



**José Ilídio Velosa de
Sena**

**Estampagem incremental: Um novo conceito de
produção**



**José Ilídio Velosa de
Sena**

**Estampagem incremental: um novo conceito de
produção**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre no Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação científica do Doutor Ricardo José Alves de Sousa, Professor Auxiliar Convidado do Departamento de Engenharia Mecânica da universidade de Aveiro e do Doutor Fábio Jorge Pereira Simões, Equiparado a Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Mecânica da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria.

Dedico este trabalho aos meus pais Irmã e avó pelo incansável apoio e motivação.

O júri

Presidente

Prof. Doutor Filipe Miguel Horta e Vale Teixeira-Dias
Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

Prof. Doutor Luís Filipe Martins Menezes
Professor Associado com Agregação do Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

Prof. Doutor Robertt Ângelo Fontes Valente
Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

Prof. Doutor Ricardo José Alves de Sousa
Professor Auxiliar Convidado do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

Prof. Doutor Fábio Jorge Pereira Simões
Equiparado a Professor Adjunto da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria

Agradecimentos

Em primeiro lugar, começo por agradecer ao meu orientador Professor Doutor Ricardo Sousa, o meu reconhecimento por todo o apoio, constante disponibilidade e incentivo manifestado ao longo da preparação deste trabalho.

Agradeço ao meu orientador Professor Doutor Fábio Simões, os seus conselhos e apoios.

À Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria, e, em particular ao Departamento de Engenharia Mecânica, agradeço as condições disponibilizadas.

Às pessoas membros do GRIDS do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro, muito obrigado pelo bom ambiente e convívio proporcionado.

Aos meus Pais, irmã e avó, o reconhecimento por todo o esforço, apoio e incentivo dado durante o meu percurso académico.

À tia Rita pela sua motivação ao longo do meu percurso académico.

Aos meus amigos, agradeço a camaradagem e ânimo que me proporcionaram.

Finalmente, a todos e a cada um, que contribuíram directamente ou indirectamente na concretização deste trabalho, a minha gratidão e reconhecimento.

A todos, muito obrigado.

Palavras-chave

estampagem incremental, alumínio, esquema de solução implícito, conformação de chapa, elementos finitos sólidos

Resumo

A estampagem incremental é actualmente um processo promissor no que diz respeito à conformação plástica de materiais em chapa, estando associada a novos campos de aplicação, como o caso da biomecânica e da prototipagem rápida, onde a produção em série de um produto não é a prioridade, mas sim a análise individual da peça a conceber.

Este método de deformação plástica distingue-se dos processos convencionais de estampagem por não requerer o uso de uma prensa, punção ou matriz, tendo assim como características principais o baixo custo, simplicidade e flexibilidade de implementação. Apesar dos vários estudos numéricos e experimentais efectuados, a pouca rapidez do processo e a baixa precisão dimensional continuam a ser os principais obstáculos na aplicação desta técnica.

O uso da simulação numérica, recorrendo ao Método dos Elementos Finitos como ajuda para uma melhor percepção das particularidades do processo, vêm enfrentando vários obstáculos, principalmente relacionados com a precisão dos elementos finitos utilizados e com a rapidez do processo de solução dadas as grandes não linearidades envolvidas.

Este trabalho pretende apresentar uma revisão detalhada do estado da arte nesta área, incluindo os desenvolvimentos mais recentes e os parâmetros mais importantes do processo. Ainda, serão estudados em pormenor casos de simulação numérica do processo recorrendo a elementos finitos sólidos para efeitos de generalidade e esquemas de solução implícitos para efeitos de precisão.

Keywords

Incremental sheet forming, implicit method, aluminum, sheet metal forming, solid finite elements.

Abstract

Incremental sheet forming is nowadays a promising process to produce small batch components from plastic deformation of sheet materials, which potential application into the field of rapid prototyping, part's customization or biomechanics.

This process differs from conventional stamping processes as not requiring the use of a press, a punch or a die. Doing so, its major features are the low cost, simplicity and flexible implementation. Although many experimental and numerical studies are being carried out recently, the low speed of production and low dimensional precision are the main obstacles in the application of this technique.

The use of numerical simulation based on the finite element method as an aid for a better understanding of the process peculiarities has been facing many obstacles, mainly related to the accuracy of the finite element formulations employed and to large CPU times given the high nonlinearities present during simulation.

The present work aims to give a detailed start of art on the process including the most recent developments and the most important input parameters. Additionally, special focus will be given to the study of finite element numerical simulation using solid elements for the sake of generality and implicit solution schemes for the sake of accuracy.

Índice Geral

Índice Geral	1
Índice de figuras	3
Índice de gráficos	5
Índice de tabelas	6
Capítulo 1	7
1. Introdução	7
1.1 Conformação incremental axissimétrica	10
1.2 Conformação incremental assimétrica	10
1.2.1 Tipos de estampagem incremental assimétrica.....	12
1.2.1.1 Deformação incremental assimétrica de dois pontos (TPIF).....	12
1.2.1.2 Deformação incremental assimétrica de único ponto (SPIF).....	14
1.3 Aplicações.....	16
1.4 Motivação da dissertação	17
1.5 Guia de leitura	18
Capítulo 2	19
2. Revisão bibliográfica e estado da arte	19
2.1 Velocidade da ferramenta de conformação	20
2.2 Parâmetros do material.....	21
2.2.1 Mecanismos de deformação em SPIF	25
2.2.2 Ângulo da parede	30
2.3 Ferramenta de conformação	33
2.4 Incremento vertical.....	36
2.5 Trajectória de conformação	38
2.6 Lubrificação	40
2.7 Desempenho da simulação numérica	41
2.7.1 Tipo de análise	41
2.7.2 Tipo de endurecimento.....	46
2.7.3 Tipo de elemento finito	48
2.7.3.1 Integração reduzida e reduzida selectiva	49
2.7.3.2 Método das deformações acrescentadas	50
2.7.4 Trajectória da ferramenta.....	51
Capítulo 3	55
3. Enquadramento e objectivos	55
3.1 Enquadramento da pesquisa bibliográfica efectuada	55
3.2 Objectivos.....	58
Capítulo 4	59

4. Simulação numérica computacional	59
4.1 Selecção do elemento finito.....	59
4.1.1 Modelo material isotrópico	60
4.1.1.1 Teste aos tipos de elementos finitos	61
4.1.1.2 Refinamento da malha no plano	68
4.1.1.3 Teste ao elemento finito RESS.....	69
4.1.2. Análise da espessura.....	71
4.1.3. Análise das tensões e deformações.....	72
4.1.4. Discussão de resultados	77
4.2 Conformação de um componente.....	78
Capítulo 5	87
5. Considerações finais	87
5.1 Trabalhos futuros	89
Referência bibliográficas	91

Índice de figuras

Figura 1 – Estampagem incremental por único ponto.....	7
Figura 2 – Etapas de conformação do “ <i>spinning</i> ” e do “ <i>shear spinning</i> ” na formação de geometria cónica [JES05].	8
Figura 3 – Prensa hidráulica de estampagem convencional de chapa.	9
Figura 4 – Conformação incremental axissimétrica por “ <i>spinning</i> ” (a) e “ <i>shear forming</i> ” (b) [CAR05].....	10
Figura 5 – As quatro variantes do processo de deformação incremental assimétrica [JES05].....	11
Figura 6 – Os elementos base da estampagem incremental assimétrica [JES05].....	12
Figura 7 – Esquema representativo do sistema de conformação incremental assimétrica de dois pontos com suporte estático [JES05].....	13
Figura 8 – Estampagem incremental de dois pontos com matriz [MAT06].	13
Figura 9 – Conformação negativa (A) e conformação positiva (B) [PAR03].	16
Figura 10 – Ciclo de aplicação da estampagem incremental aliado à Engenharia inversa [AMB05].....	17
Figura 11 – Ferramenta de conformação com ponta esférica de movimento “livre” [JES05].....	20
Figura 12 – Diferentes tipos de deformações representadas no diagrama limite de conformação (FLC) [MAR08].....	22
Figura 13 – Técnica de análise da superfície da chapa e linha de medição assinada [AMB08]..	23
Figura 14 – Diagrama limite de conformação (FLC) para uma liga de alumínio (AA1050-O) na formação de uma pirâmide quadrangular [JES05].	24
Figura 15 – Influência da tensão de corte [EMM08a].....	26
Figura 16 – Representação do mecanismo designado por dobra sob tensão (BUT) [EMM08b]..	28
Figura 17 – Demonstração da determinação da espessura da chapa conformada [JES05].....	30
Figura 18 – Influência da espessura da chapa no ângulo máximo da parede [HAM06].	32
Figura 19 – Ferramentas com extremidade esférica sólida de conformação [VIH07].	33
Figura 20 – Contacto da parede da chapa com a ferramenta de conformação.....	33
Figura 21 – Ferramentas de conformação de ponta esférica sólida com 6,10,30mm de diâmetro e com ponta de plástico (direita) [JES05].....	34
Figura 22 – Comparação entre vários diâmetros de ferramenta no diagrama limite de conformação [HIR02].....	35
Figura 23 – Influência do diâmetro da ferramenta no ângulo máximo da parede [HAM06].	35
Figura 24 – Diagrama FLD para diferentes dimensões de incrementos, com uma ferramenta de conformação de 12mm [JES05].	36
Figura 25 – Tipos de incrementos verticais e influência na dimensão na rugosidade [ATT06]...	37
Figura 26 – Influência do passo vertical constante na altura dos picos da rugosidade [ATT08].	37
Figura 27 – Simulação da rugosidade da superfície para vários tipos de passo vertical [JES05].	37
Figura 28 – Influência do passo vertical da ferramenta no ângulo máximo da parede [HAM06].	38
Figura 29 – Estratégias de entrada e saída da ferramenta de conformação [KOP05].	39
Figura 30 – Tipos de lubrificação, por lubrificante fluido (1) e por massa lubrificante (2).	40
Figura 31 – Conformação com lubrificação por massa (a) e sem lubrificação (b) [KOP05].....	40
Figura 32 – Método de Newton-Raphson [SOU02].....	42
Figura 33 – Trajectória usada na conformação do componente cilíndrico [JES05; BAM05].....	45

Figura 34 – Comparação entre os resultados obtidos nos dois tipos de análise numérica e o ensaio experimental [JES05].....	45
Figura 35 – Representação gráfica bidimensional dos tipos de encruamentos [SOU02].	47
Figura 36 – Comparação dos resultados obtidos com dois tipos de endurecimento e o ensaio experimental realizado [BAM05].	47
Figura 37 – Elemento hexaédrico genérico (8 nós) [SOU02].	48
Figura 38 – Elemento hexaédrico padrão com integração completa [SOU02].	49
Figura 39 – Trajectórias de conformação usadas na simulação computacional [MIN08].....	51
Figura 40 – Simulação computacional das duas trajectórias [MIN08].....	52
Figura 41 – Malha de elementos finitos das conformações obtidas [MIN08].	53
Figura 42 – Comportamento do ângulo máximo da parede em função da espessura chapa e do diâmetro da ferramenta [HAM06].	56
Figura 43 – Representação esquemática da relação dos vários parâmetros da estampagem incremental.....	56
Figura 44 – Influência do passo vertical na conformação por estampagem incremental assimétrica por único ponto.	57
Figura 45 – Localização e trajectória da ferramenta [BOU07].	62
Figura 46 – Malha de elementos adoptada para o teste em linha (46x46 elementos no plano)..	63
Figura 47 – Malha refinada na região de passagem da ferramenta (46x46).....	68
Figura 48 – Representação dos pontos de integração no elemento finito RESS [SOU07].	69
Figura 49 – Malha de elementos finitos adoptada para o RESS.	70
Figura 50 – Representação da orientação dos eixos cartesianos.....	73
Figura 51 – Região da malha analisada.....	73
Figura 52 – Dimensões da geometria do componente usado para a simulação [HEN08].....	78
Figura 53 – Malha adoptada para esta simulação.....	79
Figura 54 – Fase inicial da conformação do componente.	79
Figura 55 – Conformação do componente.	81
Figura 55 – Malha adoptada e nova posição da ferramenta para a segunda simulação.....	82
Figura 56 – Nova posição da ferramenta atribuída.	82
Figura 57 – Esmagamento provocado pela ferramenta na região do “ <i>backing plate</i> ”.....	83
Figura 58 – Conformação final do componente.	85

Índice de gráficos

Gráfico 1 – Curva tensão em função da deformação teórica do alumínio AA 3103-O.	61
Gráfico 2 – Ensaio experimental do teste em linha [BOU07].	62
Gráfico 3 – Simulação numérica com uma única camada de elementos finitos na espessura.	64
Gráfico 4 – Simulação numérica com 2 camadas de elementos finitos na espessura.	65
Gráfico 5 – Simulação numérica com 4 camadas de elementos finitos na espessura.	66
Gráfico 6 – Simulação numérica com 8 camadas de elementos finitos na espessura.	67
Gráfico 7 – Simulação em função do refinamento da malha.	68
Gráfico 8 – Simulação numérica com o elemento finito RESS com diferente numero de pontos de integração na direcção da espessura.	70
Gráfico 9 – Analise da espessura final da chapa após a passagem da ferramenta.	72
Gráfico 10 – Tensão na direcção XX (σ_{11}) na direcção da trajectória da ferramenta.	73
Gráfico 11 – Tensão na direcção YY (σ_{22}) transversal ao movimento da ferramenta.	74
Gráfico 12 – Tensão na direcção ZZ (σ_{33}) normal à superfície da chapa.	74
Gráfico 13 – Deformação na direcção dos três eixos.	75
Gráfico 14 – Tensão de corte na direcção XY.	76
Gráfico 15 – Tensão de corte na direcção XZ.	76
Gráfico 16 – Tensão de corte da direcção YZ.	77
Gráfico 17 – Espessura em função do raio de conformação.	80
Gráfico 18 – Profundidade em função do raio de conformação.	81
Gráfico 19 – Espessura da chapa em função do raio do componente para a 2ª tentativa de conformação.	83
Gráfico 20 – Profundidade em função do raio do componente para a 2ª tentativa de conformação.	84

Índice de tabelas

Tabela 1 – Lista de materiais analisados por diversos autores [JES05].....	32
Tabela 2 – Parâmetros do material, alumínio AA3103-O [BOU07].	60
Tabela 3 – Tempo de processamento da simulação com uma camada de elementos finitos.	64
Tabela 4 – Tempo de processamento da simulação com 2 camadas de elementos finitos.....	65
Tabela 5 – Tempo de processamento da simulação com 4 camadas de elementos finitos.....	66
Tabela 6 – Tempo de processamento da simulação com 8 camadas de elementos finitos.....	67
Tabela 7 – Tempo de simulação dos dois tipos de refinamento.	69
Tabela 8 – Tempo de processamento da simulação.....	71

Capítulo 1

1. Introdução

A ideia de deformar plasticamente chapa por sucessivos incrementos com uma única ferramenta, com movimento nos três eixos cartesianos, foi patenteada por Leszak em 1967 [LES67]. Com o avanço da tecnologia de fabrico, a implementação deste processo foi possível, tornando a sua aplicação atractiva, pelo facto de poder ser adaptado a uma máquina de comando numérico. Este novo método de deformação plástica dá a possibilidade de criar um produto com uma determinada configuração sem a utilização de punção e matriz, com geometrias complexas.



Figura 1 – Estampagem incremental por único ponto.

Na última década esta tecnologia tem apresentado um interesse crescente numa nova categoria relacionada com o processo de conformação de chapa. A designação atribuída a este método de deformação por sucessivos incrementos abrange várias técnicas que possuem características em comum, incluindo o *spinning* e o *shear forming*, estas usadas unicamente no caso de produção de peças axissimétricas (Figura 2).

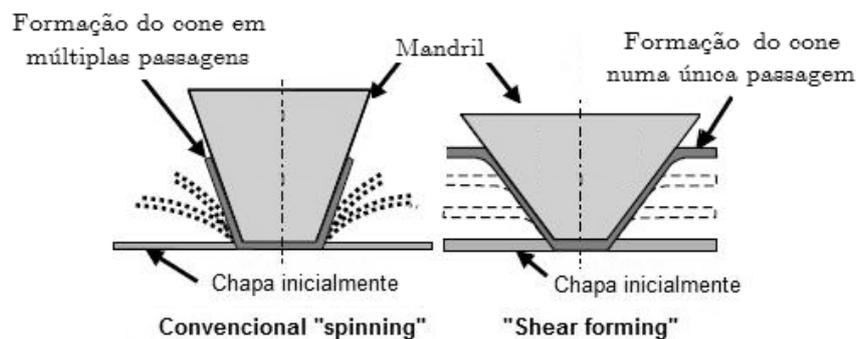


Figura 2 – Etapas de conformação do “*spinning*” e do “*shear spinning*” na formação de geometria cônica [JES05].

O modo de deformação de chapa durante a conformação incremental começou a ser estudado cientificamente antes da década de noventa, no Japão, e mais tarde, na presente década, voltou novamente a ser investigado, avaliado e discutido extensamente em artigos científicos, por diversos autores [EMM08a].

As chapas metálicas têm grande aplicação industrial, sendo usadas na produção de diversos tipos de produtos, desde a indústria automóvel, onde a sua presença é notória, ao fabrico de recipientes e embalagens destinadas ao consumidor final. Nestas indústrias, os processos mecânicos de conformação de chapa são implementados com o objectivo de fabricar grandes quantidades de componentes num curto espaço de tempo. No entanto existem situações que exigem a necessidade de produzir pequenas quantidades de peças sem recorrer a equipamentos dispendiosos.

Neste caso, a alternativa para fabricar um pequeno número de peças poderá ser a estampagem incremental (ISF, do inglês “*Incremental Sheet Forming*”), que deste modo assume a sua posição nos processos de conformação plástica de peças em chapa, compensando economicamente a sua aplicação para baixa produtividade.

As possíveis situações em que a sua aplicação apresenta grande vantagem são: a produção de componentes em que a quantidade não justifica o recurso à estampagem convencional, pois tal seria inviável economicamente devido ao custo final do produto. Outra situação é quando um determinado produto está em desenvolvimento e é necessário o fabrico de um protótipo para a realização de análises funcionais e de design.

Diferenciando-se da estampagem convencional (Figura 3), onde a transformação da chapa plana em produto final é efectuada numa única etapa usando matrizes com configurações específicas para cada formato, a estampagem incremental executa a conformação do componente em múltiplos passos, utilizando apenas uma ferramenta de geometria simples, podendo produzir formatos simples ou mesmo complexos.

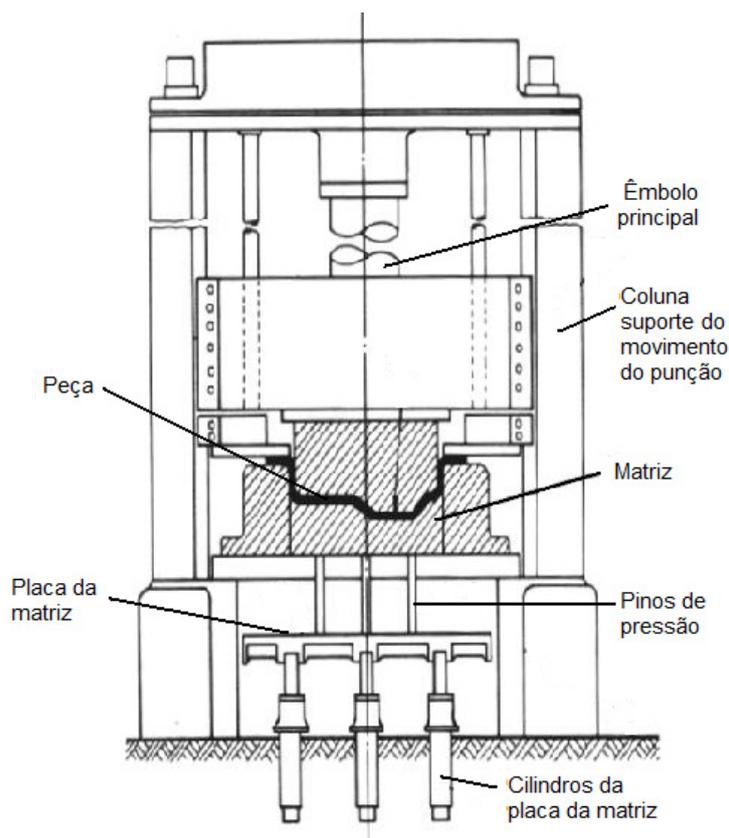


Figura 3 – Prensa hidráulica de estampagem convencional de chapa.

Nos últimos anos as técnicas de conformação incremental de chapa têm sido mais intensamente desenvolvidas e optimizadas, sendo esses avanços relacionados com o aperfeiçoamento das máquinas de comando numérico e o desenvolvimento de *software* específico para a trajectória da ferramenta.

A aplicação da estampagem incremental em máquinas tridimensionais de comando numérico é o seu principal modo de utilização, consistindo na utilização do *hardware* e *software* de uma fresadora CNC.

A adaptação deste processo a uma máquina CNC consiste em montar um pequeno punção esférico no porta ferramentas rotativo, que vai conformar uma chapa que se encontra encastrada nos bordos. Este modo é designado por método de conformação por um único ponto (SPIF, do inglês “*Single Point Incremental Forming*”) [JES05]. A principal vantagem resultante desta tecnologia é a capacidade de formar geometrias assimétricas ao contrário do *spinning*, evitando também a produção de matrizes caras.

Neste capítulo serão abordados os tipos de deformação plástica incremental conhecidos ou que recentemente começaram a ter maior interesse, com potencial aplicação na prototipagem rápida, assim como também noutras áreas.

1.1 Conformação incremental axissimétrica

O processo convencional de deformação incremental simétrica ou axissimétrica é designado por “*spinning*”. Consiste na execução de vários incrementos extensos consecutivos com a ferramenta de conformação sobre a chapa. Outro processo derivado e análogo ao “*spinning*” é o “*shear forming*” que se diferencia pelo facto da ferramenta de conformação estar em permanente contacto com a chapa, permitindo a deformação constante sobre a forma geométrica do mandril em rotação.

A chapa está fixa ao mandril por um suporte móvel que gira em conjunto, normalmente montada num sistema de torno, o que só permite o fabrico de componentes com formas geométricas cilíndricas ou cónicas. O mandril possui o formato interno da peça a produzir e a ferramenta de conformação tem a forma de disco, para facilitar a deformação da chapa [MAT06]. A Figura 4 ilustra os exemplos de movimento da ferramenta para conformar uma geometria cónica em chapa pelas duas técnicas, por várias passagens sobre a superfície (a) e o pelo método de contacto permanente da ferramenta com a chapa (b).

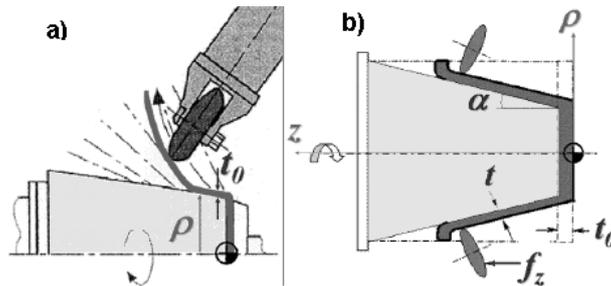


Figura 4 – Conformação incremental axissimétrica por “*spinning*” (a) e “*shear forming*” (b) [CAR05].

1.2 Conformação incremental assimétrica

A técnica de deformação incremental assimétrica pode ser interpretada de diferentes maneiras, como será analisado brevemente, no entanto este processo distingue-se pelas seguintes características:

- Ferramentas genéricas de pequena dimensão;
- Ausência ou utilização de matrizes dedicadas;
- Contacto contínuo entre a ferramenta e a chapa;
- Movimento tridimensional e controlado da ferramenta;

A conformação incremental assimétrica de chapa pode ser efectuada numa máquina concebida especificamente para o processo ou pela adaptação a uma máquina

CNC de 3 eixos, sendo este último o equipamento mais utilizado para a sua execução. A Figura 5 apresenta as diferentes configurações incluídas no grupo da técnica de deformação plástica incremental assimétrica.

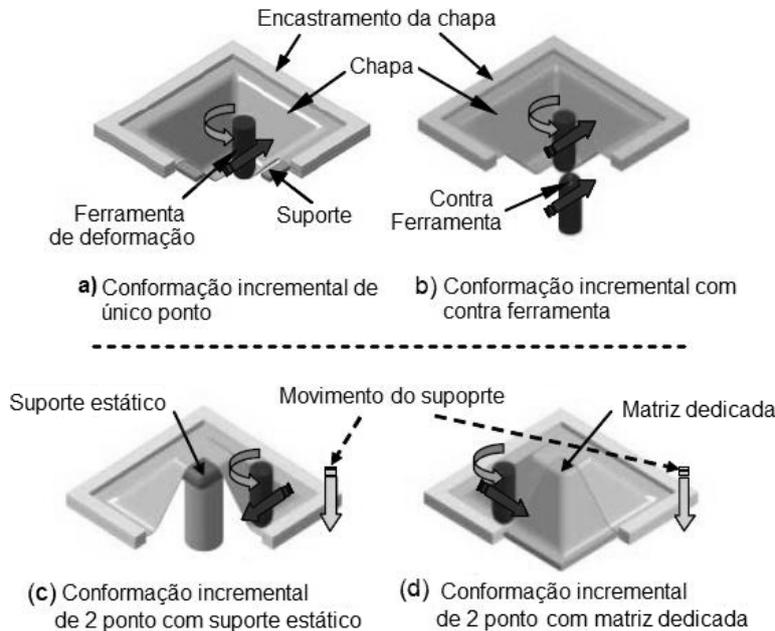


Figura 5 – As quatro variantes do processo de deformação incremental assimétrica [JES05].

A última configuração, Figura 5 (d), apresenta uma matriz dedicada com forma pré definida, ou seja, este apresenta uma geometria que permite definir a forma da peça final, deste modo não corresponde ao critério de evitar uma utilização de matriz. As configurações 5(a) e 5 (b) possuem um encastramento fixo, enquanto as configurações 5 (c) e 5 (d) a zona de encastramento movimenta-se na vertical como também a ferramenta de deformação da chapa. Estas últimas duas configurações, normalmente são implementadas em máquinas exclusivamente dedicadas a esta técnica de deformação incremental, enquanto no caso das configurações 5 (a) e 5 (b) normalmente são associadas à máquina CNC genérica (tipicamente uma fresadora). Deste modo, pode-se dizer que a estampagem incremental assimétrica apresenta dois principais tipos de variantes, a deformação incremental por único ponto (SPIF, do inglês “*Single Point Incremental Forming*”) e deformação incremental de dois pontos (TPIF, do inglês “*Two Point Incremental Forming*”).

1.2.1 Tipos de estampagem incremental assimétrica

A estampagem incremental assimétrica é constituída por quatro componentes base, a chapa, o suporte de encastramento da chapa, a ferramenta de deformação, o sistema de movimentação CNC e o *software* CAD/CAM, como ilustrado na Figura 6. O parâmetro F é a força da deformação da chapa, v é velocidade de movimento da ferramenta e ω é a rotação da ferramenta.

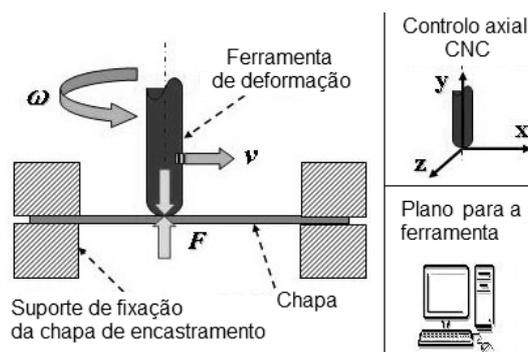


Figura 6 – Os elementos base da estampagem incremental assimétrica [JES05].

O processo de estampagem incremental é controlado numericamente pela máquina, tendo como referência o sistema de coordenadas cartesianas, orientando o movimento vertical, longitudinal e transversal da ferramenta de deformação. O sistema CAM gera a trajectória a executar pela ferramenta de conformação. A ferramenta desloca-se na horizontal e efectua deslocamentos verticais de forma incremental e destes depende o acabamento da superfície da peça final.

1.2.1.1 Deformação incremental assimétrica de dois pontos (TPIF)

A sua designação deve-se ao contacto simultâneo de dois pontos com a chapa a deformar, ou seja, o contacto da ferramenta de conformação e o contacto com o suporte ou matriz situado na zona inferior da chapa. Seguidamente são apresentadas e descritas as duas variantes deste processo de estampagem incremental assimétrica.

Estampagem incremental por dois pontos com suporte estático

Neste processo, a chapa movimenta-se verticalmente juntamente com a zona suporte de encastramento, através de um sistema de colunas guias, sobre um suporte estático que auxilia na conformação, enquanto a ferramenta esférica forma o perfil

geométrico na chapa. O suporte estático cria uma força de apoio na chapa, actuando como um punção fictício, também responsável pela determinação da forma geométrica final da peça. A Figura 7 mostra o esquema do equipamento do sistema e a trajectória da ferramenta de deformação para formar um cone em chapa.

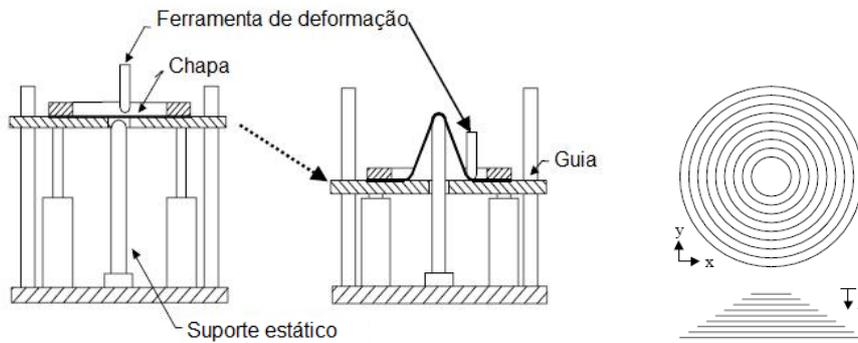


Figura 7 – Esquema representativo do sistema de conformação incremental assimétrica de dois pontos com suporte estático [JES05].

Estampagem incremental por dois pontos com matriz dedicada

Idêntico tipo de conformação incremental por dois pontos à anteriormente descrita é a utilização de uma matriz dedicada com a forma geométrica final da peça, como representado na Figura 5 (d) e Figura 8. Este sistema utiliza os mesmos componentes que o processo descrito anteriormente, com excepção do tipo de suporte usado no contacto com a superfície inferior da chapa. Em lugar do suporte local estático, utiliza-se uma matriz fabricada normalmente em materiais maciços de baixo custo, como por exemplo em resina ou em material polimérico. Porém, pode-se dizer que esta técnica de estampagem incremental não é verdadeiramente livre de matriz em comparação com a de deformação incremental de único ponto.

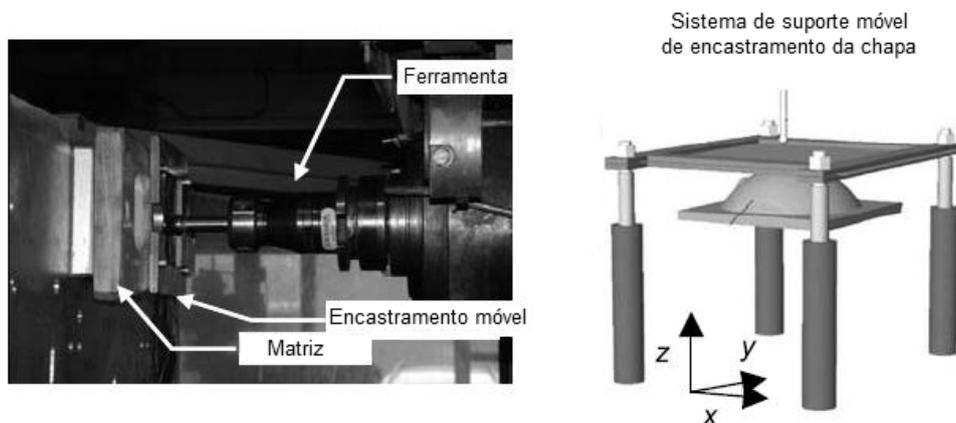


Figura 8 – Estampagem incremental de dois pontos com matriz [MAT06].

De um modo geral, as vantagens associadas a estes dois tipos variantes da estampagem incremental por dois pontos são a inexistência de erros de forma em regiões planas e o rigor geométrico da peça final produzida, superior ao método de estampagem por único ponto.

No entanto, a complexidade e o custo deste tipo de estampagem incremental são maiores relativamente ao processo de conformação por único ponto. A razão deve-se ao aumento de componentes necessários para efectuar esta técnica de conformação, conjugado com a utilização de um sistema de controlo auxiliar, reflectindo-se no custo de produção do componente e do próprio processo.

1.2.1.2 Deformação incremental assimétrica de único ponto (SPIF)

A investigação da deformação assimétrica incremental por único ponto, foi impulsionada por Jeswiet, Leach e Fratini [JES05] entre outros, demonstrando que este método pode ser implementado numa convencional máquina CNC de três eixos, incluindo a aplicação dos *softwares* CAD/CAM para planear o caminho a percorrer pela ferramenta de conformação, possibilitando a fabricação de peças complexas.

Neste tipo de conformação incremental, a superfície da chapa não está suportada, ou seja, é deformada de uma forma “livre” pela ferramenta que desliza sobre a superfície da chapa, como se pode observar na Figura 5(a). A deformação plástica é gerada pela ferramenta em rotação acoplada ao eixo vertical principal do sistema CNC, através de incrementos negativos executados gradualmente. O sistema de fixação nas extremidades da chapa evita que esta se desloque enquanto a conformação ocorre. Durante a deformação da chapa, a ferramenta de conformação está em contacto com a superfície interna do componente em fabrico, gerando incrementalmente uma concavidade.

Para além da flexibilidade de aplicação e utilização de ferramentas de baixo custo, existem ainda outras vantagens relacionadas com a aplicação do processo de estampagem incremental por único ponto:

- O objecto a produzir pode ser efectuado directamente do CAD com o mínimo de especificações da ferramenta e pode ser usado na prototipagem rápida;
- Este processo dispensa qualquer tipo de matriz, no entanto precisa de uma zona de suporte que possibilite criar o ângulo de deformação na zona encastrada (*backing plate*);
- As tensões originadas na zona de mudança de ângulo são facilmente corrigidas e controladas;

- Normalmente é dispendioso fazer protótipos em chapa, com esta técnica o custo de fabricar esses mesmos protótipos é substancialmente menor;
- A formabilidade dos materiais é aparentemente acrescida;
- Uma convencional máquina de CNC pode ser utilizada para aplicação deste processo;
- O tamanho do componente só é limitado pelo tamanho da máquina de CNC;
- A qualidade do acabamento superficial dos componentes pode ser facilmente controlada;
- O funcionamento e modos de operação são relativamente pouco ruidosos;
- Facilidade de alterações no *layout* da unidade fabril devido ao equipamento ser de menor dimensão e peso, facilitando o transporte para grandes distâncias.

No entanto também existem limitações neste processo:

- O tempo de formação do componente, que aumenta com a profundidade da geometria da peça a conformar;
- A utilização deste processo está limitada à produção de pequenos lotes de peças;
- Ocorre recuperação elástica, tornando necessário o desenvolvimento de algoritmos de correcção;
- A formação de paredes verticais não pode ser efectuada num único passo [JES05].

Estampagem incremental com contra ferramenta

A estampagem incremental com contra ferramenta de conformação, como ilustrado anteriormente na Figura 5 (b) é uma variante da estampagem incremental por único ponto. As características que a diferenciam são a ausência da zona para criar o ângulo de deformação na região de encastramento (*backing plate*) da chapa e evidentemente o uso de uma segunda ferramenta auxiliar de conformação, localizada em posição oposta à ferramenta principal de conformação.

A principal utilização dada a este tipo de estampagem incremental é na produção de peças de alta complexidade. A ferramenta auxiliar precisa de uma trajectória de conformação distinta da trajectória da ferramenta principal, com movimento controlado independente, sendo necessário o uso de uma máquina específica ou um mecanismo auxiliar a implementar na máquina CNC [SIL08].

Contudo, as variantes do processo de estampagem incremental assimétrica também podem ser denominadas por negativas ou positivas. Park e Kim [PAR03]

realizaram um estudo de modo a classificar o processo segundo as características de conformação durante a formação da peça. Sendo atribuída a designação negativa para a peça que apresenta uma superfície côncava na face em contacto com a ferramenta de conformação, ilustrado na Figura 9 (A), a designação positiva refere-se à formação de uma superfície convexa que está em contacto com a ferramenta de conformação, representado pela Figura 9 (B).

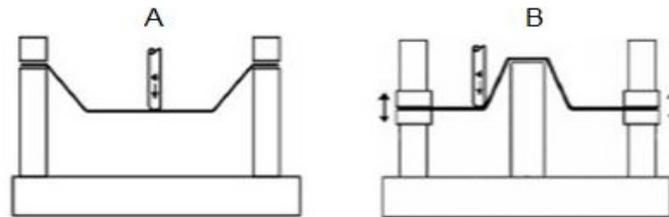


Figura 9 – Conformação negativa (A) e conformação positiva (B) [PAR03].

1.3 Aplicações

A utilização do processo de fabrico de componentes em chapa por estampagem incremental é favorável e recomendável nas seguintes aplicações:

- No fabrico de peças para reposição ou produção de pequenos lotes de componentes, isto quando as peças já não são produzidas pelos fabricantes de origem, ou então o fabrico pelo processo convencional de estampagem apresenta um custo elevado.
- Na prototipagem rápida, nas etapas de desenvolvimento e concepção de novos produtos quando não é suficiente a simulação computacional e então o fabrico de um protótipo auxilia a análise funcional e de forma do produto.
- Em aplicações da medicina, em que este método permite o fabrico de próteses com as características exclusivas de cada paciente.

A Figura 10 mostra o ciclo de aplicação da estampagem incremental conjugado com o uso da engenharia inversa.

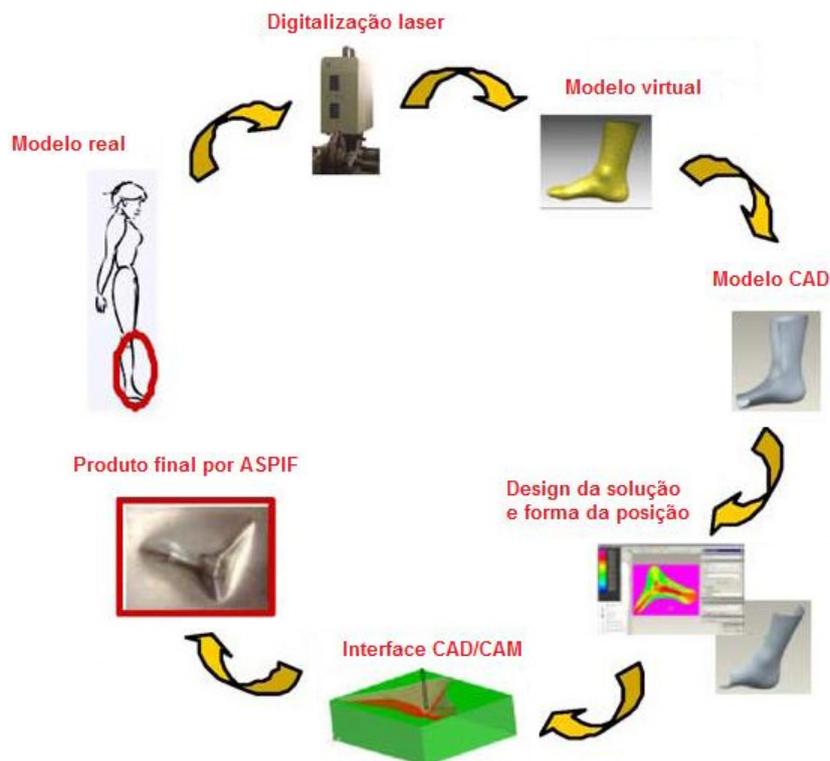


Figura 10 – Ciclo de aplicação da estampagem incremental aliado à Engenharia inversa [AMB05].

1.4 Motivação da dissertação

A presente dissertação tem por objectivo enquadrar, descrever e apresentar resultados experimentais e numéricos acerca de estampagem incremental assimétrica por único ponto.

O ponto de partida deste trabalho consiste inicialmente numa revisão bibliográfica do estado da arte do processo de estampagem incremental. Dos tipos e variantes apresentadas inicialmente neste trabalho, este recai principalmente sobre a estampagem incremental por único ponto, por ser actualmente o processo mais difundido.

A descrição e a compreensão do processo de estampagem incremental numa fase inicial deste trabalho baseiam-se em artigos científicos realizados por diversos autores, os quais estudam os parâmetros do processo.

Após a revisão bibliográfica, estado da arte e aprofundamento dos conhecimentos através dos estudos divulgados por diversos investigadores no âmbito da estampagem incremental assimétrica por único ponto, o presente trabalho tem o objectivo de estudar o processo por simulação numérica pelo método dos elementos finitos. O interesse é perceber o modo pelo qual as definições dos parâmetros iniciais

utilizados na simulação computacional, condiciona a previsão da força da ferramenta e comportamento da chapa durante e depois da conformação.

No âmbito deste processo de conformação de chapa, os principais tópicos de discussão serão, a análise dos resultados das simulações numéricas, com ênfase à sensibilidade dos resultados simulados em função dos seus parâmetros iniciais inseridos no *software* de simulação.

1.5 Guia de leitura

A dissertação divide-se em 5 capítulos. O Capítulo actual, (Capítulo 1), apresenta e sintetiza os vários tipos de estampagem incremental e suas variantes, e perspectiva o que irá ser realizado ao longo deste trabalho na área em que se enquadra.

No Capítulo 2, designado por Revisão bibliográfica e estado da arte, apresentam-se os parâmetros associados à estampagem incremental por único ponto, justificados e suportados por resultados da literatura. São também apresentadas análises de simulações numéricas, com o interesse em verificar que tipos de parâmetros influenciam estas. Todos estes resultados são oriundos de artigos científicos publicados por diversos autores.

O Capítulo 3, Enquadramento e objectivos, compila resumidamente os principais tópicos do capítulo 2, com intuito de auxiliar e definir os objectivos traçados para desenvolvimento no capítulo 4.

O Capítulo 4, Simulação numérica computacional, apresenta simulações numéricas efectuadas com o *software* comercial ABAQUS/STANDARD, utilizando o método estático implícito e elementos finitos sólidos de 8 nós. As simulações são comparadas com resultados experimentais realizados e publicados por investigadores. Os resultados obtidos incluem análise e comparação entre os vários elementos do *software* usado, e posteriormente, comparação de resultados com outro elemento finito, o RESS.

O Capítulo 5, Considerações finais, apresenta as principais conclusões do trabalho realizado, evidenciando as principais ideias retiradas e obtidas através das simulações efectuadas. Para finalizar, são apresentadas perspectivas para trabalhos e desenvolvimentos futuros.

Capítulo 2

2. Revisão bibliográfica e estado da arte

No presente capítulo abordar-se-á o estado actual em que se encontra a investigação, principalmente a nível experimental e numérico, acerca da estampagem incremental assimétrica por único ponto, recorrendo a apresentação de resultados provenientes de simulações numéricas e de ensaios práticos efectuados por diversos investigadores, com a finalidade de estudar e analisar os parâmetros que a influenciam e a caracterizam.

Os parâmetros que influenciam o processo de conformação incremental assimétrica estão relacionados maioritariamente com:

- A ferramenta de conformação;
- Material da chapa a conformar;
- Equipamento CNC, valores de deslocamento segundo os eixos coordenados X, Y e Z, velocidade de rotação da ferramenta de conformação;
- Geometria do componente no *software* CAM;
- Lubrificação.

As variáveis associadas à ferramenta de conformação são: a sua dimensão, material e formato. A combinação destas variáveis interfere no tempo de produção, acabamento superficial e nas limitações geométricas do componente final.

O material e a espessura da chapa a conformar decidem as limitações de estampagem devido às características mecânicas de conformação. A força a aplicar pela ferramenta de conformação é resultante das características da chapa. Este valor deve ser controlado e tido em consideração de modo a não danificar o equipamento.

A velocidade de rotação da ferramenta de conformação e a velocidade de movimento relativo nos três eixos cartesianos influenciam o tempo de produção e qualidade superficial do componente.

A estratégia e o incremento vertical da ferramenta definido pelo *software* CAM interferem no tempo, acabamento e rigor geométrico da peça final.

Quanto à lubrificação, a sua existência ou inexistência e tipo de lubrificante está relacionada com a temperatura gerada na interface da ferramenta com a chapa, rugosidade da superfície e desgaste da ferramenta de estampagem [KOP05].

Contudo, os parâmetros de maior interesse são: velocidade da ferramenta, a espessura da chapa, a dimensão do incremento (Δz) e o diâmetro da ferramenta, como será justificado em detalhe nas próximas secções [JES05].

2.1 Velocidade da ferramenta de conformação

O calor gerado durante o processo de deformação é resultante da fricção, quando a ferramenta se desloca sobre a superfície de trabalho com uma determinada velocidade relativa (v) e rotação (ω). Controlando estas variáveis, controla-se o calor formado na interface de contacto entre a ferramenta e a superfície da chapa durante a conformação do componente.

Ao deslocar-se sobre a superfície da chapa a uma elevada rotação, a ferramenta está em escorregamento, gerando calor por fricção. O movimento relativo da ferramenta sobre a chapa é inversamente proporcional ao calor gerado pela fricção resultante do escorregamento. Se o movimento relativo entre a ferramenta e a superfície de trabalho durante a conformação for elevado o calor gerado é inversamente proporcional à velocidade da ferramenta [JES05].

No caso de estar a ser utilizada uma esfera de movimento livre na extremidade da ferramenta de conformação, como ilustrado na Figura 11, o contacto sobre a superfície da chapa ocorre por rolamento e não por escorregamento, deste modo o calor gerado na interface diminui.

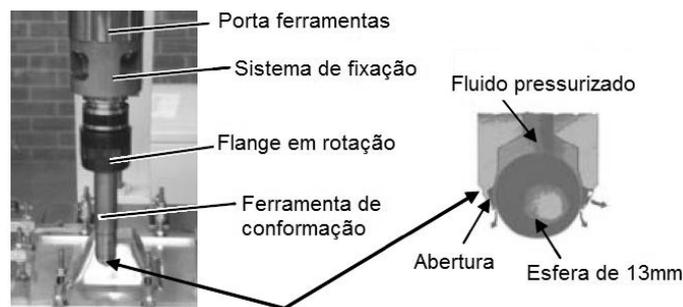


Figura 11 – Ferramenta de conformação com ponta esférica de movimento “livre” [JES05].

O aumento da velocidade angular da ferramenta pode favorecer a deformação da chapa por aquecimento local na zona de contacto entre a chapa e a ferramenta, devido ao atrito existente entre as interfaces. O aspecto negativo do aumento da velocidade de rotação da ferramenta de conformação é a necessidade de aplicar mais lubrificante, pelo facto de este se danificar rapidamente devido ao calor gerado por atrito. Quanto mais deformável é o material, mais reduzida pode ser a velocidade rotacional da ferramenta [JES05; HAM06].

O aumento da velocidade translacional relativa da ferramenta sobre a superfície de trabalho da chapa deteriora a qualidade superficial do componente em fabricação.

A velocidade da ferramenta de conformação também está directamente relacionada com o tempo e custo de produção do componente, ou seja, quanto maior o tempo para produzir a peça mais cara esta fica, no entanto a qualidade superficial do produto final é superior.

2.2 Parâmetros do material

A deformação continuada do material cria deslocações na sua estrutura interna, podendo dar origem à fractura. A tensão limite de fractura ocorre antes da rotura e depende do estado de tensão: o estado de tensão de compressão atrasa o desenvolvimento da cedência. A instabilidade durante a deformação do material origina situações em que a deformação se concentra em pequenas regiões dando origem a zonas de estrição, o que limita a deformação do material na prática. Devido à formação de zonas de estrição e até mesmo outros pequenos deslocamentos, geram-se tensões adicionais, fazendo o material alcançar o limite de fractura. O que define o limite de estrição na estampagem convencional é a curva limite de estampagem (FLC).

Para cada modo de deformação, seja ele alongamento bi-axial, deformação plana, tracção ou embutidura profunda existe uma relação entre as componentes principais de deformação. Na embutidura profunda é verificado que a deformação é positiva na direcção do comprimento, ε_1 , e negativa no sentido da largura, ε_2 , e na direcção da espessura, ε_3 . A tracção é caracterizada por ser uniaxial, apresenta alongamento na direcção do comprimento e compressão no sentido da largura e espessura. No caso da deformação plana, a deformação principal na direcção da largura é igual a zero ($\varepsilon_2 = 0$), ocorre tracção na direcção do comprimento e compressão no sentido da espessura. Por fim, no alongamento bi-axial as deformações na direcção do comprimento e da largura são de tracção e compressão na espessura com o dobro da intensidade em relação à tracção.

Segundo as condições de incompressibilidade, que estabelece que as deformações plásticas ocorrem a volume constante [MAR02], ou seja, o somatório das deformações principais nas três direcções é igual a zero:

$$\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = 0 \tag{1.1}$$

Onde: ε_1 - Deformação na direcção do comprimento;

- ε_2 - Deformação na direcção da largura;
- ε_3 - Deformação na direcção da espessura.

Cada material possui um nível máximo de deformação na ocorrência de redução excessiva de espessura até aparecer a fractura. Através da curva limite de embutidura, ou estampagem (FLC) é possível prever qual é a combinação das deformações principais que causarão a rotura.

A Figura 12 mostra uma curva típica de estampagem convencional para um determinado material. A área abaixo da curva corresponde à zona de segurança onde não ocorre fractura, a área acima da curva representa a zona de rotura do material.

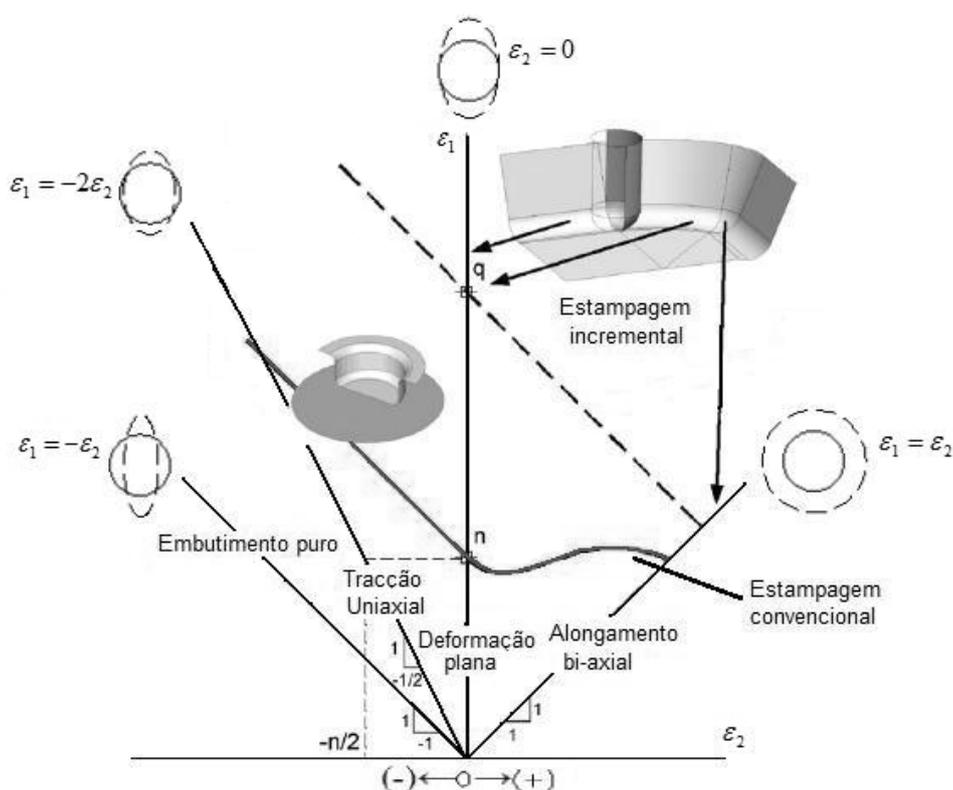


Figura 12 – Diferentes tipos de deformações representadas no diagrama limite de conformação (FLC) [MAR08].

Vários investigadores [JES05] realizaram ensaios para determinar a curva limite de embutidura para a estampagem incremental assimétrica por único ponto, e constatararam que as deformações máximas antes da ocorrência de rotura estão localizadas na zona considerada de fractura num processo convencional de estampagem.

O método mais utilizado na determinação dos pontos de deformação no diagrama limite de conformação consiste na técnica de impressão de círculos na superfície da chapa. Após a deformação da chapa com uma determinada forma geométrica, traça-se uma linha de medição sobre a superfície deformada, e a partir das

dimensões dos círculos ao longo da linha de medição e com base na expressão que define a deformação, calculam-se os pontos para o diagrama limite de conformação. A Figura 13 mostra uma chapa deformada com círculos impressos e a linha de medição.

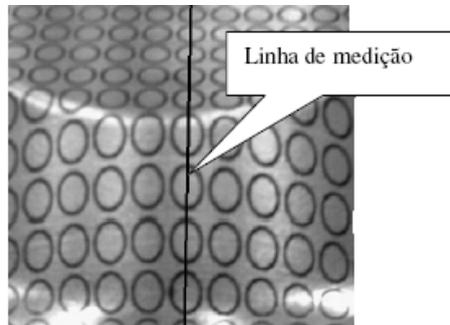


Figura 13 – Técnica de análise da superfície da chapa e linha de medição assinada [AMB08].

As expressões que definem a deformação, ε , em todas as direcções são dadas por:

$$\varepsilon_1 = \ln \frac{d_1}{d_0} \quad (1.2)$$

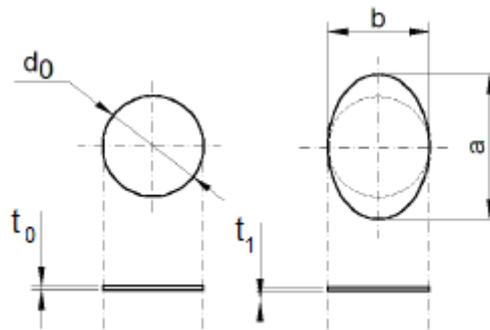
$$\varepsilon_2 = \ln \frac{d_2}{d_0} \quad (1.3)$$

$$\varepsilon_3 = \ln \frac{t_1}{t_0} = \ln \frac{S_1}{S_0} \quad (1.4)$$

Onde: ε_1 - Deformação no sentido de maior deformação;

ε_2 - Deformação no sentido da menor deformação;

ε_3 - Deformação no sentido da espessura.



Onde: d_0 - Diâmetro inicial do círculo;

d_1 - Diâmetro do círculo após a deformação na direcção comprimento;

d_2 - Diâmetros do círculo após a deformação na direcção da largura,

S_0 - Área inicial da secção da chapa;

S_1 - Área da secção da chapa após a deformação;

a - Dimensão do círculo na direcção do comprimento após a deformação;

b - Dimensão do círculo na direcção da largura após a deformação;

t_0 - Espessura inicial da chapa;

t_1 - Espessura da chapa após a deformação.

- Cálculo da espessura final da chapa, t_1 , da peça após a deformação:

Sabendo que: $S_o = t_o \cdot d_o$ (1.5)

$$S_1 = t_1 \cdot a \tag{1.6}$$

Substituindo a expressão (1.6) na expressão (1.4):

$$\varepsilon_3 = \ln \frac{a}{S_o} \cdot t_1 \Leftrightarrow t_1 = \frac{e^{\varepsilon_3} \cdot S_o}{a} \tag{1.7}$$

Ensaio mostraram [JES05] que a resposta mecânica para um alumínio na estampagem incremental é expressa por um declive negativo, como ilustra a Figura 14. A sua aplicação permite quantificar a deformação do material, otimizar o processo e prever a possível ocorrência de rotura em locais prováveis do componente.

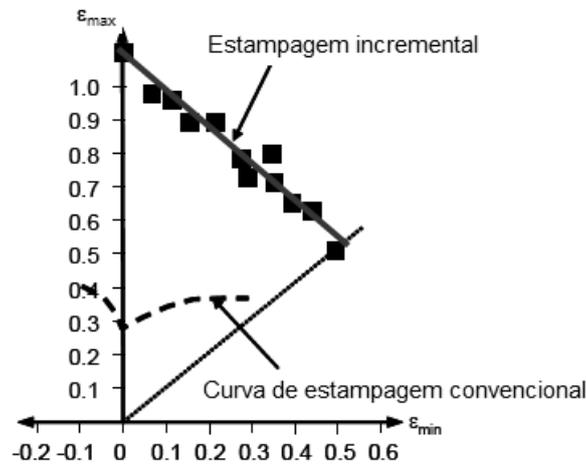


Figura 14 – Diagrama limite de conformação (FLC) para uma liga de alumínio (AA1050-O) na formação de uma pirâmide quadrangular [JES05].

As deformações bi-axiais no material da chapa ocorrem em condições específicas, como na formação de cantos ou intersecções com superfícies planas. Na maioria das situações as deformações ocorrem próximo do eixo de deformação principal.

O processo de estampagem incremental é caracterizado por uma pequena deformação plástica localizada, limitada ao contacto entre a extremidade esférica da ferramenta e a área de trabalho na chapa. Avaliações [JES05] mostram que o modo de deformação é próximo da deformação plana do material, quase puro alongamento da área deformada. As elevadas deformações são possíveis devido à presença de pressões

hidrostáticas causadas pelas deformações elásticas nas áreas circundantes à zona onde ocorre a deformação plástica.

A curva limite de estampagem é válida em determinadas condições:

- A trajectória de deformação deve ser em condições de carga proporcional;
- A deformação é predominantemente causada pela força do punção;
- A tensão de corte ao longo da espessura é desprezável;
- Existência de estado plano de tensão.

As condições anteriores são verificadas em situações práticas de modo a justificar o uso da curva limite de estampagem convencional. Na estampagem incremental estas condições não se verificam devido à existência de mecanismos de deformação específicos que serão apresentados na secção seguinte [EMM08a].

2.2.1 Mecanismos de deformação em SPIF

Como já referido anteriormente, o nível de deformação permitido pela estampagem incremental é superior quando comparada com a estampagem convencional. Este aumento da deformação por estampagem incremental é consequência da influência de vários factores, sendo a deformação localizada o mais pertinente.

Em diversos artigos [MAR08; EMM08a; EMM08b], os mecanismos sugeridos para explicar o aumento da deformação na estampagem incremental foram diversos: a combinação do alongamento com a força de corte, forças normais, trajectória cíclica de deformação, deformação em pequenas zonas e tensões de compressão hidrostáticas.

Em oposição à estampagem convencional, na estampagem incremental o componente é conformado sem fluxo de material proveniente das regiões dos bordos devido ao encastramento da chapa. Isto significa que a chapa é alongada, com o material a alongar numa direcção e a contrair noutra.

Na estampagem incremental, a deformação localizada ocasionada pelo contacto da ferramenta esférica não é a justificação generalizada para o aumento da deformação da chapa. Pelo contrário, a deformação localizada é sinónimo de formação de uma zona de estrição instável. O factor que estabiliza o crescimento da região de estrição na estampagem incremental devido à deformação localizada, é a ferramenta já estar noutra local antes da tensão limite de fractura ser alcançada e esta permanecer associada ao movimento da ferramenta. No entanto, esta explicação não é completamente satisfatória, porque não justifica qual é o motivo pelo qual a estrição gerada não mantém o seu crescimento quando ainda está sob tensão. O processo de deformação da chapa funciona por incrementos se a deformação for localizada numa pequena zona, ao

mesmo tempo que fora dessa zona a deformação não deve proporcionar o aumento da anterior.

Os autores Emmens e Boogaard [EMM08a] fizeram uma revisão acerca dos vários mecanismos de deformação que ocorrem na estampagem incremental, que são apresentados nos tópicos seguintes.

1) *Tensão de corte*

A tensão de corte adicional diminui a tensão de cedência, facilitando o início da deformação plástica durante o processo SPIF, como se pode constatar na figura 15. Sendo a tensão de corte causada pelo deslocamento tangencial resultante do movimento da ferramenta, esta não pode permanecer se a zona de estrição aumentar. Na ausência da tensão de corte, a tensão de cedência no plano aumenta novamente e os mecanismos de deformação estabilizam até a tensão no plano ser alta o suficiente para deformar a chapa o suficiente mesmo sem a tensão de corte.

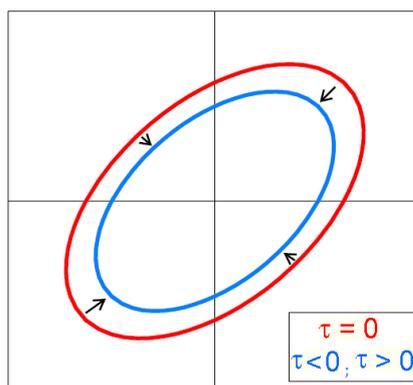


Figura 15 – Influência da tensão de corte [EMM08a].

A ocorrência de tensão de corte ao longo da espessura na direcção do movimento da ferramenta de conformação foi determinada por Sawada [SAW01], através de simulações numéricas.

Bambach [BAM03] também observou tensão de corte ao longo da espessura nas suas simulações e mencionou que o estado das tensões de corte depende do diâmetro da ferramenta e do incremento vertical.

Eyckens [EYC08] estudou a presença de tensão de corte na direcção da espessura através de um ensaio experimental que consistiu em fazer pequenos buracos na chapa. Após a passagem da ferramenta esférica, mediu a orientação destes e constatou que existia pouco ou quase nenhum indício de tensão de corte na direcção perpendicular ao movimento da ferramenta.

Jackson et al. [JAC07], verificaram em ensaios experimentais similares a ocorrência de tensão de corte ao longo da espessura na direcção do movimento da

ferramenta de conformação, medindo o deslocamento de ambas as superfícies da chapa com estrutura mista (sanduíche), através da análise da secção transversal com 3mm de espessura.

2) *Tensão de contacto*

A tensão de contacto refere-se à tensão de compressão normal à superfície da chapa gerada pelo contacto da ferramenta e actua como um mecanismo de deformação contínuo de estabilização, que também reduz a tensão de cedência, aumentando o limite de estrição. Isto acontece em todas as situações quando a ferramenta entra em contacto com a superfície de trabalho e é tanto mais severo quanto menor for o diâmetro da ferramenta. No entanto, deve-se distinguir os tipos de contacto existentes, por único ponto (SPIF) e por dois pontos (TPIF). No contacto por único ponto a tensão de contacto altera-se acima da espessura da chapa, sendo o seu valor máximo na superfície de contacto, enquanto na superfície oposta é zero. Apenas no contacto de duplo ponto com matriz dedicada a espessura suporta melhor as tensões de contacto [EMM08a].

Recentemente, Huang [HUA08] relacionou o aumento de deformação da chapa por estampagem incremental e a presença de tensão de contacto.

3) *Dobra sob tensão (BUT)*

Este mecanismo de deformação consiste basicamente na dobragem em simultâneo com o estiramento da chapa, como ilustrado na Figura 16. Todavia, torna a tensão não uniforme ao longo da espessura da chapa e apenas é possível de justificar quando a chapa está a começar a ser dobrada. A dobra sob tensão (BUT) difere da tensão de contacto, pelo facto de esta ultima alterar o estado de tensão do material, enquanto que BUT mantém o estado de tensão do material inalterado. Outra diferença, é o facto da tensão de contacto ser considerada apenas em situações estáticas, enquanto BUT baseia-se no facto de a zona deformada se movimentar, ou seja, a zona de contacto é carregada e descarregada continuamente.

A força derivada da tensão (F) depende do alongamento da deformação (e - deformação no centro da espessura) e da deformação de dobra (e_b). Sendo t a espessura e R o raio do centro da dobra até à linha média da espessura.

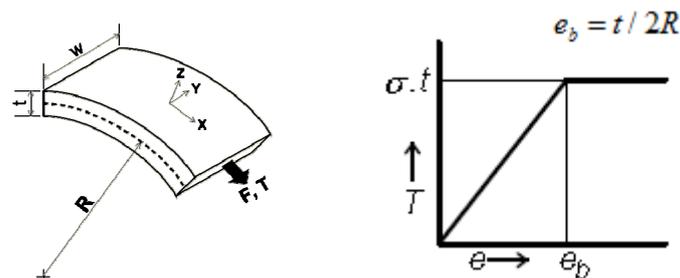


Figura 16 – Representação do mecanismo designado por dobra sob tensão (BUT) [EMM08b].

O gráfico apresentado na Figura 16, mostra a relação entre a força por unidade de largura T em função do alongamento para uma situação com um raio de dobra constante. Onde para um pequeno alongamento ($e < e_b$) a força é reduzida, significando que este mecanismo pode activar a deformação localizada. Além disso, a força aumenta com o alongamento criando uma situação de alongamento estável. O comprimento do regime estável é dado pela expressão que define e_b , associando a deformação originada por este mecanismo directamente com a espessura.

Este mecanismo foi proposto por Sawada et al. [SAW01], baseado nas suas simulações, no entanto Emmens [EMM06] também propôs este mecanismo baseado em experiências efectuadas nos finais da década de noventa, na observação da proporcionalidade entre a formabilidade e a espessura da chapa.

Em geral, este mecanismo é puramente dinâmico, só acontece quando o material se movimenta sob a superfície de contacto da ferramenta esférica e a sua ocorrência alonga o material em algumas direcções da zona de contacto. No entanto, este mecanismo é difícil de associar directamente à estampagem incremental. Mas, estando a chapa dobrada e alongada próximo da ferramenta, este mecanismo surge, sendo o seu crescimento dependente do aumento da espessura da chapa e a diminuição do raio da ferramenta [EMM08a].

4) Efeito cíclico

Na prática, a ferramenta pode passar várias vezes pelo mesmo ponto da chapa. A sua passagem provoca carga e descarga da chapa favorecendo a deformação reversível do material, proporcionando o efeito *Bauschinger*, que deste modo está sujeito a um ciclo de deformação que aumenta a sua capacidade de deformação.

Este tipo de mecanismo de deformação não deve ser confundido com o anteriormente descrito, embora envolva dobragem repetida da chapa não significa que esta seja necessariamente cíclica. Em situações práticas estes dois mecanismos são difíceis de separar, mas no entanto as suas influências no aumento da deformação são diferentes. [EMM08a]

5) *Restrição ao crescimento da estrição*

Martins et al. [MAR08; EMM08] observou a ocorrência de fractura em peças produzidas por estampagem incremental e referiu que não existe sinal de existência de estrição. Salienta a inexistência da zona de estrição pelo facto desta não ter possibilidade para crescer. Baseado na análise da geometria da zona de deformação localizada, determinaram o local provável onde a estrição se podia desenvolver. No entanto, essa zona pertence à região circundante com baixa tensão que inibe o desenvolvimento da estrição, isto é, a zona de deformação localizada é muito pequena para desenvolver a estrição.

6) *Efeito triaxial*

Martins et al. [MAR08] efectuou um estudo analítico das tensões, mostrando que a relação triaxial que ocorre em estampagem incremental assimétrica por único ponto é menor que no processo de estampagem convencional. Segundo este investigador, a razão triaxial é uma importante regra na deformação do material. No caso da estampagem convencional o nível da razão de triaxilidade é maior que no caso da estampagem incremental por único ponto, em que a taxa de rotura do material é menor. Isto explica o motivo pelo qual a rotura é preferencialmente localizada nos cantos em que as deformações são bi-axiais, enquanto nas superfícies planas laterais a razão de triaxilidade é mais baixa. A influência do raio da ferramenta na razão de triaxilidade é oposta à influência da espessura da chapa, e conseqüentemente a deformação aumenta com a diminuição do raio da ferramenta.

Foram aqui referidos os vários possíveis mecanismos de deformação presentes na estampagem incremental assimétrica por único ponto, descritos por vários investigadores como fundamento para o aumento da deformação da chapa por este processo. No entanto podem aparecer em investigações posteriores outro tipo de mecanismo que justifiquem melhor o aumento da deformação. Também não está completamente esclarecido se estes mecanismos actuam em condições específicas deste processo de conformação.

2.2.2 Ângulo da parede

O ângulo da superfície da chapa deformada é também importante na conformação incremental assimétrica. Um dos pontos que se deve ter em atenção ao conceber a peça no *software* CAD é a obrigatoriedade o ângulo da parede da peça desenhada ser inferior ao ângulo de conformação permitido pelas características do material da chapa durante a deformação [JES05]. É sabido que o material da chapa atinge o máximo de deformação na estampagem incremental quando atinge um determinado valor de ângulo, para qual o alongamento é máximo com simultânea redução da espessura da chapa, alcançando um valor mínimo pelo qual ocorre fractura. Ocorre redução da espessura da parede lateral de modo a obedecer à lei de volume constante. A previsão da espessura final da chapa, t_1 , também pode ser calculada através da lei do seno, que relaciona a espessura inicial da chapa com a espessura final e o ângulo da parede da chapa conformada é dada pela seguinte expressão:

$$t_1 = t_o \cdot \text{Sen}(90 - \alpha) \quad (1.8)$$

Onde t_o é a espessura inicial da chapa, t_1 a espessura da chapa medida numa determinada fase da conformação e α o ângulo de inclinação da chapa nessa mesma fase de conformação. A Figura 17 mostra um exemplo da determinação da espessura da chapa em diferentes zonas com diferentes declives.

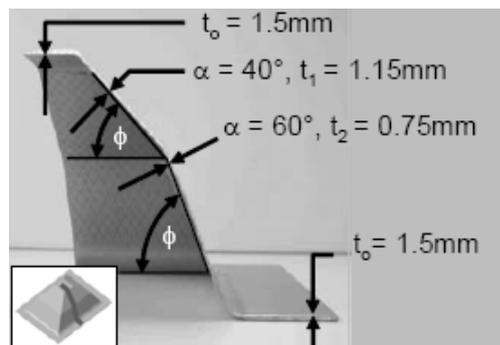


Figura 17 – Demonstração da determinação da espessura da chapa conformada [JES05].

A medição directa do ângulo da parede do componente pode ser um óptimo indicador da deformação da chapa. No entanto é importante encontrar o ângulo máximo (ϕ_{\max}) do declive da parede da chapa, para ajudar a responder à influência de outros parâmetros no aumento ou diminuição da deformação, reflectindo-se deste modo na análise de resultados provenientes de ensaios experimentais e permitindo uma análise mais detalhada [HAM06].

Os materiais mais utilizados na estampagem incremental assimétrica são o aço e o alumínio, embora as ligas de alumínio sejam as mais frequentemente utilizadas devido à sua maior ductilidade e menor força de deformação em relação ao aço. As ligas de alumínio maioritariamente usadas nos ensaios são: AA 1100, AA 3003-O e AA 1050, onde têm sido estudadas as suas propriedades de deformação [JES05].

Foram efectuados ensaios pelos investigadores Minutolo et al. [MIN07] para duas diferentes geometrias de conformação em chapa, sendo posteriormente analisadas em função do ângulo máximo (ϕ_{\max}) permitido pelos respectivos declives das paredes sem ocorrer fractura. As duas geometrias experimentais correspondem à formação de um cone e de uma pirâmide quadrangular. Os testes foram executados numa máquina de CNC com uma ferramenta em aço com diâmetro de 10mm a uma rotação de 1000rpm, com uma velocidade relativa sobre a área de trabalho da chapa de 1000mm/minuto, o material da chapa em liga de alumínio (7075-T0) com uma espessura de 1mm e adicionado lubrificante para reduzir o atrito.

As dimensões para formar a pirâmide quadrangular foram de 70mm de largura e comprimento, com um passo vertical de 0.5mm. Quanto às dimensões para a formação do cone, foram de 70mm de diâmetro com um incremento vertical de 0.5mm. Para ambas as configurações a profundidade pretendida é de 39mm com um aumento de 5° por cada passo vertical. As fracturas ocorreram para declives com ângulos superiores a 65° no caso da pirâmide quadrangular e 70° para o caso da formação do cone. Outros testes para alcançar novos ângulos máximos sem acontecer rotura, foram feitos impondo um incremento angular de 1° para cada passo vertical. Os declives obtidos mostraram que para a pirâmide quadrangular o ângulo conseguido foi de 63° e para o cone um ângulo de 66°.

Ensaaios experimentais simulares foram realizados por vários autores [JES05], para diferentes tipos de materiais em função da espessura da chapa. A tabela 1 mostra semelhantes resultados obtidos para os valores de espessuras iniciais das chapas em vários materiais e correspondentes ângulos máximos, ϕ_{\max} , permitidos pela deformação plástica em cada um dos materiais.

Material	$\phi_{m\acute{a}x}$	FLD _o	t _o	Investigador
AA 1050-O	67.5°	2.305	1.21	Filice
AA 6114-T4	60°	0.841	1.0	Micari
AL 3003-O	78.1°		2.1	Jeswiet
AL 3003-O	72.1°		1.3	Jeswiet
AL 3003-O	71°	3.0	1.21	Jeswiet
AL 3003-O	67°		0.93	Jeswiet
AL 5754-O	62°		1.02	Jeswiet
AL 5182-O	63°		0.93	Jeswiet
AA 6111-T4P	53°		0.93	Jeswiet
DC04, aço médio	65°	1.2	1.0	Hirt
DDQ	70°	2.718	1.0	Micari
HSS	65°	1.924	1.0	Micari
Cobre	65°	1.808	1.0	Micari
Bronze	40°	0.701	1.0	Micari

Tabela 1 – Lista de materiais analisados por diversos autores [JES05].

Nota: FDL_o corresponde ao valor máximo de maior deformação (eixo das ordenadas) quando a menor deformação (eixo da abcissa) é zero no diagrama das deformações.

A partir da análise da Tabela 1, conclui-se que para o mesmo material ensaiado com diferentes espessuras de chapa (AL 3003-O), o ângulo de inclinação máximo, $\phi_{m\acute{a}x}$, da parede da chapa antes do aparecimento de fractura, diminui para conformações de chapas com espessuras menores.

Para comprovar os resultados apresentados na Tabela 1, a Figura 18 mostra o comportamento do ângulo de inclinação máximo da parede do componente em alumínio AA3003-O em função da espessura da chapa. Os resultados gráficos foram obtidos de ensaios efectuados pelos investigadores Ham e Jeswiet [HAM06].

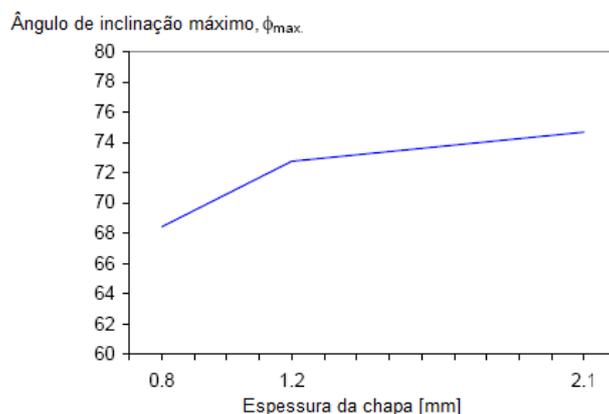


Figura 18 – Influência da espessura da chapa no ângulo máximo da parede [HAM06].

Na Figura 18 é notório o aumento significativo do ângulo máximo em cerca de 6° para um aumento de espessura de material de 0.8mm para 2.1mm, provocando o aumento simultâneo da aptidão da chapa para deformar. O aumento da espessura da chapa para além dos 2.1mm também continuaria a proporcionar o aumento do ângulo do declive da parede da peça, podendo-se verificar através da lei do seno, porém o factor limite será a força necessária que a máquina de CNC tem de exercer para deformar a chapa com o aumento da sua espessura.

2.3 Ferramenta de conformação

Para seleccionar a ferramenta de conformação mais indicada é necessário encontrar o diâmetro óptimo para a esfera da ferramenta, sendo essencial conhecer a geometria a conformar na chapa, o tipo de material e a que profundidade a esfera na extremidade da ferramenta em movimento vai trabalhar. Na estampagem incremental assimétrica por único ponto são normalmente usadas ferramentas de ponta esférica sólida, como na Figura 19.



Figura 19 – Ferramentas com extremidade esférica sólida de conformação [VIH07].

Para o ângulo de inclinação, α , da parede do componente, existe um ponto a partir do qual o diâmetro de contacto da ferramenta com a chapa é máximo, e corresponde ao instante em que o contacto da chapa em deformação nesse ponto é tangente à superfície da esfera da ferramenta. A Figura 20 ilustra o contacto limite tangencial para duas tipologias de ferramentas diferentes.

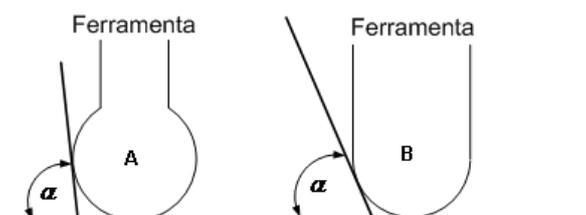


Figura 20 – Contacto da parede da chapa com a ferramenta de conformação.

Quando o ângulo das paredes da chapa em conformação é muito acentuado, é necessário que a ponta esférica da ferramenta tenha um diâmetro superior ao diâmetro de suporte desta, Figura 20A, com o intuito de evitar o contacto entre o suporte da ponta esférica e a chapa. Existe uma gama variada de diâmetros para a esfera localizada na ponta da ferramenta de conformação, valores de diâmetro que podem ir dos 6mm até aos 100mm, este último usado no fabrico de peças de grandes dimensões. Normalmente os valores de diâmetro da ponta esférica usados são de 4mm a 15mm [VIH07]. O diâmetro a utilizar depende do ângulo côncavo requerido para formar a peça e influencia a qualidade superficial como também o tempo de fabrico.

Seleccionada a ferramenta de estampar, com uma ponta esférica com determinado diâmetro específico consoante a aplicação, também é necessário ter em consideração o material desta. Na maioria dos casos, a ponta esférica é fabricada em aço, o que é satisfatório para a maioria das aplicações. No entanto para reduzir a fricção e aumentar a vida útil da ferramenta, esta pode ser coberta superficialmente por outros materiais, à base de carbonetos. Em algumas aplicações é necessário a utilização de uma ferramenta de ponta esférica em material polimérico, Figura 21, para evitar a formação de substâncias químicas ou reacções com o material da chapa em conformação, de modo a peça final obter melhor qualidade superficial.



Figura 21 – Ferramentas de conformação de ponta esférica sólida com 6,10,30mm de diâmetro e com ponta de plástico (direita) [JES05].

Quando o acabamento e qualidade superficial são prioritários, a velocidade de deslocamento e o incremento da ferramenta devem ter um controlo mais exigente ou então a ferramenta pode ser especificamente projectada para o efeito, como se pode observar na Figura 11. Neste caso em particular, a ferramenta consiste numa esfera suportada por um fluido pressurizado, permitindo que a esfera gire livremente sobre a superfície de trabalho em todas as direcções, diminuindo a fricção entre a ferramenta e a chapa.

O diâmetro da esfera na extremidade da ferramenta de conformação desempenha um papel importante, onde um pequeno diâmetro concentra as tensões

locais na zona de deformação da chapa. Resultados obtidos por Hirt [HIR02] na conformação de pirâmides com bases quadrangulares com declives variados, mostram que com a diminuição do diâmetro da ferramenta de 30mm para 6mm, podem ser alcançadas maiores deformações para o mesmo material da chapa, como representado no diagrama das conformações da Figura 22.

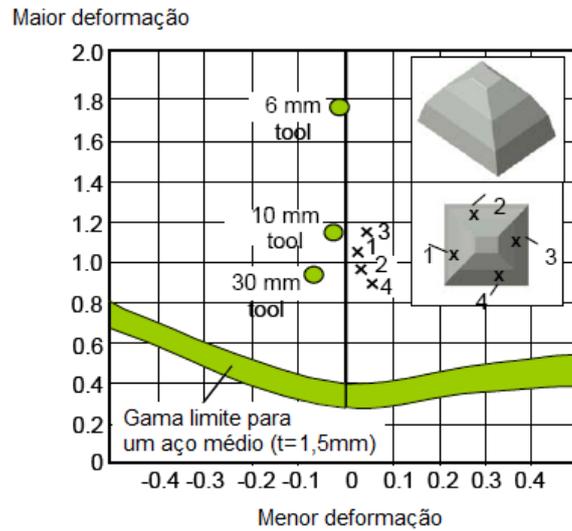


Figura 22 – Comparação entre vários diâmetros de ferramenta no diagrama limite de conformação [HIR02].

O aumento do ângulo máximo da parede da chapa com a diminuição do diâmetro da ferramenta de conformação é causado pela concentração da força numa menor área, conjugado com a geração de calor devido ao atrito entre superfícies. A condição que limita a diminuição do diâmetro é o facto de ser propício a ocorrência de rotura por fadiga da ferramenta. A Figura 22 mostra o comportamento do ângulo da parede da peça em alumínio AA 3003-O em função do aumento do diâmetro da esfera na extremidade da ferramenta, através de resultados obtidos por Ham e Jeswiet [HAM06].

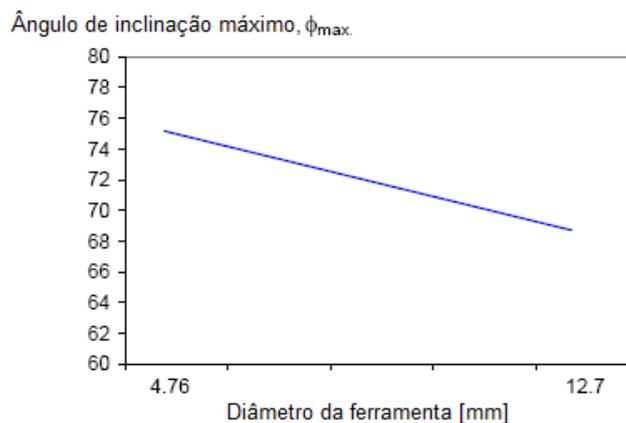


Figura 23 – Influência do diâmetro da ferramenta no ângulo máximo da parede [HAM06].

2.4 Incremento vertical

A dimensão do passo no incremento vertical, Δz , tem influência significativa no tempo de conformação e no acabamento superficial, nomeadamente na rugosidade. O aumento do incremento sobre a chapa é realizado em condições de conformação mais exigentes e o acabamento superficial não é a prioridade. Macari [MAC04] efectuou testes com alumínio AA 1050, em que aplicou incrementos de 1mm numa chapa de grande espessura na formação de um cone, e constatou que a deformação da chapa diminui como consequência directa do aumento do passo de incremento da ferramenta. A Figura 24 mostra os resultados obtidos.

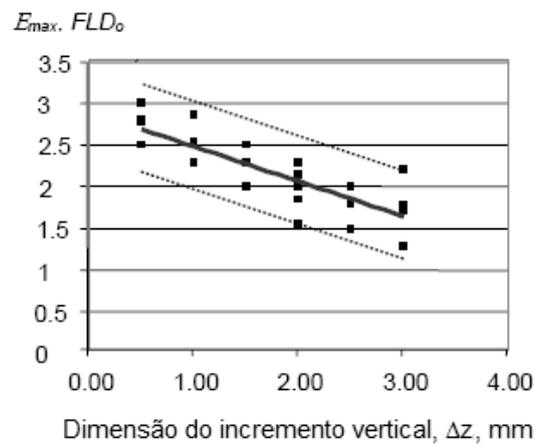


Figura 24 – Diagrama FLD para diferentes dimensões de incrementos, com uma ferramenta de conformação de 12mm [JES05].

A rugosidade da superfície deformada é uma preocupação quanto à qualidade superficial do produto final. Na estampagem incremental assimétrica o principal factor que determina a altura dos picos que definem a rugosidade da superfície é a dimensão do incremento vertical, após a passagem da ferramenta de conformação.

A Figura 25 mostra os tipos de passos verticais utilizados em ensaios de conformação incremental: passo constante (a) e passo variável (b).

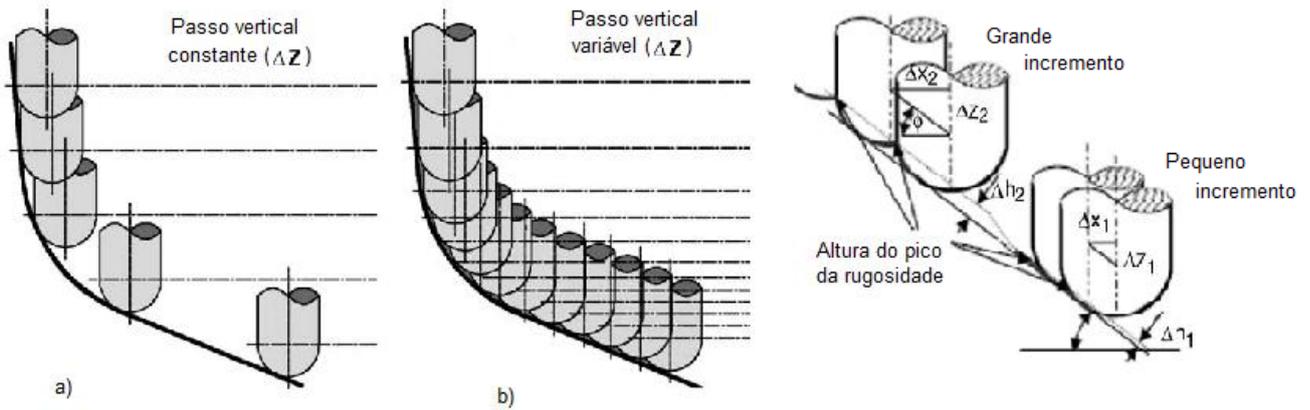


Figura 25 – Tipos de incrementos verticais e influência na dimensão na rugosidade [ATT06].

O passo vertical constante obriga a ferramenta a seguir uma trajetória com incremento vertical constante, fazendo com que a altura da rugosidade se altere com a mudança de declive durante a conformação da chapa, como ilustra a Figura 26.

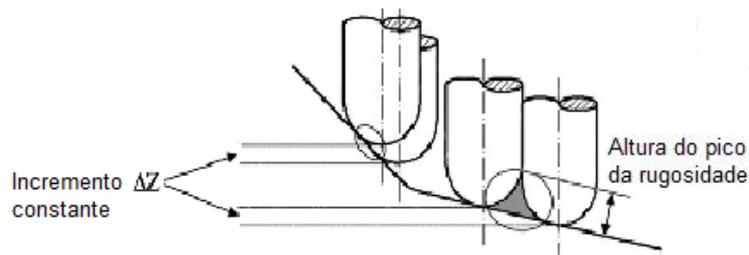


Figura 26 – Influência do passo vertical constante na altura dos picos da rugosidade [ATT08].

A desvantagem associada a esta estratégia é a baixa qualidade da superfície, sobretudo em regiões planas e quando o incremento é superior a 0.5mm, como mostram os ensaios realizados com uma ferramenta de 12,5mm de diâmetro na Figura 27, ficando a chapa marcada nas regiões de ligação entre as trajetórias.

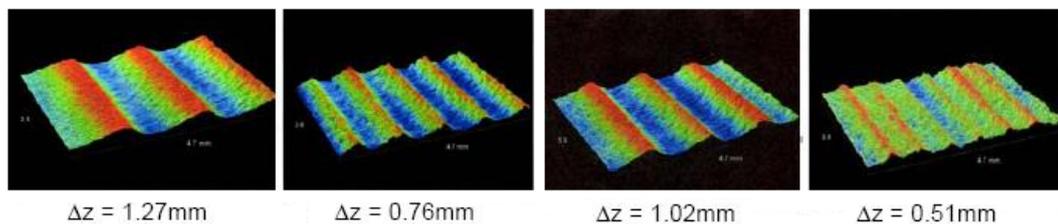


Figura 27 – Simulação da rugosidade da superfície para vários tipos de passo vertical [JES05].

Com a variação do incremento vertical, a altura dos picos das rugosidades gerados pelas curvas de nível devido à trajetória da ferramenta são constantes. Neste tipo de estratégia quanto menor o ângulo de inclinação da superfície menor será o valor

do incremento vertical e o incremento horizontal, Δx , como se pode verificar na Figura 25b.

A Figura 28 apresenta os resultados obtidos em ensaios efectuados por Ham e Jeswiet [HAM06] para uma chapa em alumínio AA 3003-O. A influência da dimensão do incremento vertical no ângulo máximo da parede parece pouco significativa no aumento ou diminuição do declive da parede na conformação. Todavia reconhece-se uma diminuição muito pouco expressiva do ângulo máximo da parede com o aumento do passo vertical.

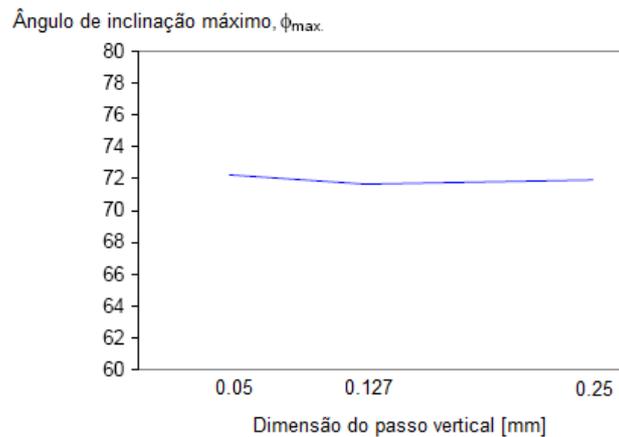


Figura 28 – Influência do passo vertical da ferramenta no ângulo máximo da parede [HAM06].

2.5 Trajectória de conformação

A trajectória da ferramenta é uma estratégia decisiva para o sucesso da conformação do componente em chapa, sendo um dos principais parâmetros envolvidos no acabamento superficial e na capacidade de deformação do material. Quando a chapa está a ser deformada, o efeito de endurecimento do material surge, alterando as características do material e reduzindo a sua capacidade de deformar.

O endurecimento do material aumenta quando a deformação imposta pela ferramenta também aumenta, ou seja, durante a conformação incremental o material vai-se modificando estruturalmente, gerando zonas deformadas frágeis onde o material pode fracturar. Este efeito pode ser controlado modificando a trajectória da ferramenta.

A trajectória da ferramenta é definida pelos incrementos verticais que distribuem os contornos deixados pela ferramenta ao longo da parede da peça em fabrico e pelo contorno geométrico a estampar na chapa.

Um dos principais parâmetros que influenciam a qualidade da superfície da peça final obtida, é forma como a ferramenta de conformação entra na superfície, assim como a forma como sai da superfície da chapa. Nos ensaios feitos por Kopac e Kampus

[KOP05] com duas estratégias de trajetórias diferentes, foi verificado que na primeira estratégia, Figura 29a), a entrada da ferramenta causou uma assimetria na chapa, Figura 29b) e na região central da peça produzida a profundidade obtida ficou diferente da restante área circundante da chapa (zona assinalada), provocando irregularidades na geometria e no acabamento do componente. Na segunda estratégia, Figura 29c), a trajetória foi concebida para eliminar os pontos de entrada da ferramenta, ficando esta constantemente em contacto com a superfície de trabalho, executando a conformação em forma cíclica e sem interrupções, melhorando o rigor geométrico e a qualidade de acabamento superficial da peça, Figura 29d).

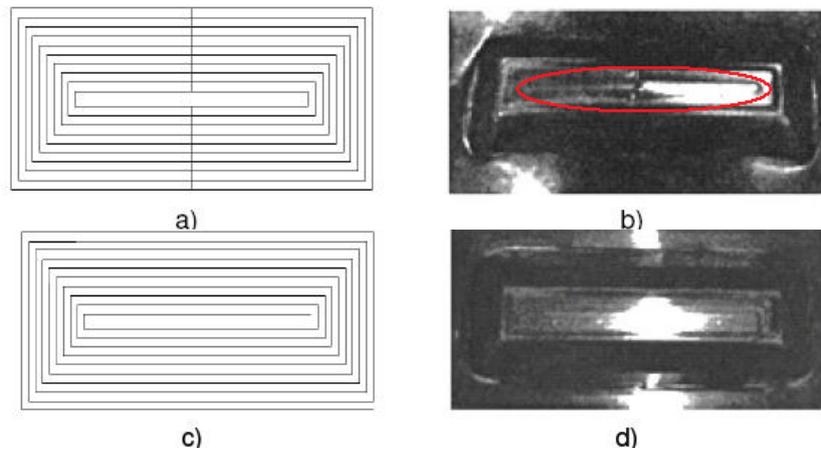


Figura 29 – Estratégias de entrada e saída da ferramenta de conformação [KOP05].

2.6 Lubrificação

O uso da lubrificação na estampagem incremental assimétrica de único ponto tem por objectivo a manutenção das características tribológicas do material da chapa durante e após a conformação.

A Figura 30 ilustra os dois tipos de lubrificação utilizados na estampagem incremental assimétrica por único ponto.

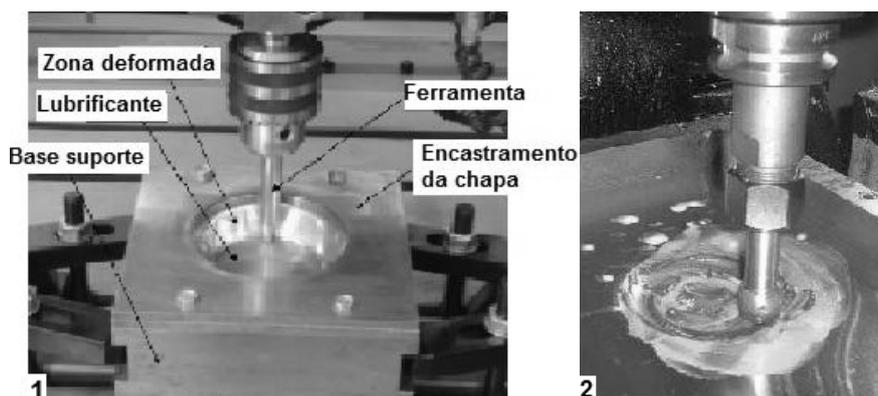


Figura 30 – Tipos de lubrificação, por lubrificante fluido (1) e por massa lubrificante (2).

A Figura 31 apresenta as diferenças entre os acabamentos superficiais de dois componentes em alumínio com uma espessura de chapa inicial de 1mm e utilização de uma ferramenta de conformação com 10mm de diâmetro. Os ensaios experimentais foram efectuados com e sem utilização de massa lubrificante.

Visualizando as figuras, a superfície do componente da Figura 31a) possui melhor acabamento superficial, visto a massa lubrificante atenuar os efeitos provocados pela fricção entre os contactos evitando o aumento da rugosidade. Quanto ao acabamento superficial do componente Figura 31b), verifica-se que contém maior rugosidade superficial nas zonas das arestas, devido à alteração estrutural do material da chapa nessas regiões, provocando irregularidades que podem conduzir à rotura do material da peça.

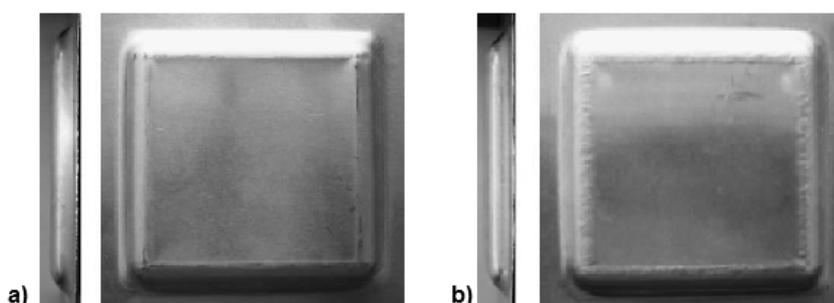


Figura 31 – Conformação com lubrificação por massa (a) e sem lubrificação (b) [KOP05].

2.7 Desempenho da simulação numérica

Nesta secção serão referidos alguns parâmetros que influenciam a fiabilidade da simulação numérica, nomeadamente os que serão analisados em detalhe posteriormente no capítulo referente à análise e estudo numérico de simulações de conformação em SPIF.

Nos *softwares* de simulação numérica pelo método de elementos finitos, a formulação das equações de equilíbrio e o tipo de método utilizado na integração temporal destas equações, podem ser formuladas de duas formas. Por formulação do problema de forma estática, em que os efeitos da inércia são desprezados, ou por formulação dinâmica onde os efeitos da inércia são contabilizados.

Na base da formulação estática, o facto de o trabalho realizado pelas forças de inércia, ou seja, forças associadas à gravidade e à aceleração, serem cerca de quatro ordens de grandeza inferiores à energia de deformação plástica, são desprezadas e eliminadas das equações de equilíbrio.

2.7.1 Tipo de análise

Os métodos de integração temporal podem ser implícitos ou explícitos, sendo a principal diferença entre estes dois métodos o instante temporal. Para um intervalo de tempo $[t, t + \Delta t]$, procede-se à integração do modelo constitutivo e à formulação das equações de equilíbrio: no instante $t, t + \Delta t$, no caso do método de integração implícito e no instante t para o caso de integração explícita [ALV03].

No método implícito, as equações de equilíbrio são formuladas à volta da configuração final do tempo $[t, t + \Delta t]$, a qual é desconhecida e constitui a incógnita do problema, garantindo e impondo que o equilíbrio do corpo seja satisfeito no final do incremento de tempo Δt . Adoptando o método estático implícito, o cálculo de deslocamentos $\Delta \mathbf{x}$ faz-se pela resolução do problema não linear dado pela expressão seguinte, a qual é reescrita como:

$${}^{t+\Delta t}R(\Delta \mathbf{x}) = \mathbf{0} \quad . \quad (1.9)$$

O sistema de equações não lineares deve também ser reescrito na forma:

$${}^{t+\Delta t}K \cdot \Delta \mathbf{x} = {}^{t+\Delta t}\Delta F \quad . \quad (1.10)$$

O marcador sobrescrito $t, t + \Delta t$ indica o instante no qual é calculada a rigidez K e o vector incremento das forças externas ΔF . No entanto, as grandezas matriciais ${}^{t+\Delta t}K$ e ${}^{t+\Delta t}\Delta F$ são elas próprias função do incremento de tempo final, a partir do qual se pretende determinar o vector $\Delta \mathbf{x}$. Deste modo tratando-se de um problema não

linear, a sua resolução implica a adopção de um método iterativo de resolução. Para se proceder à determinação das correcções sucessivas até se verificar a condição de equilíbrio estático do corpo no incremento final, ou seja, quando as forças externas se igualam às forças internas, é adoptado o algoritmo de Newton-Raphson, Figura 32, para a resolução do problema não linear formulado pela expressão (1.9), a qual se pode escrever

$${}^{t+\Delta t}R(\Delta x^{i-1}) + \frac{\partial {}^{t+\Delta t}R(\Delta x^{i-1})}{\partial \Delta x^{(i)}} \cdot (\Delta x^{(i)} - \Delta x^{(i-1)}) + \dots = 0, \quad (1.11)$$

obtendo-se um sistema de equações lineares de incógnita $dx^{(i)} = \Delta x^i - \Delta x^{(i-1)}$, o qual permite reescrever

$${}^{t+\Delta t}K \cdot dx^{(i-1)} = -{}^{t+\Delta t}R^{(i-1)}, \quad (1.12)$$

em que ${}^{t+\Delta t}R^{(i-1)}$ é o vector das forças não equilibradas nas iterações de equilíbrio $(i-1)$, dado por

$${}^{t+\Delta t}R(\Delta x^{i-1}) = {}^{t+\Delta t}K^{(i-1)} \cdot \Delta x^{(i-1)} - {}^{t+\Delta t}\Delta F^{(i-1)}, \quad (1.13)$$

sendo o vector $dx^{(i)}$ é a correcção da iteração i do vector de deslocamento Δx , determinado iterativamente, até que um critério de convergência seja satisfeito.

$$\Delta x^i = \Delta x^{(i-1)} + dx^{(i)}, \quad (1.14)$$

Teoricamente, o tamanho de cada incremento pode ser muito grande, no entanto na prática é limitado pelas não linearidades associadas ao problema, tais como a lei do comportamento dos materiais ou o problema do contacto com atrito.

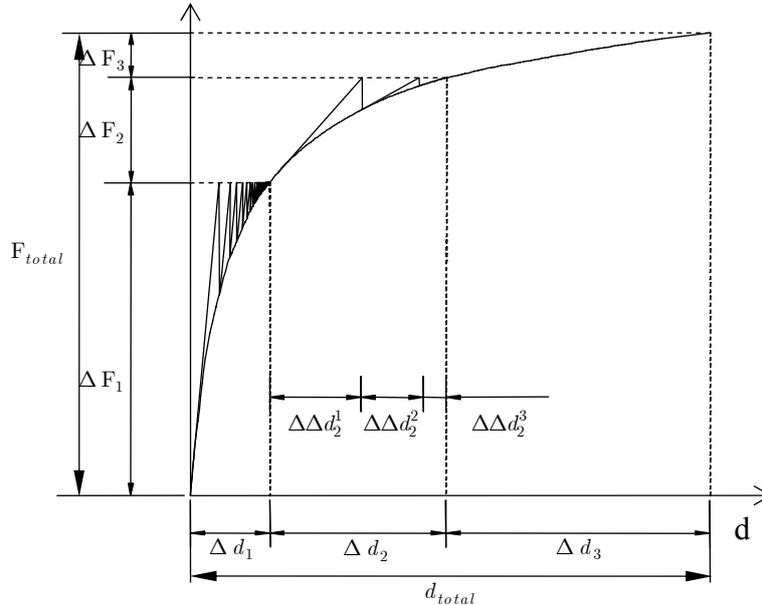


Figura 32 – Método de Newton-Raphson [SOU02].

Na Figura 32 encontra-se um exemplo que traduz uma relação não linear força em função do deslocamento para um problema unidimensional. A carga total é dividida

em três incrementos e, para cada um destes são necessárias várias iterações para se chegar à convergência. No primeiro incremento de carga, é aplicada a variante KT1, onde a matriz de rigidez tangente é calculada na 1.^a iteração e mantida constante até à convergência, embora nessa altura já não seja tangente à curva do problema. No 2.^o incremento de carga é aplicado o chamando Método de Newton-Raphson completo KT, onde a matriz de rigidez tangente é actualizada em cada iteração. Se por um lado, o método KT exige um maior esforço computacional, visto ser necessário o estabelecimento da matriz de rigidez em cada iteração, também é verdade que apresenta uma taxa de convergência superior [BAR92].

Actualmente, o método estático implícito é muito usado na simulação do retorno elástico, pois os métodos puramente explícitos não são capazes de simular as fases de retorno elástico de modo fiável. Tekkaya [TEK00] refere que os softwares estáticos implícitos são normalmente usados na simulação de processos de hidroformagem, nos casos em que exactidão do retorno elástico, distribuição final das tensões residuais, são importantes aspectos a retirar da simulação numérica.

As duas principais dificuldades geralmente associadas ao método estático implícito são o tempo de cálculo que evolui de forma quase quadrática com o número de graus de liberdade do problema a simular e a memória necessária, principalmente para o cálculo das equações lineares, geralmente muito superior à necessária ao método dinâmico explícito. A outra desvantagem é a falta de convergência para a solução, que ocorre principalmente devido ao tamanho demasiadamente grande do incremento e a não linearidade do problema. A solução para resolver este problema passa por diminuir o tamanho do incremento [ALV03].

No método explícito a formulação as equações de equilíbrio fazem-se em torno da configuração inicial do intervalo de tempo $[t, t + \Delta t]$, o qual é conhecido. Nenhum critério de convergência é adoptado e o equilíbrio do corpo no final do incremento de tempo Δt do intervalo de tempo $[t, t + \Delta t]$ não é verificado. Não desprezando o trabalho das forças de inércia, as equações de equilíbrio relativas a um ponto material arbitrário, escrevem-se do seguinte modo

$$\text{div}(\boldsymbol{\sigma}) + \rho(\mathbf{g} - \ddot{\mathbf{x}}) = \mathbf{0} \ , \quad (1.15)$$

Onde, ρ é massa volúmica do material, \mathbf{g} a aceleração gravítica e $\ddot{\mathbf{x}}$ a aceleração da partícula material.

A equação de forma de sistema de equação algébrica reescrito é dado por

$$\mathbf{M} \, {}^t\ddot{\mathbf{x}} + {}^t\mathbf{I} = {}^t\mathbf{F} \ , \quad (1.16)$$

sendo ${}^t\mathbf{I}$ o vector de forças internas e ${}^t\mathbf{F}$ os vector forças externas, \mathbf{M} a matriz de massa e ${}^t\ddot{\mathbf{x}}$ é o vector aceleração, a única incógnita do problema. Porém, para que os

métodos dinâmicos sejam interessantes do ponto de vista da eficiência computacional, a matriz M deverá ser fácil de inverter se esta for uma matriz diagonal. No entanto, porque tal não acontece, esta é artificialmente diagonalizada. Deste modo, o vector das acelerações nodais é dado pela seguinte expressão:

$${}^t\ddot{x} = {}^D M^{-1}({}^t F - {}^t I). \quad (1.17)$$

Conhecido o vector das acelerações nodais, a determinação do campo de deslocamento x no instante $t, t + \Delta t$, é determinado das diferenças centrais,

$${}^{t+\Delta t}x = {}^t x + \Delta t \cdot {}^t \dot{x} + \frac{1}{2} \cdot \Delta t^2 \cdot {}^t \ddot{x}. \quad (1.18)$$

Para finalizar, o estado de tensão no instante $t, t + \Delta t$ é actualizado a partir da expressão

$${}^{t+\Delta t}\sigma = {}^t \sigma + \Delta t \cdot {}^t \dot{\sigma}. \quad (1.19)$$

Comparativamente ao método estático implícito, no método dinâmico explícito a velocidade de computação é mais elevada e os requisitos de memória são inferiores, desde que a matriz de massa seja diagonal. Contudo, para alcançar a vantagem real de velocidade de cálculo, os cálculos ao nível dos elementos devem ser tão reduzidos quanto possível. Isto faz com que se utilizem elementos muito simples, resultando numa reduzida exactidão nos cálculos de tensões e deformações. Consequentemente, também o retorno elástico não é bem calculado pelo software que usa este tipo de análise. Este método numérico só é satisfeito se a matriz for diagonal, o facto de esta ser artificialmente diagonalizada, introduz erros que se procuram controlar com artifícios numéricos, tais como a integração reduzida do elemento [ALV03]. Outra desvantagem é a estabilidade condicional, ou seja, existe um tamanho máximo do incremento para um problema.

Bambach et al. [BAM04; JES05] fizeram a simulação numérica da conformação de um componente cilíndrico (copo) por estampagem incremental assimétrica de único ponto em dois tipos de análise, em análise explícita e em análise implícita. Nas duas análises, o elemento deformável (chapa) foi dividido em 2304 elementos finitos do tipo casca (elemento de 4 nós) com 9 pontos de integração ao longo da espessura. Na primeira modelação numérica da chapa foi utilizado um material com endurecimento isotrópico, assumido um coeficiente de atrito de 0.05 entre a ferramenta e a chapa e um coeficiente de atrito de 0.15 entre o contacto da chapa com o seu suporte de encastramento. O componente conformado na simulação foi gerado com um passo vertical de 5mm, um diâmetro de 115mm e uma profundidade de 25mm e o diâmetro do suporte encastramento (*backing plate*) da chapa possui 120mm.

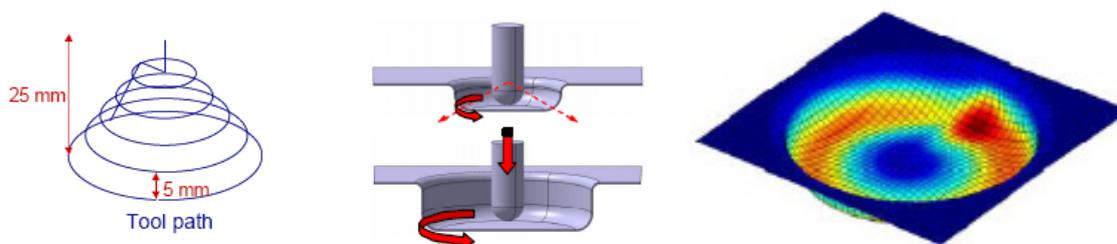


Figura 33 – Trajectória usada na conformação do componente cilíndrico [JES05; BAM05].

A análise da simulação numérica obtida foi comparada com o resultado do ensaio experimental ao longo da secção radial, para os dois métodos de simulação numérica como representado na figura 34.

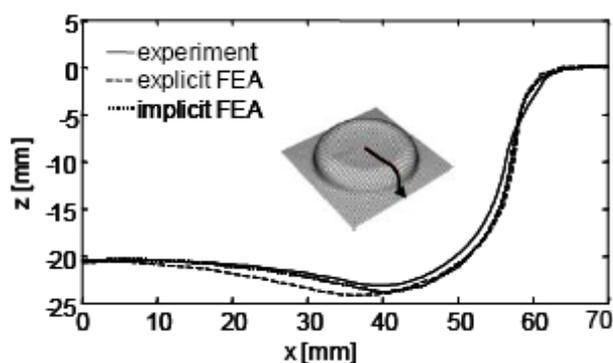


Figura 34 – Comparação entre os resultados obtidos nos dois tipos de análise numérica e o ensaio experimental [JES05].

A Figura 34 mostra o resultado da simulação numérica implícita que apresenta um óptimo resultado comparado com o ensaio experimental, no entanto o tempo de simulação é longo. Com comportamento oposto, a análise numérica explícita é muito mais rápida a simular a conformação do componente, mas a qualidade do resultado final comparado o com ensaio experimental e a análise implícita revela-se inferior. Pode-se dizer que a análise implícita possibilita melhores resultados relativamente ao campo de tensões e espessura da peça final produzida e a análise explícita, um tempo de simulação razoavelmente baixo que é útil para a optimização da trajectória da ferramenta.

2.7.2 Tipo de endurecimento

O comportamento plástico do material varia consoante a ocorrência ou não de endurecimento, caso não exista endurecimento o comportamento do material designa-se por elasto-plástico perfeito. Quando o material é elasto-plástico com endurecimento, as condições de escoamento plástico do material durante a sua deformação plástica alteram-se. Considerando um ponto qualquer do material, no qual é conhecida a superfície de plasticidade ou de cedência inicial, com o decorrer da deformação plástica a superfície de plasticidade pode expandir ou contrair, transladar ou distorcer.

Segundo a teoria da plasticidade, a forma e a posição da superfície de plasticidade são função das alterações induzidas na textura e na microestrutura do material durante a deformação, e depende do carregamento [ALV03]. Estas alterações diferem consoante o tipo de endurecimento (ou encruamento) a referir:

- Endurecimento isotrópico (Figura 35a) caracteriza-se por uma expansão uniforme da superfície de cedência a partir da superfície inicialmente definida pelo critério de plasticidade. Significa que os centros das superfícies se mantêm coincidentes, isto é, o efeito de *Bauschinger* é desprezado aquando da inversão da trajectória ou qualquer outro efeito que conduza à alteração da forma da superfície para além da expansão isotrópica. Em qualquer instante do processo de deformação plástica, diz-se que o critério é simétrico;
- Endurecimento cinemático (Figura 35b) corresponde a um movimento de translação do corpo rígido da superfície de cedência. Este tipo de endurecimento, introduzido por Prager, visou explicar o chamado efeito *Bauschinger* associado a algumas mudanças de trajectória de deformação, presente em alguns materiais sujeitos a carregamentos cíclicos. Assume-se que durante o processo de deformação plástica a superfície se desloca no espaço das tensões, permanecendo a sua forma e dimensão inalterada;
- Endurecimento misto (Figura 35c) compreende uma combinação dos dois tipos de encruamento referidos anteriormente, podendo ainda aliar-se a uma rotação da superfície de cedência.

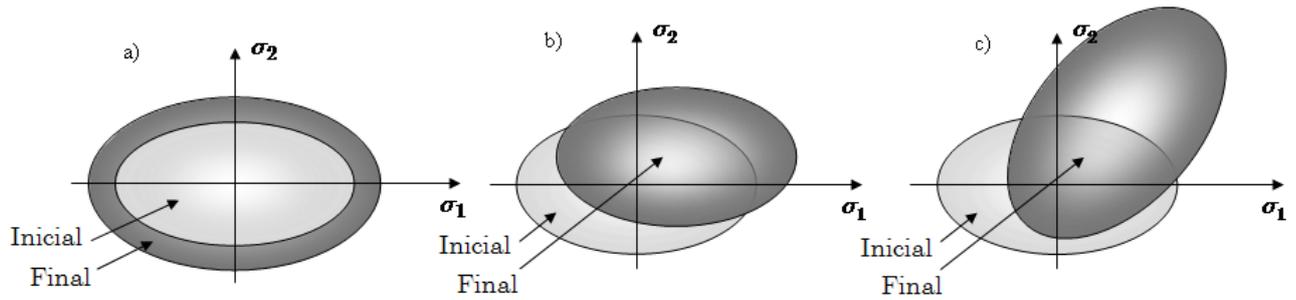


Figura 35 – Representação gráfica bidimensional dos tipos de encruamentos [SOU02].

Bambach e Hirt [BAM05] numa diferente investigação fizeram duas simulações numéricas distintas na conformação de um copo, na primeira simulação o material possui um endurecimento isotrópico e na segunda simulação o material possui um endurecimento misto (isotrópico/cinemático). Os resultados obtidos foram novamente comparados com o ensaio experimental da conformação do cone, como mostra a Figura 36. Neste caso, o uso de endurecimento misto (isotrópico/cinemático) apresenta resultados mais próximos dos obtidos no ensaio experimental.

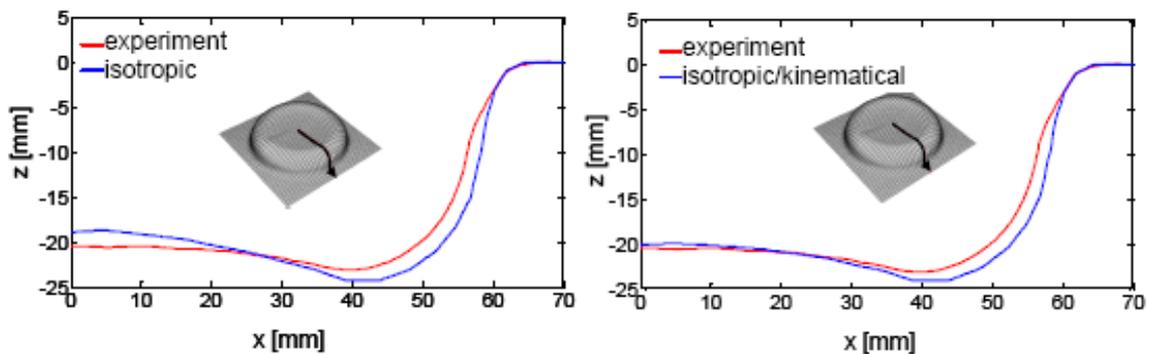


Figura 36 – Comparação dos resultados obtidos com dois tipos de endurecimento e o ensaio experimental realizado [BAM05].

Outros investigadores como Bouffioux et al. [BOU07], também demonstraram através das suas simulações numéricas que ao usar endurecimento isotrópico, a força da ferramenta produzida na simulação é superior em relação à medida durante os testes experimentais.

2.7.3 Tipo de elemento finito

O tempo de simulação é a principal desvantagem da análise implícita quando comparada com o esquema explícito, no entanto o tipo de elemento finito seleccionado também possui uma influência relevante. No caso dos elementos 3D, nomeadamente hexaédrico trilinear de 8 nós o tempo de simulação é superior que no caso da utilização de elementos casca de 4 nós. Porém, os elementos sólidos apresentam duas grandes vantagens: possibilitam a aplicação de leis constitutivas gerais 3D, sem simplificação de estado plano como nas cascas e permitem avaliar directamente as variações de espessura da chapa visto possuir duas camadas distintas de nós, ao contrários das cascas. A desvantagem deste tipo de formulações é a sua maior sensibilidade aos fenómenos de retenção [SOU02] e o número reduzido de pontos de integração ao longo da espessura.

Neste estudo, a modelação é feita através de elementos hexaédricos lineares tridimensionais de oito nós, vulgarmente referidos na literatura como “*brick elements*”, Figura 37.

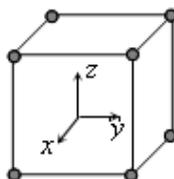


Figura 37 – Elemento hexaédrico genérico (8 nós) [SOU02].

Particularmente para um elemento hexaédrico clássico de 8 nós, e atendendo ao caso do esquema de integração numérica completa, normalmente seriam utilizados 8 pontos de integração (pontos de *Gauss*)($2 \times 2 \times 2$). A utilização de um esquema de integração completa, apesar de matematicamente correcto, conduz ao aumento da rigidez do elemento em caso de deformação incompressível (retenção volumétrica) ou com geometrias finas (retenção ao corte transversal). Para minimizar este efeito é adoptada a técnica de integração reduzida, ou seja, redução do número de pontos de integração no elemento, resultando na diminuição da rigidez do elemento. Contudo, esta técnica de integração conduz normalmente à deterioração da solução do problema, caso não sejam adoptados esquemas de estabilização numérica.

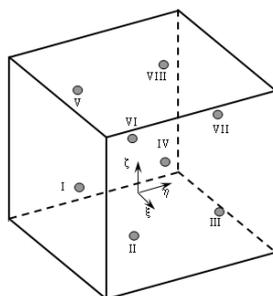


Figura 38 – Elemento hexaédrico padrão com integração completa [SOU02].

Quanto ao número de pontos de integração, a sua influência não só reflecte-se na fiabilidade da simulação mas também no tempo de simulação, ou seja, embora sejam elementos finitos do mesmo tipo, estes podem possuir diferentes números de pontos de integração. Os tipos de integração conhecidos são: a integração reduzida selectiva, a integração reduzida pura e integração completa.

2.7.3.1 Integração reduzida e reduzida selectiva

A utilização da integração reduzida (RI) com o objectivo de atenuar o efeito de retenção foi inicialmente introduzida em elementos casca [ZIE71]. Entende-se por fenómeno de retenção como sendo a incapacidade de um modelo representar devidamente os campos de deslocamentos e deformações, para um determinado conjunto de condições de fronteira e forças exteriores aplicadas. O mesmo conceito foi utilizado noutras áreas, nomeadamente em problemas que apresentam incompressibilidade. Em simultâneo, o conceito de integração reduzida selectiva (SRI), foi introduzido [HUG87].

A integração reduzida pressupõe, que nos elementos trilineares, a integração numérica da matriz de rigidez é apenas num ponto de integração localizado no centro geométrico do elemento, enquanto a integração reduzida selectiva utiliza esta integração apenas para a sua parcela volumétrica. Na integração com um único ponto garante maior atenuação dos efeitos de retenção volumétrica [SOU02].

O conceito de integração reduzida selectiva terá sido inicialmente proposto com o objectivo de melhorar o comportamento à flexão, utilizando elementos de 4 nós para aplicação em estados planos. Com esta regra de integração e para os referidos elementos, utiliza-se nos termos ao corte, um ponto de *Gauss*, e quatro pontos de integração de *Gauss* para os restantes termos.

Malkus e Hughes [MAL78] realizaram um estudo mais aprofundado sobre o método da integração reduzida selectiva, alargando-o aos problemas incompressíveis. Este método combina a integração completa para os termos desviadores e a integração

reduzida uniforme para os termos volumétricos do vector de forças internas e da matriz rigidez. O teorema da equivalência proposto por estes investigadores mostrou que a aplicação da integração completa usa demasiados pontos para os multiplicadores de *Lagrange*, restringindo excessivamente o problema de incompressibilidade, tornando evidente que o número de graus de liberdade deve ser superior ao número de restrições.

2.7.3.2 Método das deformações acrescentadas

O principal objectivo do método das deformações acrescentadas consiste em reduzir, através da inserção de modos de deformação adicionais compatíveis ou incompatíveis, a dificuldade de um elemento em reproduzir determinados modos específicos de deformação. Estes métodos baseiam-se na interpolação do vector das deformações, não sendo este totalmente dependente da interpolação do campo de deslocamentos.

Simo e Rifai em 1990 [SIM90] introduziram o conceito de elemento com deformações acrescentadas, em que o campo de deformações usual é ampliado com a inserção de um campo de deformações acrescentadas. O tensor das deformações é composto por duas partes, a primeira é compatível com o campo de deslocamentos do elemento e a segunda é introduzida de modo a incluir os modos de deformação não reproduzidos pelo elemento original, melhorando o seu comportamento. Existe a liberdade de inclusão de mais ou menos variáveis e modos de deformação, bastando apenas a alteração do número de variáveis adicionais e da matriz de interpolação relativa a estas mesmas variáveis, cumprindo as condições essenciais do método. As variáveis adicionais, embora utilizadas no cálculo do estado de deformação, não têm significado físico. De um modo geral, aumenta-se o número de graus de liberdade do elemento sem que se aumente o número de nós. Porém o número excessivo de graus de liberdade, pode levar ao aparecimento de modos de deformação esporádicos, referidos na literatura como fenómeno de “*hourglass*”, à semelhança do que pode ocorrer com elementos de integração reduzida.

O caso da adição de modos incompatíveis de deformação, trabalho inicialmente desenvolvido por Wilson et al. [WIL73], e seguidamente aperfeiçoado por Taylor et al. [TAY76] mais tarde, com o intuito de resolver os problemas relacionados com a incapacidade de reprodução de deformações de flexão, recorreram à adição de modos incompatíveis de deformação. Assim, o método das deformações acrescentadas proposto por Simo e Rifai [SIM90] é em vários aspectos similar ao método dos modos incompatíveis de Wilson et al. [WIL73], que acaba por abranger este último como um caso particular.

Contudo, a escolha dos modos de deformação suplementares com uso de um número excessivo de variáveis adicionais, conduz por exemplo ao aparecimento de matrizes de rigidez elementares de dimensões exageradas, que depois de agrupadas, originam problemas de índole numérica e computacional, e ocasionando soluções menos fiáveis.

2.7.4 Trajectória da ferramenta

A Figura 39 mostra dois tipos de trajectórias utilizadas por Minoru et al. [MIN08] na conformação de uma pirâmide quadrangular por simulação computacional. A formação do componente consiste na repetição das trajectórias de formato quadrangular, movendo a ferramenta da periferia da chapa para o interior, diminuindo a área dos respectivos quadrados formados.

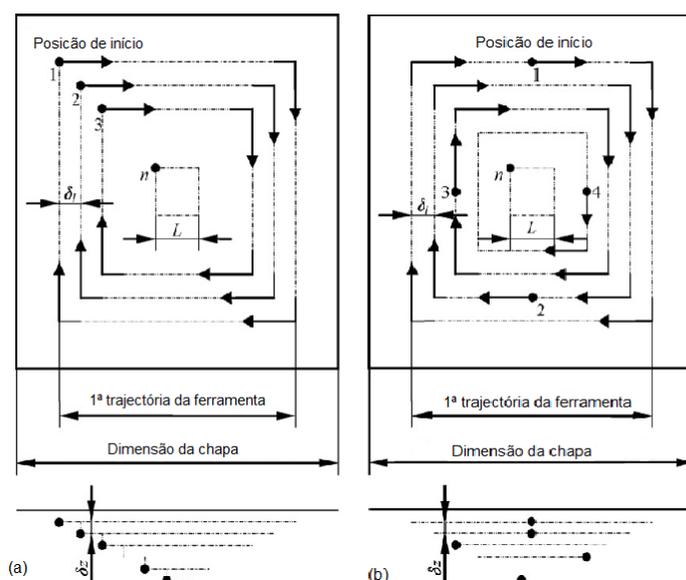


Figura 39 – Trajectórias de conformação usadas na simulação computacional [MIN08].

Na trajectória (a) em análise, a ferramenta de conformação começa inicialmente na posição de canto na chapa, com um determinado incremento vertical (δ_z) e seguidamente move-se na horizontal sobre a área de trabalho da chapa deformando-a plasticamente na zona de contacto da ferramenta com a chapa. A ferramenta volta a tomar a posição inicial no canto da chapa e novamente com um passo vertical, agora com uma menor trajectória, repetindo-se este último passo até a peça estar totalmente conformada.

Na trajectória (b), a ferramenta inicia a sua trajectória de conformação numa posição inicial intermédia da dimensão da chapa com um determinado passo vertical.

Os caminhos de conformação seguintes repetem-se sucessivamente com posições iniciais intermédias para a ferramenta em pontos alternados de cada trajectória.

As condições iniciais dos parâmetros do *software* de simulação são: malha de elementos finitos da chapa composta por elementos sólidos, a espessura foi devida em duas camadas de elementos finitos e a chapa em todas as extremidades está estrangida ao deslocamento e à rotação durante o processo de conformação. A simulação numérica foi efectuada pelo método explícito dinâmico. As dimensões da chapa são de 14.5mm_x_14.5mm_x_0.25mm e a ferramenta de conformação possui um diâmetro de 2mm e velocidade sobre a superfície da chapa de 20m/s.

Para as três situações simuladas a dimensão dos parâmetros de conformação são: o incremento vertical (δ_z) é de 1mm e a geometria quadrada na última trajectória possui 1mm de lado (L). O passo horizontal (δ_l) é de 1mm para a situação (1) e (2) com 5 trajectórias (n) para 5mm de profundidade. Para a situação (3) são efectuadas 10 trajectórias (n) para 10mm de profundidade [MIN08].

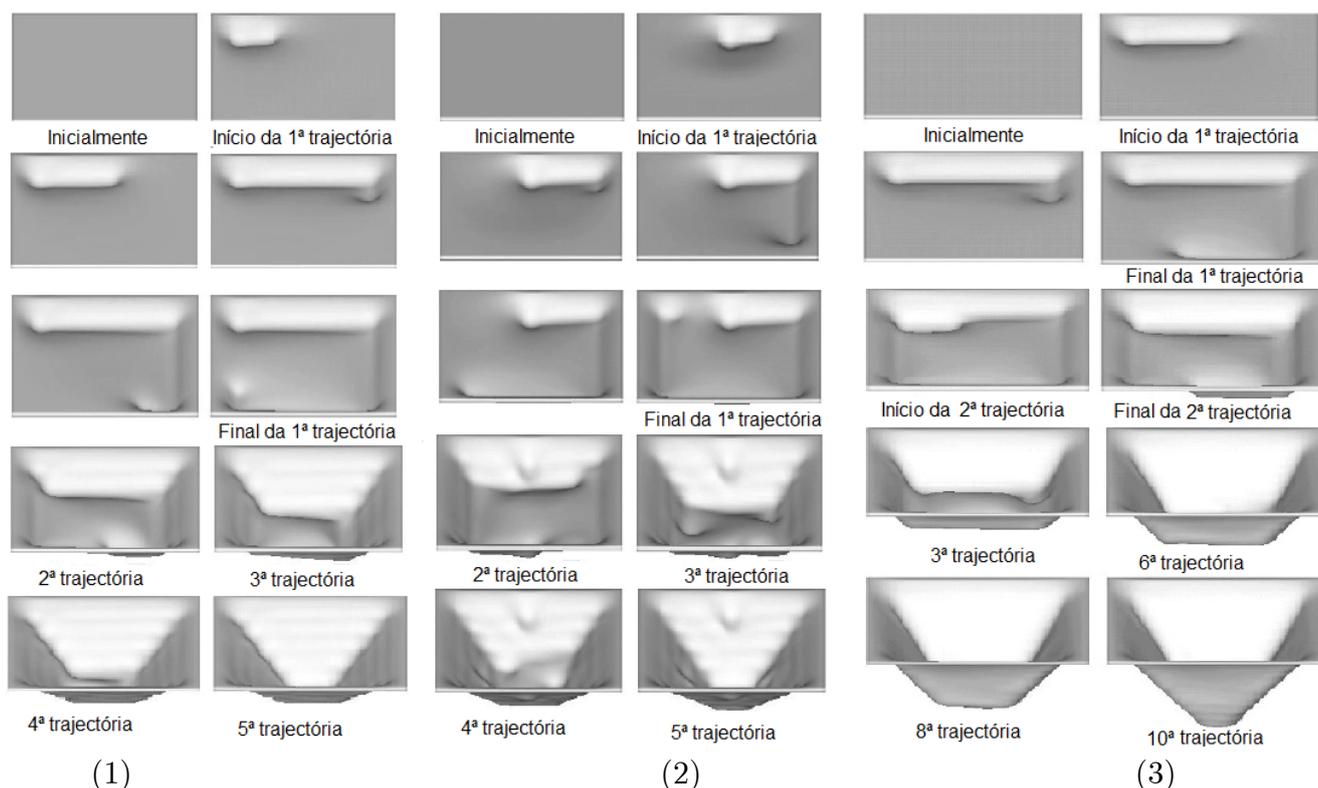


Figura 40 – Simulação computacional das duas trajectórias [MIN08].

Pela análise da simulação numérica apresentada na Figura 40, pode-se verificar que a trajectória para a ferramenta de conformação mais indicada é a trajectória (a) aplicada na simulação (1), pelo facto de apresentar melhor qualidade superficial em relação à trajectória (b). Na simulação (3) o aumento do declive da parede fez melhorar a qualidade superficial do componente final conjugado com o uso da trajectória (a),

pelo facto de as curvas de nível deixadas pela passagem da ferramenta encobrirem a rugosidade com o aumento do ângulo da parede, embora com um passo vertical igual em todas as simulações.

A

Figura 41 mostra a malha de elementos finitos dos componentes finais obtidos nas três simulações. Como se pode visualizar, a malha de elementos finitos para a simulação (3) é mais homogénea e sem distorções. A posição inicial da ferramenta de conformação provocou distorção da malha de elementos finitos na simulação (2), devido à diminuição súbita da espessura da chapa na posição inicial de contacto da ferramenta, com o incremento vertical, enquanto que na simulação (1) a posição inicial da ferramenta de conformação foi encoberta pela deformação bi-axial da chapa nos cantos da geometria quadrangular em cada trajectória.

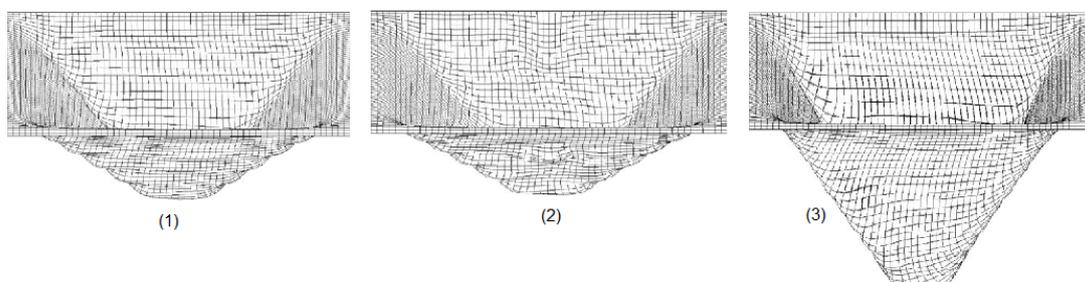


Figura 41 – Malha de elementos finitos das conformações obtidas [MIN08].

Capítulo 3

3. Enquadramento e objectivos

3.1 Enquadramento da pesquisa bibliográfica efectuada

O fabrico de componentes em chapa utilizando o processo de conformação incremental assimétrica por único ponto, possui parâmetros que podem ser controlados e que influenciam o estado tribológico da superfície da chapa. As principais variáveis segundo vários autores são:

- Espessura da chapa;
- Diâmetro da ferramenta;
- Velocidade de rotação da ferramenta;
- Velocidade relativa da ferramenta sobre a superfície de trabalho;
- Trajectória de conformação;
- Incremento vertical, ΔZ ;
- Lubrificação.

Os investigadores Ham e Jeswiet [HAM06] efectuaram dois tipos de ensaios. Num primeiro ensaio experimental analisaram como a rotação e velocidade relativa da ferramenta sobre a área de trabalho da chapa e a dimensão do passo vertical afectam o ângulo máximo da parede da chapa. No segundo ensaio experimental analisaram a influência do diâmetro da ferramenta, dimensão do passo vertical e da espessura no aumento do ângulo da parede da chapa conformada.

As conclusões e os resultados obtidos nos ensaios experimentais feitos por estes investigadores já foram apresentados no capítulo 2, durante a investigação, compreensão e descrição dos parâmetros que influencia a conformação da chapa.

A correlação apresentada por estes investigadores [HAM06] na Figura 42, mostra o comportamento do ângulo máximo, ϕ_{\max} , do declive da parede do componente em alumínio AA3003-O, em função da espessura e do diâmetro da ferramenta. Através da interacção destes parâmetros concluir-se que uma maior espessura de chapa conjugada com um diâmetro de ferramenta mais pequeno possibilita o aumento do declive da parede da chapa na conformação.

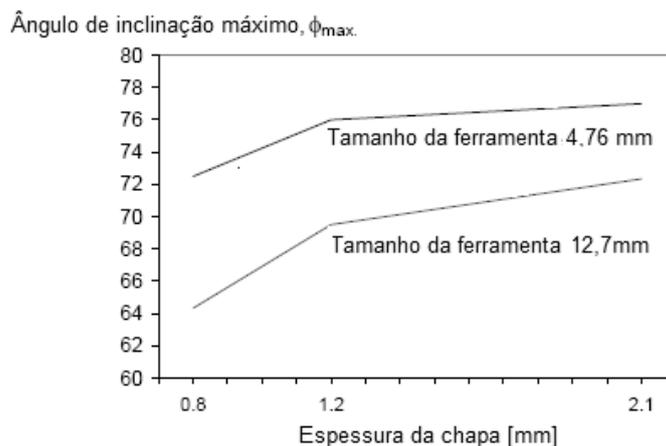


Figura 42 – Comportamento do ângulo máximo da parede em função da espessura chapa e do diâmetro da ferramenta [HAM06].

Qualquer produto resultante de um processo de fabrico tem o seu custo de produção. Portanto, não se pode deixar de referir no caso concreto da estampagem incremental a relação dos parâmetros do processo no custo de produção de um componente. A Figura 43 ilustra o esquema que relaciona os vários parâmetros da estampagem incremental com o tempo que se vai reflectir no custo total da conformação do componente.

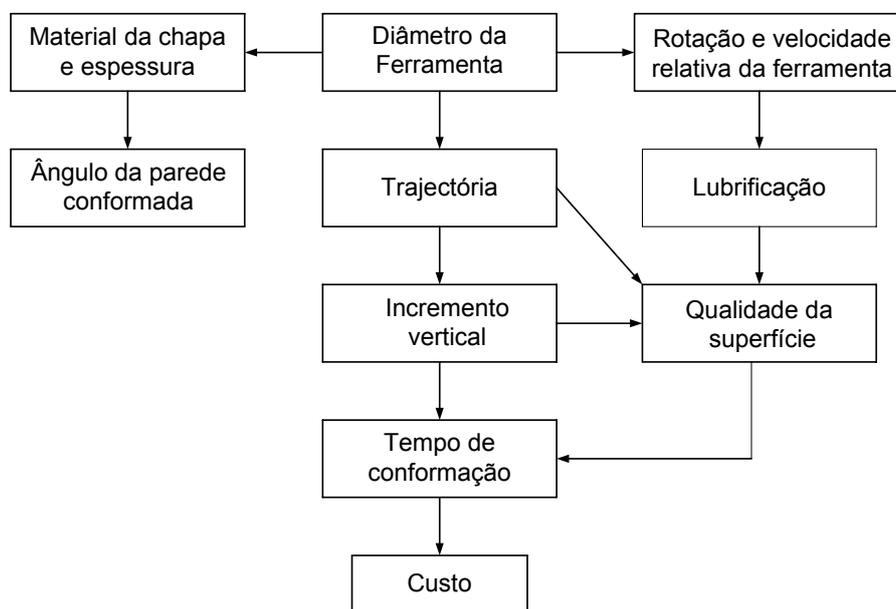


Figura 43 – Representação esquemática da relação dos vários parâmetros da estampagem incremental.

Pela interpretação do esquema da Figura 43, pode-se perceber melhor toda relação entre os parâmetros da estampagem descritos no capítulo anterior e verificar que acabamento superficial do componente é resultante para o aumento do custo.

Na conformação de uma geometria por estampagem incremental assimétrica por único ponto, como por exemplo a conformação de uma pirâmide quadrangular ou de um cone, os movimentos necessários para a ferramenta são:

- A ferramenta pressiona a chapa com um determinado incremento vertical;
- Movimenta-se sobre o plano de trabalho da chapa descrevendo a forma geométrica pretendida;
- Após a execução dos passos descritos nos dois tópicos anteriores, a ferramenta movimenta-se na horizontal com um pequeno incremento, para o interior da geometria criada inicialmente e também com um determinado passo vertical.

Através da repetição sucessiva dos passos descritos anteriormente, o componente é conformado gradualmente. Portanto, este processo de conformação é designado por estampagem incremental por único ponto devido às repetições dos movimentos por uma única ferramenta na formação da geometria da peça de modo progressivo.

O passo vertical da ferramenta de conformação na estampagem incremental influencia significativamente a qualidade da superfície do componente produzido. A Figura 44 mostra o comportamento da rugosidade da superfície em função do aumento do incremento vertical.

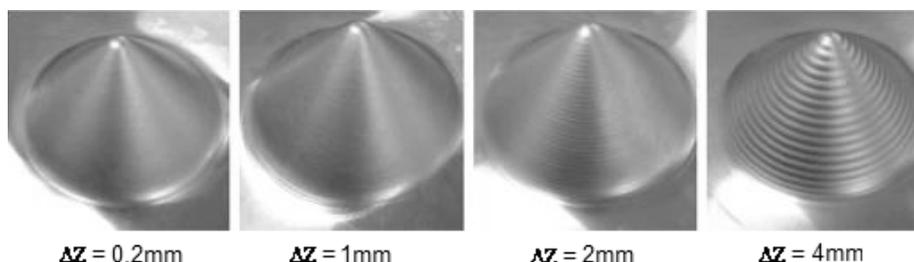


Figura 44 – Influência do passo vertical na conformação por estampagem incremental assimétrica por único ponto.

A variação do declive da geometria da peça durante a conformação tem igual implicância no acabamento superficial, ou seja, também será necessário adequar o incremento vertical ao ângulo da parede da chapa utilizando um passo vertical variável, com a finalidade de diminuir a dimensão da rugosidade superficial deixada pela trajectória da ferramenta.

O estado da arte relativamente à exposição dos mecanismos que provocam o aumento da deformação só começaram recentemente a aparecer em artigos científicos, no entanto não existe uma resposta que justifique o seu aumento durante o processo de estampagem incremental por único ponto. A provável resposta é a combinação de vários fenómenos referidos no capítulo 2 na secção 2.2.1.

A tensão de corte ao longo da espessura é uma das principais ocorrências, pelo facto de ter sido estudada por simulação numérica e verificada em ensaios experimentais por Eyckens et al [EYC08]. O mecanismo de dobra sob tensão proposto por Emmens e Boogaard [EMM08b] é igualmente um bom fundamento para justificar o aumento da deformação na estampagem incremental assimétrica por único ponto.

Através da revisão bibliográfica efectuada no Capítulo 2 verifica-se que foram feitos muitos estudos experimentais no âmbito da caracterização dos parâmetros que influenciam a estampagem incremental por único ponto. Contudo, a simulação computacional do processo não está ao mesmo nível, ou seja, a simulação numérica como ferramenta auxiliar para prever o comportamento da conformação também possui variáveis que influenciam os resultados simulados. Nomeadamente, as características do comportamento do material, tipo de método de integração temporal e tipo de elemento finito são os maiores problemas na fiabilidade dos resultados numéricos.

3.2 Objectivos

Após este breve enquadramento sobre a pesquisa bibliográfica acerca da estampagem incremental, especificamente sobre a estampagem incremental assimétrica por único ponto, é necessário definir uma estratégia para ser efectuada análise numérica neste trabalho. O desenvolvimento da análise numérica deste trabalho vai se apoiar nos conhecimentos adquiridos, principalmente nos que influenciam os resultados das simulações numéricas.

Os resultados experimentais efectuados por vários investigadores [BOU07; HEN08; VER08, BAM05] serão o apoio ao capítulo seguinte, com o intuito de estabelecer um ponto de comparação entre os resultados obtidos durante as simulações numéricas e o ensaio experimental. A comparação entre os resultados consiste em validar os resultados obtidos nas simulações.

O desenvolvimento da análise numérica neste trabalho implica o uso do método de integração temporal implícito, uso de elemento finito sólido e selecção do elemento finito com melhor convergência de resultados. Posteriormente, comparação de resultados com o uso do elemento RESS (do inglês *Reduced enhanced solid-shell*) e análise da simulação da conformação de um componente em alumínio.

Visto a este trabalho ter um carácter de inicialização à investigação do processo de estampagem incremental assimétrica por único ponto, tem o intuito também de apresentar perspectivas para desenvolvimentos de futuros trabalhos no âmbito da simulação numérica deste processo de conformação.

Capítulo 4

4. Simulação numérica computacional

Na maioria dos processos, a modelação numérica computacional ajuda a explicar e a entender determinados parâmetros, como o estado de tensão e de deformação do material e os limites de deformação da chapa, complementando a análise experimental.

A estampagem incremental assimétrica por único ponto é caracterizada por ser uma deformação plástica local e cíclica na chapa, com várias peculiaridades, sendo estas estudadas através de modelos analíticos simplificados e por simulação numérica computacional por elementos finitos. Porém, os modelos analíticos devolvem resultados aproximados que podem conduzir a conclusões menos esclarecedoras. A utilização do método por elementos finitos através de simulação computacional, veio mostrar pré-resultados mais exactos e conclusivos acerca do processo mecânico em causa.

No presente capítulo, a simulação numérica vai incidir na análise do comportamento de convergência dos elementos finitos 3D do *software* ABAQUS, ou seja, verificar qual deles permite maior aproximação aos resultados experimentais com o refinamento da malha de elementos. Seguidamente, será feita análise de tensões e deformações e espessura da chapa, comparação de resultados obtidos com outro elemento finito implementado como “*user subroutine*” (RESS).

4.1 Seleção do elemento finito

A fiabilidade da simulação numérica depende de vários parâmetros, como já referenciados no capítulo 2, secção 2.7, onde o tipo de análise, tipo de endurecimento usado e o tipo elemento finito influenciam e proporcionam diferentes resultados na simulação numérica. Também o tipo de elemento finito seleccionado em combinação com o refinamento adequado da rede de elementos finitos pode aproximar a simulação numérica ao ensaio experimental.

Analisar-se-á a influência da combinação do tipo de elemento finito com o refinamento da malha de elementos da chapa por comparação com resultado experimental. Os tipos de elementos finitos que serão analisados são os elementos finitos de 8 nós, ou seja, os elementos tridimensionais hexaédricos com diferentes tipos de integração. Os elementos finitos 3D hexaédricos que serão utilizados e estão

presentes no *software* ABAQUS são, C3D8 (integração reduzida selectiva), C3D8R (integração reduzida pura) e o C3D8I (modos incompatíveis).

O método de análise seleccionado para a simulação numérica é o implícito. A sua aptidão para permitir obter uma melhor aproximação de resultados aos reais é o principal fundamento pela sua selecção.

4.1.1 Modelo material isotrópico

A simulação numérica em desenvolvimento nesta secção consiste na análise e optimização do número de elementos finitos necessários na malha de elementos da chapa para obter resultados mais próximos dos reais, tendo como consideração o comportamento isotrópico do material. A selecção do tipo de elementos 3D do *software* de simulação vai estar dependente dos resultados obtidos, ou seja, da maior aproximação aos resultados dos ensaios experimentais.

O comportamento elasto-plástico dos materiais está sempre presente nos processos industriais de conformação de componentes em chapa. Na produção de um componente, a análise prévia do comportamento plástico do material é essencial. Normalmente o ensaio de tracção uniaxial é o método utilizado para conhecer a resposta às solicitações que serão impostas. O Gráfico 1 apresenta a curva tensão vs deformação teórica introduzida no *software* de simulação numérica (ABAQUS), obtida a partir da lei de *Swift* de endurecimento isotrópico.

A curva teórica do comportamento plástico do material, tensão vs deformação, é dada pela seguinte equação de endurecimento isotrópico, segundo a lei de *Swift*:

$$\sigma = K \cdot (\varepsilon + \varepsilon_o)^n . \quad (1.20)$$

Onde ε é a deformação uniaxial e K , ε_o , n são parâmetros do material e σ tensão uniaxial.

Parâmetros do material	
Módulo de <i>young</i> (E)	72600 MPa
Coefficiente de <i>poisson</i> (ν)	0,36
Coefficiente de força (K)	180 MPa
Coefficiente de endurecimento (n)	0,229
ε_o	0,00057

Tabela 2 – Parâmetros do material, alumínio AA3103-O [BOU07].

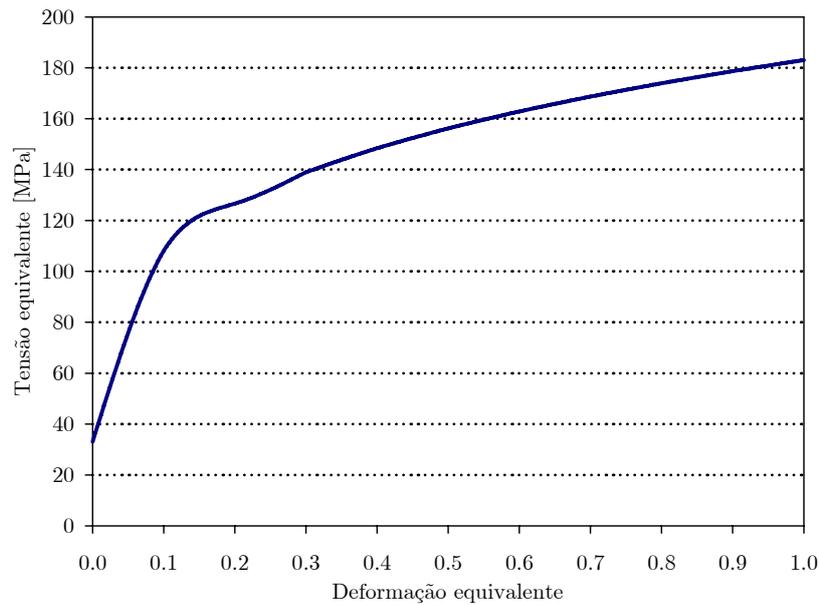


Gráfico 1 – Curva tensão em função da deformação teórica do alumínio AA 3103-O.

4.1.1.1 Teste aos tipos de elementos finitos

O teste aos vários tipos de elementos finitos 3D do ABAQUS, consiste no teste em linha, ou seja, resume-se numa versão simplificada da estampagem incremental, que neste caso tem o objectivo servir como método de selecção do tipo de elemento finito hexaédrico.

O ensaio experimental do teste em linha foi efectuado numa máquina de estampagem incremental por Bouffieux et al. [BOU07]. Este consiste em efectuar uma trajectória rectilínea com a ferramenta esférica sobre a chapa como está representado na Figura 45. A ferramenta possui 10mm de diâmetro e as dimensões da chapa são, 182mmx182mm com uma espessura de 1,5mm. O movimento da ferramenta é composto por 5 passos, inicialmente é feito um incremento vertical de 5mm (1), em seguida a ferramenta desloca-se na horizontal com um deslocamento de 100mm (2) à mesma profundidade do 1º incremento. Ininterruptamente é feito um segundo incremento vertical de 5mm (3), ficando a ferramenta agora à profundidade de 10mm, esta inverte o sentido voltando ao ponto inicial (4) e para finalizar a ferramenta sai da superfície de trabalho (5).

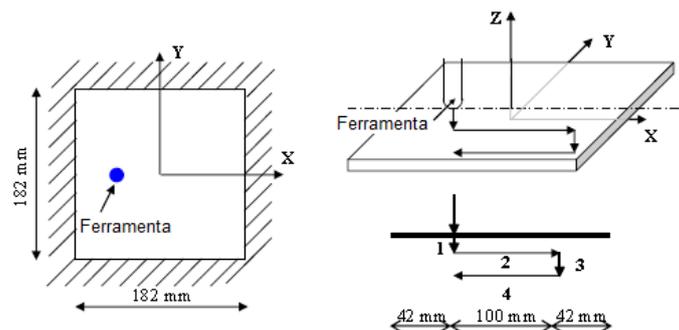


Figura 45 – Localização e trajetória da ferramenta [BOU07].

Relativamente ao contacto entre a ferramenta esférica e a chapa, vai ser atribuído um coeficiente de atrito de 0.05. O uso deste valor deve-se ao facto de ser um coeficiente normalmente encontrado em artigos científicos sobre simulação numérica por diversos investigadores em estampagem incremental.

O Gráfico 2 apresenta o comportamento da força ao longo da trajetória da ferramenta durante o ensaio experimental.

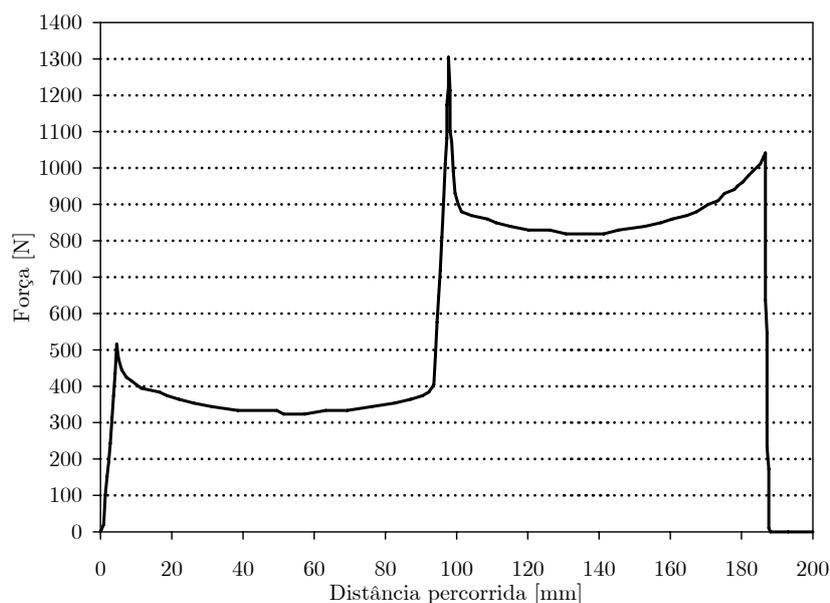


Gráfico 2 – Ensaio experimental do teste em linha [BOU07].

Como se pode observar existem duas regiões com valores de força distintas no decorrer do ensaio experimental. Os dois picos de força correspondem aos incrementos verticais impostos pela ferramenta em diferentes etapas do teste em linha. O comportamento distinto do valor da força nas duas fases do ensaio deve-se ao endurecimento do material, isto é, o material por ter sido deformado numa primeira fase encruou o material, sendo necessário maior força para deformar novamente a chapa na passagem da ferramenta pelo mesmo local.

A estratégia adoptada para seleccionar o elemento finito do software de simulação ABAQUS/Standard mais adequado, consiste em refinar a malha ao longo da espessura da chapa de modo a incluir mais pontos de integração ao longo da espessura da chapa, ou seja, aumentar o número de elementos até que o valor da força na simulação numérica se aproxime do valor real da força obtida no ensaio experimental. O elemento finito que permitir melhor aproximação ao comportamento real da força será o seleccionado juntamente com o número de camadas de elementos finitos a adoptar ao longo da espessura da chapa.

O objectivo dos testes aos elementos finitos 3D é determinar qual destes elementos permite menor diferenciação de resultados nas simulações numéricas em relação ao ensaio experimental.

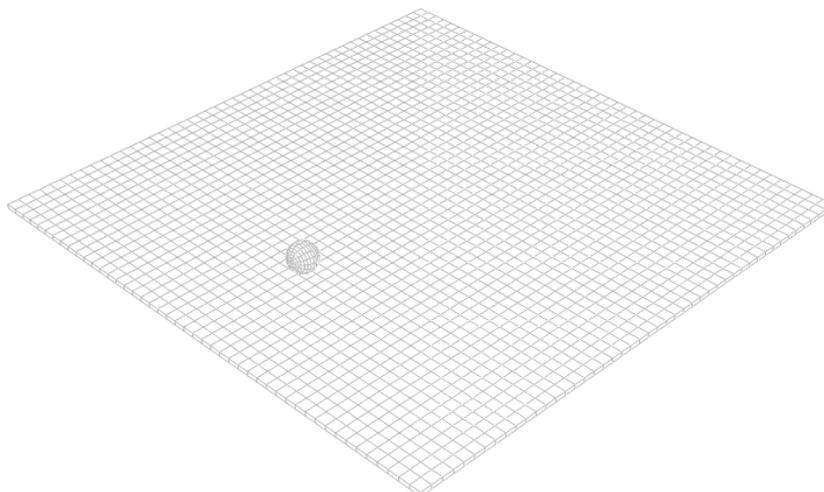
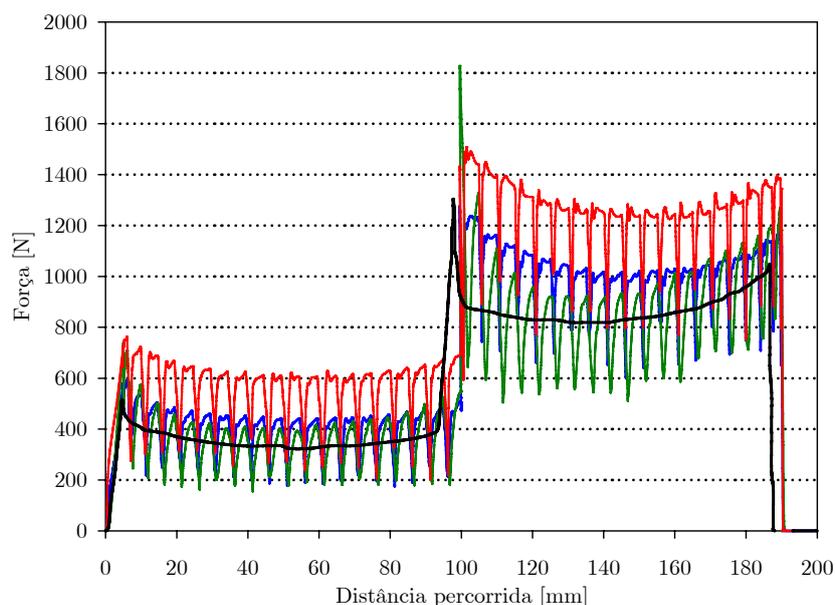


Figura 46 – Malha de elementos adoptada para o teste em linha (46x46 elementos no plano).

Os resultados obtidos nesta primeira simulação numérica são relativos a uma malha com 2116 elementos na chapa numa única camada na direcção da espessura.

Os gráficos seguintes apresentam os resultados em função do aumento do número de camadas de elementos finitos ao longo da espessura da chapa.



— Ensaio experimental — Elemento C3D8I — Elemento C3D8R — Elemento C3D8

Gráfico 3 – Simulação numérica com uma única camada de elementos finitos na espessura.

Verifica-se pelos resultados obtidos que a simulação feita com o elemento C3D8R (apenas 1 ponto de integração ao longo da espessura) para uma camada de elementos, os valores da força nos dois incrementos verticais são superiores aos valores obtidos com os outros elementos. No entanto quando a ferramenta esférica se movimenta sobre a superfície da chapa a força baixa e mantém próximas dos valores obtidos com o elemento C3D8I. Quanto ao elemento C3D8 os valores da força ao longo do deslocamento da ferramenta dispersam-se relativamente aos outros elementos. Nesta primeira análise o elemento C3D8I é o elemento que apresenta maior aproximação ao ensaio experimental, possivelmente justificado pelo facto deste elemento possuir um comportamento à flexão melhorado através do método dos modos incompatíveis.

Tipo de elemento finito 3D	Tempo do CPU (seg.)
C3D8I	5279.4
C3D8R	2996.6
C3D8	3963.9

Tabela 3 – Tempo de processamento da simulação com uma camada de elementos finitos.

Quanto aos tempos de simulação para uma única camada de elementos o elemento C3D8I exigiu maior tempo de simulação.

Nesta segunda simulação numérica a malha da chapa é composta por 4232 elementos na chapa dividida em duas camadas na direcção da espessura.

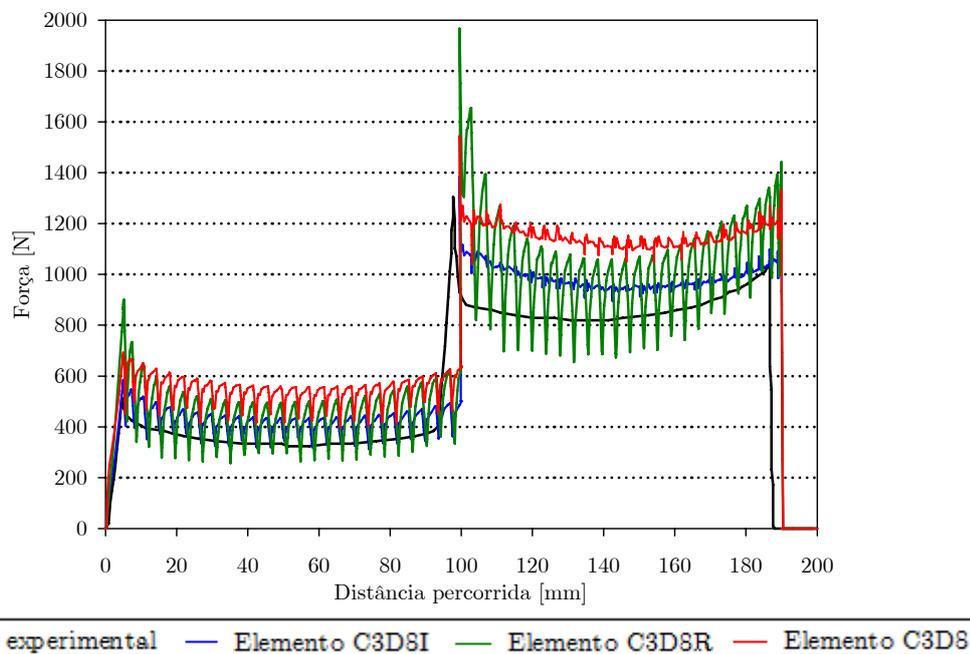


Gráfico 4 – Simulação numérica com 2 camadas de elementos finitos na espessura.

Observa-se nesta situação a diminuição da instabilidade numérica para os elementos C3D8I e C3D8 com o refinar da malha ao longo da espessura da chapa, com os valores a aproximar-se do ensaio experimental, nomeadamente para o elemento C3D8I nos incrementos verticais. Porém, o elemento C3D8R distancia-se dos resultados em comparação aos outros elementos finitos analisados.

Tipo de elemento finito 3D	Tempo do CPU (seg.)
C3D8I	10426
C3D8R	5681.5
C3D8	7525.5

Tabela 4 – Tempo de processamento da simulação com 2 camadas de elementos finitos.

Quanto aos tempos de simulação o elemento C3D8I exigiu maior tempo de processamento para efectuar a simulação numérica, enquanto o elemento C3D8R necessitou de menor tempo, devido ao facto de possuir menos pontos de integração.

A presente simulação é realizada com o dobro do número de camadas em relação à simulação anterior, com a malha a possuir 8464 elementos em quatro camadas ao longo da espessura.

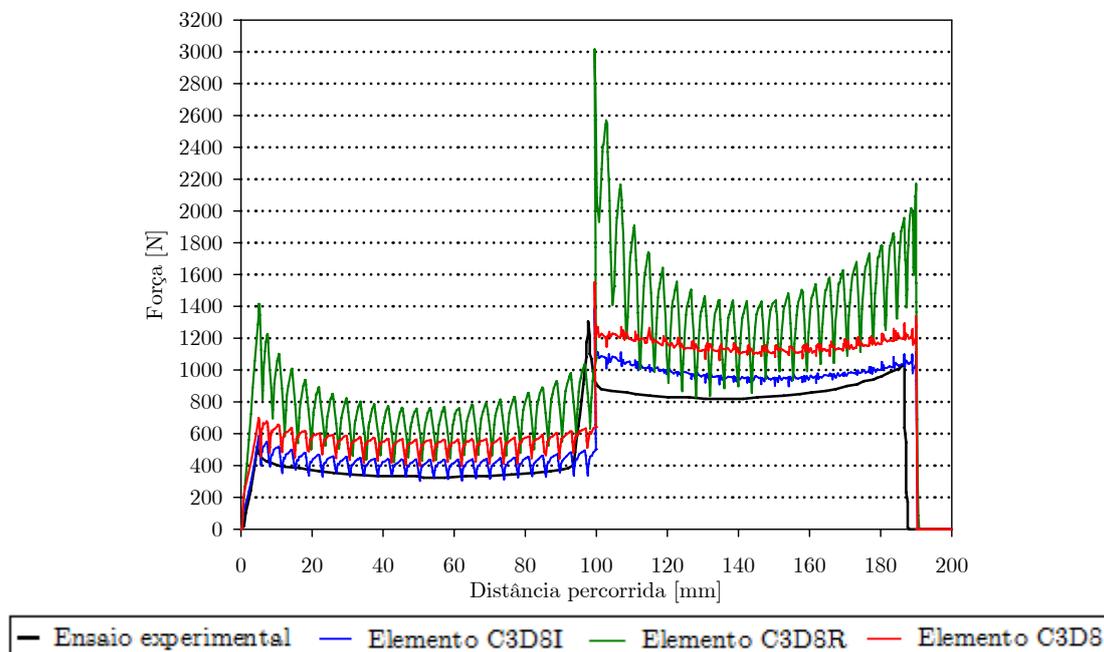


Gráfico 5 – Simulação numérica com 4 camadas de elementos finitos na espessura.

Com o duplicar do número de camadas com o elemento C3D8R na direcção da espessura os resultados obtidos acentuam a sua diferenciação relativamente aos resultados obtidos com os outros elementos. Provavelmente devido a efeitos de “*shear locking*”, devido à reduzida espessura de cada elemento finito. Os elementos C3D8I e C3D8 estão estabilizados com os valores da força durante os testes em linha a não se alterem significativamente.

Tipo de elemento finito 3D	Tempo do CPU (seg.)
C3D8I	23050
C3D8R	15970
C3D8	17512

Tabela 5 – Tempo de processamento da simulação com 4 camadas de elementos finitos.

Novamente, os tempos de processamento da simulação do teste em linha para cada elemento finito mantiveram o mesmo comportamento, com elemento C3D8I a precisar de maior tempo de simulação em relação aos restantes.

Para finalizar, nesta última simulação efectuada com os elementos finitos do ABAQUS, a chapa possui oito camadas de elementos finitos na direcção da espessura com um total de 16928 elementos.

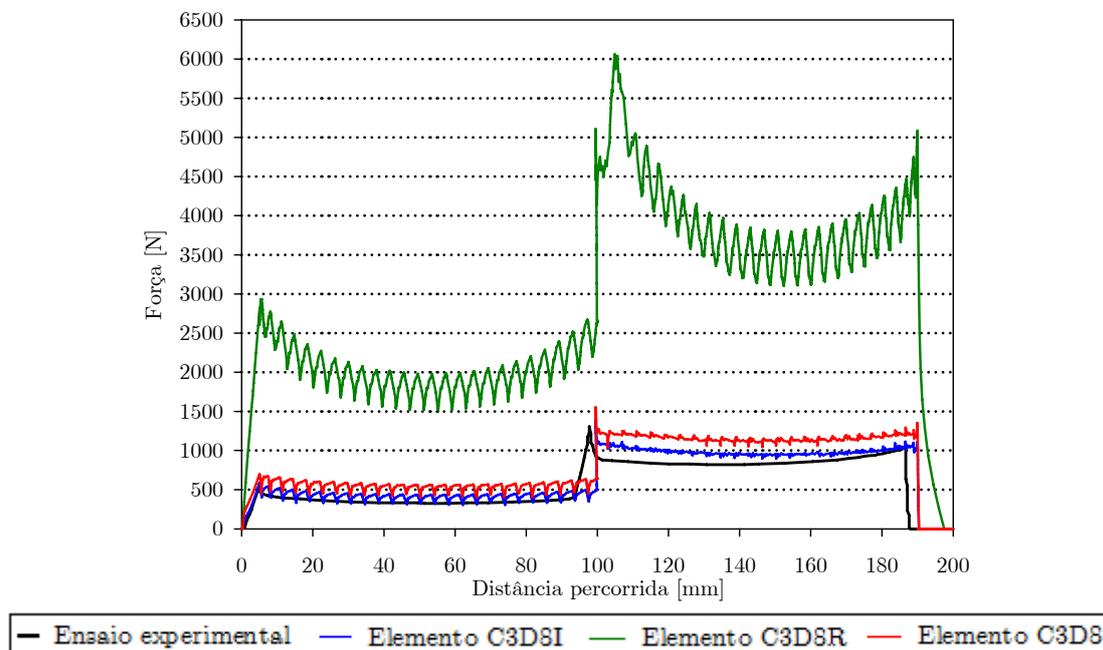


Gráfico 6 – Simulação numérica com 8 camadas de elementos finitos na espessura.

Nos resultados obtido nesta última simulação numérica verifica-se que o comportamento da força se mantém inalterado, ou seja, não houve qualquer alteração do comportamento da força em função ao deslocamento da ferramenta para os elementos C3D8I e C3D8 com o aumento de quatro camadas para oito. Apenas o elemento C3D8R acentuou a sua instabilidade numérica com a diminuição da espessura do próprio elemento finito, onde o *shear locking* ainda se tornou mais evidente.

Tipo de elemento finito 3D	Tempo do CPU (seg.)
C3D8I	75721
C3D8R	69177
C3D8	111151

Tabela 6 – Tempo de processamento da simulação com 8 camadas de elementos finitos.

Para esta última simulação o elemento finito que exigiu maior tempo de simulação foi o C3D8 na execução do teste em linha, denotando mais dificuldade de convergência que o C3D8I.

4.1.1.2 Refinamento da malha no plano

Após as simulações dos testes em linha com uma malha com um refinamento homogêneo, Figura 46, no plano, apresentam-se seguidamente os resultados relativamente à influência do tipo de refinamento nos resultados numéricos. O elemento que melhor resultado apresentou nos testes em linha foi o elemento finito C3D8I, com resultados convergentes com o aumento do refinamento da malha em espessura. Dos resultados obtidos para o elemento finito C3D8I, embora os resultados obtidos sejam convergente a partir de duas camadas, o número de camadas na espessura seleccionado para esta análise foi de 4 camadas. O tipo de refinamento em análise é o refinamento local da malha no plano, ou seja, a malha mantém o mesmo número de elementos finitos em cada camada, no entanto esta é refinada ao longo da região de passagem da ferramenta esférica, Figura 47.

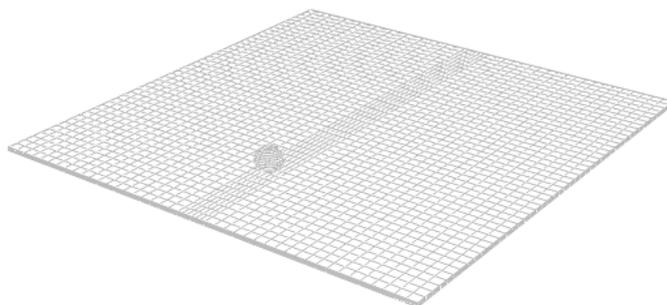


Figura 47 – Malha refinada na região de passagem da ferramenta (46x46).

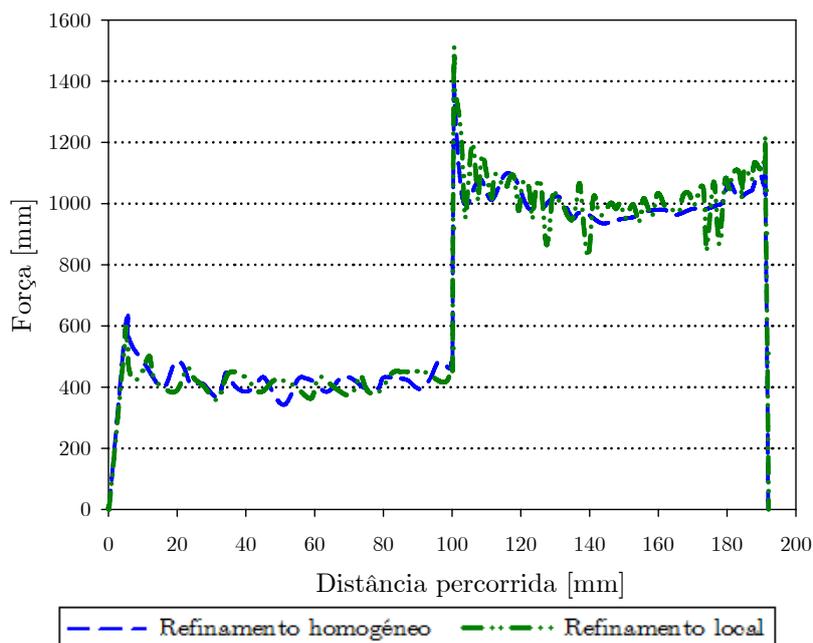


Gráfico 7 – Simulação em função do refinamento da malha.

Através do Gráfico 7, pode-se ver que o refinamento local da malha não introduziu qualquer melhoria no resultado numérico. O resultado obtido com a malha com refinamento homogéneo mostrou que na segunda passagem da ferramenta as oscilações foram menores, também é de referir que a força no segundo incremento é menor com esta malha.

Tipo de refinamento	Tempo do CPU (seg.)
Refinamento homogéneo	21904
Refinamento local	29016

Tabela 7 – Tempo de simulação dos dois tipos de refinamento.

Em relação aos tempos, o refinamento local da malha aumentou o tempo necessário de simulação, portanto nesta situação o refinamento local não reflectiu melhoria no resultado da simulação.

4.1.1.3 Teste ao elemento finito RESS

Inicialmente esta secção apresenta um resumo que descreve genericamente o elemento RESS (*Reduced enhanced solid-shell*), a teoria mais pormenorizada que explica este elemento finito está no trabalho desenvolvido por Alves de Sousa et al. [SOU07]. Seguidamente será efectuado o teste em linha com o elemento RESS e comparado com o resultado obtido com o ensaio experimental e os elementos 3D do ABAQUS.

O elemento RESS é um elemento finito sólido genérico de 8 nós de integração reduzida no plano e número de pontos de integração arbitrário ao longo da espessura, Figura 48, combinado com o método das deformações acrescentadas. Diferenciando-se deste modo devido a permitir a implementação de um número arbitrário de pontos de integração de *Gauss* na direcção espessura numa única camada de elementos finitos. Esta é a principal característica que o distingue dos outros elementos finitos sólidos do ABAQUS, ou seja, evita o uso de várias camadas de elementos para aumentar o número de pontos de integração na direcção da espessura da chapa.

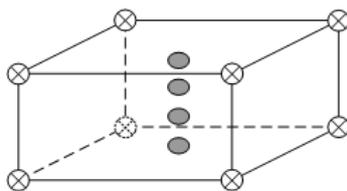


Figura 48 – Representação dos pontos de integração no elemento finito RESS [SOU07].

Nos elementos sólidos conhecidos, como se pode constatar através das simulações anteriormente realizadas, foi necessário o aumento das camadas de elementos na direcção da espessura para aumentar o número de pontos ao longo da espessura e aproximar os resultados ao ensaio experimental.

Assim, a título exemplificativo o problema do teste em linha com 16 pontos de integração ao longo da espessura, existe 8 camadas de elementos finitos da família C3D8. Tal corresponde a um número de 16928 elementos finitos com 8 nós. No caso do RESS, o mesmo número de pontos de integração ao longo da espessura é conseguido com 2116 elementos com 16 pontos de integração cada.

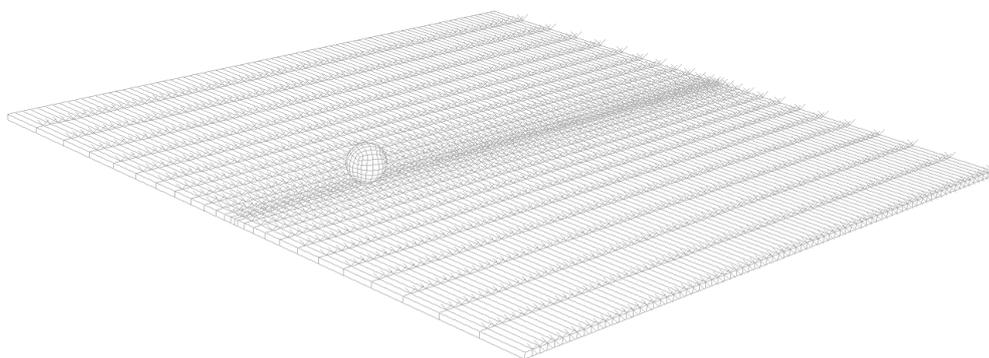


Figura 49 – Malha de elementos finitos adoptada para o RESS.

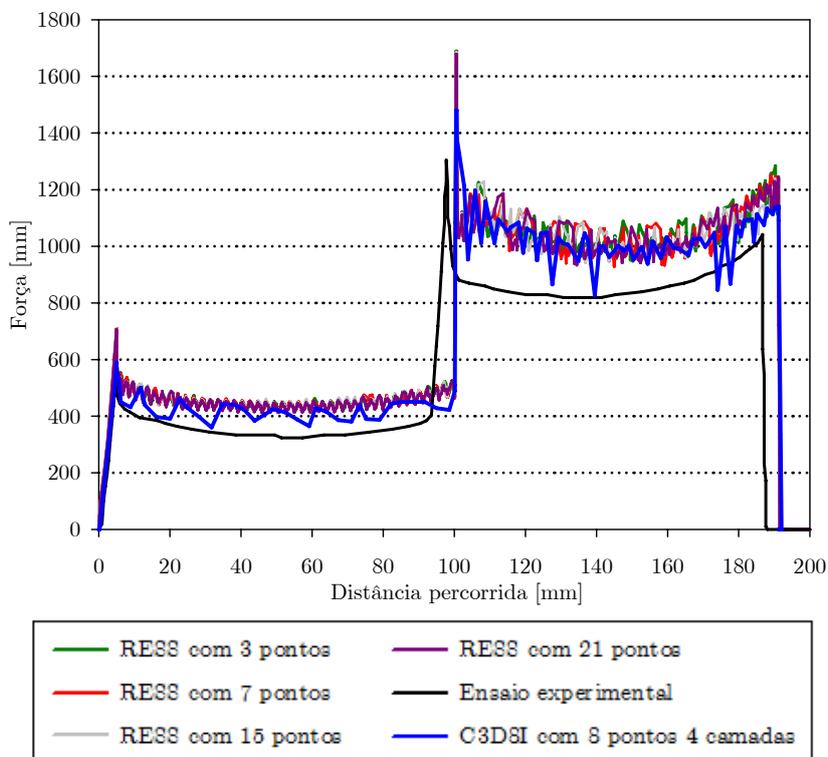


Gráfico 8 – Simulação numérica com o elemento finito RESS com diferente numero de pontos de integração na direcção da espessura.

Pelo Gráfico 8, os resultados obtidos em função do aumento do número de pontos de integração na espessura do elemento RESS, foram convergentes com o aumento de pontos de integração, sem qualquer diferença relevante de resultados entre as várias simulações. Comparativamente, o elemento C3D8I do ABAQUS, este na primeira passagem da ferramenta obteve maior aproximação ao ensaio experimental, no entanto, apresenta maior oscilação numérica. Na segunda passagem da ferramenta o comportamento é semelhante ao resultado obtido com o elemento finito RESS, diferenciando-se no resultado da força no segundo incremento vertical.

Elemento finito RESS	Tempo do CPU (seg.)
3 Pontos de integração	51422
7 Pontos de integração	138354
15 Pontos de integração	269498
21 Pontos de integração	227289

Tabela 8 – Tempo de processamento da simulação.

Quanto ao comportamento do tempo este aumenta com o aumento do número de pontos ao longo da espessura, no entanto verifica-se que para 15 pontos de integração o tempo é superior ao tempo resultante da simulação com 21 pontos, o que poderá denotar problemas relacionados com convergência e que deverão ser alvo de estudo mais aprofundado.

4.1.2. Análise da espessura

Das análises aos elementos finitos do software ABAQUS, seleccionou-se o elemento que obteve melhor aproximação ao ensaio experimental. Neste caso, o elemento seleccionado foi o elemento sólido C3D8I com quatro camadas de elementos finitos na direcção da espessura. O Gráfico 9 apresenta a variação da espessura da chapa durante o teste em linha.

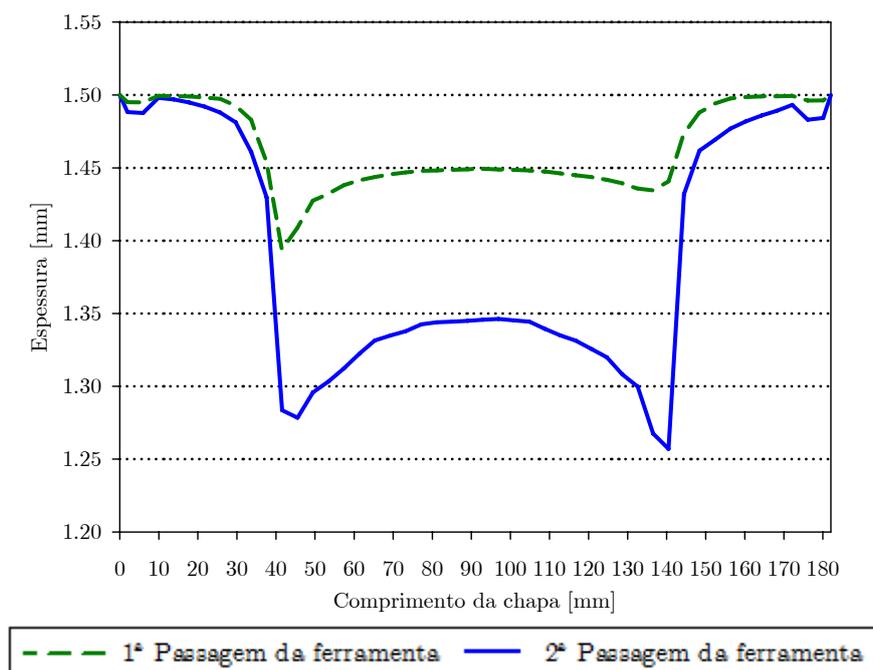


Gráfico 9 – Análise da espessura final da chapa após a passagem da ferramenta.

Através da observação do Gráfico 9, verifica-se que as regiões que apresentam diminuição acentuada da espessura da chapa são nas zonas dos incrementos verticais, nomeadamente o segundo incremento vertical permitiu maior redução de espessura da chapa. Quanto à diferença entre as duas passagens da ferramenta esférica, observa-se que a segunda passagem da ferramenta proporcionou um aumento significativo da redução da espessura ao longo do comprimento da chapa. Enquanto na primeira passagem a redução de espessura é pouco significativa. Apesar dos dois incrementos verticais serem de elevadas dimensões, comparados com os valores usados normalmente na estampagem incremental, estes não reflectiram uma redução acentuada da espessura. Este motivo deve-se ao facto de a área da chapa usada no teste em linha ser de grandes dimensões, possibilitando a ocorrência de deformação em regime elástico na região circundante à passagem da ferramenta.

4.1.3. Análise das tensões e deformações

Na presente secção apresenta-se e analisa-se o comportamento das componentes de tensão nas várias direcções após a passagem da ferramenta. Os resultados obtidos são referentes à simulação efectuada com quatro camadas de elementos na direcção da espessura com o elemento finito C3D8I. A Figura 50 representa a orientação dos eixos cartesianos, usado na simulação. A tensão na direcção σ_{11} é o sentido do movimento

relativo da ferramenta sobre o plano da chapa, a tensão na direcção σ_{33} é o sentido normal da ferramenta no passo vertical e a tensão na direcção σ_{22} é o sentido transverso ao movimento relativo da ferramenta. As representações gráficas das tensões nas várias direcções mostram o comportamento da tensão em duas diferentes secções da chapa.

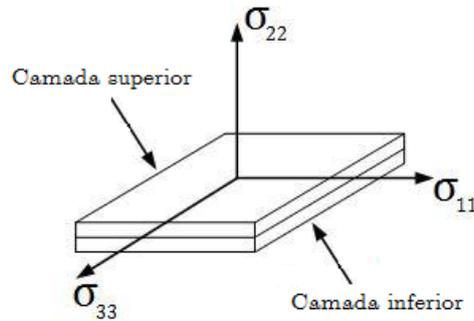


Figura 50 – Representação da orientação dos eixos cartesianos.

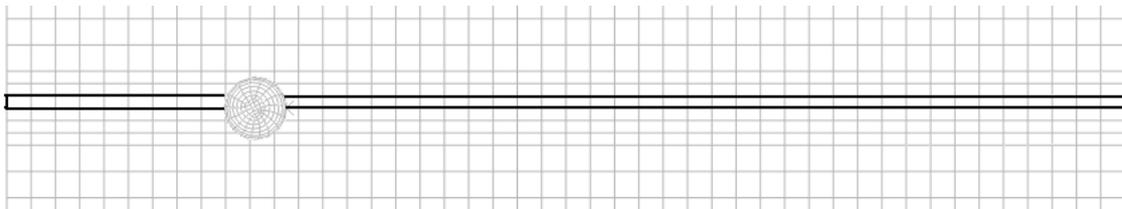


Figura 51 – Região da malha analisada.

A Figura 51 apresenta a região da malha que foi analisada para tirar os valores referentes às tensões e deformações na chapa ao longo da trajectória da ferramenta.

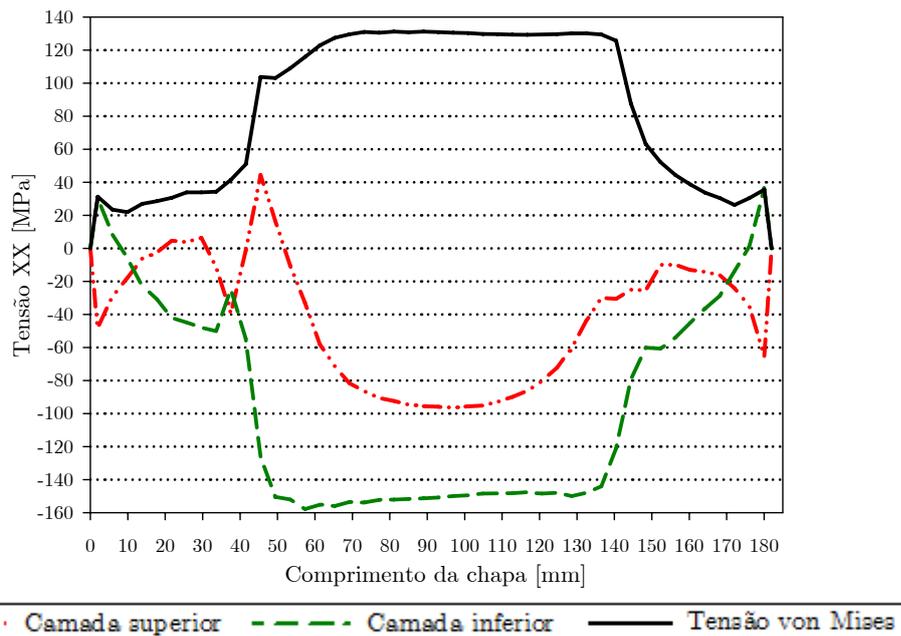


Gráfico 10 – Tensão na direcção XX (σ_{11}) na direcção da trajectória da ferramenta.

A partir do Gráfico 10, observa-se que a após a passagem da ferramenta de conformação os estados das tensões na direcção de movimento da ferramenta é maioritariamente de compressão em ambas as secções da chapa.

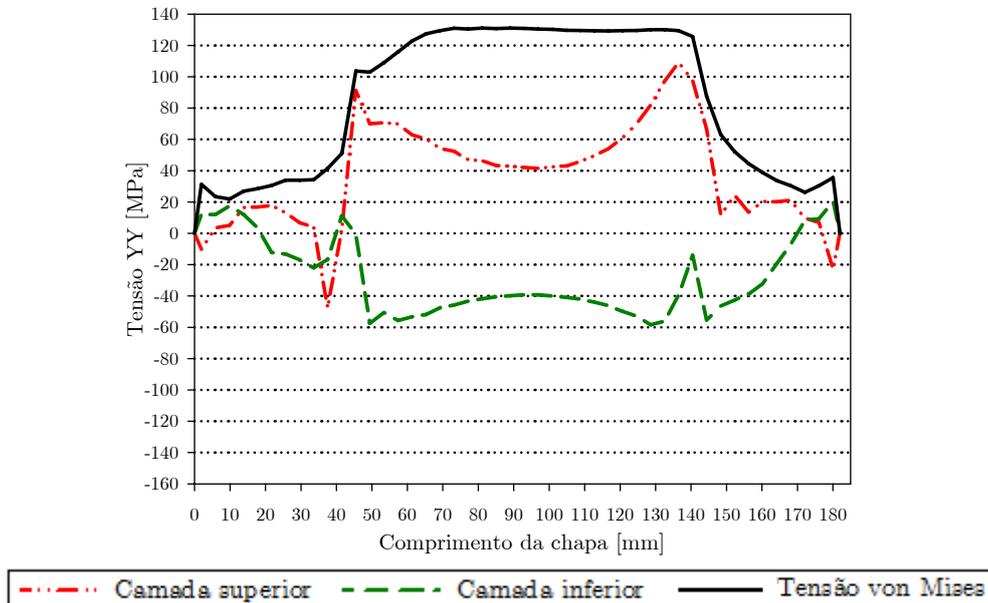


Gráfico 11 – Tensão na direcção YY (σ_{22}) transversal ao movimento da ferramenta.

O Gráfico 11 mostra que o estado das tensões se diferencia nas duas secções da espessura da chapa, com a camada superior num estado de tensão de tracção e a secção inferior submetida a um estado de compressão, evidenciando um comportamento de flexão na zona analisada.

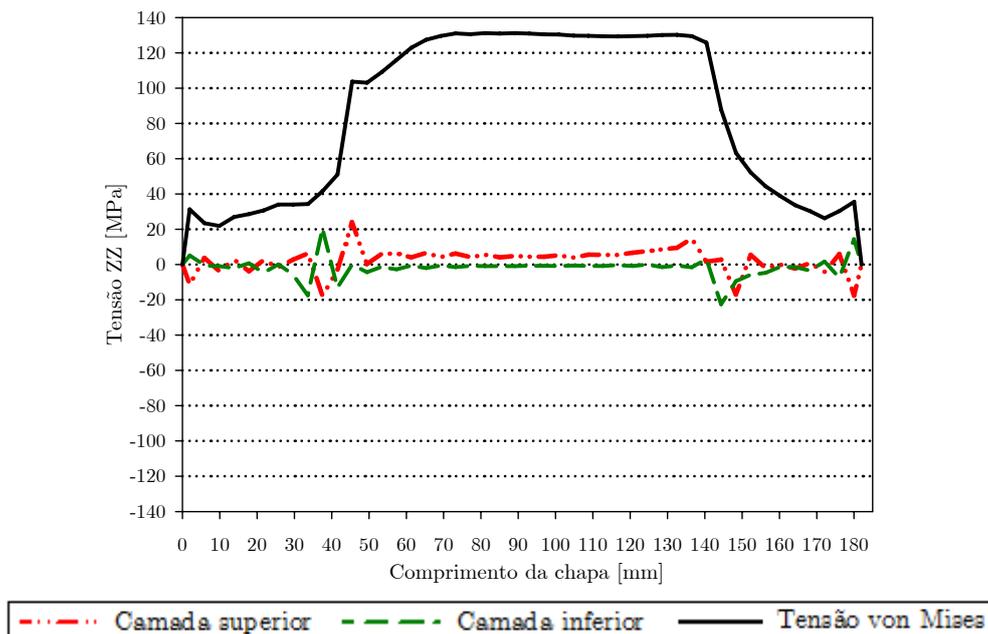


Gráfico 12 – Tensão na direcção ZZ (σ_{33}) normal à superfície da chapa.

O Gráfico 12 apresenta do estado de tensão na direcção do incremento vertical e como se observa, as tensões nas duas secções da espessura da chapa estão muito próximas e são quase insignificantes. Assim, verifica-se a existência de preponderância das componentes de tensão no plano da chapa, em detrimento das componentes normais.

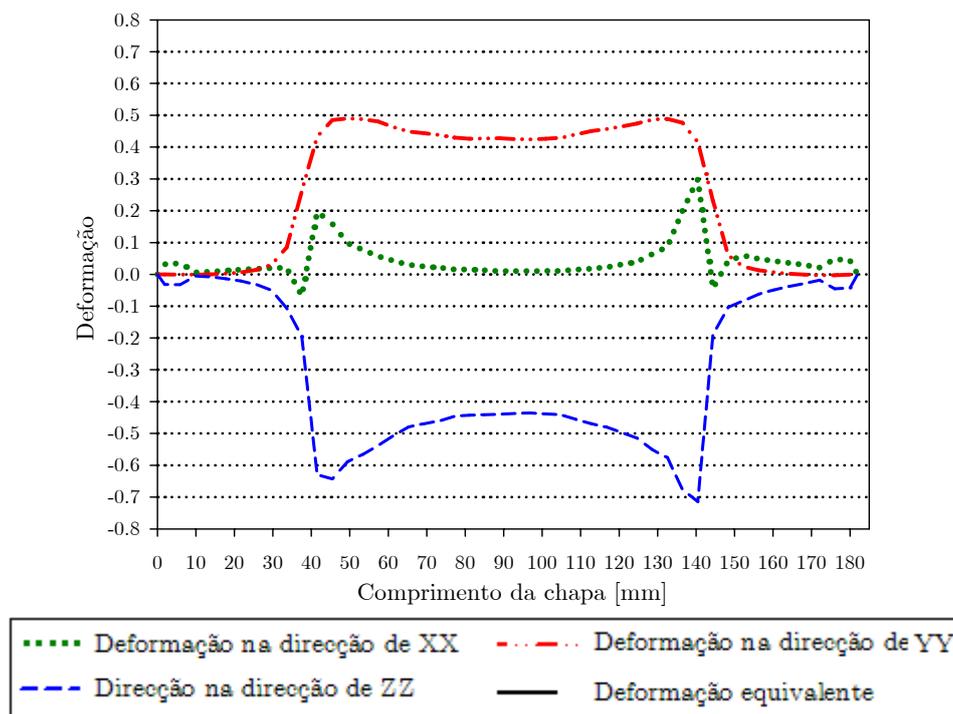


Gráfico 13 – Deformação na direcção dos três eixos.

Quanto às deformações nas três direcções, apresentadas no Gráfico 13, como era esperado a maior deformação ocorre na direcção normal à superfície da chapa, nomeadamente nas zonas dos incrementos verticais sobre a chapa. Na direcção transversal à direcção de movimento da ferramenta a deformação é tão significativa como na direcção normal à chapa. As deformações na direcção de movimento da ferramenta são insignificantes.

Embora as tensões normais σ_{xx} , σ_{yy} e σ_{zz} sejam aproximadamente as tensões principais σ_{11} , σ_{22} e σ_{33} respectivamente, são também analisadas as tensões de corte τ_{xy} , τ_{xz} e τ_{yz} apenas como complemento de informação.

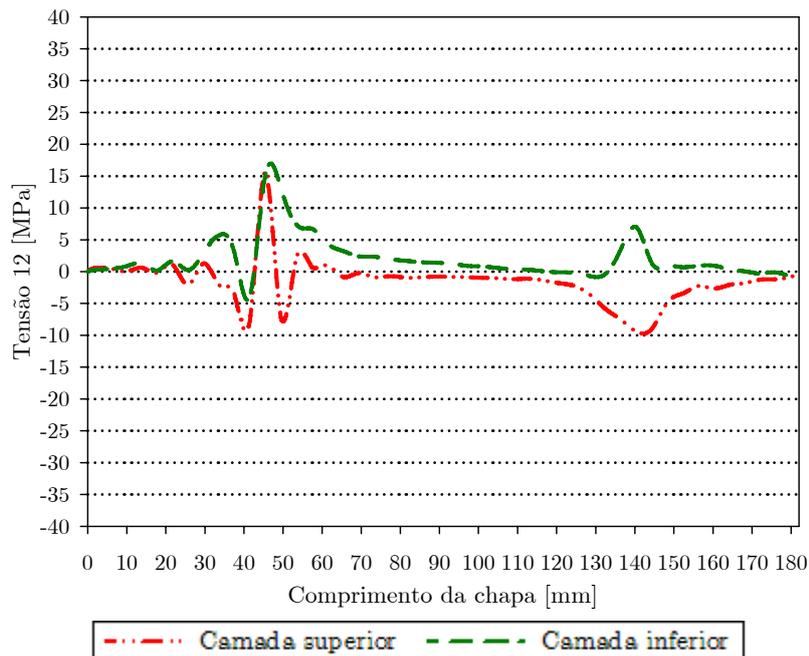


Gráfico 14 – Tensão de corte na direção XY.

As tensões de corte no plano da chapa são significativas na região do incremento, sendo o 1º incremento a proporcionar mais tensão de corte com o mesmo comportamento nas duas camadas da chapa. Na região do movimento horizontal da ferramenta as tensões de corte após a passagem da ferramenta são quase nulas.

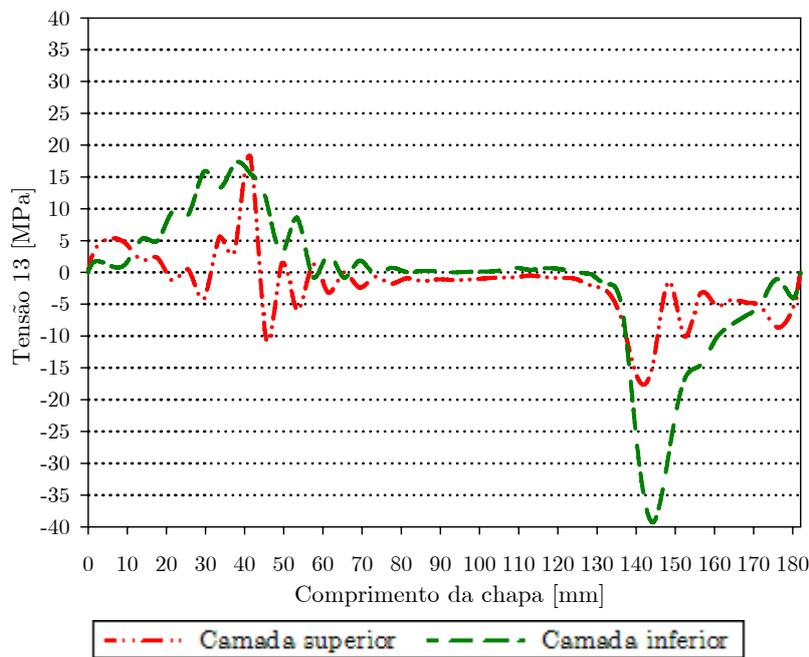


Gráfico 15 – Tensão de corte na direção XZ.

A tensão de corte apresentada no Gráfico 15 tem um comportamento similar ao estado de tensões de corte no plano (Gráfico 14) na zona da trajetória rectilínea da ferramenta esférica. As tensões de corte na zona do incremento vertical são superiores no 2º incremento vertical, sendo a camada inferior a reflectir o maior valor de tensão.

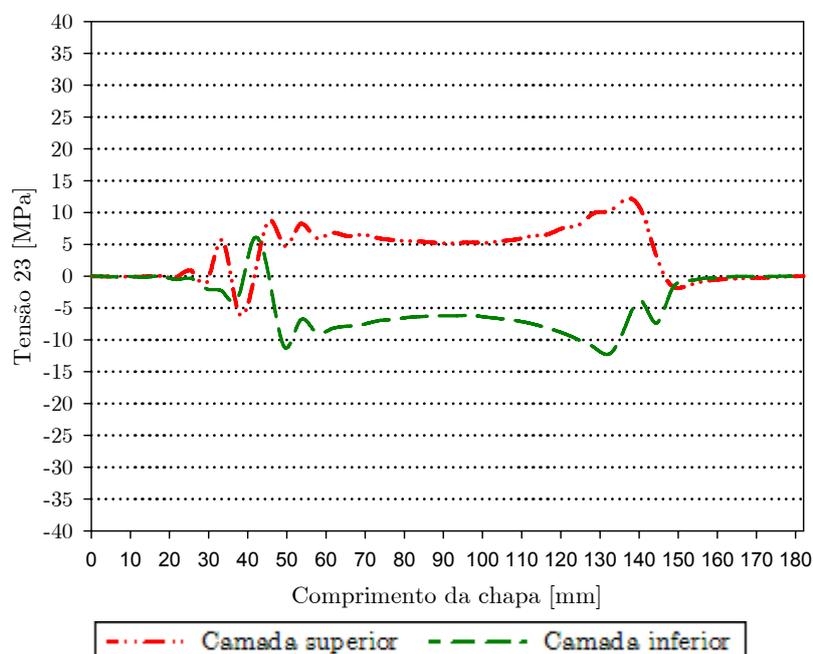


Gráfico 16 – Tensão de corte da direcção YZ.

O Gráfico 16 mostra que as tensões de corte possuem um comportamento oposto nas duas camadas, evidenciando que existe tensões de corte na secção vertical transversal ao plano na direcção YZ.

4.1.4. Discussão de resultados

As oscilações nas curvas das simulações numéricas efectuadas nos testes aos elementos finitos do software ABAQUS são provavelmente devidos à instabilidade numérica provocada pela alta não-linearidade no contacto entre a ferramenta e a chapa. No entanto, com o aumento do número de camadas de elementos finitos ao longo da espessura da chapa a instabilidade numérica das simulações foi reduzida. Porém, a partir de 4 camadas a razão entre a espessura e o comprimento dos elementos torna-se de tal forma pequeno que pode deteriorar a qualidade dos resultados.

Entre as simulações numéricas efectuadas verificou-se que de um modo geral o elemento finito C3D8R acentua a sua divergência em relação aos outros elementos analisados com o aumento do número de camadas ao longo da espessura da chapa. Este tipo de elemento demonstrou ser mais sensível à diminuição da sua espessura, ou seja, a

instabilidade numérica é tanto mais acentuada quanto mais fino for o elemento finito. Com comportamento oposto, o elemento finito C3D8I apresentou resultados convergentes a partir de duas camadas de elementos na direcção da espessura e com maior aproximação ao ensaio experimental. Portanto o elemento finito mais realista a nível de resultados obtidos foi o elemento C3D8I, sendo o elemento finito do ABAQUS seleccionado para a conformação de um componente.

Através das simulações verificou-se que não foi possível aproximar mais os resultados, com o modelo de material isotrópico. Para que os resultados das simulações do teste em linha se aproximem do ensaio experimental, a utilização do modelo de material cinemático será provavelmente a opção para melhorar os resultados.

O refinamento da malha de elementos finitos em espessura também faz parte da análise, cujo principal objectivo foi verificar a sua influência nos resultados numéricos. No caso do elemento finito C3D8I, este convergiu os resultados a partir de duas camadas de elementos na direcção da espessura. Relativamente ao elemento finito RESS os resultados obtidos foram sempre convergentes com o aumento do número de pontos de integração ao longo da espessura.

Conclui-se então que o elemento finito RESS apresentou com apenas uma camada de elementos finitos, resultados similares ao C3D8I com 4 camadas, sendo deste modo mais estável e numericamente mais eficiente.

Na análise das tensões e das tensões de corte nas várias direcções da chapa, verificou-se que o comportamento diferenciado acima e abaixo do plano médio da secção da espessura da chapa, o comportamento predominante é flexão combinada com deformação uniaxial na direcção do deslocamento do punção.

4.2 Conformação de um componente

A actual secção apresenta a análise dos resultados obtidos na simulação da conformação de um componente, quanto à sua forma geométrica do perfil final do componente e o comportamento da espessura da chapa ao longo da conformação. As dimensões geométricas do componente estão ilustradas na figura 50, o material usado para a conformação foi o alumínio AA3103-O com uma espessura de 1,5mm [VER08].

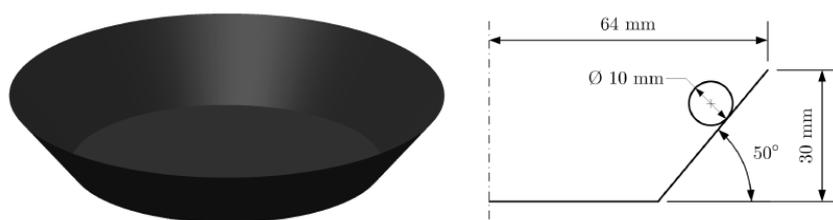


Figura 52 – Dimensões da geometria do componente usado para a simulação [HEN08].

O fabrico do componente consiste em 30 trajectórias circulares, ou seja, cada incremento vertical possui 1mm, o raio do componente é de 64mm com uma parede de 50° de inclinação, a ferramenta usada tem um diâmetro de 10mm e o “*backing plate*” possui 131mm de diâmetro [VER08; HEN08] sendo ainda considerado um coeficiente de atrito de 0.05.

A análise baseia-se apenas num quarto (90°) da conformação total do cone, essencialmente devido ao tempo para simular a conformação total do componente, que poderia ser de algumas semanas. Salienta-se que Henrard [HEN08] encontrou diferenças entre simulações de conformações feitas com 45°, 90° e 360°, devido ao erro associado às condições de simetria.

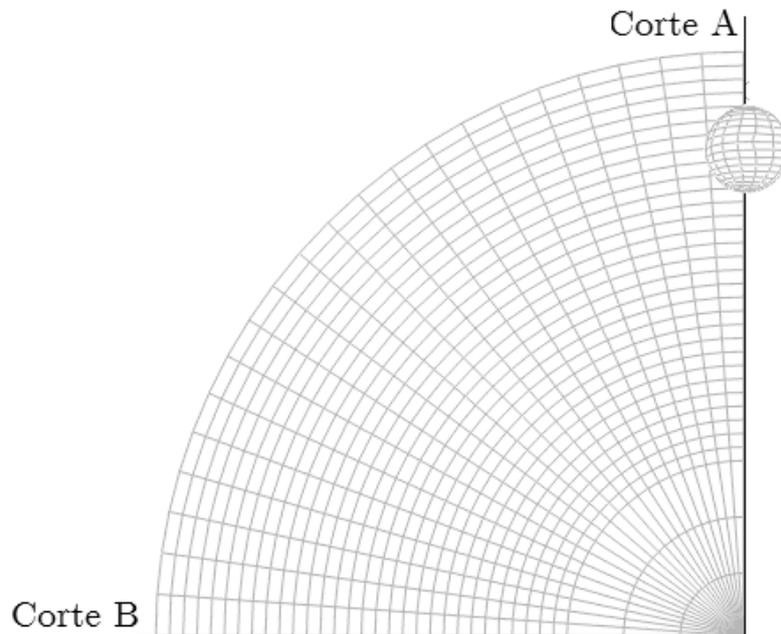


Figura 53 – Malha adoptada para esta simulação.

O número total de elementos finitos C3D8I dispostos em quatro camadas para a malha apresentada na Figura 56 é de 4320 elementos. O tempo necessário para simular esta conformação foi de 183030 segundos, aproximadamente 51 horas.

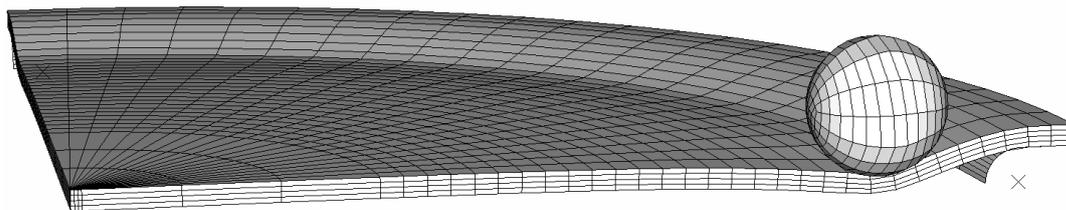


Figura 54 – Fase inicial da conformação do componente.

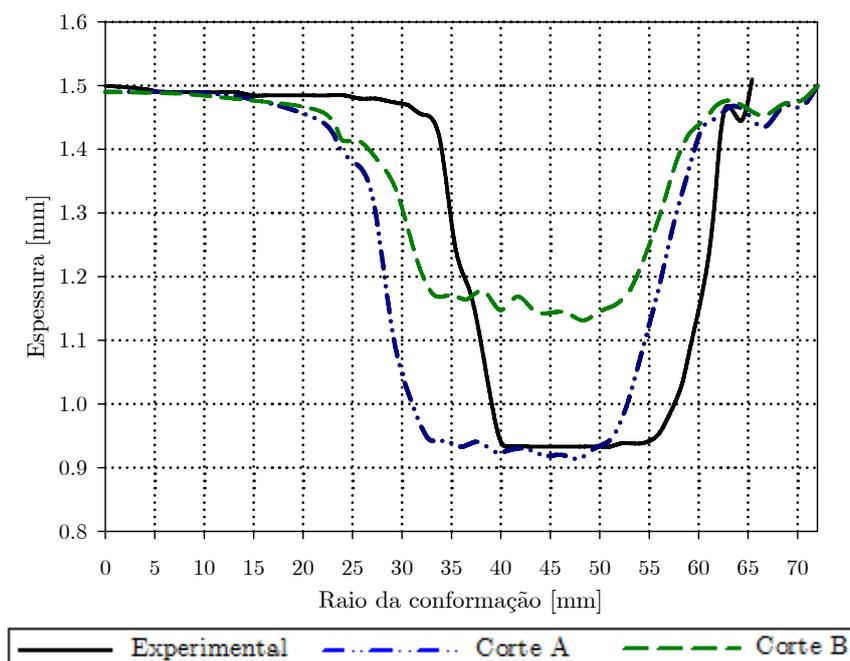


Gráfico 17 – Espessura em função do raio de conformação.

O Gráfico 17 mostra a variação da espessura em função do raio de conformação do componente, entre os dois cortes e o ensaio experimental. Pode-se observar que existe diferença entre estes, pelo facto de ao longo do corte A ocorrerem os incrementos verticais exigindo maior deformação ao longo do perfil formado, enquanto no corte B verifica-se que a espessura não tem uma acentuada diminuição comparada com o corte A.

Analisando o comportamento da espessura ao longo do corte A em relação ao ensaio experimental, verifica-se que os valores determinados na simulação se aproximam dos valores medidos no ensaio experimental da região onde o raio de conformação começa a ficar menor. A diferença entre os valores da espessura experimentais e da simulação evidenciam-se na zona próxima do “*backing plate*” e na base da geometria. Esta ocorrência deve-se ao facto de falta de rigor geométrico na posição geométrica da esfera de conformação sobre a superfície da chapa, isto é, não está exemplificado na fonte [VER08; HEN08] de onde foi retirado o ensaio experimental, a posição da ferramenta no início da conformação do componente. Portanto, foi atribuída uma posição inicial para a ferramenta esférica.

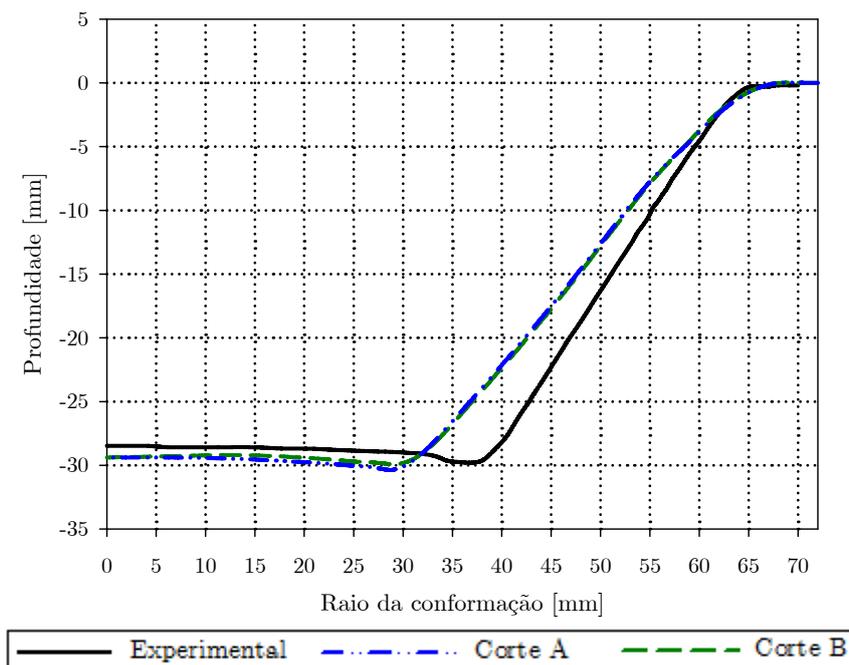


Gráfico 18 – Profundidade em função do raio de conformação.

Quanto ao perfil obtido, como mostra o Gráfico 18, as diferenças são mais acentuadas entre os resultados obtidos na simulação e o ensaio experimental com o aumento da profundidade do componente. No entanto, entre os dois cortes analisados as diferenças são insignificantes nomeadamente nas paredes inclinadas da conformação.

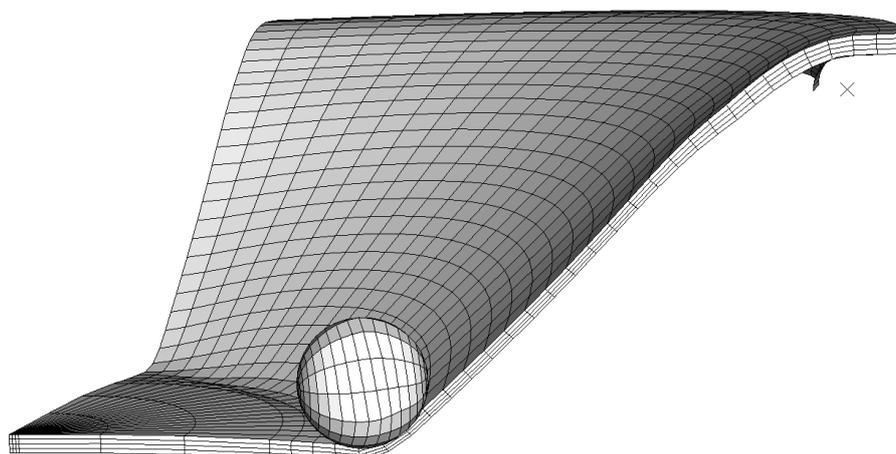


Figura 55 – Conformação do componente.

Pelo facto de a primeira conformação não obter os resultados pretendidos devido a questões geométricas da posição exacta da ferramenta de conformação, é feita uma segunda simulação com o objectivo de melhorar os resultados obtidos.

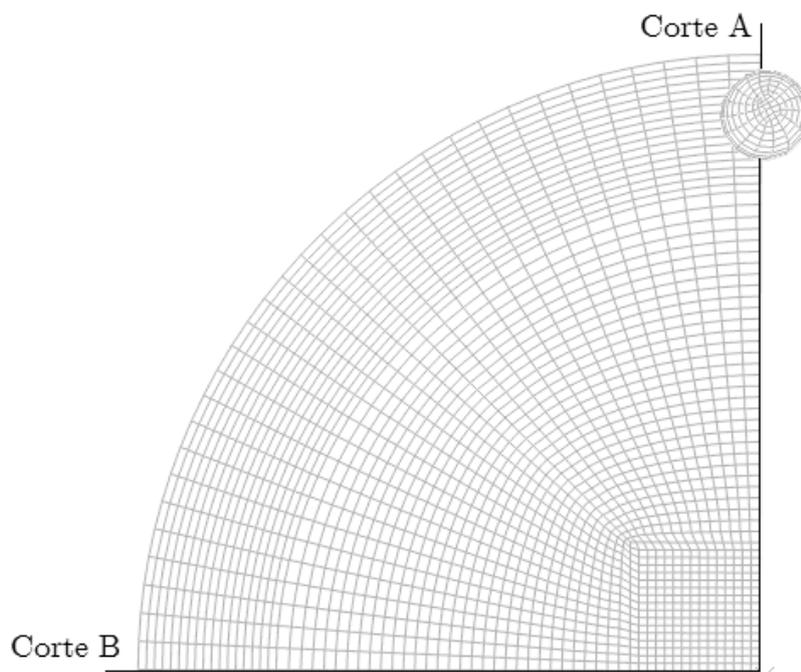


Figura 56 – Malha adoptada e nova posição da ferramenta para a segunda simulação.

A malha adoptada está mais refinada na zona de contacto do “*backing plate*”, composta por duas camadas da direcção espessura e possui no total 3582 elementos C3D8I. Devido ao tempo necessário para simular ser longo, foi reduzido o número de camadas de elementos na espessura. Como analisado anteriormente nos testes em linha, a diferença de resultados na simulação com o elemento C3D8I com duas camadas em comparação com quatro é insignificante.

O tempo de CPU necessário para simular esta segunda foi de 339894 segundos, cerca de 94 horas, devido ao maior número de elementos no plano da chapa.

Esta nova posição da ferramenta de conformação consistiu em definir o raio maior como sendo executado a partir do centro da ferramenta, o que permitiu aproximar a ferramenta do “*backing plate*”, ilustrado na Figura 57.

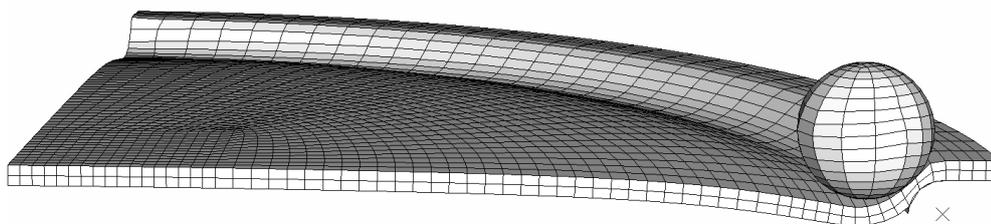


Figura 57 – Nova posição da ferramenta atribuída.

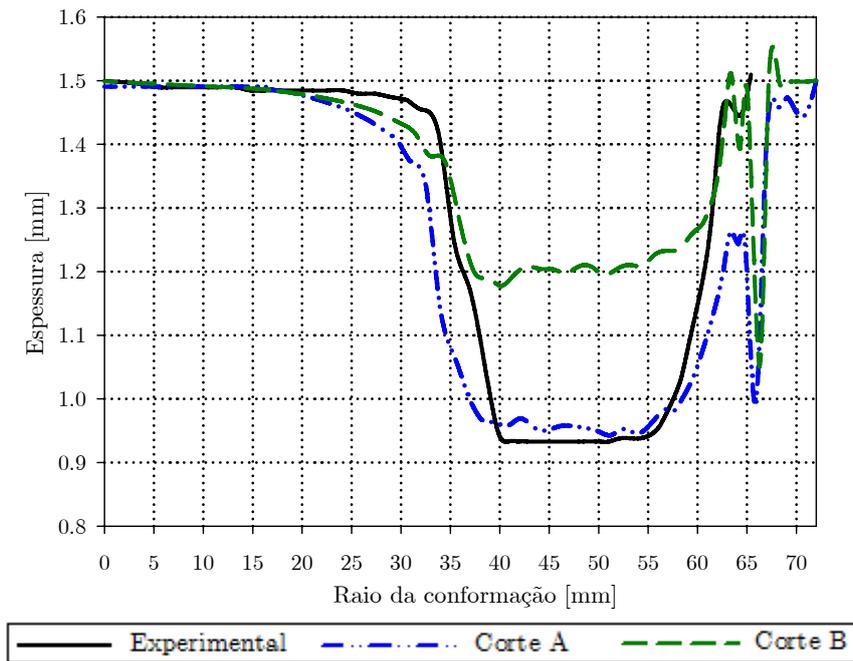


Gráfico 19 – Espessura da chapa em função do raio do componente para a 2ª tentativa de conformação.

Pela observação do Gráfico 19, verifica-se uma maior aproximação dos resultados simulados e o ensaio experimental relativamente à primeira simulação de conformação efectuada. A diminuição excessiva da espessura da chapa deve-se ao facto de ocorrer esmagamento da chapa na região do “*backing plate*” (Figura 58).

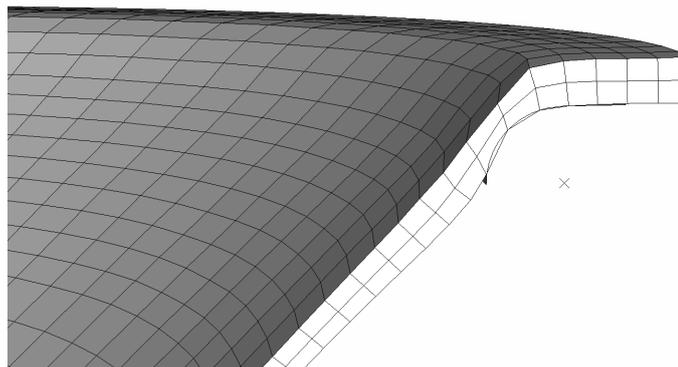


Figura 58 – Esmagamento provocado pela ferramenta na região do “*backing plate*”.

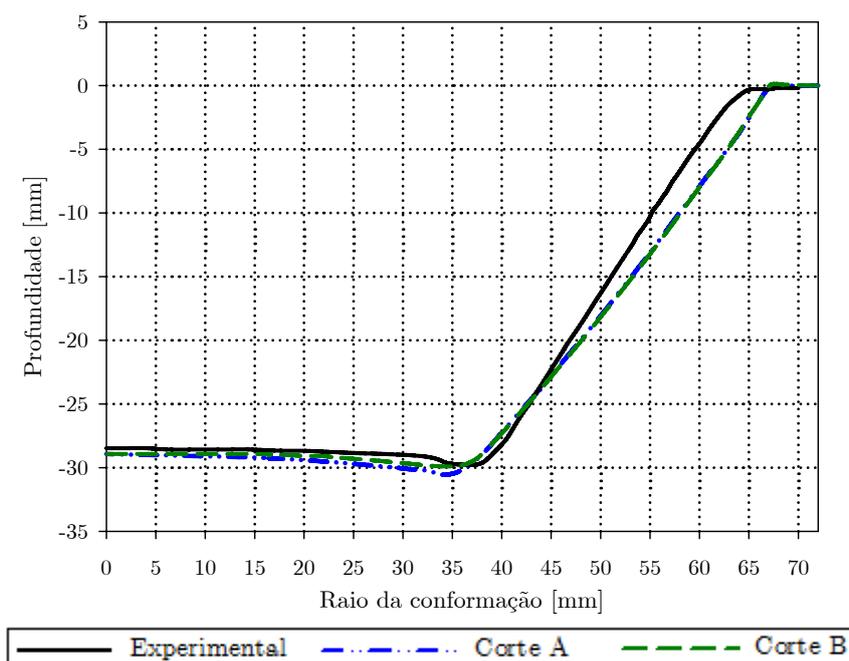


Gráfico 20 – Profundidade em função do raio do componente para a 2ª tentativa de conformação.

O Gráfico 20 apresenta o perfil resultante da alteração da posição da ferramenta de conformação, com maior aproximação ao ensaio experimental relativamente à posição na primeira simulação. Nomeadamente a região próxima da base e na base da conformação simulada está muito próxima do resultado experimental. A zona próxima da posição do *backing plate* e ao longo da parede inclinada do componente é onde se verifica maior diferença entre o experimental e a simulação. Esta diferença é de 3mm na zona do *backing plate* e vai diminuindo ao longo da profundidade da conformação. Quanto a análise dos dois cortes da secção, não se verifica qualquer diferenciação nas paredes, existindo um afastamento mínimo na zona da base onde a ferramenta faz o incremento, no corte A. Todos os resultados apresentados relacionados com as análises das simulações da conformação de um componente em alumínio, este permanece encastrado e sobre o *backing plate*. O objectivo de analisar a simulação desta forma, destina-se a perceber o quanto os parâmetros geométricos como a dimensão da zona de suporte, principalmente o *backing plate*, influenciam a conformação do componente, como também a posição inicial da ferramenta de conformação.

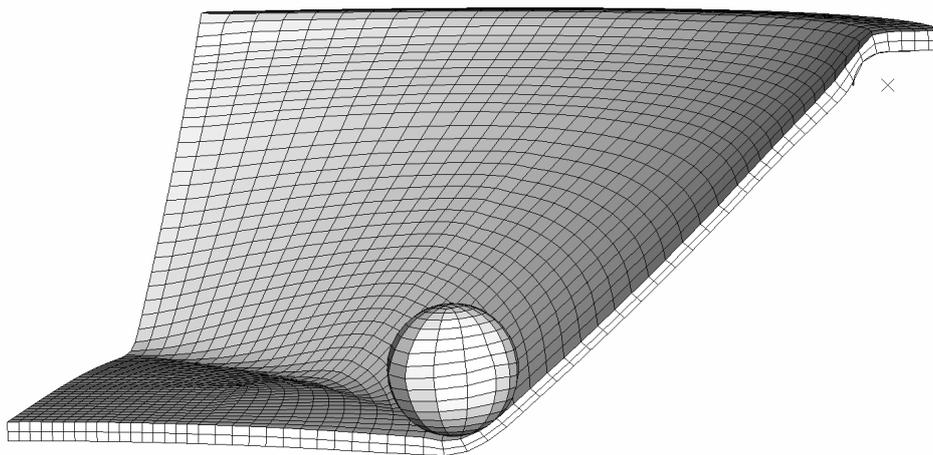


Figura 59 – Conformação final do componente.

No caso de analisar dimensionalmente a simulação da conformação com o retirar das condições fronteira, encastramento, e mover a zona do *backing plate* o resultado e a diferença entre o ensaio experimental e o simulado possivelmente seria maior. Este aumento pode ser justificado devido a ocorrência de retorno elástico da chapa. Segundo vários autores [JES05], existe retorno elástico em estampagem assimétrica com movimento da ferramenta esférica e após retirar o componente da zona de suporte de encastramento.

Capítulo 5

5. Considerações finais

A modelação numérica de problemas mecânicos através do método dos elementos finitos permite a previsão aproximada do campo de tensões e deformações num processo de conformação plástica em chapa, bem como o retorno elástico após a retirada da carga. No âmbito deste trabalho, para a simulação numérica de processos de estampagem incremental, optou-se pela utilização de elementos sólidos de 8 nós em detrimento dos elementos de casca e utilizou-se um esquema de análise implícita.

A correcta utilização dos *softwares* de simulação nos processos de conformação é crucial para a fiabilidade dos resultados finais, que dependem não só das variáveis introduzidas pelo utilizador para modelação do material, como também de uma correcta escolha do grau de refinamento da malha de elementos, correcta modelação das condições de fronteira e tipo de elemento finito a seleccionar.

A escolha de elementos sólidos baseou-se na sua maior generalidade para utilização de leis materiais 3D (enquanto as cascas assumem estados planos de tensão) e consideração automática de variações de espessura. Todavia, uma das desvantagens deste tipo de elementos é o reduzido número de pontos de integração ao longo da espessura. A utilização de vários pontos de integração numérica (pontos de Gauss) ao longo da espessura da chapa modelada permite descrever melhor o comportamento das tensões e deformações nesta direcção. Contudo, para os elementos finitos sólidos clássicos, que possuem um número fixo de pontos de integração, tal só pode ser obtido aumentando-se o aumento de camadas de elementos. Tal solução acarreta problemas de origem numérica (nomeadamente o *shear locking*), devido ao facto do elemento ficar com uma razão espessura/comprimento demasiado pequena. Neste trabalho foi apresentado o elemento finito RESS, que com apenas uma camada de elementos, tem a possibilidade de alteração do número de pontos de integração na direcção da espessura pelo utilizador, de modo a eliminar os referidos problemas de carácter numérico.

Para além da modelação do problema, o método de integração das equações de equilíbrio é outro ponto importante. O método explícito revela maior interesse quando o comportamento dinâmico dependente da massa e aceleração é importante ter em análise. Pese embora a sua rapidez, os métodos explícitos são condicionalmente estáveis e altamente sensíveis a perturbações numéricas. Para simulações de conformação plástica, o uso do método de cálculo implícito é mais geral e estável, permitindo maior fiabilidade dos resultados, nomeadamente na análise de retorno elástico.

Deve-se referir ainda a utilização de modelos materiais simplificados neste trabalho, devido ao horizonte temporal reduzido para a realização deste. Assim, foi utilizada uma lei de escoamento plástico clássica baseada na superfície de cedência de von Mises, aliada a um encruamento isotrópico do material.

Os modelos mecânicos tridimensionais apresentados e modelados numericamente no ABAQUS/Standard, possibilitaram avaliar as variáveis que influenciam a simulação numérica em geral. Os principais progressos realizados durante este trabalho de dissertação foram:

- Compreensão dos parâmetros que influenciam a estampagem incremental;
- Interpretação resultados obtidos por diversos investigadores como ponto de partida para tomar opções para optimização e fiabilização de resultados, preponderante para a continuidade deste trabalho;
- Percepção do mecanismo de deformação do material na estampagem incremental;
- Verificação da fiabilidade e desempenho de *software* comercial, no caso concreto da estampagem incremental, reter quais são as questões que devem ser melhoradas;
- Com base nos resultados obtidos, definição da orientação que os próximos estudos na estampagem incremental por simulação numérica devem adoptar;
- Criação de bases científicas para o desenvolvimento de futuros trabalhos nesta área.

Em suma, o trabalho apresentado consistiu na iniciação à investigação da estampagem incremental por único ponto, no entanto foram verificados aspectos importantes para a definição de perspectivas para trabalho futuros.

Em conclusão, foram apresentadas as principais questões sobre o processo, nomeadamente o entendimento entre os ensaios experimentais e a simulação numérica. A necessidade de perceber o processo é primordial e neste trabalho alcançado o objectivo de referir os principais assuntos em discussão nesta área, complementado informação com a análise numérica de exemplos reais.

5.1 Trabalhos futuros

A expectativa para a continuação deste trabalho incide essencialmente no domínio da simulação numérica do processo de estampagem incremental. As melhorias podem inserir os seguintes tópicos e deverão incluir a utilização de um software académico para alteração de funções mais avançadas, tais como os algoritmos de contacto e atrito.

- Desenvolvimento de um novo elemento finito sólido para aplicação directa em simulações SPIF;
- Melhorar o algoritmo do contacto entre a ferramenta e a chapa na simulação, aperfeiçoando-o para o caso particular da estampagem incremental;
- Desenvolver ou melhorar o modelo de endurecimento cinemático para obter resultados mais precisos da deformação após a passagem da ferramenta;
- Desenvolvimento de algoritmos de refinamento local da malha;
- Estudar a influência do contacto entre a ferramenta e a chapa na simulação numérica, de forma a melhorar os resultados numéricos;
- Estudar a influência do comportamento anisotrópico de materiais na simulação numérica de estampagem incremental;
- Alargar as simulações numéricas ao estudo de outros materiais na aplicação em estampagem incremental.

Os trabalhos futuros apresentados nesta secção são vários, no entanto podem existir outros também tão importantes como estes enumerados nos tópicos acima. Eventualmente a conformidade das opções de investigação descritas anteriormente têm de possuir uma base experimental.

Referência bibliográficas

- [ALV03] Alves, J. C. Martins, Dissertação de doutoramento: Simulação numérica do processo de estampagem de chapas metálicas, Universidade do Minho, Guimarães, 2003.
- [AMB05] G. Ambrogio, L. De Napoli, L. Filice, F. Gagliardi, M. Muzzupappa. Application of Incremental Forming process for high customised medical product manufacturing. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 162, pp.156-162 2005.
- [AMB08] G. Ambrogio, R. Di Lorenzo, L. Filice, G.L. Manco, Warm incremental forming of magnesium alloy AZ31. *CIRP Annals Manufacturing Technology*, Vol. 57, pp.257-260, 2008.
- [ATT06] A. Attanasio, E. Ceretti, C. Giardini. Optimization of tool path in two points incremental forming. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 177, pp. 409-412, 2006.
- [ATT08] A. Attanasio, E. Ceretti, C. Giardini, L. Mazzone. Asymmetric two points incremental forming: Improving surface quality and geometric accuracy by tool path optimization. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 197, pp. 59-67, 2008.
- [BAM03] Bambach, M., Hirt, G., Junk, S., Modelling and experimental evaluation of the incremental CNC sheet metal forming process. In: *Proceedings VII International Conference on Computational Plasticity*, Barcelona, 2003.
- [BAM04] Bambach, M., Hirt, G., Ames, J. Modeling of optimization strategies in the incremental CNC sheet metal forming process, *NUMIFORM 2004*, Columbus, Ohio.
- [BAM05] Bambach, M., Hirt, G. Performance assessment of element formulations and constitutive laws for the simulation of incremental sheet forming (ISF), *VIII International Conference on Computational Plasticity*, Barcelona, 2005.
- [BAR92] Barbosa, J.A.T., Análise não linear por elementos finitos de placas e cascas reforçadas, Tese de Doutoramento, Universidade do Porto, 1992.
- [BOU07] Bouffieux, C., Eyckens, P., Henrard, C., Aereens, R., Van Bael, A., Sol, H., Dufloy, J. R., Habraken, A.M. Identification of material parameters to predict Single Point Incremental Forming forces, *Proceedings da Conferência IDDRG 2007*, Győr, Hungria.
- [CAR05] L. Carrino, G. Giuliano and M. Strano. The Effect of the Punch Radius in Dieless Incremental Forming. *Università di Cassino, Dipartimento di Ingegneria Industriale, via di Biasio 43, 03043 Cassino (FR), Italy* 2005.

- [EMM06] Emmens, W.C., Water jet forming of steel beverage cans. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* Vol. 46, pp.1243-1247, 2006.
- [EMM08a] W.C. Emmens, A.H. van den Boogaard. An overview of stabilizing deformation mechanisms in incremental sheet forming. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 209, pp. 3688-3695 2008.
- [EMM08b] W.C. Emmens, A.H. van den Boogaard. Incremental Forming Studied by Tensile Tests with Bending. 9th ICTP Conference, Gyeongju, Korea, September 7-11 2008.
- [EYC08] Eyckens, P., Van Bael, A., Van Houtte, P., An extended Marciniak–Kuczynski forming limit model to assess the influence of through-thickness shear on formability. In: *Proceedings Numisheet 2008*, Interlaken, Switzerland, September 1–5, 2008.
- [FRA04] Fratini, L., Ambrogio, G., R. Di Lorenzo, Filice, L., Micari, F., Influence of mechanical properties of the sheet material on formability in single point incremental forming, *CIRP Annals Manufacturing Technology*, Vol, 53, pp.207-210, 2004.
- [FRA05] L. Fratini, G. Ambrogio, R. Di Lorenzo, L. Filice, F. Micari, “Three-Dimensional FE Simulation of Single Point Incremental Forming: Experimental Evidences and Process Design Improving”, VIII International Conference on Computational Plasticity, *Complas VIII*, Barcelona 2005.
- [HAM06] M. Ham & J. Jeswiet . Single Point Incremental Forming and the Forming Criteria for AA3003. *CIRP Annals Manufacturing Technology*, Vol. 55, pp. 241-244, 2006.
- [HEN08] Henrard, Christophe, PhD thesis: Numerical Simulations of the Single Point Incremental Forming Process, Université de Liège, November 2008.
- [HIR02] Hirt, G. Junk, S., Witulski, N. Incremental Sheet Forming: Quality Evaluation and Process Simulation. 7th ICTP International Conference on Technology of Plasticity, October 27-November 1, Yokohama, Japan, paper no. 343, 2002.
- [HUA08] Huang, Y., Cao, J., Smith, S., Woody, B., Ziegert, J., Li, M., Experimental and numerical investigation of forming limits in incremental forming of a conical cup. *Transaction of the North American Manufacturing Research Institution of SME* 38, 2008.
- [HUG87] Hughes, T.J.R., *The Finite Element Method*, Prentice-Hall, New Jersey, 1987.
- [JAC07] Jackson, K.P., Allwood, J.M., Landert, M. Incremental forming of sandwich Panels, *SheMet'07 International Conference on Sheet Metal*. Palermo, Sicily. 2007.

- [JES05] J. Jeswiet, F. Micari, G. Hirt, A. Bramley, J. Duflou, J. Allwood. Asymmetric Single Point Incremental Forming of Sheet Metal. *CIRP Annals Manufacturing Technology*, Vol. 54, pp. 88-114 2005.
- [KIM02] Kim, Y.H., Park, J.J., Effect of process parameters on formability in incremental forming of sheet metal. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 130-131, pp 42-46, 2002.
- [KOP05] J.Kopac, Z, Kampus. Incremental sheet metal forming on CNC-milling machine tool. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.162-163, pp. 622-628, 2005.
- [LES67] Leszak, E. Patent US3342051A1, published 1967- 09-19. Apparatus and Process for Incremental Dieless Forming.
- [MAL78] Malkus, D.S. & Hughes, T.J.R., Mixed finite element methods-reduced and selective integration techniques: a unification of concepts, *Computer Methods in Applied Mechanical Engineering*, Vol.15, pp.63-81. 1978.
- [MAR02] Marciniak Z., Duncan J.L., Hu S. J., *Mechanics of sheet metal forming*, Butterworth Heinemann, Oxford 2002.
- [MAR08] P.A.F. Martins, N. Bay, M. Skjoedt, M.B. Silva, Theory of single point incremental forming. *CIRP Annals Manufacturing Technology*, Vol.57, pp.247-252, 2008.
- [MAS06] Massimo Callegari, Dario Amodio, Elisabetta Ceretti, Claudio Giardini. *Sheet Incremental Forming: Advantages of Robotised Cells vs. CNC Machines*. Industrial Robotics: Programming, Simulation and Application, ISBN 3-86611-286-6, Germany, December 2006.
- [MAT06] Matthias Kleiner, Roland Ewers, Joachim Kunert, Nadine Henkenjohann, Corinna Auer. Optimisation of the shear forming process by means of multivariate statistical methods, Relatório Interno, Universidade de Dortmund.
- [MIC04] Micari, F. Single Point Incremental Forming: recent results. Seminar on Incremental Forming, Cambridge University, 22 October, 2004.
- [MIN07] F. Capece Minutolo, M. Durante, A. Formisano, A. Langella. Evaluation of the maximum slope angle of simple geometries carried out by incremental forming process. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 194, pp. 145.150, 2007.
- [MIN08] Minoru Yamashita, Manabu Gotoh, Shin-Ya Atsumi. Numerical simulation of incremental forming of sheet metal. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 199, pp.163-172, 2008.

- [PAR03] Park, J., Kim, Y. Fundamental studies on the incremental sheet metal forming technique. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.140, pp. 447-453 2003.
- [SAW01] Sawada, T., Fukuhara, G., Sakamoto, M., Deformation mechanism of sheet metal in stretch forming with computer numerical control machine tools. *Journal of JSTP* 42 (489), 1067–1069 (em japonês), 2001.
- [SIL08] Silva, M.B. Jesus, Dissertação de doutoramento: Single Point Incremental Forming, Instituto Superior técnico, Lisboa, Dezembro de 2008.
- [SIM90] Simo, J.C. & Rifai, M.S., A class of mixed assumed strain methods and the method of incompatible modes, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol.29, pp.1595-1638, 1990.
- [SOU02] Alves de Sousa, R.J., Dissertação de Mestrado: Modelação de problemas incompressíveis pelo método de deformações acrescentadas em domínio tridimensional, Faculdade de Engenharia do Porto, Porto, 2002.
- [SOU07] Alves de Sousa, R.J., Yoon, j. W., Cardoso R.P.R., Valente, R.A. Fontes, Grácio, J.J., On the use a reduced enhanced solid-shell (RESS) element for forming simulations. *International Journal of Plasticity*, Vol.23, pp. 490-515, 2007.
- [TAY76] Taylor, R.L., Beresford, P.J. & Wilson, E.L., A non-conforming element for stress analysis, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 10, pp. 1211-1219, 1976.
- [TEK00] Tekkaya, A.E., State-of-the-art of simulation of sheet metal forming, *Journal of Material Processing Technology*, Vol. 103, pp. 14-22, 2000.
- [VER08] Verbert J., Belkassam B., Henrard C., Habraken A.M., Gu J., Sol H., Lauwers B., Duflou J.R.. Multi-Step toolpath approach to overcome forming limitations in single point incremental forming, *International Journal of Material Forming*, Vol.1, pp. 1203-1206, 2008.
- [VIH07] Vihtonen, L., Tuomi, J., Rapid Manufacturing of sheet metal parts using incremental techniques, Overview and case studies, Helsinki University of Technology, internal report, 2007.
- [WIL73] Wilson, E.L., Taylor, R.L., Doherty, W.P. & Ghaboussi, J., Incompatible displacement models, *Numerical Computer Models in Structural. Mechanics*, S.J. Fenves et al. (eds.), Academic Press, New York, 1973.

[ZIE71] Zienkiewicz, O.C., Taylor, R.L. & Too, J.M., Reduced integration technique in general analysis of plates and shells, International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 3, pp. 275-290, 1971.