grelha de suporte para definir regiões (ver Figura 3-4). Enquanto na grelha utilizada na fase 1 (ver Figura 3-1) há cerca de 350 intercepções (o que implica 350 pontos de medição), a grelha da fase 2 recorre a aproximadamente 850 pontos de marcação. Ou seja, esta grelha, tendo uma nuvem de pontos muito mais densa que a anterior ($\approx 2,5$), descreve com muito mais detalhe o comportamento da chapa.

No entanto, observou-se que os pontos de cada zona podem apresentar comportamentos muito distintos. De facto, como se depreende da Figura 3-4, a nuvem de pontos é extensa, pelo que optou-se por estabelecer uma outra metodologia para uma análise coadjuvada. O processo passa então por analisar a peça por duas vias, sendo que na primeira abordagem procede-se à medição dos pontos na horizontal (ver Figura 3-5 (a)). Nesta fase, a medição é dividida em seis secções A, B, C, D, E e F. Para cada secção foram ainda criadas subsecções (1,...,6) que variam de secção para secção. Do mesmo modo, a abordagem à análise vertical também se regeu por uma grelha vertical (ver Figura 3-5 (b)) e dentro desta, as secções G, H, I, J, L e M também são divididas em subsecções. Os resultados obtidos para cada uma destas secções horizontais e verticais são abordadas nos subcapítulos seguintes.

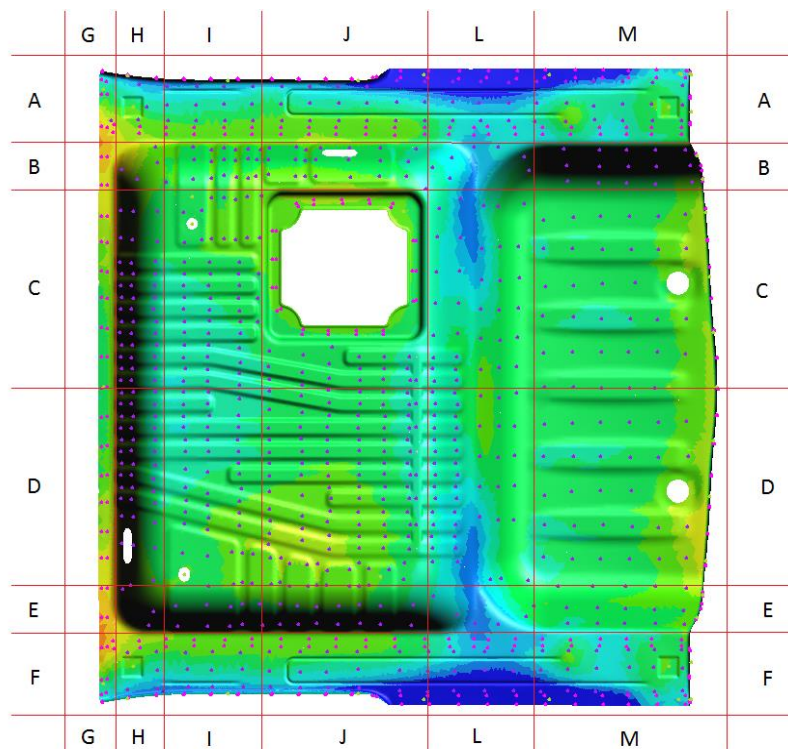


Figura 3-4 Grelha de medição fase 2

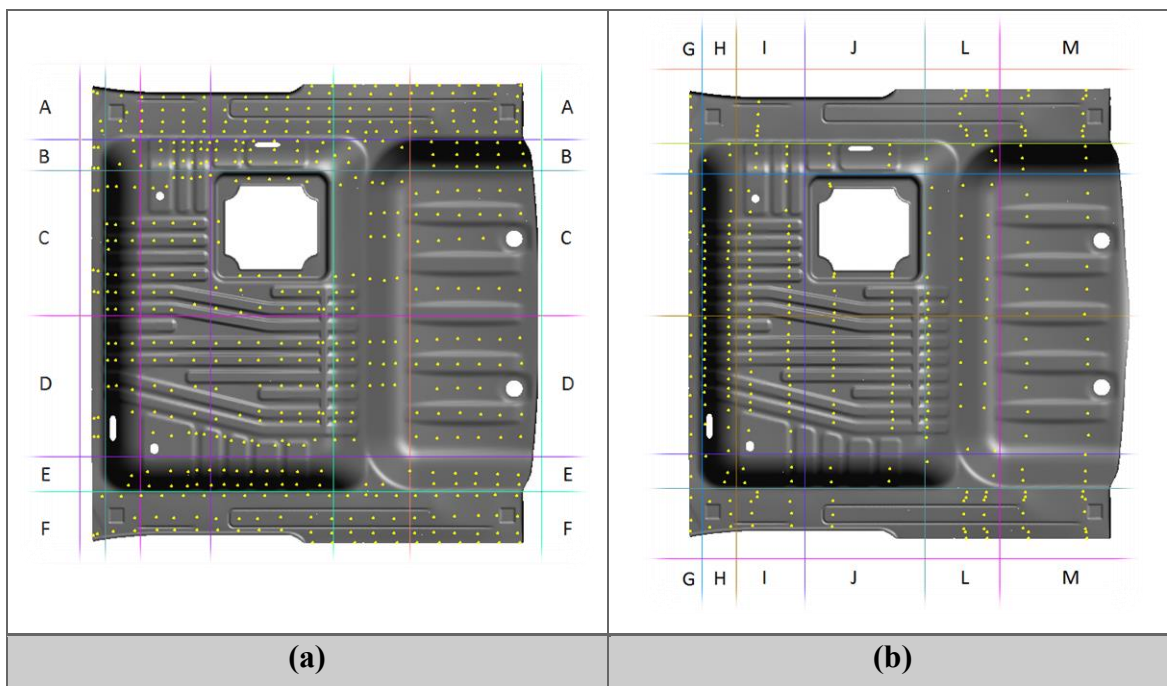


Figura 3-5 (a) Grelha de secções horizontais e (b) grelha de secções verticais

3.2.1. Secções Horizontais

3.2.1.1. Secção A

Na Figura 3-6 observa-se a metodologia que se adoptou para a medição desta secção, de acordo com a divisão nas secções internas supramencionadas. No Gráfico 3-13 apresentam-se os resultados obtidos para todas as simulações realizadas, para a secção A e subsecção 1, designada por A1. Observa-se que na comparação com os resultados experimentais existe uma discrepância máxima de aproximadamente 4 mm. No entanto, à medida que se vão percorrendo as subsecções, na direcção do interior da peça, as discrepâncias entre a peça medida e as simulações são cada vez menores, chegando os resultados a serem praticamente coincidentes. No Gráfico 3-14 mostra-se a secção A5 na qual se observa uma aproximação às décimas de milímetro na previsão do retorno elástico. Os gráficos das restantes secções 1 e 5 são apresentados no Anexo D.

A zona A1 é uma porção da peça que, experimentalmente, escoa pelos travamentos e é parte inclusa da peça, pelo que a componente cinemática pode ter um efeito importante. Como já foi referido anteriormente, esta componente não é inclusa no modelo constitutivo utilizado. Negligenciar este comportamento, mais concretamente o efeito de Bauschinger, é um passo dado para a imprecisão do fenómeno de retorno elástico. Não obstante, o defeito dimensional acentuado nesta secção deve-se também ao reduzido estiramento nesta zona da peça, o que conduz a um nível reduzido de deformação plástica e a um estiramento reduzido (ver Figura 3-7 (a) e (b), respectivamente). Importa mencionar que o detalhe de forma em U não é considerado na modelação numérica das etapas de estampagem apesar de ser considerado na ferramenta. Este detalhe de pequeno raio de curvatura deve contribuir para aumentar o nível de deformação plástica da chapa, o que justifica o menor valor de retorno elástico medido experimentalmente.

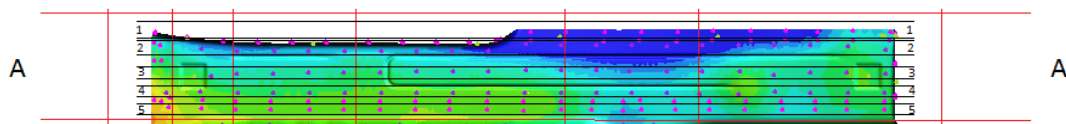


Figura 3-6 Secção horizontal A e subsequentes secções 1, 2, 3, 4 e 5

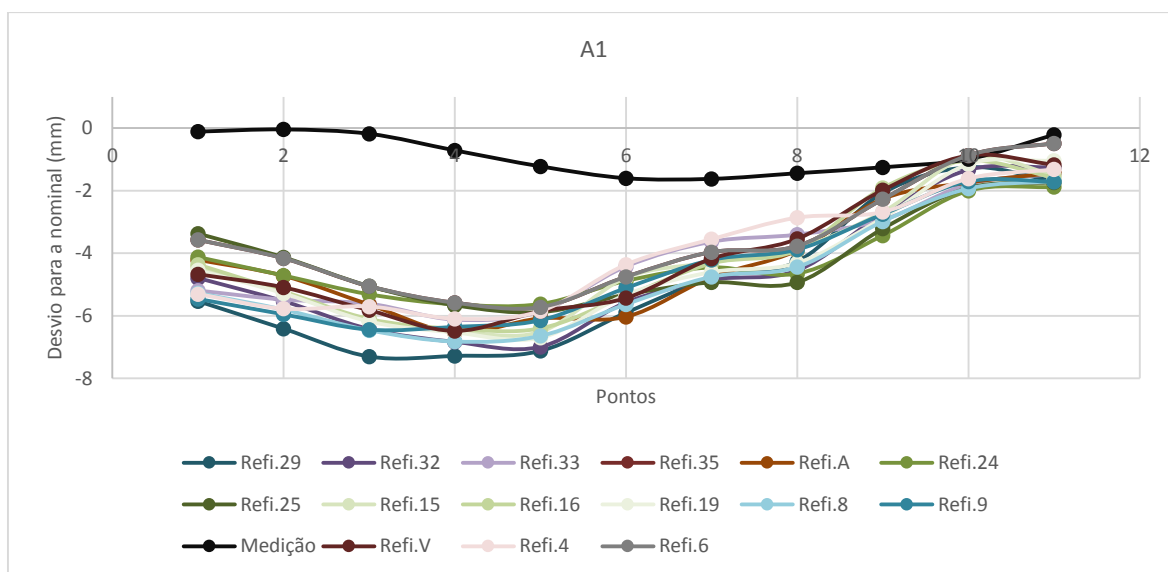


Gráfico 3-13 - Secção horizontal A1 com os refinamentos pré-seleccionados para a segunda fase

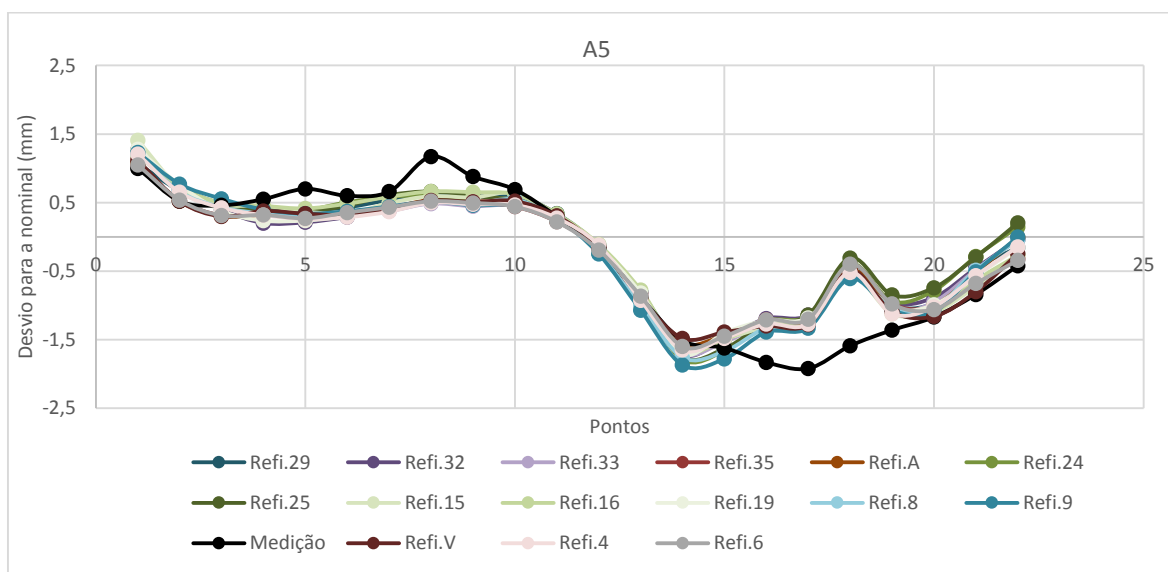


Gráfico 3-14 - Secção horizontal A5 com os refinamentos pré-seleccionados para a segunda fase

Nas secções que apresentam uma menor discrepância em relação aos resultados experimentais, é muito difícil distinguir os resultados numéricos, i.e., a solução para qualquer dos conjuntos de parâmetros numéricos considerados é muito idêntica. No entanto, na secção A1 para a qual a discrepância é menor, o refinamento 6 é o que apresenta um menor desvio em relação aos resultados experimentais.

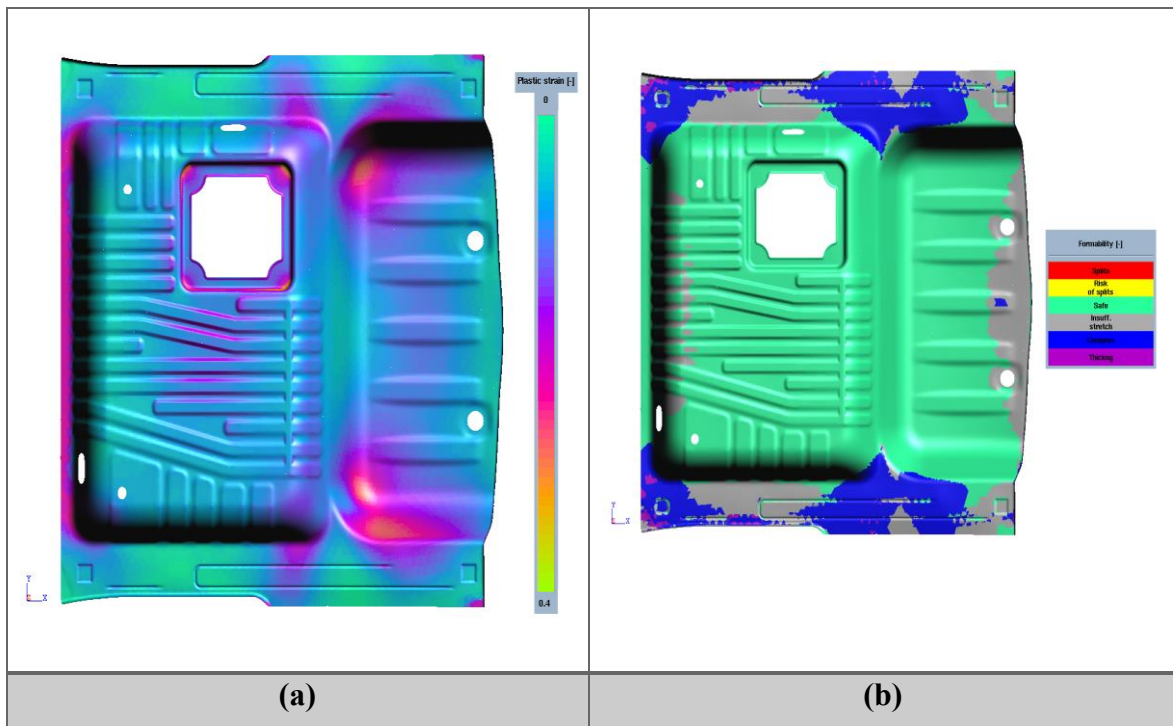


Figura 3-7 (a) Deformação plástica equivalente para o refinamento V e (b) formabilidade da peça para o refinamento V

3.2.1.2. Secção B

Esta secção foi dividida em 3 subsecções (1, 2 e 3) que podem ser visualizadas na Figura 3-8. Nesta secção, a previsão do retorno elástico é satisfatória na medida em que os resultados das simulações são muito próximos da peça medida.

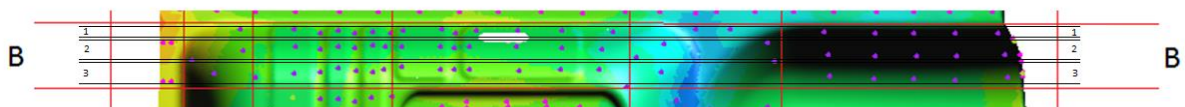


Figura 3-8 - Secção horizontal B e subsequentes secções 1, 2 e 3

No Gráfico 3-15 observa-se que apenas na parte final, ou seja, na parede vertical da segunda embutidura, há uma diferença mais acentuada entre o resultado experimental e as diferentes simulações numéricas. Também neste caso, destaca-se o refinamento 6, que apresenta uma diferença em relação ao resultado experimental inferior ou igual a 0,4 milímetros.

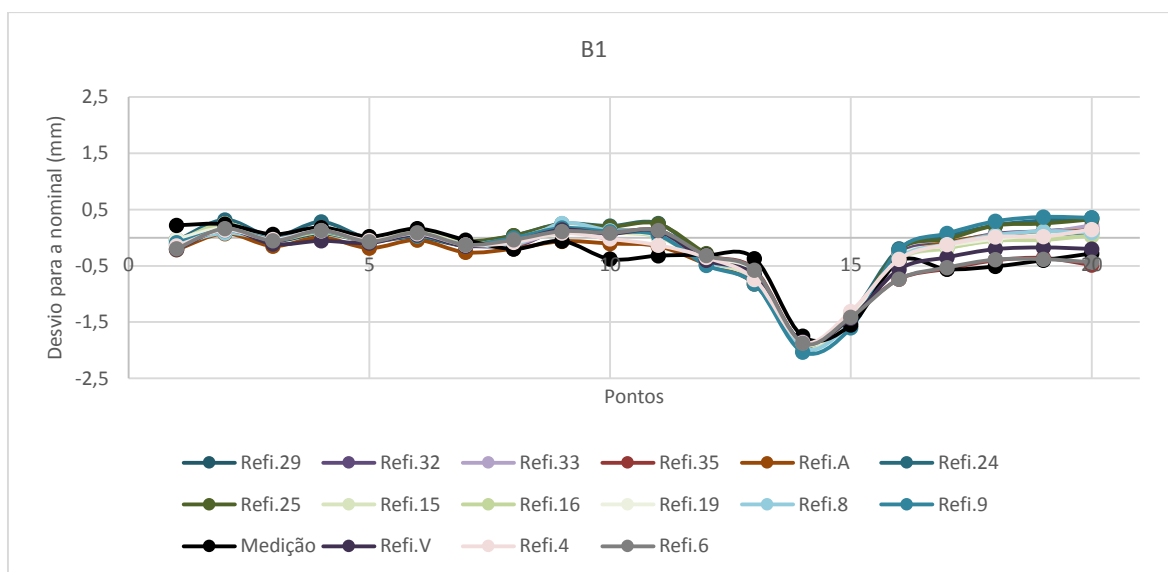


Gráfico 3-15- Secção horizontal B1 com os refinamentos pré-seleccionados para a segunda fase

Nas restantes subsecções (2 e 3), as diferenças voltam a ser mais acentuadas na parede vertical. O Gráfico 3-16 apresenta os resultados para a subsecção 2, sendo possível observar que as maiores diferenças entre resultados numéricos e experimentais ocorrem para os refinamentos 6 e 35. É curioso notar que é nestes refinamentos que a malha é mais densa logo no início da simulação. Isto é, tanto o refinamento 6 como o 35, ambos começam com uma malha mais densa (ver Tabela 3-9). A diferença, neste caso, é cerca de 1 milímetro (ver Gráfico 3-16) o que, para efeitos empresariais, não é o desejado. Tal como já foi referido, uma boa previsão compreende uma diferença máxima de 0,4 milímetros. Porém, o refinamento 6 é o que mais se aproxima da peça medida, com a excepção de algumas secções (como tem vindo a ser discutido ao longo da análise).

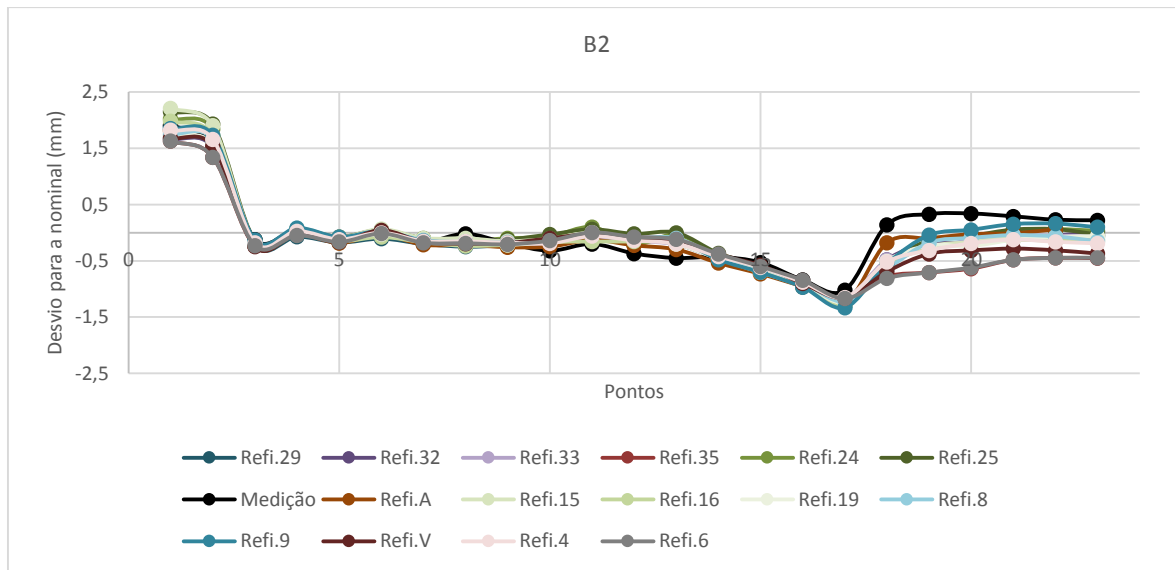


Gráfico 3-16 - Secção horizontal B2 com os refinamentos pré-seleccionados para a segunda fase

3.2.1.3. Secção C

Nesta secção é onde se observam as maiores discrepâncias nos resultados numéricos, em particular na fracção da peça referente à segunda embutidura (ver Figura 2-3). De facto, esta secção corresponde à parte central da peça, que foi dividida em 6 subsecções diferentes, como se mostra na Figura 3-9.

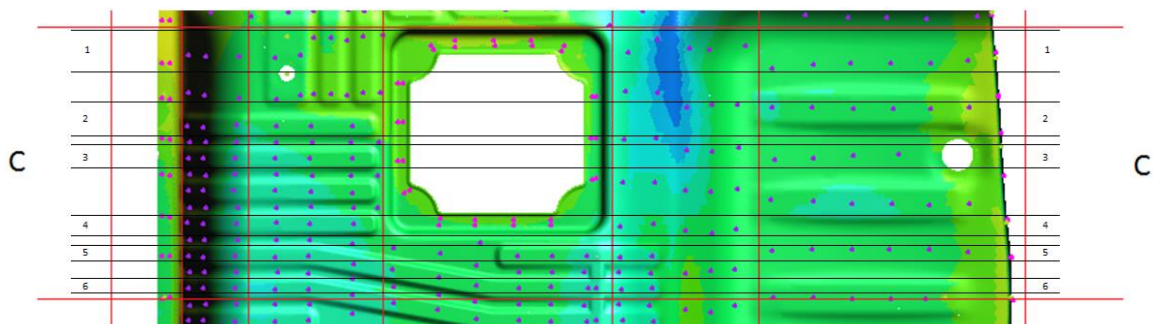


Figura 3-9 - Secção horizontal C e subsequentes secções 1, 2, 3, 4, 5 e 6

O Gráfico 3-17 apresenta os resultados obtidos para a subsecção 2, sendo possível observar que o refinamento 6 é o que mais se aproxima da medição experimental. Os resultados para as restantes secções são apresentados no Anexo D.

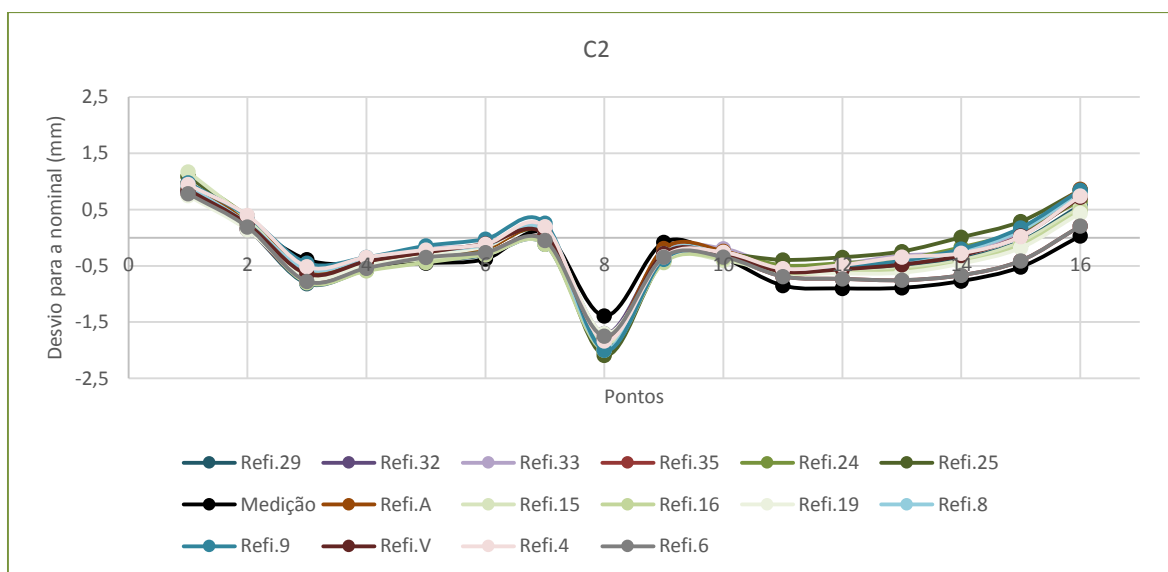


Gráfico 3-17 - Secção horizontal C2 com os refinamentos pré-seleccionados para a segunda fase

3.2.1.4. Restantes secções horizontais

De modo análogo à secção C, também para a secção D os pontos que apresentam maiores diferenças na previsão do retorno elástico corresponde à zona referente à segunda embutidura. Porém, para o refinamento 6, essa diferença é máxima na subsecção D4 (ver Figura 3-10 e Gráfico 3-18) e toma o valor de cerca de 0,5 milímetros. De entre todas as simulações, o refinamento que mais se aproxima entre os pontos 0 e 15 é o refinamento 4 (ver Gráfico 3-18). Na secção final (entre os pontos 15 a 20), o refinamento 6 é o que tem valores mais aproximados da peça experimental.

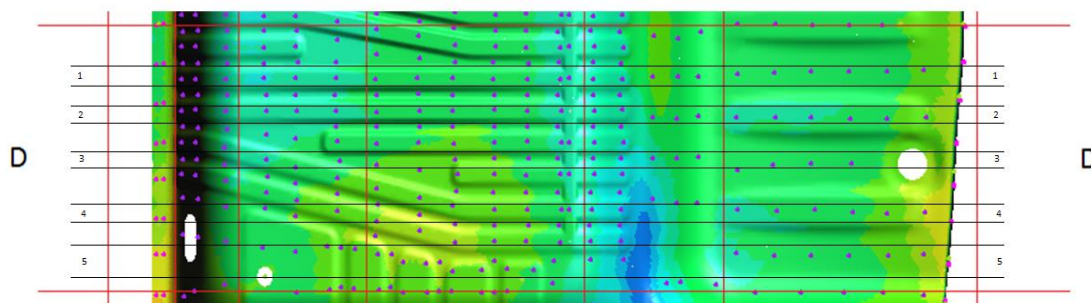


Figura 3-10 - Secção horizontal D e subsequentes secções 1, 2, 3, 4 e 5

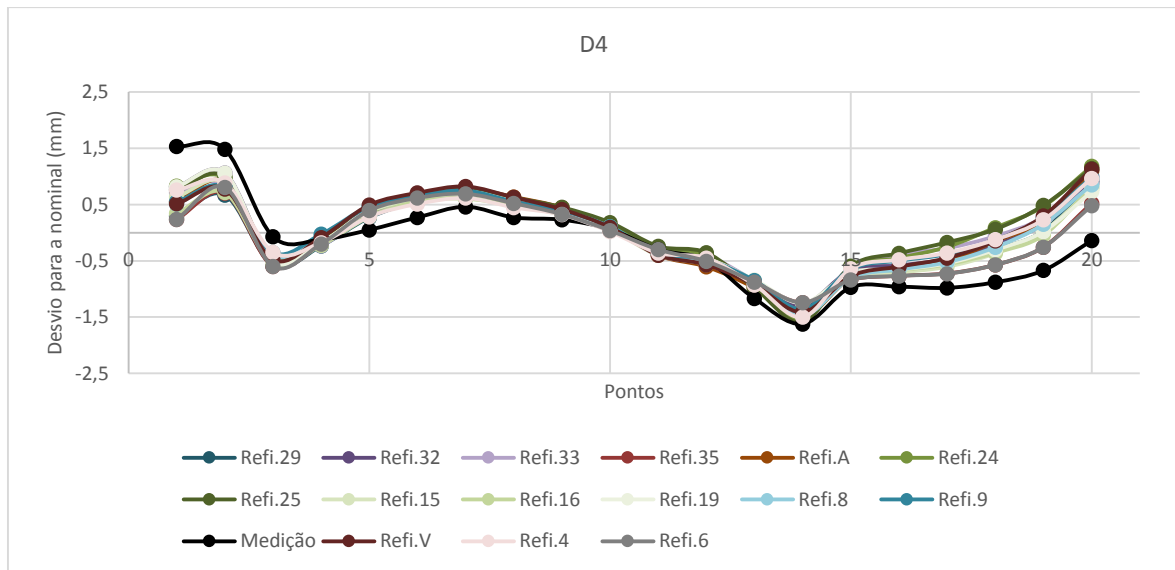


Gráfico 3-18 - Secção horizontal D4 com os refinamentos pré-seleccionados para a segunda fase

Estas divergências nesta porção da peça podem resultar do facto de esta zona sofrer uma dobragem na extremidade da peça (ver Figura 2-7) e da peça não sofrer estiramento nesta zona (ver Figura 3-7 (b)). Mais uma vez podem estar associadas ao facto da descrição do comportamento do material não ser a mais adequada, na medida em que o programa não tem em consideração o encruamento cinemático. Também o facto de não haver deformação plástica (ver Figura 3-7 (a)) e a conseqüente falta de estiramento desta zona conduz a que a previsão do retorno elástico seja ainda mais complicado de prever.

As secções E e F são muito semelhantes às secções A e B, pelo que a abordagem e análise destas também são idênticas (ver Figura 3-11 e Figura 3-12, respectivamente). Os resultados da previsão de retorno elástico da secção E voltam a ser um pouco divergentes na parede vertical da peça (de modo análogo à secção B). De igual modo, a secção F, tal como a secção A, apresenta resultados com desvios mínimos na subsecção 1, sendo que estes vão piorando na direcção do exterior da peça (tal como acontece na secção A). As semelhanças podem ser visualizadas nos gráficos apresentados no Anexo D.

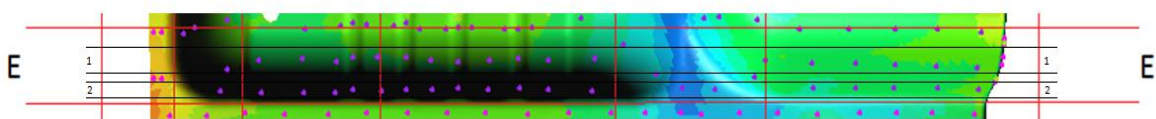


Figura 3-11 - Secção horizontal E e subsequentes secções 1 e 2

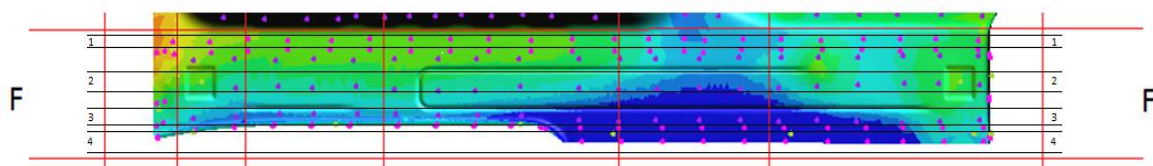


Figura 3-12 - Secção horizontal F e subsequentes secções 1, 2, 3 e 4

3.2.2. Secções Verticais

Neste subcapítulo são analisadas as secções verticais, de acordo com a divisão em subsecções, como apresentado na Figura 3-13.

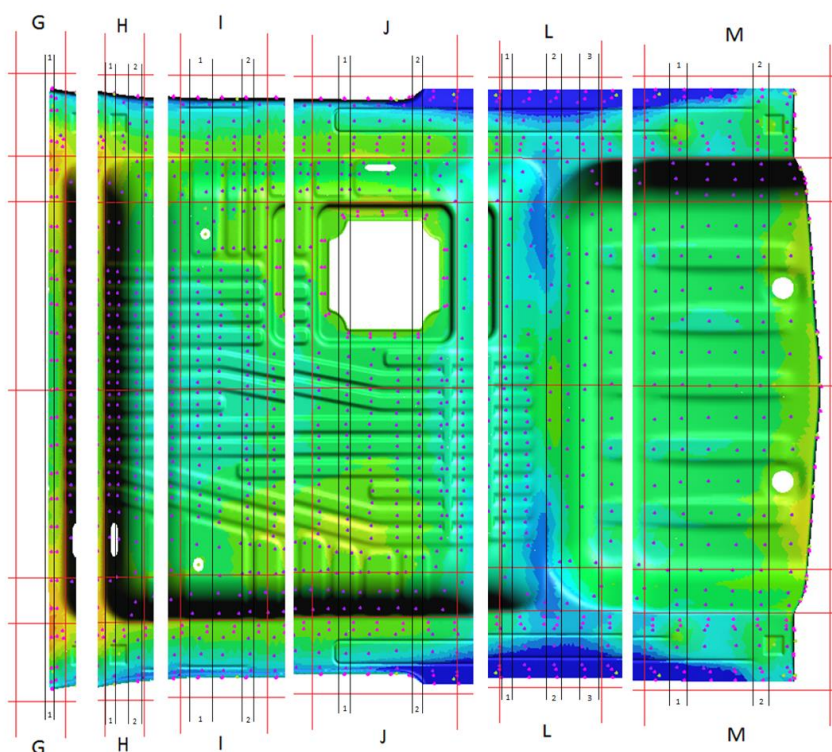


Figura 3-13 Secções (G, H, I, J, L e M) e subsecções (1, ..., 3) verticais

3.2.2.1. Secção G

Esta secção apresenta algumas discrepâncias entre o resultado experimental e os resultados numéricos. Esta secção corresponde a um bordo livre, pelo que a peça medida sofre de alguma ondulação e é essencialmente a este factor que se devem as divergências. Porém, mais uma vez é importante salientar que a porção de peça ondulada (quase a totalidade da secção G) passa pelo travamento e é parte integrante da peça final. Os

resultados obtidos para esta secção, G1, são apresentados no Gráfico 3-19, onde se observa a dificuldade em seleccionar um refinamento que permita minimizar o erro na previsão do retorno elástico, ao longo de toda a secção.

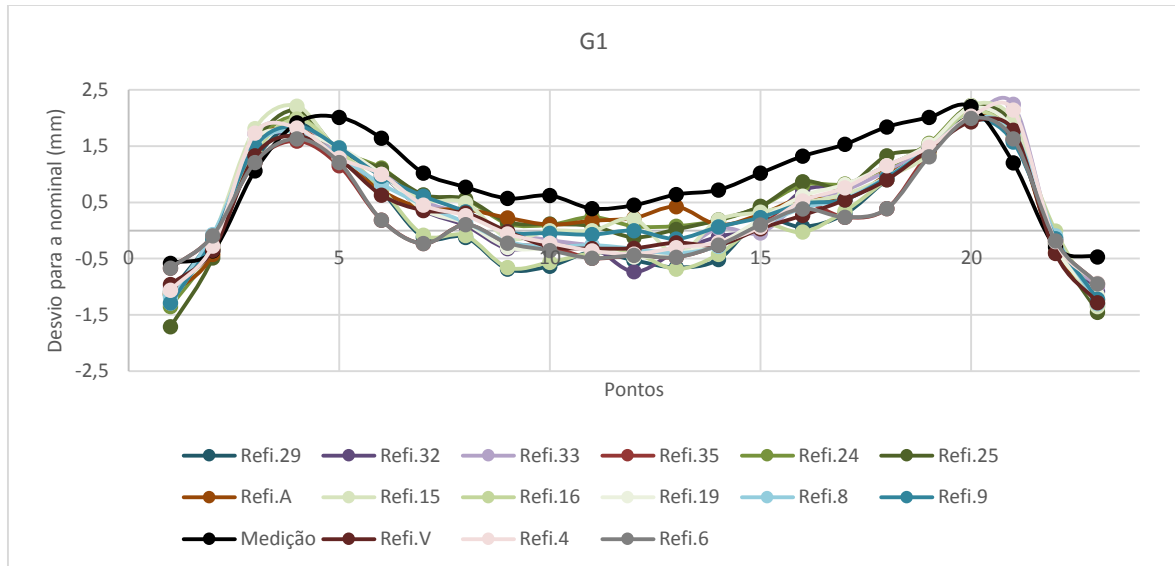


Gráfico 3-19- Secção vertical G1 com os refinamentos pré-seleccionados para a segunda fase

3.2.2.2. Secção H

Como se pode visualizar na Figura 3-13, a secção H corresponde à parte vertical da primeira embutidura. Na subsecção 1, todas as simulações prevêem com uma grande precisão o desvio dimensional. Contudo, na subsecção seguinte, H2, a previsão apresenta um comportamento um pouco erróneo. Os valores de desvio entre o refinamento 6 e a peça medida voltam a apresentar um valor máximo de cerca de 1 milímetro. Porém, qualquer que seja o conjunto de parâmetros numéricos seleccionados não é possível minimizar este desvio na previsão, como se mostra no Gráfico 3-20. Esta diferença de valores deve-se ao não estiramento da peça, o que conduz a uma reduzida deformação plástica do material. Assim, é mais difícil garantir uma correcta previsão do retorno elástico.

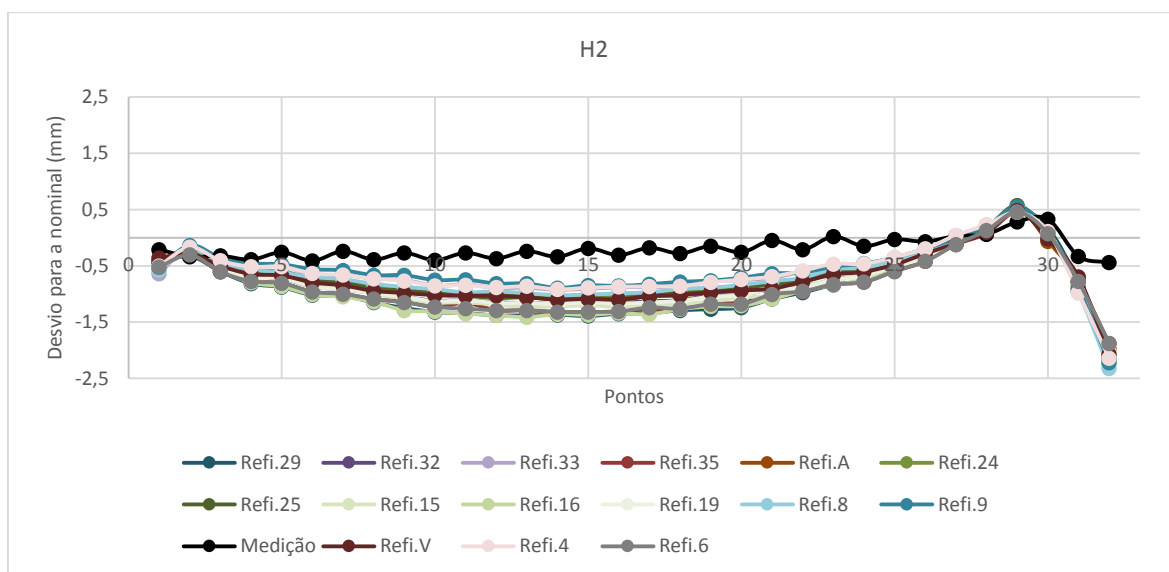


Gráfico 3-20- Secção vertical H2 com os refinamentos pré-seleccionados para a segunda fase

3.2.2.3. Secção I

No seguimento da discussão realizada na secção anterior, as subsecções I1 e I2 apresentam maiores discrepâncias na previsão do retorno elástico no centro da peça. Estas diferenças podem ser observadas no Gráfico 3-21, sendo que os valores obtidos para a secção I2 são apresentados no Anexo D.

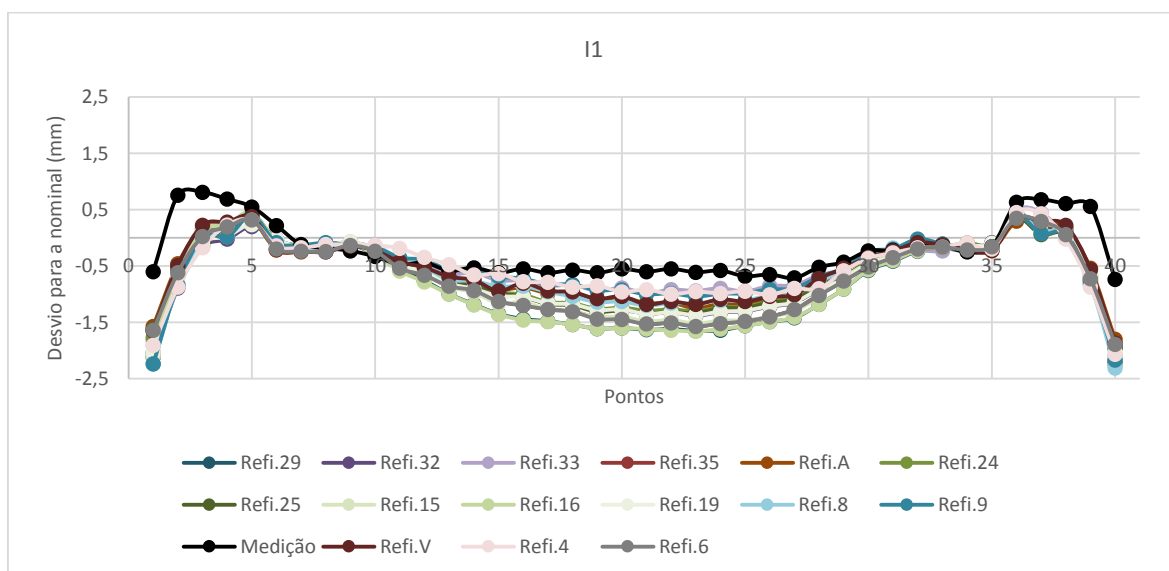


Gráfico 3-21 - Secção vertical I1 com os refinamentos pré-seleccionados para a segunda fase

3.2.2.4. Secção J

A diferença entre o retorno elástico medido e previsto é, em todos os casos, muito reduzida, com excepção da zona correspondente à aba exterior, para a qual os resultados são um tanto ao quanto díspares. Neste caso, o refinamento que mais se aproxima do resultado experimental é novamente o 6, contudo este apresenta uma diferença de $\approx 1,2$ milímetros (ver Gráfico 3-22). Esta diferença é o reflexo da análise realizada anteriormente, uma vez que é nesta zona que se verifica a maior diferença entre as simulações e a peça medida.

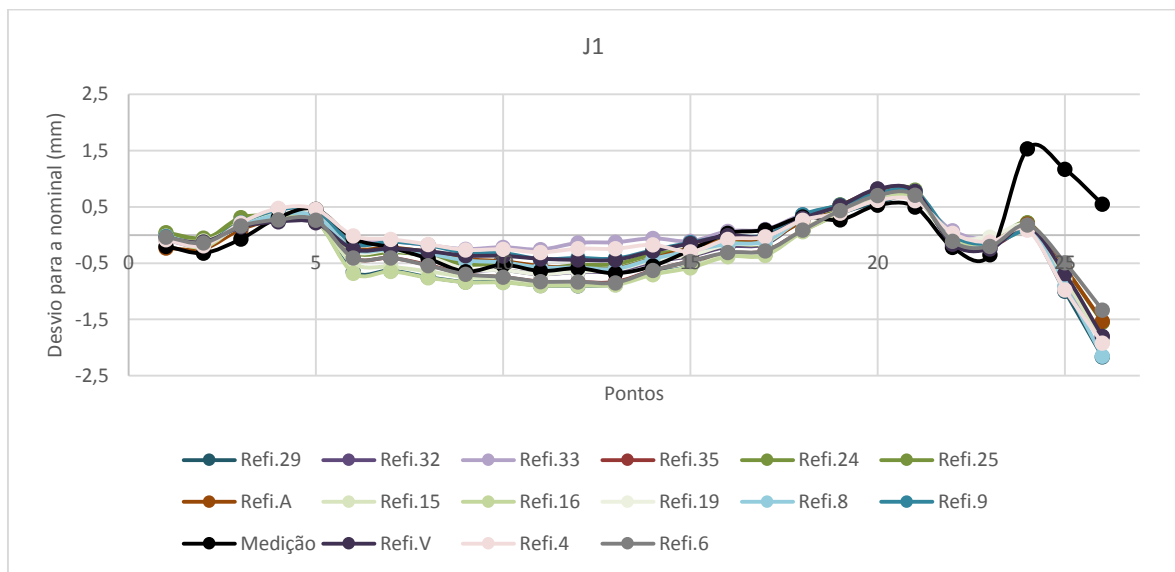


Gráfico 3-22 - Secção vertical J1 com os refinamentos pré-seleccionados para a segunda fase

3.2.2.5. Secção L

Para esta secção, as simulações prevêem com precisão o retorno elástico, qualquer que seja o conjunto de parâmetros numéricos considerados. Exceptuando as zonas das abas exteriores, os resultados de todas as simulações são congruentes e muito próximos da peça medida (ver Gráfico 3-23).

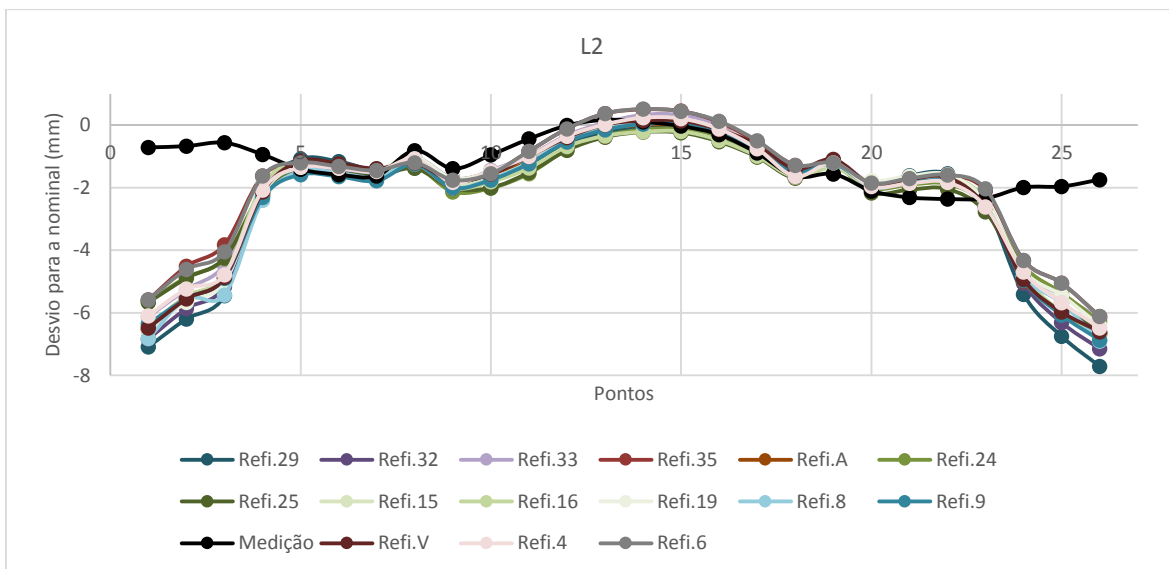


Gráfico 3-23 - Secção vertical L2 com os refinamentos pré-seleccionados para a segunda fase

3.2.2.6. Secção M

Por fim, na secção M, que diz respeito à porção de chapa referente à segunda embutidura, verificam-se algumas diferenças entre os resultados das simulações e a medição experimental (ver Gráfico 3-24). Tal como foi referenciado na análise das secções C e D, este feito deve-se ao não estiramento da peça (ver Figura 3-7) e ao facto de a extremidade da peça ter sido dobrada. De qualquer modo, a diferença máxima entre o refinamento 6 e a medição experimental não é superior a 0,8 milímetros.

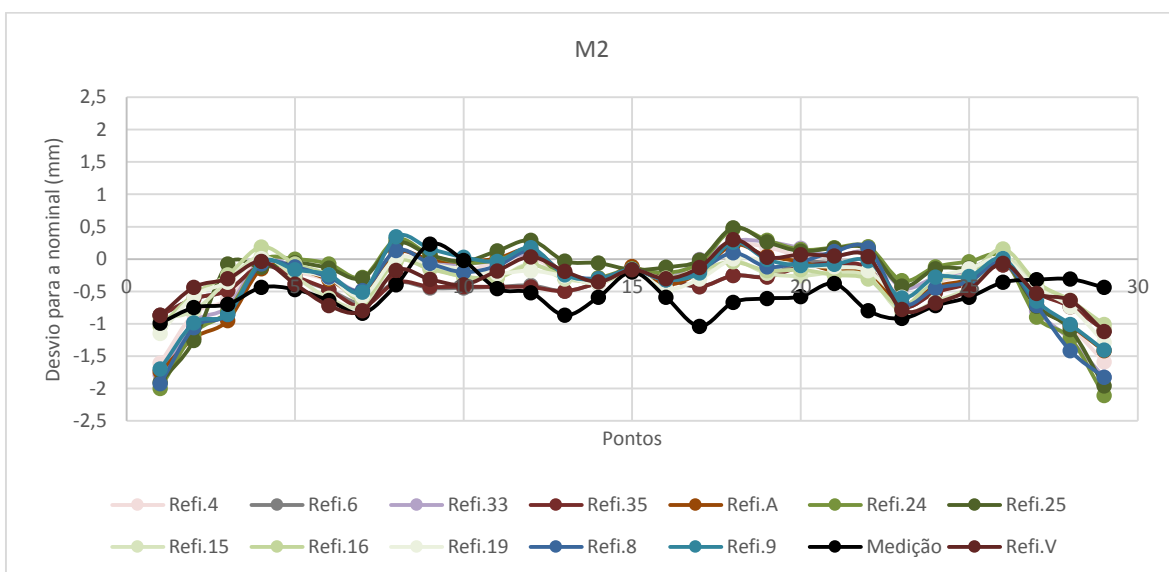


Gráfico 3-24 - Secção vertical M2 com os refinamentos pré-seleccionados para a segunda fase

4. CONCLUSÕES

Na actualidade, a previsão do retorno elástico é ainda um grande obstáculo para a melhoria do projecto e concepção de ferramentas de embutidura. Durante o período de realização do estudo foram executadas várias simulações para se estudar caso a caso o impacto dos parâmetros. Verificou-se que os parâmetros: “*Radius penetration*” e o “*Max element angle*” não têm tanto impacto como o “*Initial element size*” e o “*Max refinement level*”. Contudo, estes parâmetros trazem custos de computação mais elevados e espaço virtual necessário também de maiores proporções. A adopção das condições seleccionadas neste estudo, em detrimento das utilizadas actualmente, conduzem a um aumento destes factores em, aproximadamente, 2,5 vezes. Não obstante, no que diz respeito à exigência industrial, mais concretamente no ramo automóvel, as previsões mais precisas trazem vantagens na medida em que se trabalha com décimas de milímetro. À vista desarmada são detalhes que por vezes não são notórios, porém, os custos associados a estes pequenos detalhes são avultados. Assim, apesar de os resultados entre simulações apresentarem variações reduzidas (raramente mais do que 2-3 milímetros), é necessário ter atenção que estas diferenças podem ter um grande impacto na optimização das ferramentas.

As dificuldades na previsão do retorno elástico são acrescidas para os aços de alta resistência por apresentarem maiores razões entre a tensão limite de elasticidade e o módulo de elasticidade do que os aços convencionais. O componente seleccionado apresenta um retorno elástico elevado que deve ser minimizado de modo a cumprir com os requisitos do projecto. A incorrecta previsão implica um maior conjunto de procedimentos de testes experimentais da ferramenta, dificultado pelo facto de o processo envolver diferentes etapas.

Outro ponto fulcral diz respeito à dificuldade de modelação e precisão de um processo multi-etapa. O processo seleccionado envolve 5 etapas (estampagens, cortes e dobragens), pelo que ainda é mais complicada a previsão do retorno elástico, uma vez que as etapas anteriores influenciam as subsequentes. Neste contexto, seria de todo o interesse que fosse possível a medição do componente entre etapas, de modo a compreender a influência de cada uma delas na previsão do retorno elástico. Contudo, a realização destas medições acarreta custos, na medida em que é necessário projectar e adquirir os suportes. Não obstante, é um projecto futuro interessante de ser analisado.

Dado que se trata de uma peça que se encontra em fase de *try-out*, o manuseamento e o ajuste contínuo das ferramentas torna ainda mais complexa a precisão deste defeito dimensional. Se se unir ainda o transporte e manuseamento entre as ferramentas e a máquina de medição e sabendo que se tratam de medições que vão ao décimo de milímetro, a tarefa de comparar os dados experimentais e os numéricos é ainda mais árdua e imprevisível. Contudo, apesar de tantos factores influenciarem os dados experimentais assim como os numéricos, é fundamental destacar-se a grande precisão que se obtém nas simulações.

Ao longo da análise foi dado ênfase ao refinamento 6 pois, de entre as restantes simulações, foi a que mais se aproximou das medições da peça experimental. É notório que a malha mais densa corresponde a uma melhor descrição do comportamento do material assim como da evolução das forças de contacto na peça. Contudo, há zonas em que mesmo com este refinamento de malha a previsão não tem a exactidão exigida ($\leq 0,4$ milímetros). Apesar dos custos de computação serem cerca de 2,5 vezes mais elevado, a nível industrial o melhoramento da precisão do retorno elástico vale o investimento.

Assim, nesta fase convém validar este refinamento de malha com outro tipo não só de peça como de material.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alves, J.L. (2003). *Simulação numérica do processo de estampagem de chapas metálicas - Modelação mecânica e métodos numéricos*. Universidade do Minho.
- Alves, J.L. Oliveira, M.C. Menezes. (2006). L.F. *Numerical Evaluation of the Influence of the Elastic Properties Evolution in Springback Prediction*. International Deep Drawing Research Group (p. 161-168)
- Asgari, S. a., Pereira, M., Rolfe, B. F., Dingle, M., & Hodgson, P. D. (2008). *Statistical analysis of finite element modeling in sheet metal forming and springback analysis*. Journal of Materials Processing Technology, 203(1-3), 129–136.
- AutoForm® Plus R3. *Help*
- Azevedo, F. M. (2003). *Método dos elementos finitos* (p. 258). Porto.
- Borgmann, I. (2012). *Análise por elementos finitos de um carro*. Faculdade de Horizontina
- Burchitz, I. A. (2008). *Improvement of Springback Prediction in Sheet Metal Forming* (p. 156).
- Cafuta, G., Mole, N., & Štok, B. (2012). *An enhanced displacement adjustment method: Springback and thinning compensation*. Materials & Design, 40, 476–487
- Duarte, J. M. F. (1997). *Conformação plástica de chapas metálicas*. Universidade do Porto, Porto.
- Ferreira, A. J. M. (1990). *Análise por elementos finitos de estruturas do tipo casca em materiais compósitos*. Universidade do Porto, Porto
- Grilo, T. Jordão. (2011). *Estudo de modelos constitutivos anisotrópicos para chapas metálicas*. Universidade de Aveiro.
- Haus, S. A. (2011). *Influência do efeito Bauschinger no retorno elástico em aços de elevada resistência*. Universidade Federal do Paraná.
- Lajarin, S. F. (2012). *Influência da variação do módulo de elasticidade na previsão computacional do retorno elástico em aços de alta resistência*. Universidade Federal do Paraná.

- Malheiro, L. N. T. (2012). *Caracterização Mecânica de Materiais em Chapa Metálica e Problemas de Formabilidade em Componentes para Automóveis*. Universidade do Porto.
- Malheiro, L. N. T. (2013). *Inovação nas empresas de metalurgia e metalomecânica*. *Tecnometal*, (205), 18 – 31.
- Mangas, A. Arroyo, A. Fernandez, I. Gonzalez, B. (2006). *Improvement of Springback FEM Simulation by Means of an Optimization Procedure Based on an Experimental Trial*. International Deep Drawing Research Group (p. 519-526)
- Meinders, T., Burchitz, I. a., Bonte, M. H. a., & Lingbeek, R. a. (2008). *Numerical product design: Springback prediction, compensation and optimization*. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 48(5), 499–514.
- Mole, N., Cafuta, G., & Stok, B. (2014). *Technology A 3D forming tool optimisation method considering springback and thinning compensation*. *Journal of Materials Processing*, 214, 1673–1685.
- Oliveira, M. C. C. de. (2005). *Algoritmos e Estratégias de Gestão do Problema de Contacto com Atrito em Grandes Deformações Aplicação à Estampagem de Chapas Metálicas*. Universidade de Coimbra.
- Oliveira, M.C. (2006). *Two Stage Forming: Experiment and FE Analysis*. International Deep Drawing Research Group (p. 279-286)
- Padmanabhan, R. Oliveira, M.C.. Baptista. A.J. Alves, J.L. Menezes, L. F. (2007). *Study on the Influence of the Refinement of a 3-D Finite Element Mesh in Springback Evaluation of Plane-Strain Channel Sections*. *Numiform* (p 847-852)
- Panthi, S. K., Ramakrishnan, N., Ahmed, M., Singh, S. S., & Goel, M. D. (2010). *Finite Element Analysis of sheet metal bending process to predict the springback*. *Materials & Design*, 31(2), 657–662.
- Sun, G., Li, G., Gong, Z., Cui, X., Yang, X., & Li, Q. (2010). *Multiobjective robust optimization method for drawbead design in sheet metal forming*. *Materials & Design*, 31(4), 1917–1929.
- Teixeira-Dias, F. Pinho-da-Cruz, J. Fontes Valente, R. A. Alves de Sousa, R.J. (2010). *Técnicas de Simulação Numérica em Engenharia*. Métodos dos Elementos Finitos
- Turetta, A., Ghiotti, A., Bruschi, S. (2006). *Testing Material Formability in Hot Stamping Operations*. Actas da conferência IDDRG 2006, International Deep Drawing Research Group conference, Santos A.D. e Barata da Rocha A. (eds.), 99-104.

-
- Tutelman, D., Tutelman, R.H, Tutelman, J., Tutelman, D., Stress distribution, The Tutelman site. Acedido a 22 de Junho de 2014. Disponível em <http://www.tutelman.com/golf/shafts/allAboutSpines1.php>
- Vaz, T. J. L. P. (2013). *Modelação Numérica de Processos de Conformação Plástica de Chapas*. Universidade do Porto.
- Verterra R.M.F, Stress-strain Diagram. Engineering Math review, Acedido em 30 de Maio de 2014. Disponível em <http://www.mathalino.com/reviewer/mechanics-and-strength-of-materials/stress-strain-diagram>
- Vladimirov, Ivaylo.N. Reese, Stefanie. (2006). *Constitutive Modelling of Sheet Metals in the Finite Strain Regime*. International Deep Drawing Research Group (p. 177-182)
- Wagoner, R. H., Lim, H., & Lee, M.-G. (2013). *Advanced Issues in springback*. International Journal of Plasticity, 45, 3–20. doi:10.1016/j.ijplas.2012.08.006
- Yoshida, F. Uemori, T. Abe, S. (2006) *A Model of Large-Strain Cyclic Plasticity for Accurate Springback Analysis*. International Deep Drawing Research Group (p. 145-152)
- Zang, S., Lee, M., & Kim, J. H. (2013). *Evaluating the significance of hardening behavior and unloading modulus under strain reversal in sheet springback prediction*. International Journal of Mechanical Sciences, 77, 194–204.
- Zhao, J., Zhai, R., Qian, Z., & Ma, R. (2013). *A study on springback of pro fi le plane stretch – bending in the loading method of pretension and moment*. International Journal of Mechanical Sciences 75, 45–54.
- Zhu, Y. X., Liu, Y. L., Yang, H., & Li, H. P. (2012). *Development and application of the material constitutive model in springback prediction of cold-bending*. Materials & Design, 42, 245–258.

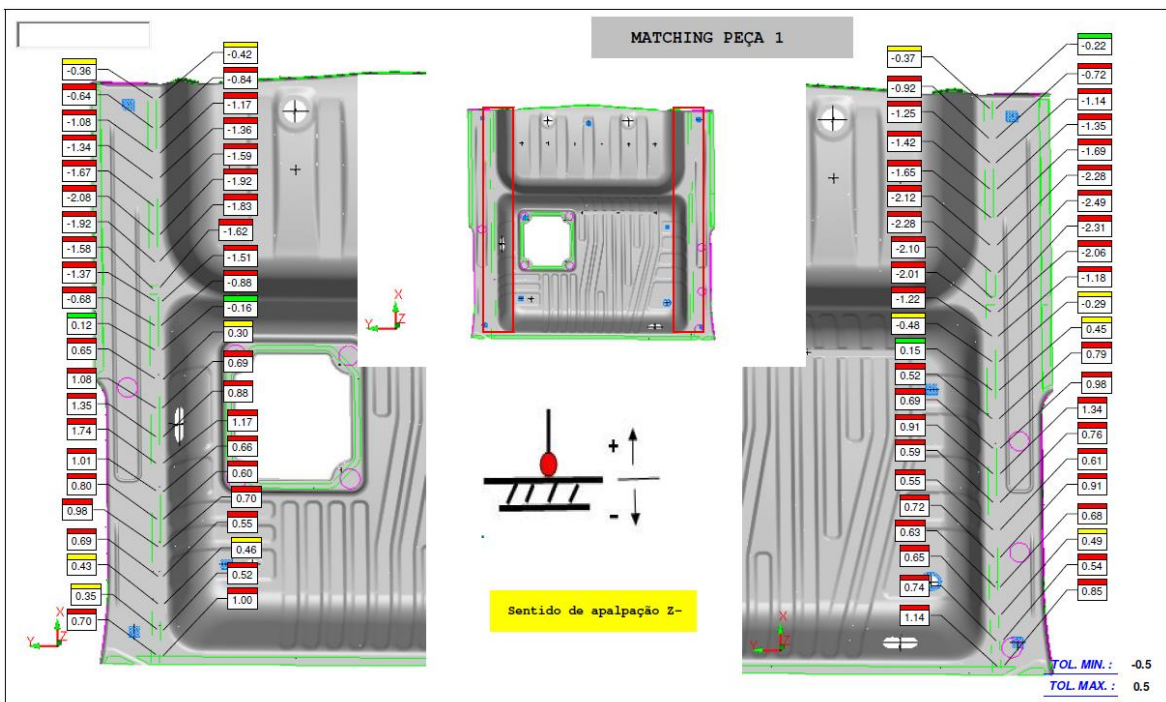
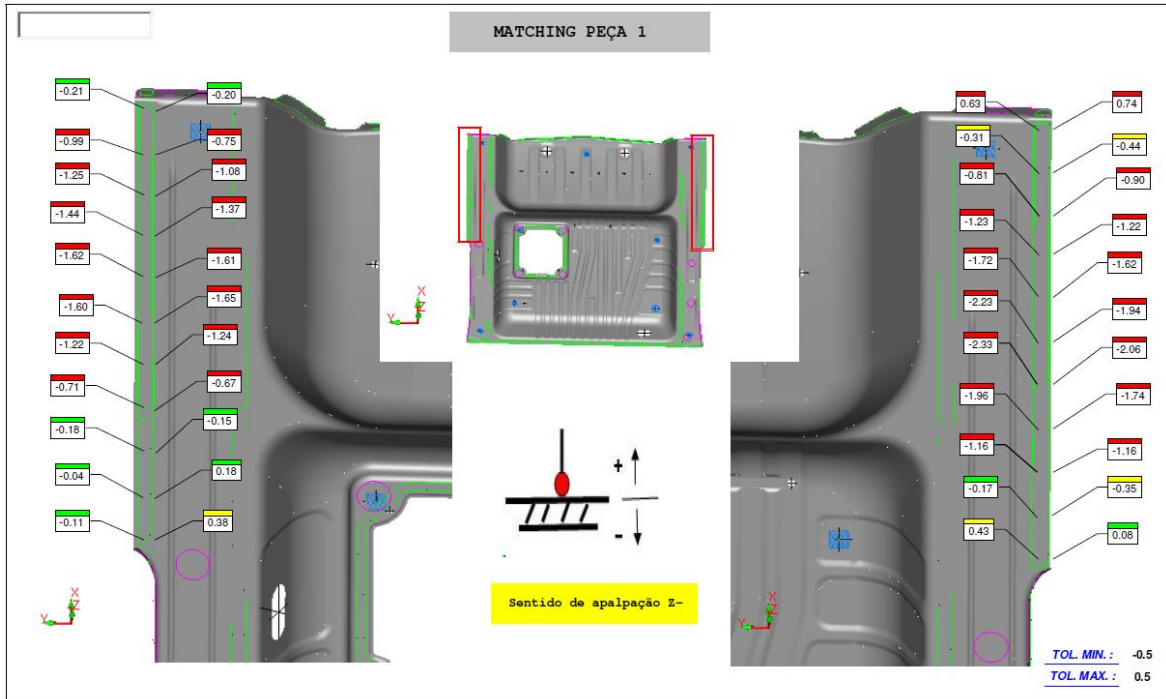
ANEXO A: TABELA INTEGRAL DAS SIMULAÇÕES

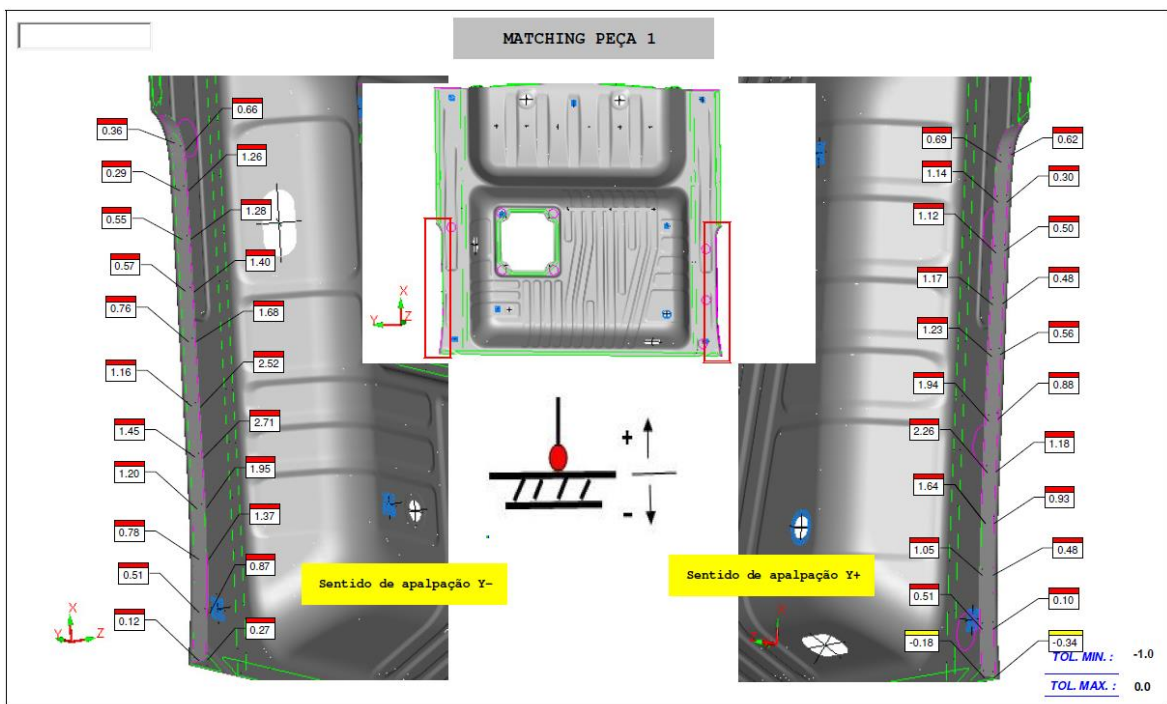
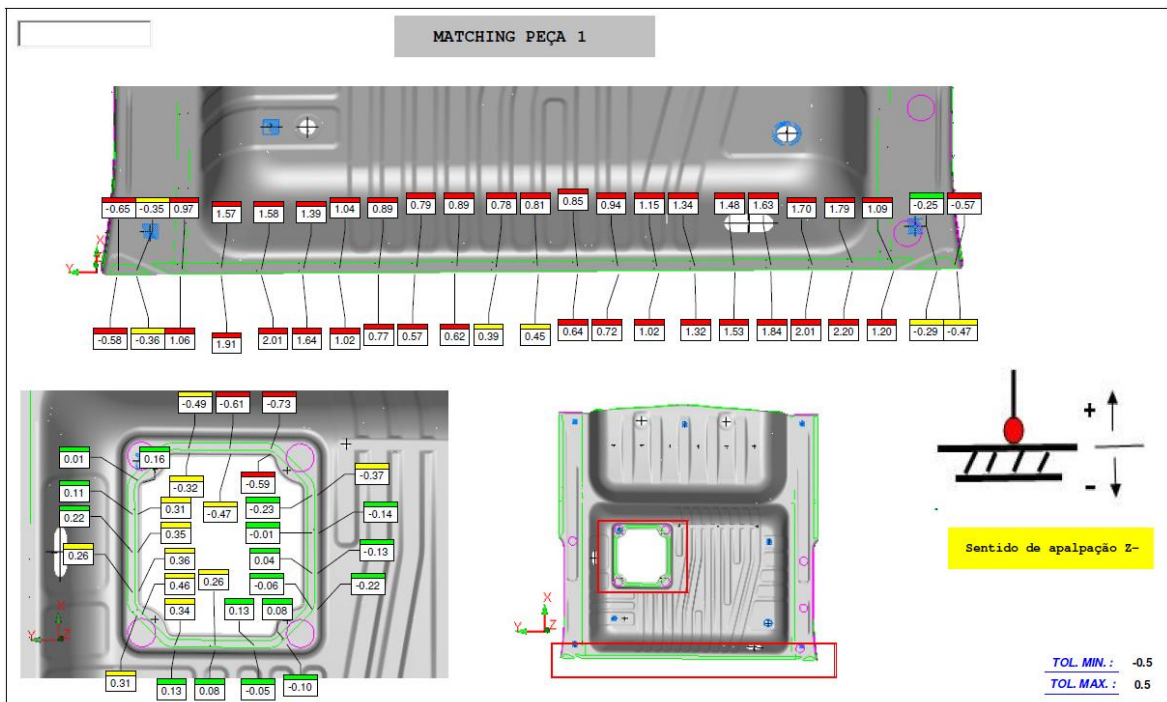
Simulações	Malha		Parâmetros de malha avançados		Tempo de computação	Espaço em disco
	Radius penetration (mm)	Max element angle (°)	Initial element size (mm)	Max refinement level	(minutos)	GB
V	0,22	22,5	20	5	347	5,75
A	0,22	22,5	20	6	357	5,81
Refinamento 1	0,22	15	Auto	Auto	522	8,31
Refinamento 2	0,22	10	Auto	Auto	910	13,5
Refinamento 3	0,22	22,5	20	7	398	6,1
Refinamento 4	0,22	22,5	15	5	422	6,39
Refinamento 5	0,22	22,5	10	5	452	6,44
Refinamento 6	0,22	22,5	5	5	860	9,62
Refinamento 7	0,22	20	20	5	666	7,43
Refinamento 8	0,22	18	20	5	688	8,82
Refinamento 9	0,22	16	20	5	830	10,6
Refinamento 10	0,22	14	20	5	907	12,9
Refinamento 11	0,22	12	20	5	1152	16,5
Refinamento 12	0,22	10	20	5	1606	21,3
Refinamento 13	0,22	5	20	Tempo de computação muito elevado		
Refinamento 14	0,2	22,5	20	5	382	5,94
Refinamento 15	0,18	22,5	20	5	398	6,09
Refinamento 16	0,16	22,5	20	5	455	6,89
Refinamento 17	0,14	22,5	20	5	499	7,27
Refinamento 18	0,12	22,5	20	5	580	7,92
Refinamento 19	0,1	22,5	20	5	654	8,51
Refinamento 20	0,22	20	20	7	504	7,73
Refinamento 21	0,22	18	20	7	581	8,76
Refinamento 22	0,22	16	20	7	684	10,8
Refinamento 23	0,22	14	20	7	903	13,1
Refinamento 24	0,22	12	20	7	1237	17,4
Refinamento 25	0,22	10	20	7	1653	23,6
Refinamento 26	0,22	5	20	Tempo de computação muito elevado		
Refinamento 27	0,2	22,5	20	7	425	6,01
Refinamento 28	0,18	22,5	20	7	435	6,44

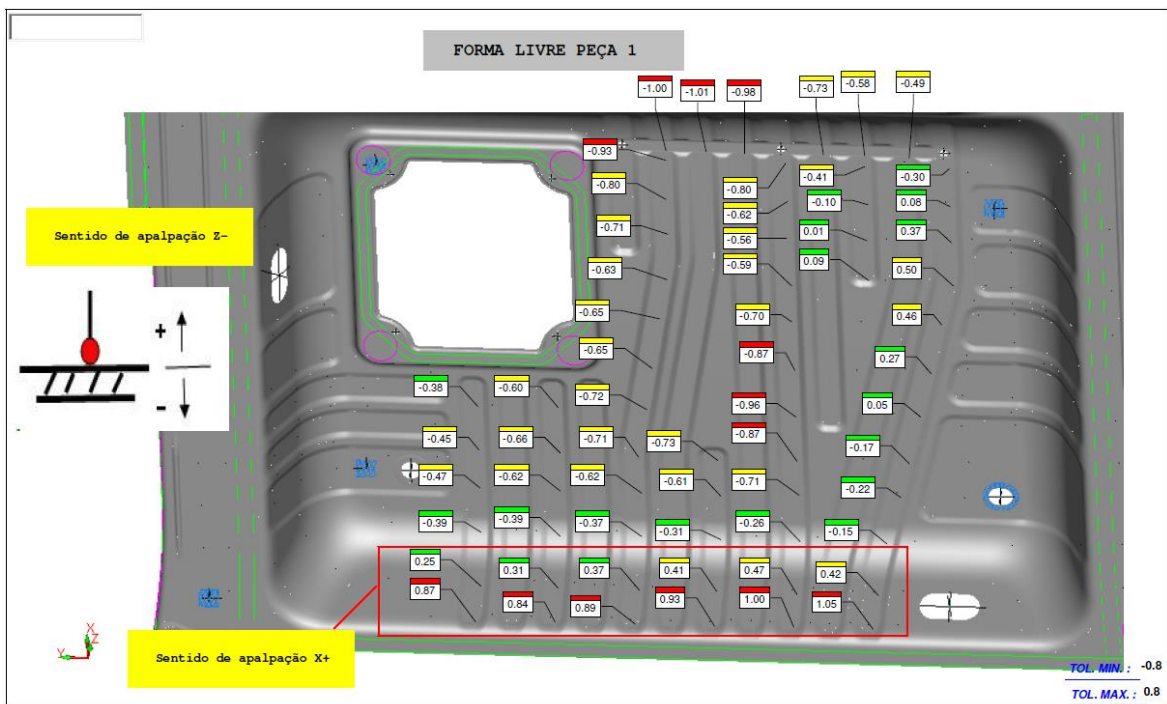
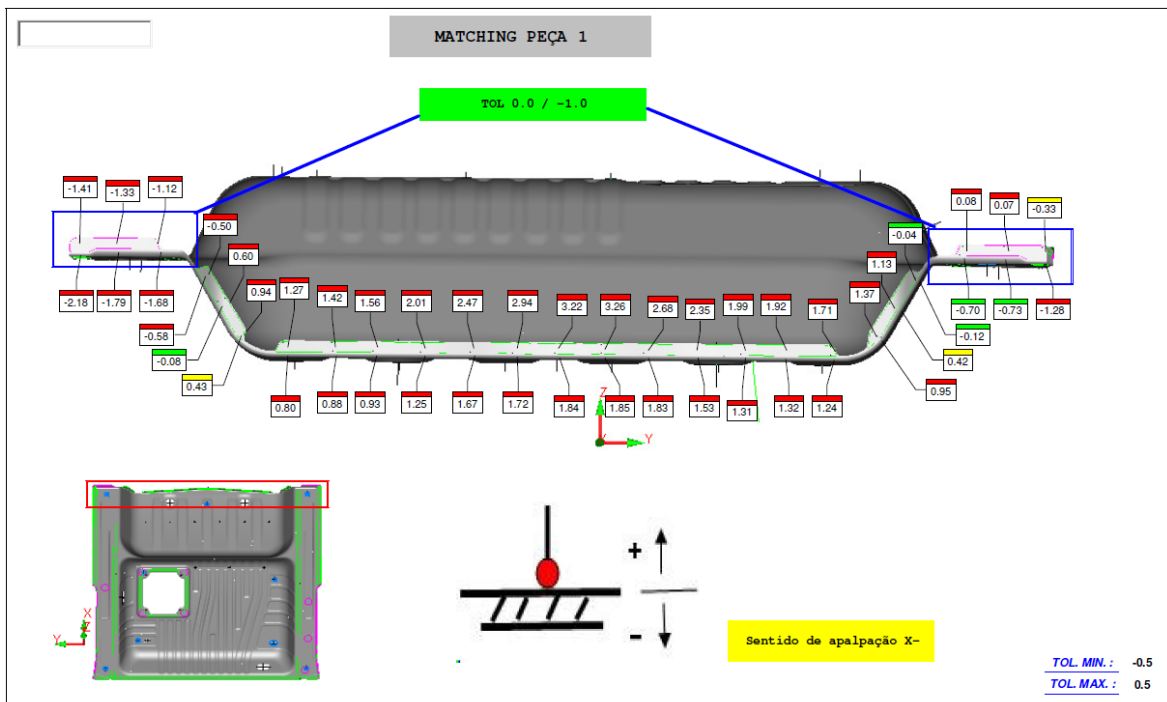
Simulações	Malha		Parâmetros de malha avançados		Tempo de computação	Espaço em disco
	Radius penetration (mm)	Max element angle (°)	Initial element size (mm)	Max refinement level	(minutos)	GB
Refinamento 29	0,16	22,5	20	7	481	6,91
Refinamento 30	0,14	22,5	20	7	521	7,42
Refinamento 31	0,12	22,5	20	7	546	7,72
Refinamento 32	0,1	22,5	20	7	622	8,41
Refinamento 33	0,22	22,5	15	7	429	6,71
Refinamento 34	0,22	22,5	10	7	472	5,99
Refinamento 35	0,22	22,5	5	7	722	9,12

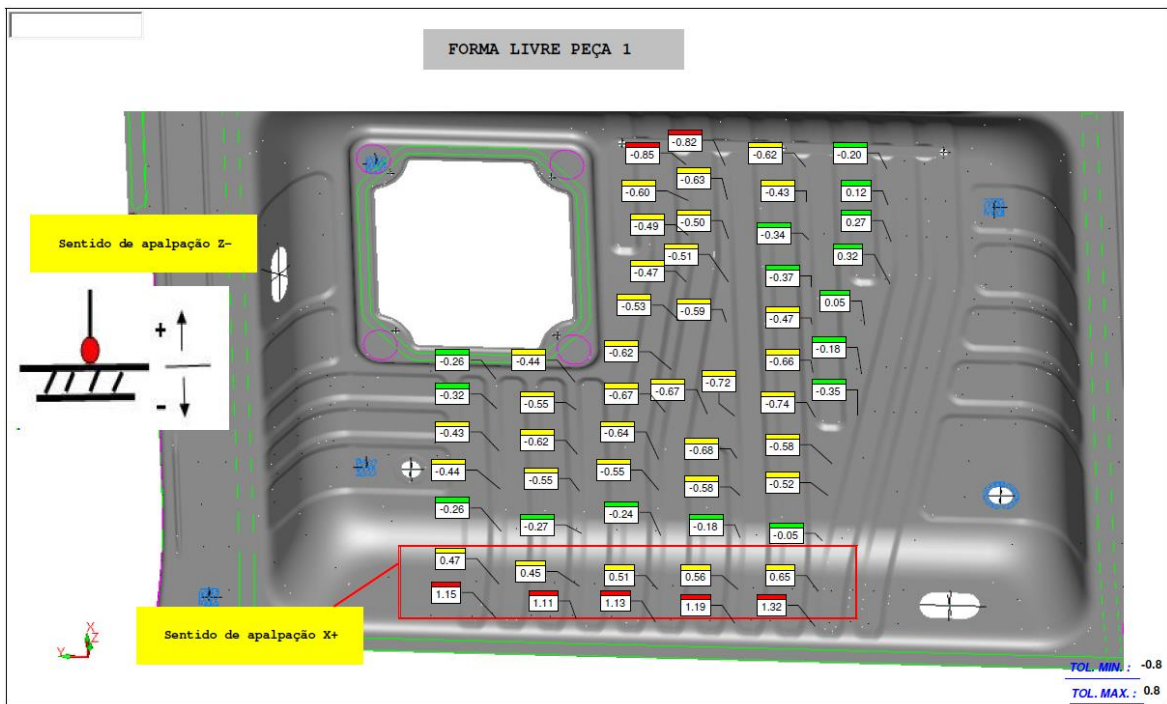
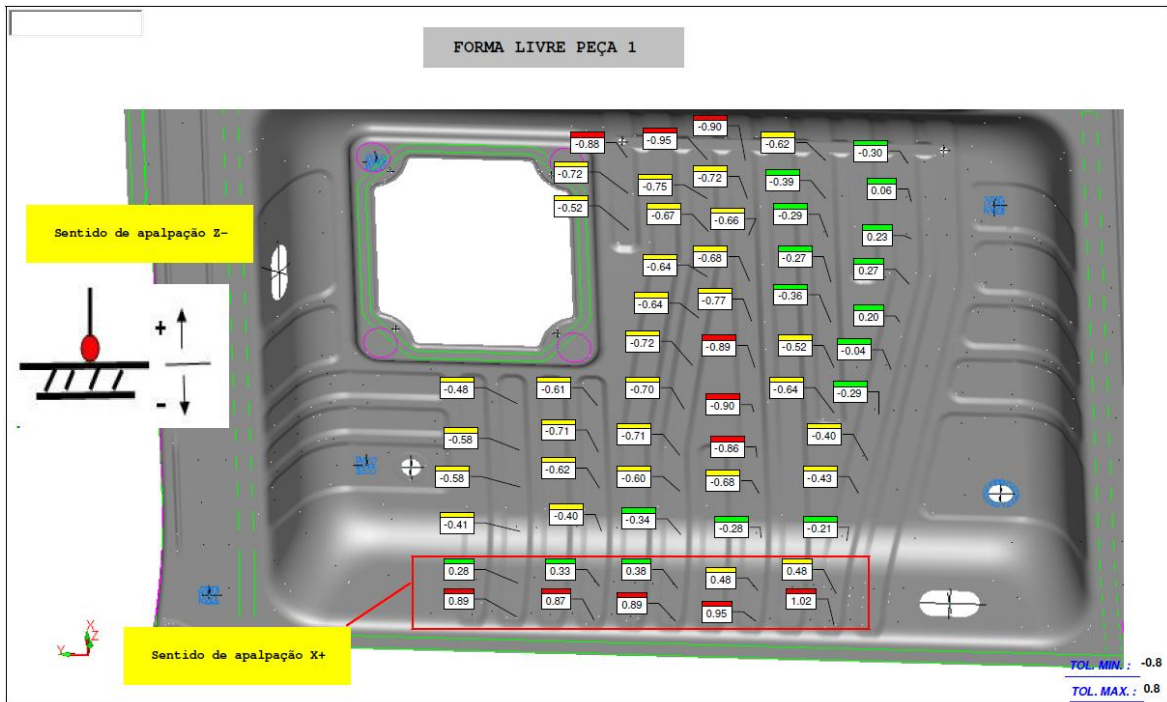
Somatório	23300 min.	328,21 GB
	388,33 horas	
	16,18 dias	

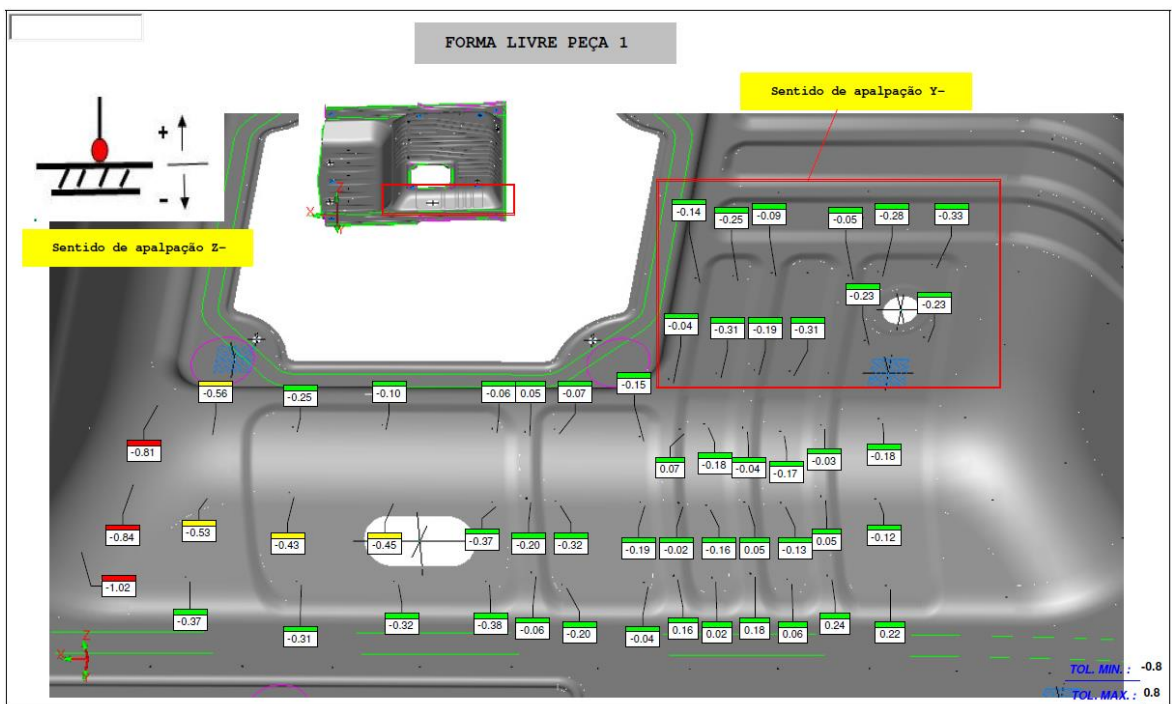
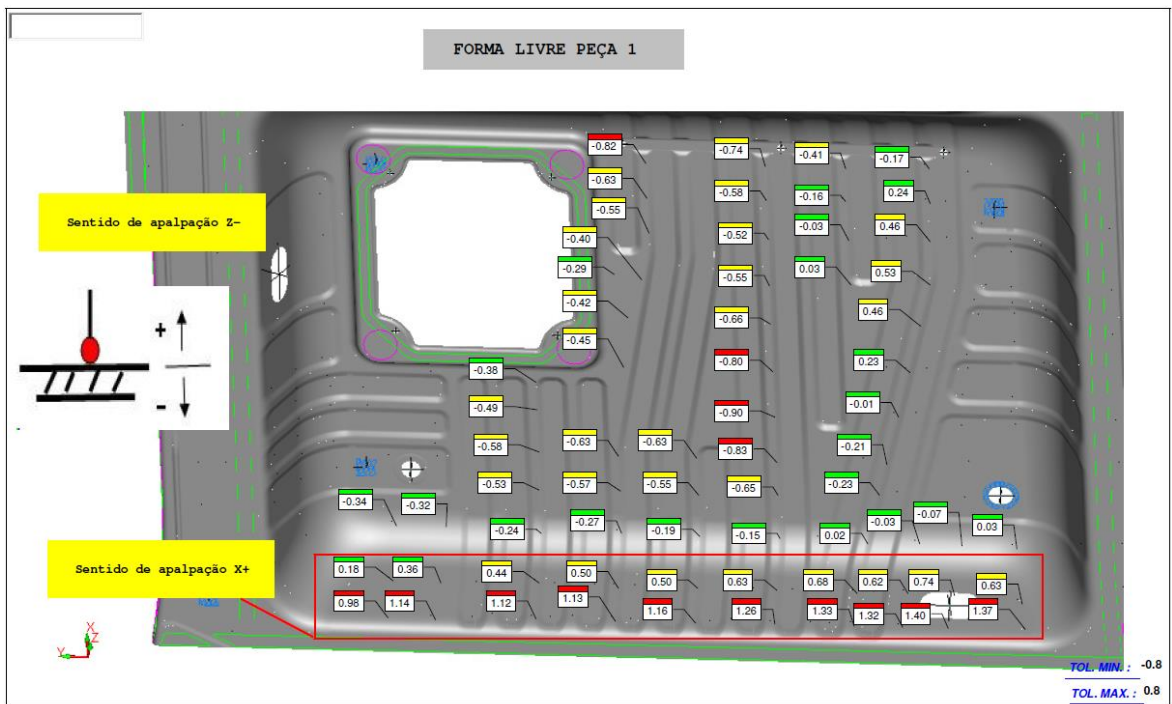
ANEXO B: MEDIÇÕES EXPERIMENTAIS

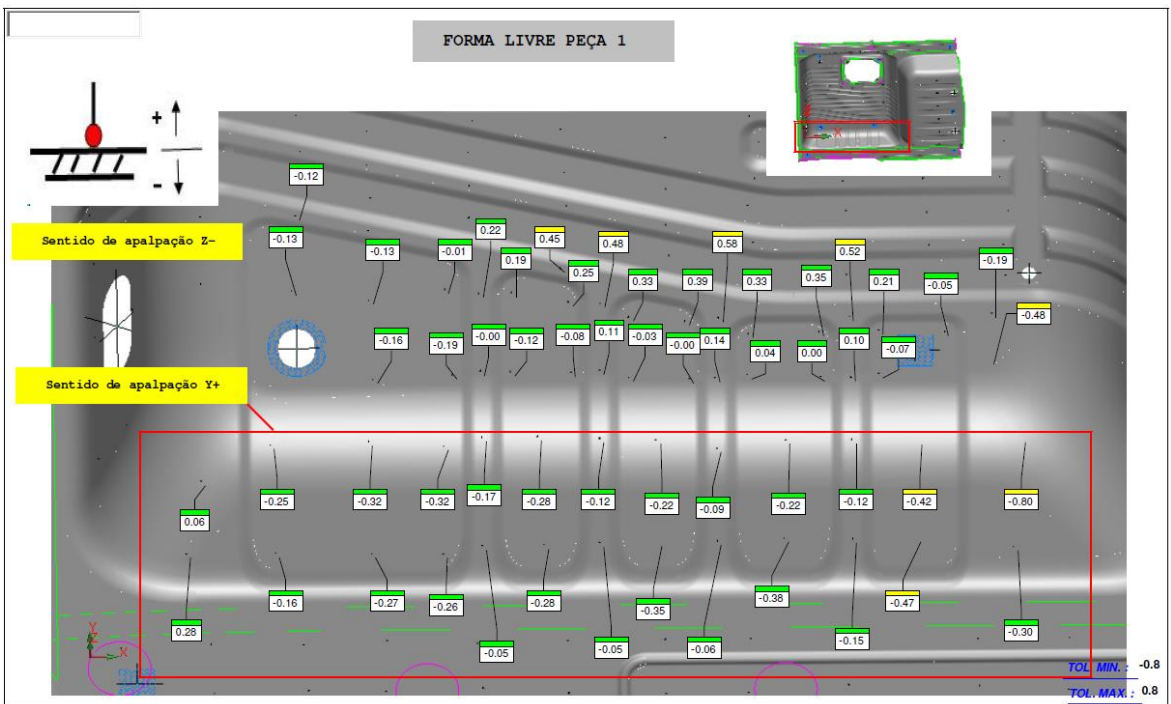
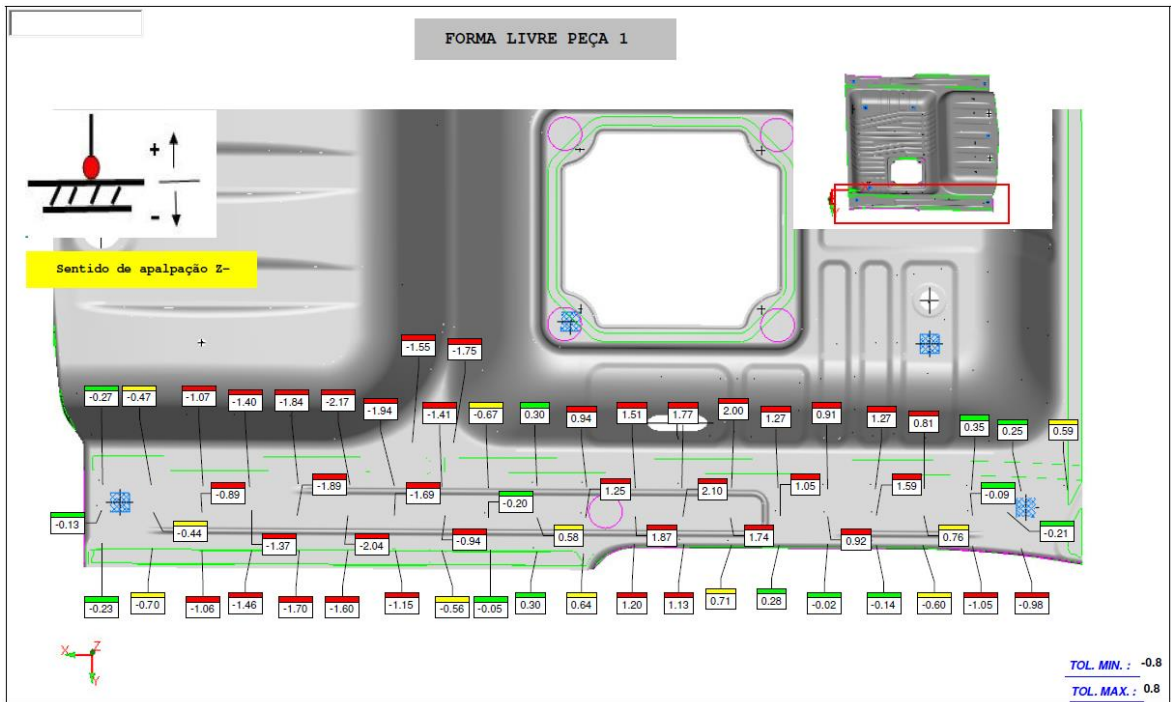


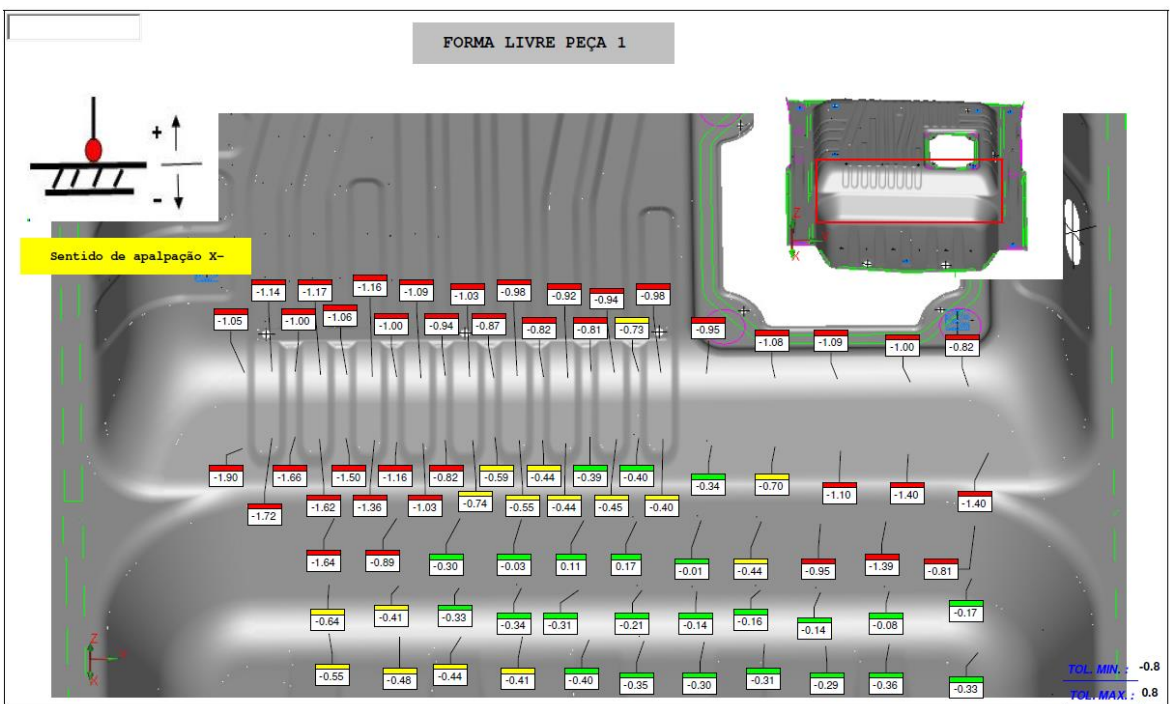
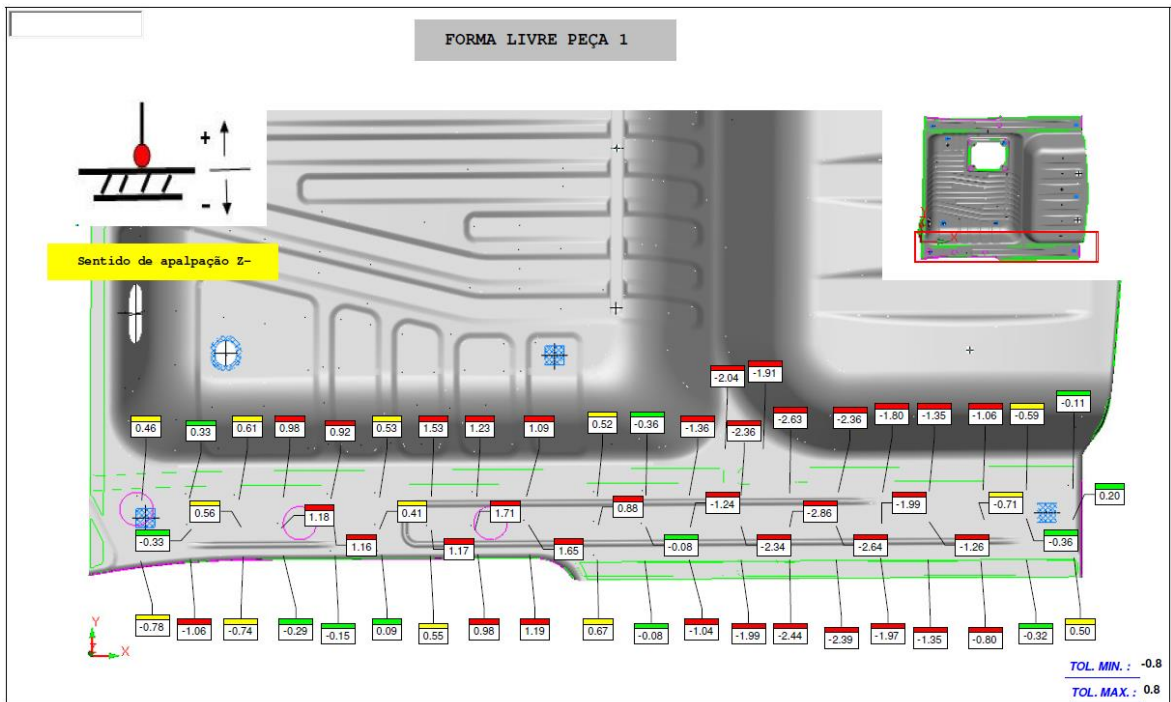


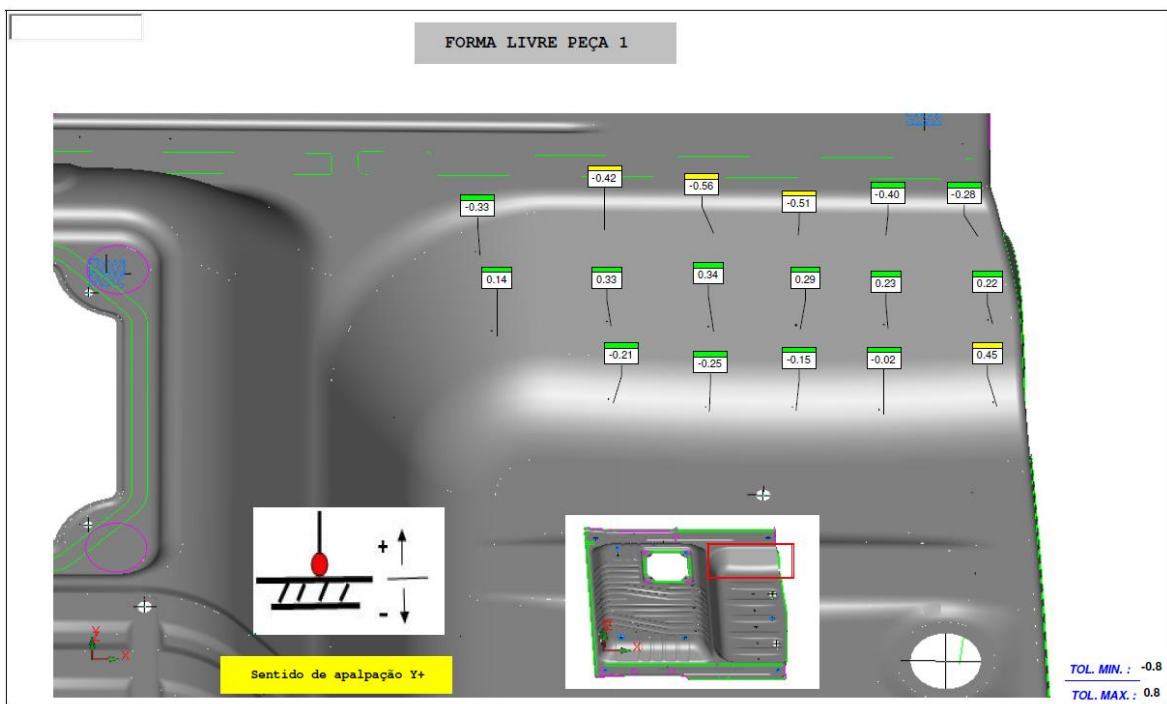
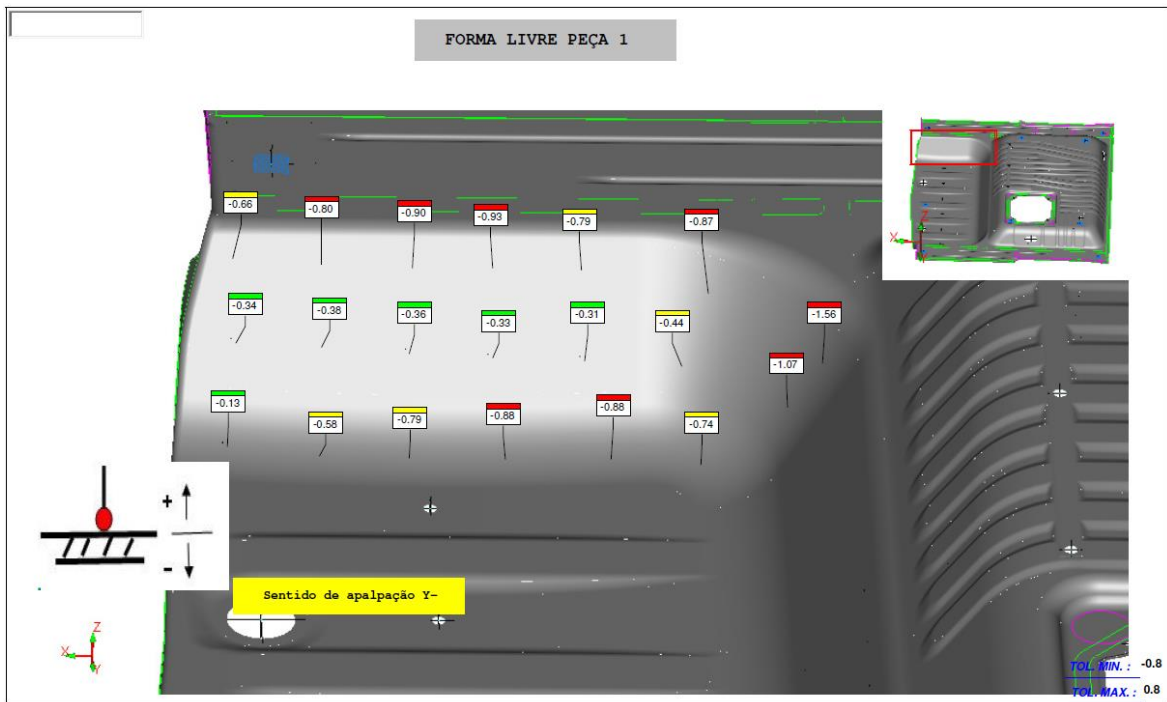


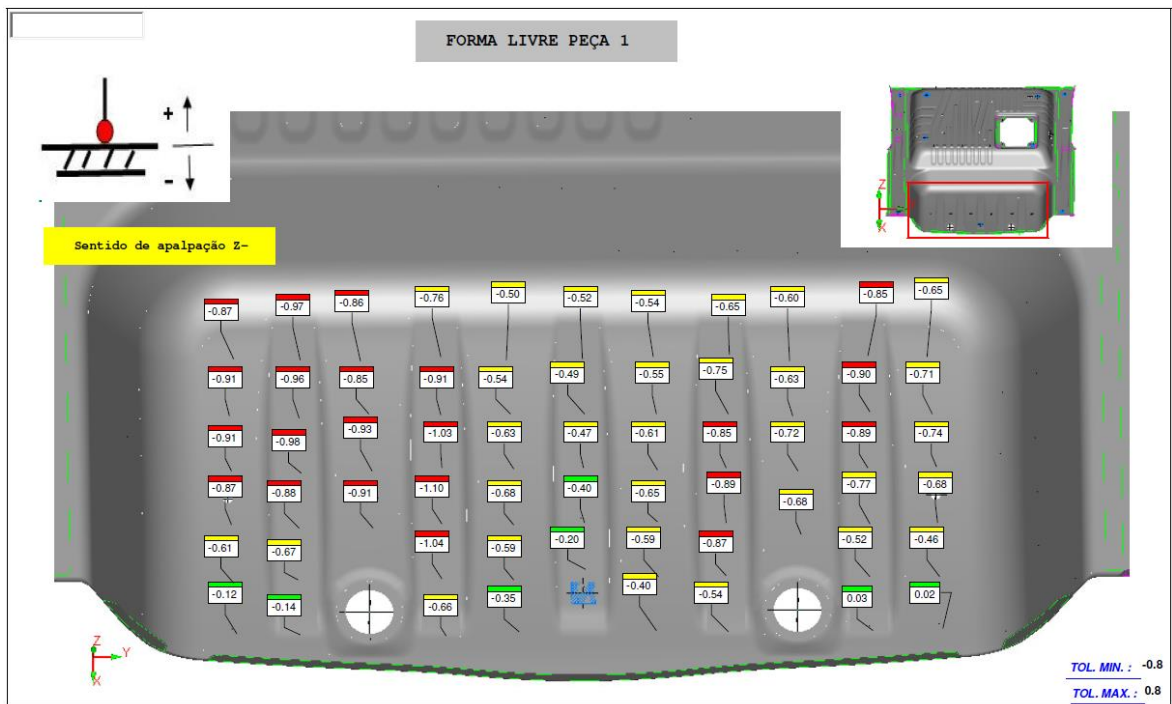






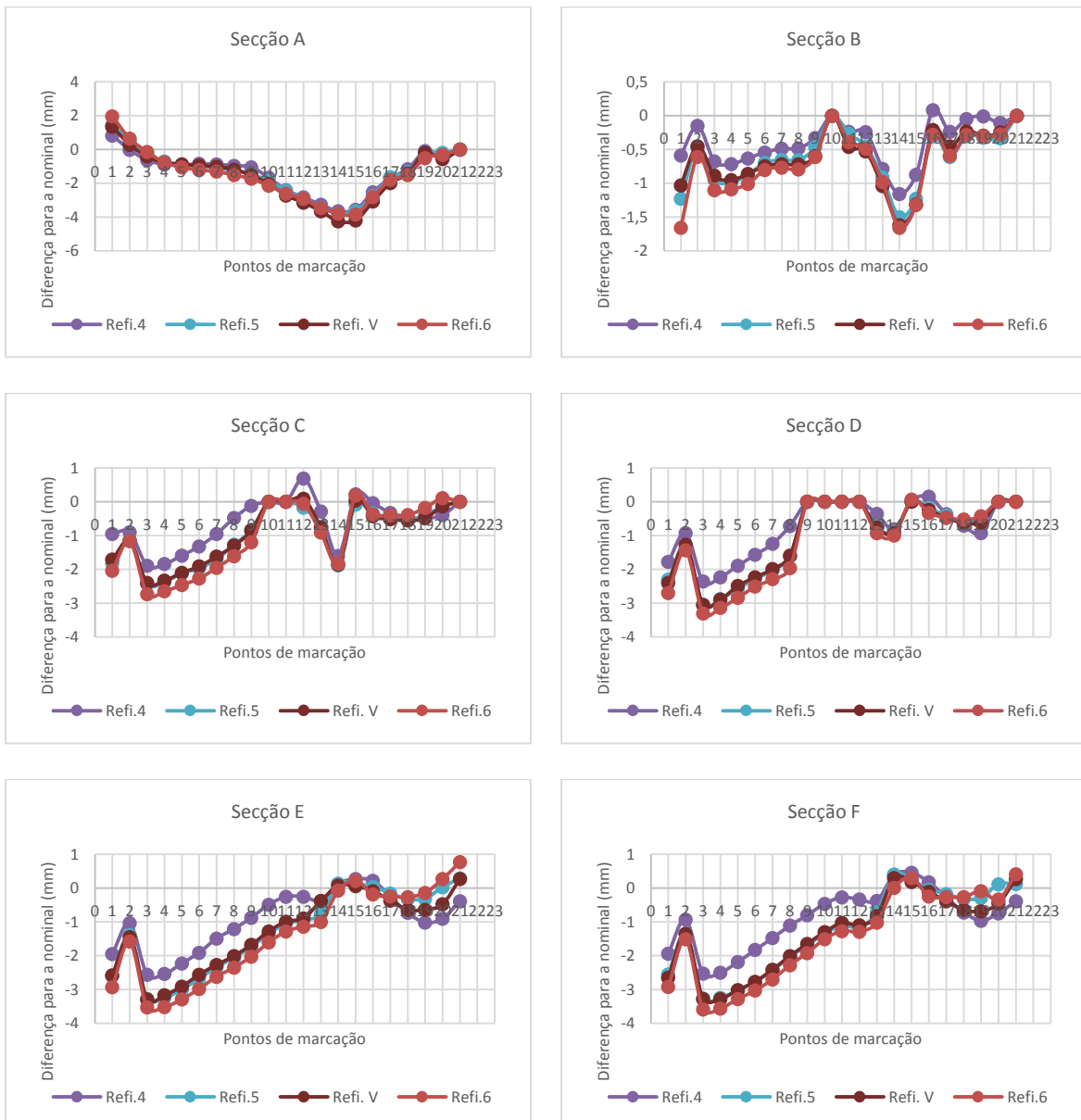


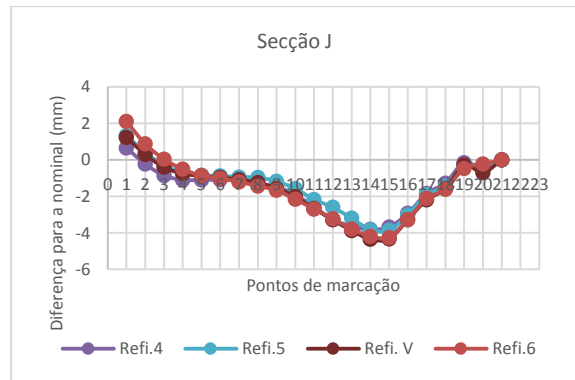
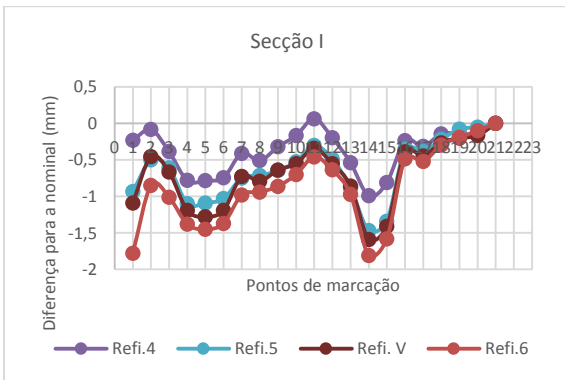
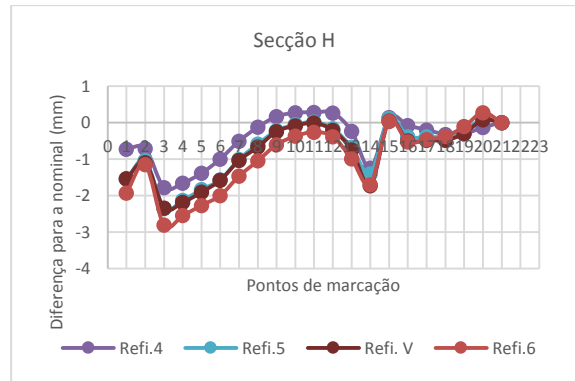
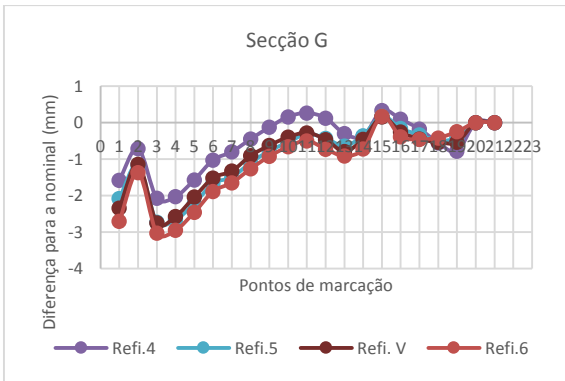




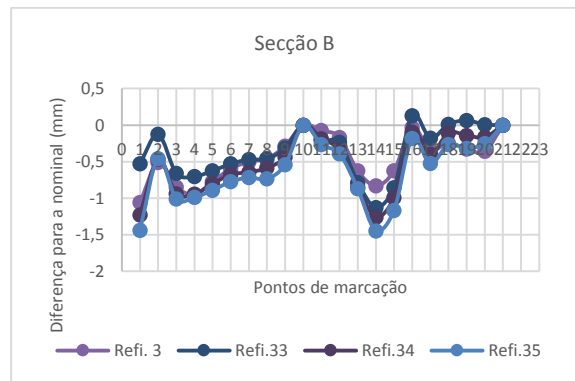
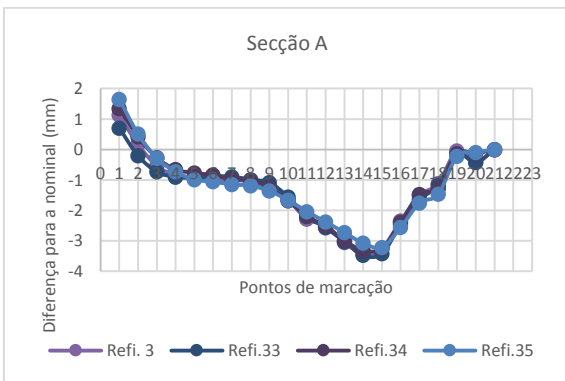
ANEXO C: COMPARATIVO DOS REFINAMENTOS

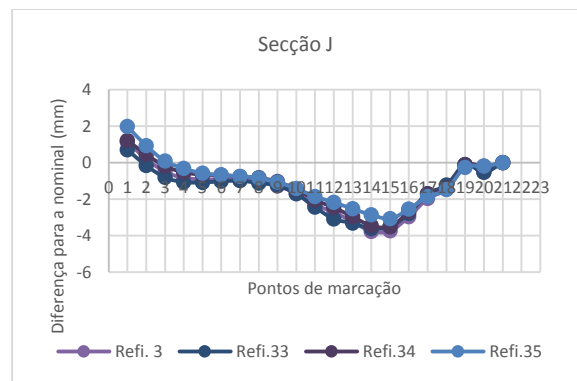
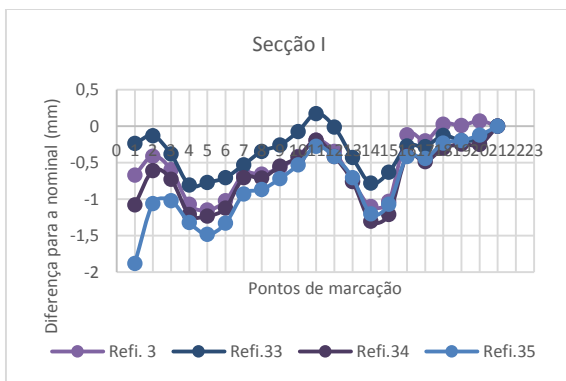
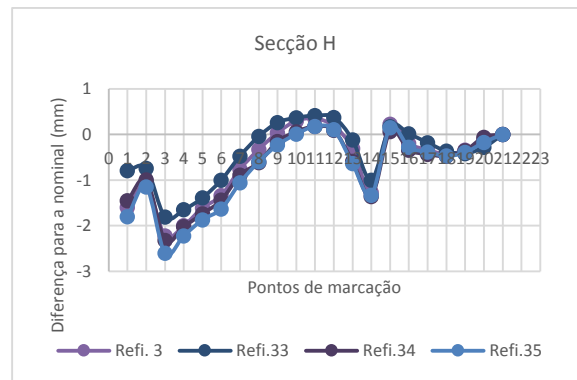
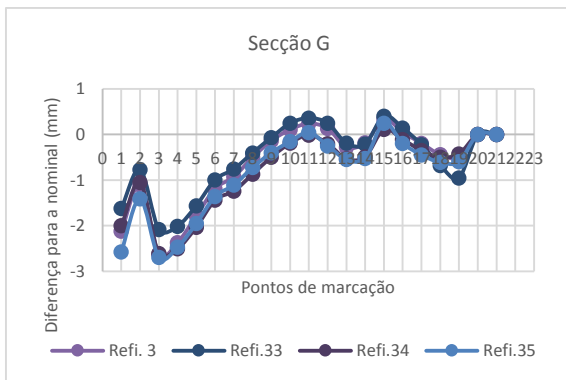
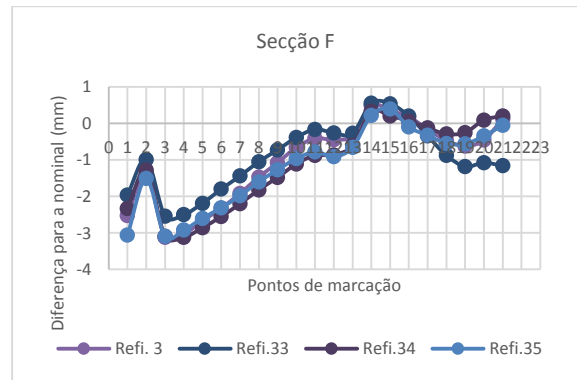
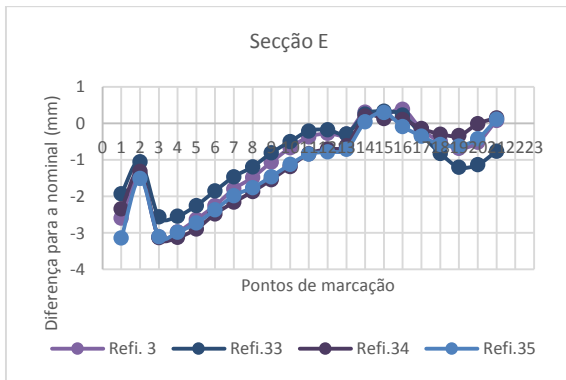
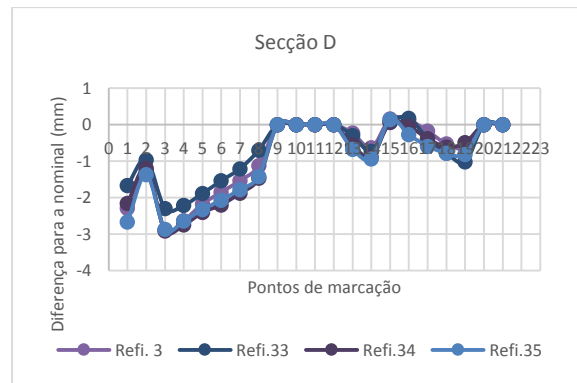
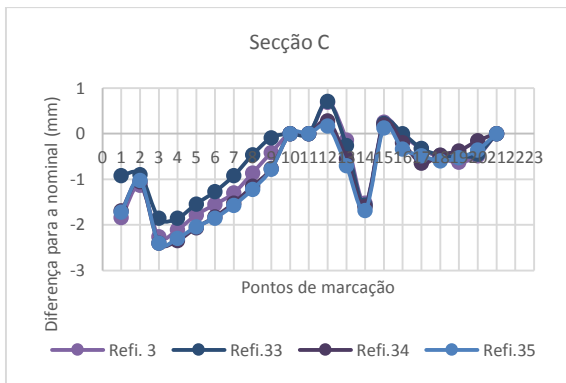
1. a – Comparativo dos refinamentos V, 4, 5, 6



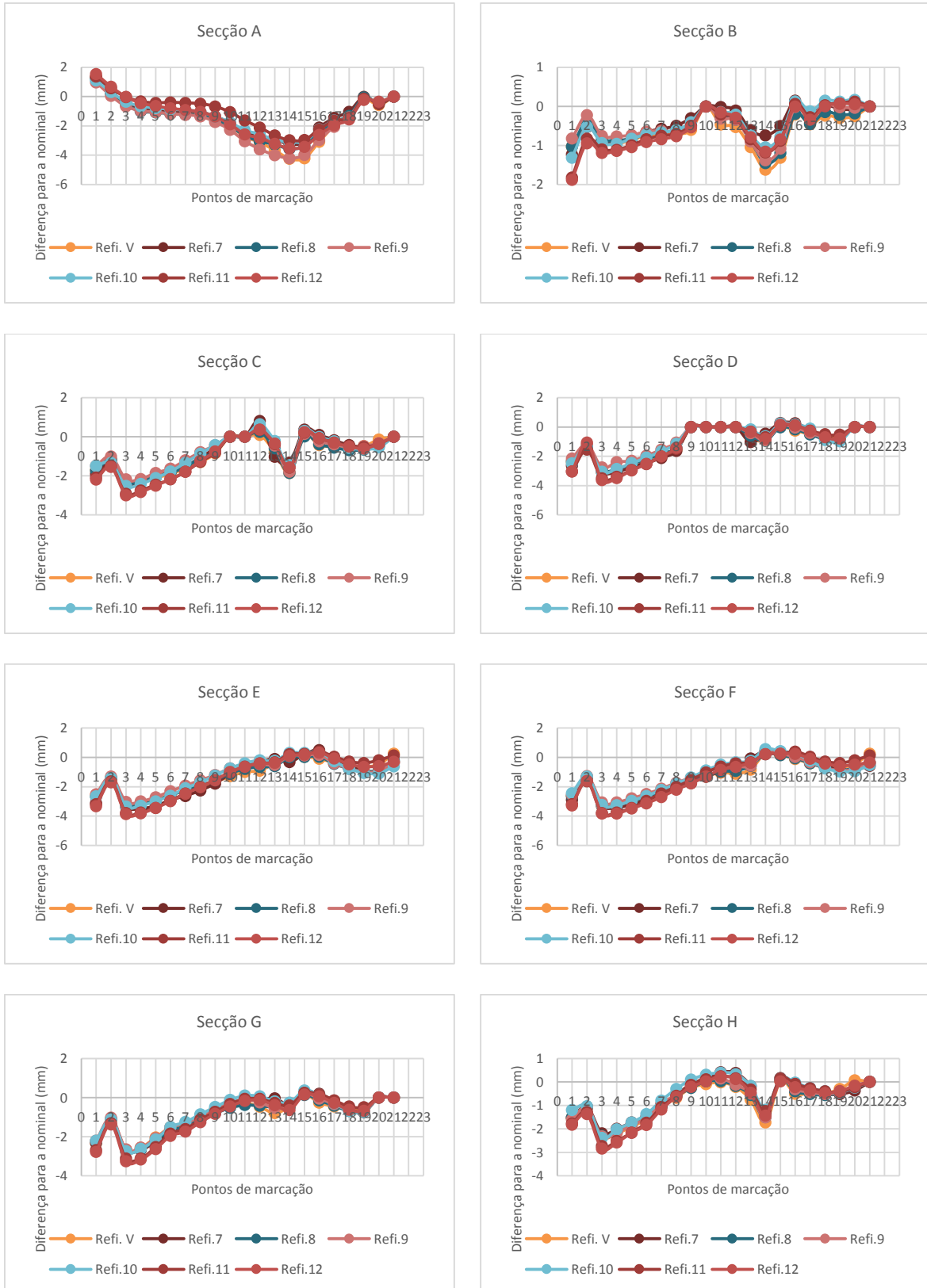


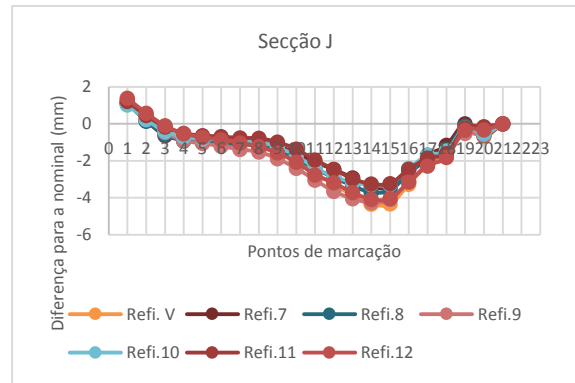
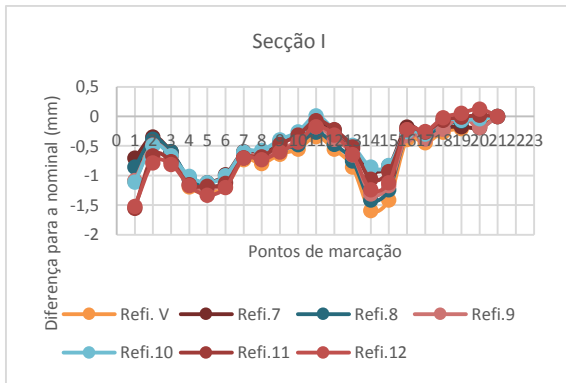
1.b – Comparativo dos refinamentos 3, 33, 34 e 35



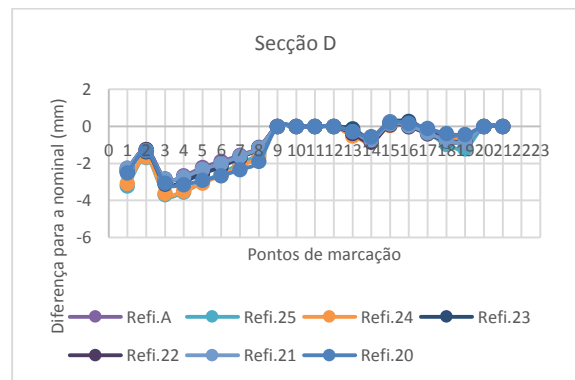
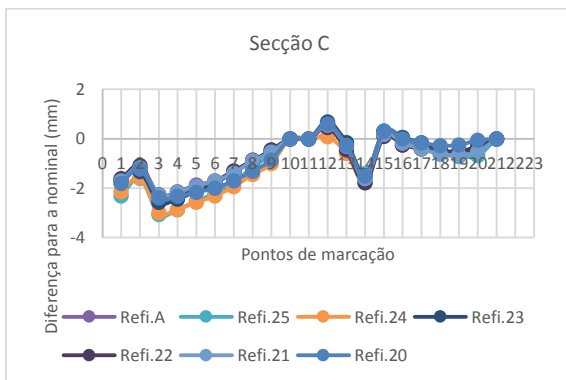
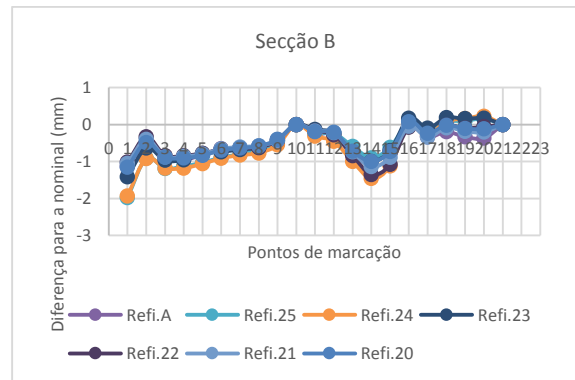
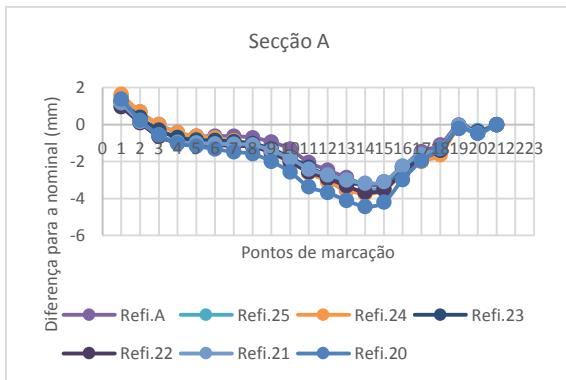


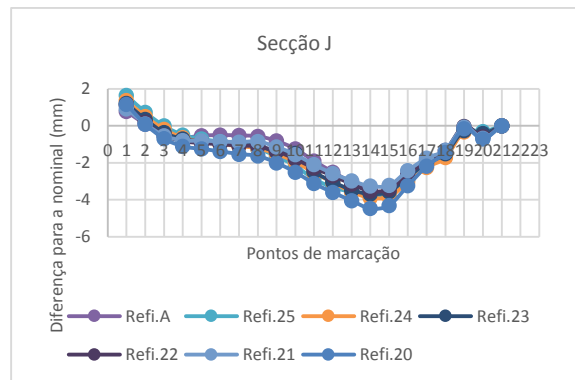
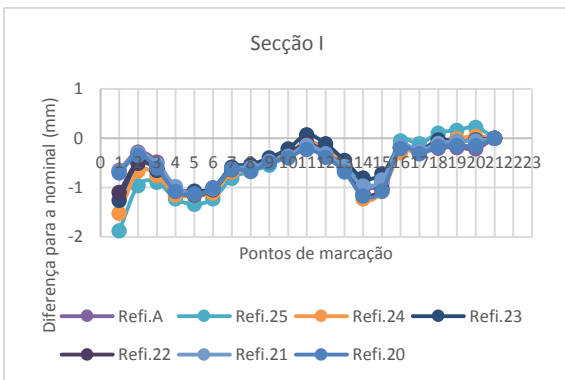
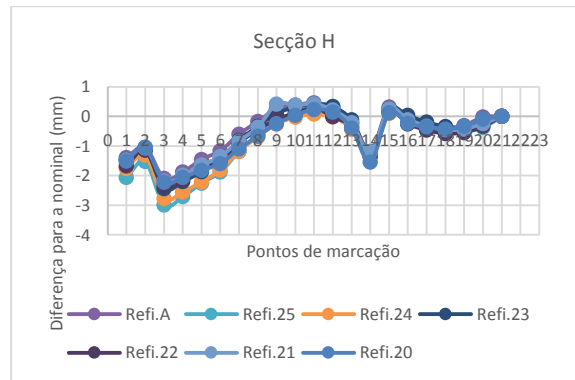
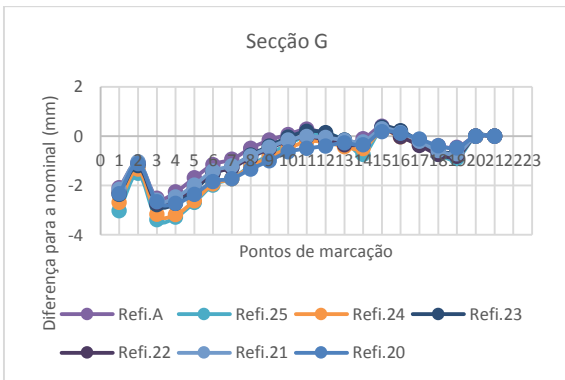
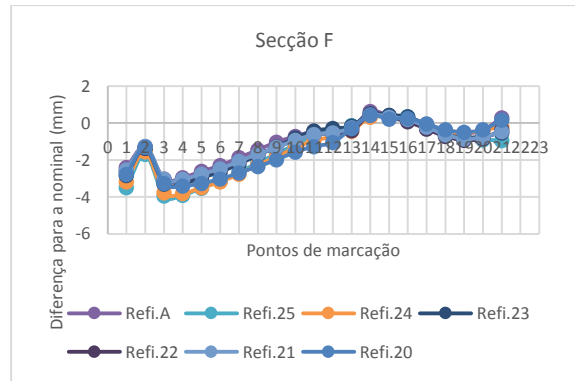
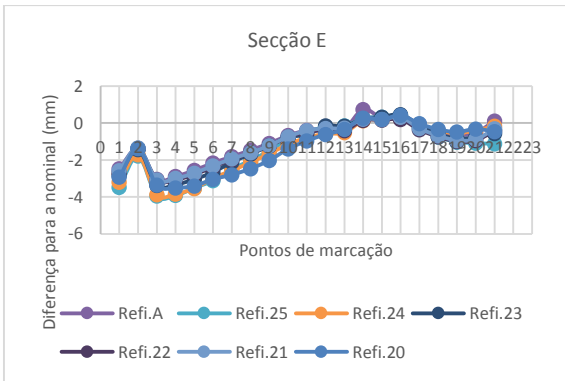
2.a – Comparativo dos refinamentos V, 7, 8, 9, 10, 11 e 12



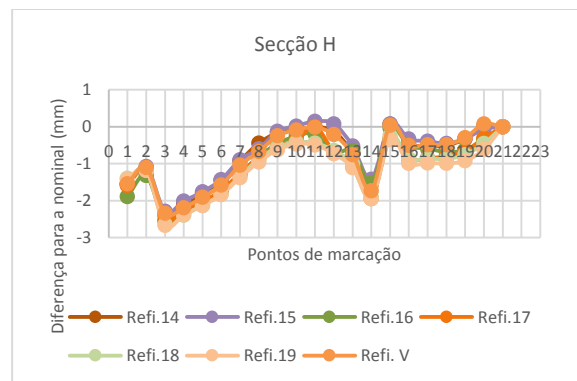
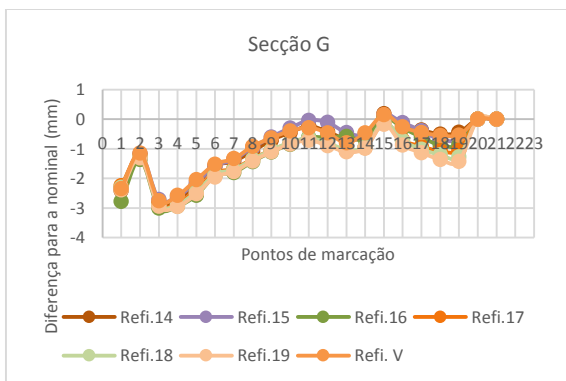
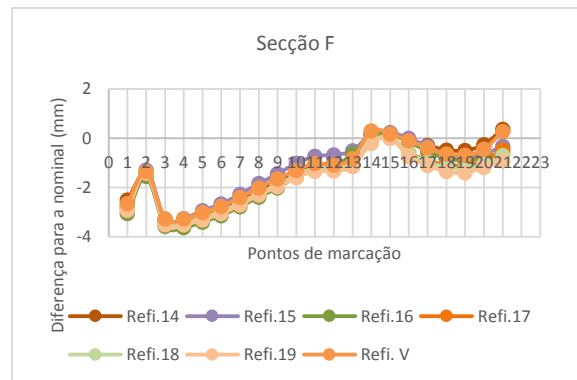
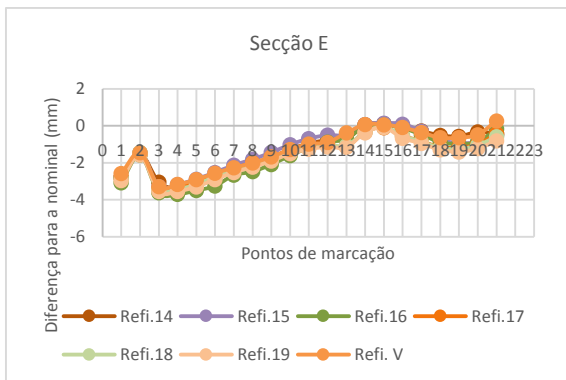
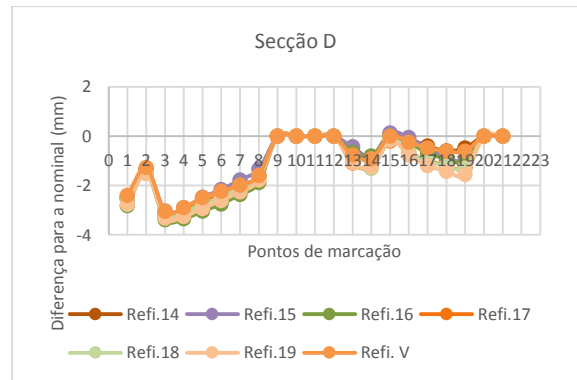
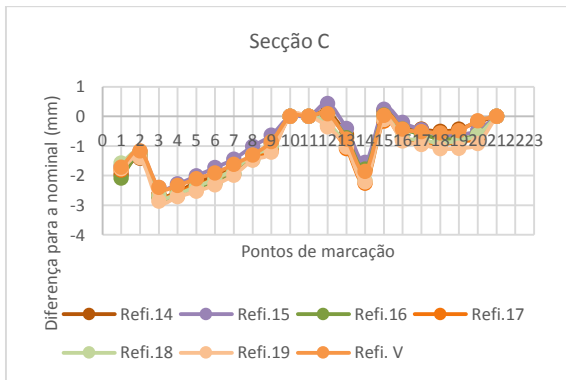
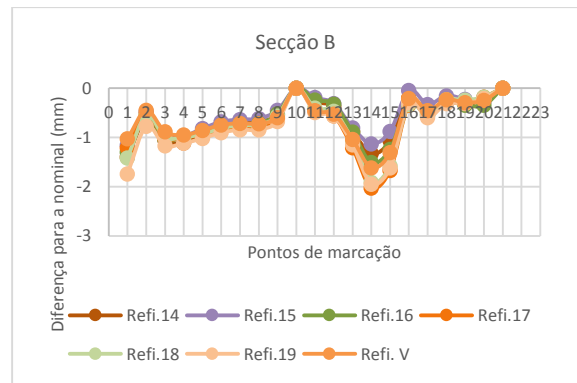
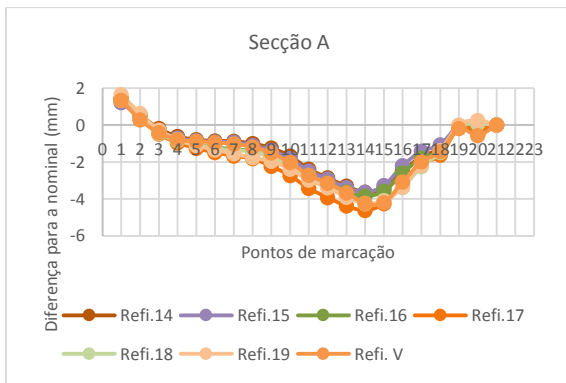


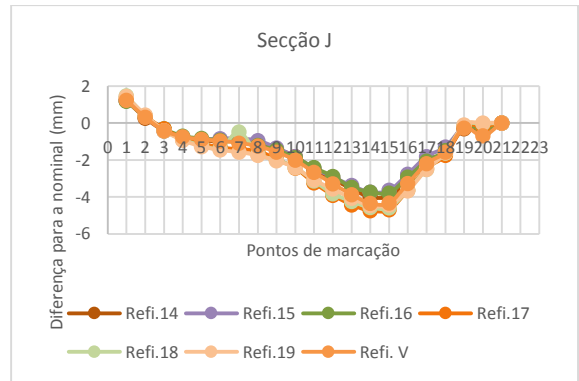
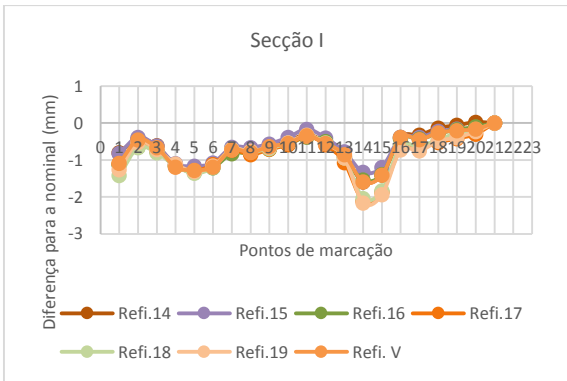
2.b – Comparativo dos refinamentos A, 20, 21, 22, 23, 24 e 25



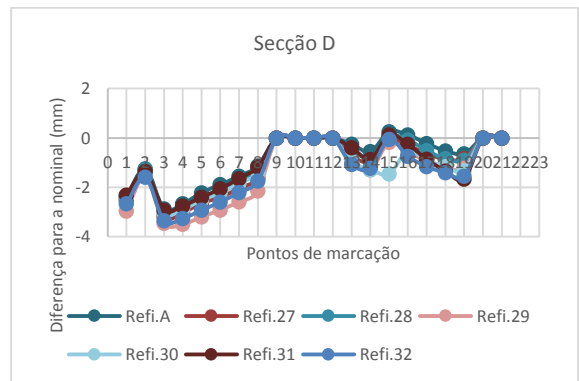
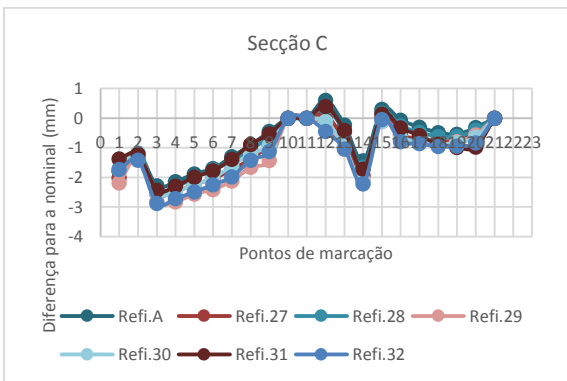
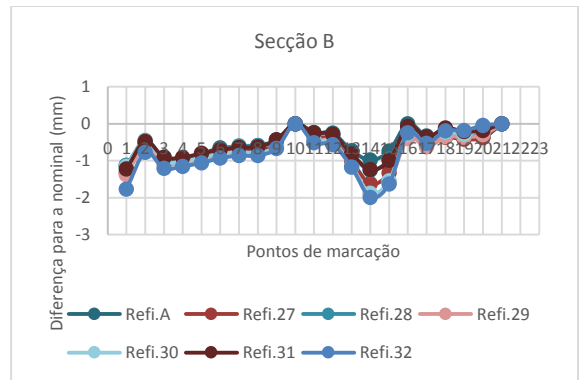
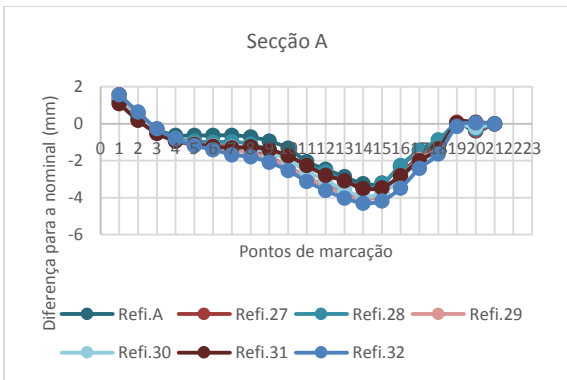


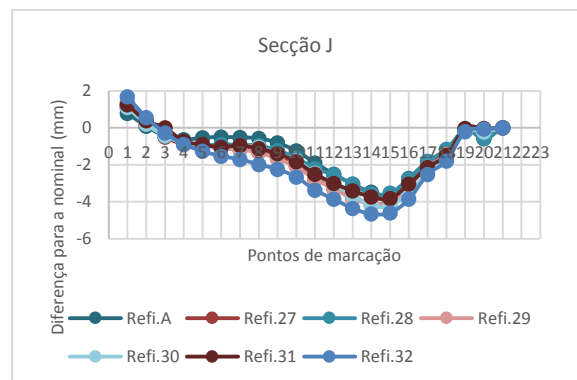
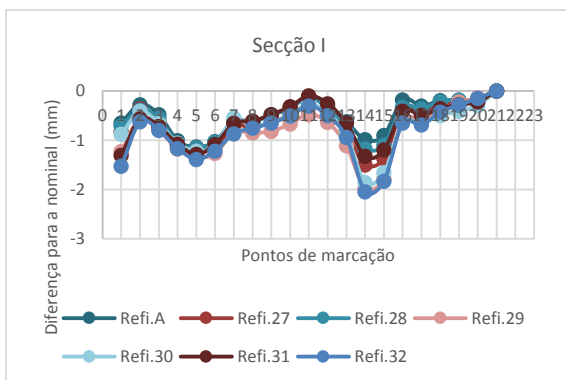
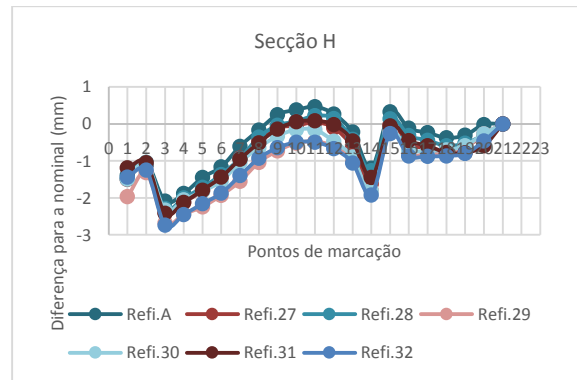
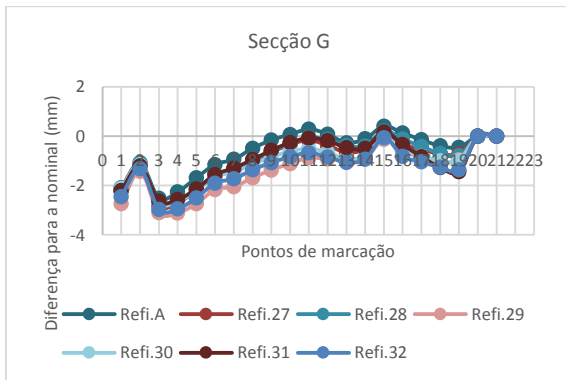
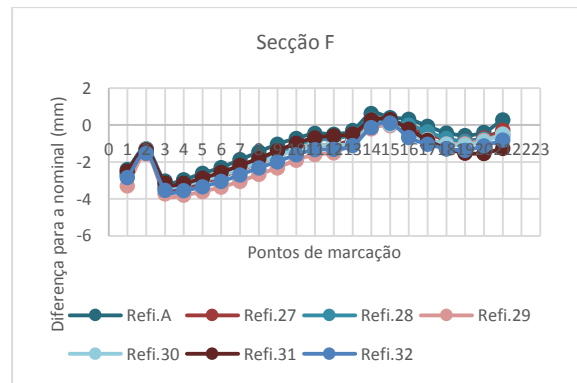
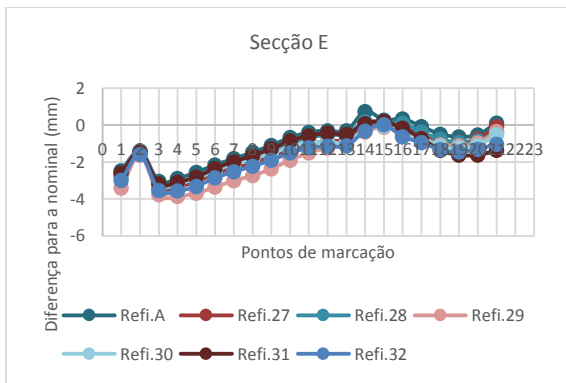
3.a – Comparativo dos refinamentos V, 14, 15, 16, 17, 18 e 19





3.b – Comparativo dos refinamentos A, 27, 28, 29, 30, 31 e 32





ANEXO D: SECÇÕES E SUBSEQUENTES SUBSECÇÕES

