



Sónia Raquel de Jesus **Desenvolvimento de uma máquina para operações**
Helena Marabuto **de estampagem incremental**



Sónia Raquel de Jesus **Desenvolvimento de uma máquina para operações**
Heleno Marabuto **de estampagem incremental**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação científica do Prof. Doutor Ricardo José Alves de Sousa, Professor Auxiliar Convidado do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro, e co-orientação do Professor Doutor Jorge Augusto Fernandes Ferreira, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro.

Para o Gonçalo, e meus irmãos, Nelsito e Nelita.

o júri

Presidente

Professor Doutor Robertt Ângelo Fontes Valente

Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

Professor Doutor Fábio Jorge Pereira Simões

Professor Equiparado Adjunto do Departamento de Engenharia Mecânica da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria.

Professor Doutor Francisco José Malheiro Queirós de Melo

Professor Associado do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

Professor Doutor Ricardo José Alves de Sousa

Professor Auxiliar Convidado do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

Professor Doutor Jorge Augusto Fernandes Ferreira

Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

agradecimentos

No final de mais uma etapa da minha vida, chega o momento de agradecer a todos os que percorreram comigo esta caminhada...

Finalmente, uma palavra de agradecimento a todos os que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho.

A todos agradeço, profundamente.

palavras-chave

Estampagem incremental de chapa, cinemática paralela, processos tecnológicos, projecto de construções mecânicas.

resumo

A estampagem incremental é um processo recente, actualmente em forte expansão e com aplicação crescente na prototipagem rápida, biomecânica, produção de pequenas séries e peças personalizadas.

Os meios actualmente existentes para realizar estampagem incremental resultam na sua maioria da adaptação de máquinas-ferramenta convencionais que tornam o processo pouco flexível, e com uma gama limitada de aplicações em termos de materiais e geometrias. Alternativamente, existe uma limitada oferta do mercado para equipamentos dedicados à estampagem incremental, mas constituem um investimento elevado, tornando-se pouco atractivo à implementação na indústria.

O elevado tempo de conformação e a baixa precisão dimensional das peças obtidas por estampagem incremental representam actualmente grandes desvantagens na aplicação deste processo tecnológico.

Neste trabalho pretende-se desenvolver um equipamento que tenta eliminar as limitações das máquinas utilizadas actualmente, servindo como base de estudo mais aprofundado das características particulares de um processo que não se rege pelos princípios normalmente aplicados nos processos de estampagem convencional, e que represente uma alternativa viável, atractiva, de fácil utilização e contribuindo assim activamente para a difusão da estampagem incremental na indústria, tentando sempre que possível superar as limitações inerentes ao processo.

keywords

Incremental sheet forming, parallel kinematics, process technology, mechanical engineering design.

abstract

Incremental sheet forming is a recent process, gathering growing application in rapid prototyping, biomechanical, production of small series and custom parts.

Equipment currently available for conducting incremental sheet forming result mostly from the adaptation of conventional machine tools that make the process with a limited range of applications in terms of materials and geometries. Alternatively, there is a limited supply of the market for equipment dedicated to SPIF, as they represent a substantial investment, making it unattractive for implementation in the industry.

The high forming time and low dimensional accuracy of parts produced by incremental sheet forming currently represents major disadvantages in the application of this technological process.

This work intends to develop an equipment that tries to overcome the limitations of the machines currently used, also to establish a basis for further study of the particular features of a process that is not governed by the principles generally applied in conventional sheet forming processes, and that represents a viable alternative, attractive, easy to use and thus actively contributing to disseminate incremental sheet forming in the industry, trying to overcome the limitations inherent in the process.

Índice

Índice	i
Índice de Figuras	iv
Índice de Tabelas	viii
Lista de abreviaturas	x
Nomenclatura	xi
1 Introdução.....	1
1.1 A conformação incremental de chapa.....	1
1.1.1 Definição	1
1.1.2 Descrição.....	2
1.1.3 Parâmetros relevantes do processo	3
1.2 Tipos de conformação incremental.....	5
1.2.1 Conformação incremental por único ponto (SPIF)	5
1.2.2 Conformação incremental por dois pontos (TPIF)	5
1.3 Principais aplicações.....	6
1.4 Limitações do processo	8
1.5 Motivação.....	10
1.6 Objectivos do presente trabalho e guia de leitura.....	11
2 Estado da arte.....	13
2.1 Máquinas	13
2.1.1 Máquinas adaptadas e montagens experimentais	13
2.1.2 Máquinas dedicadas (purpose built)	15
2.1.2.1 <i>Cambridge ISF Machine</i>	16
2.1.2.2 Máquina da Amino Corporation®	17
2.1.3 Robots com cinemática do tipo série	19
2.2 Fundamentação do projecto	22

2.2.1	Forças de conformação.....	22
2.2.2	Mecanismos de interacção.....	29
2.2.3	Ferramentas.....	33
2.2.4	Curso vertical, z.....	34
2.2.5	Área de trabalho.....	35
2.2.6	Incremento vertical (passo).....	35
2.2.7	Materiais.....	36
2.2.8	Lubrificação.....	37
3	Projecto.....	39
3.1	Sistema cinemático.....	39
3.1.1	Design da Plataforma Stewart.....	43
3.1.1.1	Cilindros actuadores hidráulicos.....	43
3.1.1.2	Juntas com dois graus de liberdade.....	45
3.1.1.3	Bases da plataforma Stewart.....	49
3.1.2	Descrição dos componentes para o Sistema cinemático.....	51
3.2	Projecto da árvore.....	53
3.2.1	Proposta 1 (Primeira proposta da árvore da SPIF-A).....	55
3.2.2	Seleção do porta-ferramentas.....	57
3.2.2.1	Porta-ferramentas comercialmente disponíveis.....	59
3.2.2.2	Alojamento do porta-ferramentas.....	62
3.2.3	Re-design da árvore (Segunda proposta da árvore da SPIF-A).....	65
3.2.4	Re-re-desgin da árvore (Terceira proposta para a árvore da SPIF-A).....	68
3.2.4.1	Dimensionamento da árvore.....	69
3.2.4.2	Descrição dos componentes constituintes da árvore.....	74
3.3	Projecto da estrutura.....	76
3.3.1	Arquitectura estrutural a adoptar para a SPIF-A.....	78
3.3.2	Escolha do Perfil.....	79

3.3.3	Configuração estrutural adoptada	80
3.3.4	Mesa de conformação	82
3.4	Ligações e montagem da máquina.....	84
3.4.1	Acoplamento da árvore à plataforma Stewart	84
3.4.2	Acoplamento da plataforma Stewart à estrutura.	89
4	Conclusões.....	93
4.1	Conclusões sobre o trabalho desenvolvido.....	93
4.2	Sugestões para trabalhos futuros.....	96
	Referências bibliográficas.....	99
	Anexo A – Resultados da análise de rigidez do veio da árvore	109
	Anexo B – Resultados da análise da rigidez da estrutura.....	113

Índice de Figuras

Fig. 1 - Estampagem incremental [STR2005]	2
Fig. 2 - Parâmetros relevantes em estampagem incremental [JES2002].....	4
Fig. 3 - Geometria para a lei do seno [JES2002].	4
Fig. 4 a) e b) - Conformação incremental sem matriz dedicada [JES2005a].	5
Fig. 4 c) e d) - Conformação incremental com matriz dedicada [JES2005a].	5
Fig. 5 - Algumas aplicações de <i>ISF</i> para prototipagem rápida na indústria automóvel [JES2001]....	6
Fig. 6 - Aplicação de <i>ISF</i> em prototipagem rápida [JES2001].....	7
Fig. 7 - Implante craniano em titânio, produzido pela SimiCure® [AMB2005].	7
Fig. 8 - Modelo em formato IGES de uma tala para tornozelo, e produção [AMB2005].	8
Fig. 9 - Diagrama de correcção de desvios [MEI2009].	9
Fig. 10 - Máquinas-ferramenta adaptadas à estampagem incremental: centro de maquinagem (esq.) [AMB2005], e fresadora de bancada (dir.) [DUF2005].....	14
Fig. 11 - Máquinas-ferramenta adaptadas à estampagem incremental: fresadora de pórtico (esq.) [AER2009], e fresadora de consola (dir.) [DEJ2005].....	14
Fig. 12 - Cambridge <i>ISF</i> Machine [ALL2005].....	16
Fig. 13 - Cones produzidos pela Cambridge <i>ISF</i> Machine. Da esquerda para a direita: incremento vertical de 0.2mm, 1mm, 2mm, 4mm [ALL2005].	17
Fig. 14 - Equipamento <i>Amino Dieless NC Forming</i> ® [12].....	18
Fig. 15 - Braço robótico a realizar estampagem incremental na horizontal [STR2005], e na vertical [DUF2007].....	20
Fig. 16 - Estampagem incremental com ferramentas em oposição realizada por dois braços robóticos [MEI2009].	21
Fig. 17 - Aparato experimental de oscilação para estampagem incremental [SCH2004].	21
Fig. 18 - Base da estimação das forças de conformação [ALL2005].....	22

Fig. 19 - Resultados experimentais variando o incremento vertical Δ_z entre 0.25 e 1.0 mm [DUF2005].....	23
Fig. 20 - Resultados experimentais variando o diâmetro do punção desde 10 até 25mm [DUF2005].	24
Fig. 21 - Resultados experimentais variando o ângulo de parede entre 20° e 60° [DUF2005].....	24
Fig. 22 - Resultados experimentais variando a espessura da chapa entre 0.85 e 2mm [DUF2005]. ..	24
Fig. 23 - Resultados experimentais para lubrificantes com viscosidades crescentes [DUF2005].....	25
Fig. 24 – Resultados experimentais de medição de forças verticais a actuar no punção em função da variação do incremento vertical e do diâmetro da ferramenta [JAC2008].	26
Fig. 25 - Resultados experimentais de medição de forças horizontais e verticais em <i>ISF</i> [DUR2008].	27
Fig. 26 - Evolução das forças exercidas no punção durante um <i>line test</i> [BOU2007].....	27
Fig. 27 - Evolução das forças de conformação com o deslocamento do punção [DEC2008].	28
Fig. 28 - Geometria usada para deduzir a expressão da velocidade óptima de rotação própria do punção [JES2005a].....	31
Fig. 29 – Punções de ponta esférica (esq.) e de ponta plana (dir.) usados em <i>ISF</i> [JES2005a].	33
Fig. 30 – Ferramenta de conformação especialmente construída para estampagem incremental [JES2005a].	34
Fig. 31 - Estampagem incremental com massa de lítio (esq) [JAC2008] e óleo mineral (dir) [HUS2006].	38
Fig. 32 - Sistemas cinemáticos com seis graus de liberdade: cabeça rotativa de CNC [1], manipulador série [2], e manipulador paralelo [3].....	39
Fig. 33 - Cilindro actuador hidráulico [4].	44
Fig. 34 - Juntas universais [6].....	45
Fig. 35 - Junta esférica [5].	46
Fig. 36 - Junta universal projectada para os actuadores hidráulicos: ligação à base inferior (esq), e ligação à base superior (dir).	46

Fig. 37 - Fixação adaptada para construir junta universal.	47
Fig. 38 - Vista explodida da junta universal.....	48
Fig. 39 - Simulação dos esforços suportados pelas juntas universais.....	49
Fig. 40 - Posicionamento das juntas universais que ligam a plataforma aos actuadores lineares.....	50
Fig. 41 - Bases da plataforma Stewart.....	50
Fig. 42 - Esquema de montagem dos componentes da junta prismática na base superior da plataforma Stewart.	51
Fig. 43 - Esquema de montagem dos componentes da junta prismática na base inferior da plataforma Stewart.	52
Fig. 44 - Aspecto final da plataforma Stewart projectada para a SPIF-A.	52
Fig. 45 - Inacessibilidade devido à geometria da peça, e definição do ângulo ideal de conformação (\mathbf{X}) , e do ângulo possível de conformação $(\mathbf{\xi})$	54
Fig. 46 - Esboço inicial da árvore da SPIF-A.....	54
Fig. 47 - Configuração I da disposição dos rolamentos no veio.	56
Fig. 48 - Configuração II da disposição dos rolamentos no veio.....	56
Fig. 49 - Proposta de árvore para a SPIF-A.	57
Fig. 50 - Arquitectura de um porta-ferramentas: A-cone, B-flange, C- sistema de fixação [7].....	59
Fig. 51 - Cones a) DIN, b) HSK e C) flutuante [9]	60
Fig. 52 - Sistemas de fixação do punção: a) porta pinças [9], b) mandril hidráulico [10], c) mandril de contracção [9], d) mandril Weldon [9].....	61
Fig. 53 - Aparafusamento do sistema de fixação ao veio.....	62
Fig. 54 - Ajustamento do sistema de fixação ao veio.	63
Fig. 55 - Roscagem do sistema de fixação ao veio.	63
Fig. 56 - Sistema de aperto por pinça metálica [11].	64
Fig. 57 - Desenho esquemático do sistema de aperto incluído na segunda solução [11].	65
Fig. 58 - Árvore da proposta 2, em corte, onde se pode ver a disposição dos diferentes elementos, e do sistema de aperto do porta-ferramentas.	67

Fig. 59 - Árvore da proposta 3.	68
Fig. 60 - Pormenor do sistema de fixação do porta-ferramentas da árvore 3.....	69
Fig. 61 – Vista explodida da árvore	75
Fig. 62 – Prensa mecânica de estrutura em C [16], e prensa hidráulica de estrutura em arcada [15].	76
Fig. 63 - Estrutura de suporte inicialmente proposta.....	78
Fig. 64 - Estrutura de suporte em arcada.	79
Fig. 65 – Materiais usados para construção de estruturas mecânicas: perfil de alumínio extrudido [17], e diversos perfis de aço [13].	79
Fig. 66 - Estrutura projectada para a SPIF-A.	81
Fig. 67 - Mesa de conformação.	82
Fig. 68 – Esforços actuantes nas ligações aparafusadas da árvore à plataforma Stewart.	85
Fig. 69 – Vista inferior da caixa envolvente da árvore.....	85
Fig. 70 – Pormenor do sistema de fixação da árvore.....	89
Fig. 71 – Ligação da plataforma Stewart à estrutura.....	89
Fig. 72 - Pormenor de ligação aparafusada da plataforma à estrutura da SPIF-A.....	92
Fig. 73 – SPIF-A	92
Fig. 74 – Discretização do veio para a configuração I da primeira proposta da árvore.	109
Fig. 75 - Discretização do veio para a configuração II da primeira proposta da árvore.....	110
Fig. 76 - Discretização do veio para a segunda proposta da árvore.	111
Fig. 77 - Discretização do veio para terceira proposta da árvore	112
Fig. 78 - Discretização da estrutura, aplicação de condições de fronteira e carregamentos.	113
Fig. 79 - Diagrama de esforços transversos e momentos flectores da estrutura	115
Fig. 80 - Deformada da estrutura	116

Índice de Tabelas

Tabela 1 – Principais aplicações de <i>ISF</i> [ALL2004].	8
Tabela 2 - Características da Cambridge <i>ISF</i> Machine [ALL2005].	17
Tabela 3 - Características da gama <i>Amino Dieless NC Forming</i> [®] [12].	19
Tabela 4 – Resultados experimentais variando o incremento vertical e o avanço [RAU2009].	25
Tabela 5 - Resumo das forças obtidas por diversos autores em operações de estampagem incremental.	29
Tabela 6 – Profundidade máxima de conformação de peças realizadas em estampagem incremental.	35
Tabela 7 - Áreas de conformação utilizadas por diversos autores para realizar estampagem incremental.	35
Tabela 8 – Incrementos verticais utilizados por diversos autores para realizar estampagem incremental.	36
Tabela 9 - Materiais usados em estampagem incremental.	37
Tabela 10 - Principais características de projecto da SPIF-A.	39
Tabela 11 – Configurações da plataforma Stewart [BEN1999].	42
Tabela 12 - Características do modelo de cilindro actuador seleccionado [4].	44
Tabela 13 - Características das juntas apresentadas.	47
Tabela 14 - Resultados da análise dos esforços suportados pelas juntas universais.	49
Tabela 15 - Características dos rolamentos seleccionados para o veio [8].	55
Tabela 16 - Resultados do dimensionamento à flexão do veio da árvore.	56
Tabela 17 - Forças de aperto recomendadas para imobilização de porta-ferramentas em operações de fresagem, em função do tamanho e tipo de cone [11].	64
Tabela 18 – Características dos rolamentos seleccionados para o veio [8].	66
Tabela 19 – Resultados do dimensionamento à rigidez do veio da proposta 2.	67
Tabela 20 - Resultados do dimensionamento à rigidez do veio da proposta 3.	69

Tabela 21 - Elementos usados para o projecto da estrutura da SPIF-A.	80
Tabela 22 - Resultados da análise à rigidez da estrutura da SPIF-A.	82
Tabela 23 - Características da mesa de conformação.	83
Tabela 24 - Resultados da análise de rigidez do veio para a configuração I da primeira proposta da árvore.....	109
Tabela 25 - Resultados da análise de rigidez do veio para a configuração II da primeira proposta da árvore.....	110
Tabela 26 - Resultados da análise de rigidez do veio para a segunda proposta da árvore.....	111
Tabela 27 - Resultados da análise de rigidez do veio para a terceira proposta da árvore.....	112
Tabela 28 - Resultados da análise de rigidez da estrutura.	113

Lista de abreviaturas

- AISF - Assymetrical Incremental Sheet Forming
AISI - American Iron and Steel Institute
CAD - Computer Aided Design
CAM - Computer Aided Manufacture
CNC - Comando Numerico Computrizado
DIN - Deutsches Institut für Normung
HSK - Hollow Shank Kegel
ISF - Incremental Sheet Forming
ISO - International Organization for Standardization
PVC - Polyvinyl Chloride
SPIF - Single Point Incremental Forming
SPIF-A - Single Point Incremental Forming at Aveiro
STL - Stereolithography
TPIF - Two Points Incremental Forming

Nomenclatura

A_s	- Área de secção resistente da rosca	[mm ²]
C_0	- Capacidade de carga estática de um rolamento	[kN]
C	- Capacidade de carga dinâmica de um rolamento	[kN]
C_a	- Factor de cálculo de sensibilidade aos entalhes do veio	
C_b	- Constante de rigidez da ligação aparafusada	
F_i	- Pré-esforço do parafuso	[N]
F_m	- Força de compressão exercida em média por cada parafuso	[N]
F_s	- Carga limite de escoamento exercida na junta da ligação aparafusada	[N]
k_{as}	- Factor de acabamento superficial	
k_{ta}	- Factor de tamanho	
K_f	- Factor de concentração de tensões à fadiga	
k_{sl}	- Factor de solitação	
K_t	- Factor teórico de concentração de tensões	
M_z	- Momento flector em z	[Nm]
$M_{z,max}$	- Máximo momento flector em z	[Nm]
$M_{z,min}$	- Mínimo momento flector em z	[Nm]
n_b	- Número de parafusos	
n_s	- Número de planos de escorregamento	
P_u	- Carga limite de fadiga de um rolamento	[kN]
v_{lim}	- Velocidade limite de um rolamento	[kN]
v_{ref}	- Velocidade de referência de um rolamento	[kN]
δ_{max}	- Deslocamento máximo	[mm]
γ_s	- Coeficiente de segurança	
γ_{ME}	- Coeficiente de segurança parcial para o dimensionamento à fadiga	
η_i	- Fração de pré-carga	
σ_a	- Amplitude de tensão	[Pa]
σ_e	- Tensão limite de fadiga	[Pa]
$\overline{\sigma_{eb}}$	- Tensão limite de fadiga à flexão rotativa	[Pa]
σ_m	- Tensão média	[Pa]
σ_{max}	- Tensão máxima	[Pa]

σ_{min}	- Tensão mínima	[Pa]
$\sigma_{n,max}$	- Tensão nominal máxima	[Pa]
$\sigma_{n,min}$	- Tensão nominal mínima	[Pa]
σ_{ob}	- Tensão de cedência do parafuso	[Pa]
σ_u	- Tensão de rotura à tracção	[Pa]
$\overline{\sigma_u}$	- Tensão média de rotura à tracção	[Pa]
σ_y	- Tensão de cedência	[Pa]
θ_{max}	- Rotação máxima	[rad]

1 INTRODUÇÃO

Com o avanço tecnológico dos últimos anos, a indústria é solicitada a dar resposta a uma procura de mercado altamente personalizada, não só utilizando materiais mais comuns, tais como aço e as ligas, como também o recurso a novos processos e materiais avançados, tais como ligas de alumínio e titânio, que têm a vantagem de ser leves e recicláveis. Neste contexto, surge um novo processo de estampagem, que alia a tecnologia de geração de percursos de ferramenta do comando numérico computadorizado com a estampagem convencional: a conformação incremental de chapa. Devido à sua elevada flexibilidade, este processo pode fornecer uma alternativa económica ao processo de estampagem convencional para a prototipagem rápida, produção de pequenos lotes, produtos customizados e peças únicas. Permite a criação de peças 3D sem o uso de matrizes dedicadas. Torna-se uma alternativa mais flexível ao processo de *shear spinning*, que está limitado a peças axissimétricas, pois permite a produção de peças assimétricas, ainda que este último seja mais económico [MAR2008]. A máxima rentabilidade deste processo é atingida para uma produção mensal de aproximadamente 500 peças [12], dependendo do grau de complexidade destas.

1.1 A CONFORMAÇÃO INCREMENTAL DE CHAPA

1.1.1 DEFINIÇÃO

A conformação incremental de chapa (*incremental sheet forming - ISF*) é um processo inovador na conformação de chapa, patenteado em 1967 por Lezak [LEZ1967]. Usa uma ferramenta simples para a conformação, normalmente um veio cilíndrico de metal, com

ponta plana ou esférica, que segue as trajectórias definidas previamente para a conformação por software CNC.

1.1.2 DESCRIÇÃO

A figura 1 mostra os componentes básicos do processo: a chapa, o suporte de aperto, o cerra-chapas, e o punção que vai actuar como ferramenta de conformação. O punção desliza com atrito sobre a superfície da chapa, gerando calor e consequentemente plastificação localizada e forçando-a deformar progressivamente. O cerra-chapas é usado para encastrar a chapa contra o suporte de aperto durante o processo. Ao contrário da estampagem convencional, o processo de *ISF* não requer uma matriz com a forma da peça a ser conformada, além disso o punção tem uma forma geométrica cilíndrica de ponta plana ou esférica e não a forma da peça a conformar, com o qual conformação é realizada incrementalmente através de trajectórias geradas por software CAD/CAM. A chapa está aparafusada ao suporte de aperto para evitar o escoamento de material para o interior da área de conformação. Devido a isto, toda a conformação da geometria é feita à custa da diminuição da espessura da chapa, o que pode tornar-se crítico e levar ao rompimento da chapa [DUR2008].

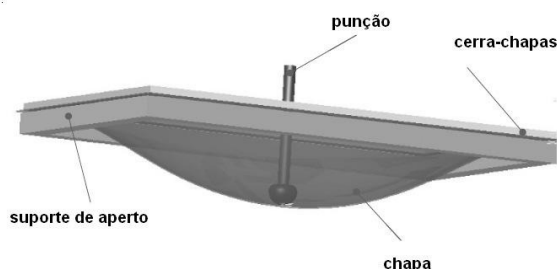


Fig. 1 - Estampagem incremental [STR2005]

1.1.3 PARÂMETROS RELEVANTES DO PROCESSO

O processo de conformação incremental de chapa é realizado sobre uma chapa com as seguintes características:

a = largura da chapa.

b = comprimento da chapa.

t_i = espessura inicial da chapa.

t_f = espessura final da chapa.

ϕ = ângulo de inclinação da parede (representa o menor ângulo formado entre a superfície da chapa e plano horizontal).

α = ângulo complementar de inclinação da parede (representa o menor ângulo formado entre a superfície da chapa e o plano vertical).

Em relação à ferramenta de conformação, podem ser definidos os seguintes parâmetros:

d = diâmetro da ferramenta.

r = raio da ferramenta.

ω = velocidade de rotação da ferramenta.

v = velocidade de avanço da ferramenta sobre a chapa.

Δ_z = incremento vertical da ferramenta.

Δ_x = incremento de avanço devido ao rolamento da esfera de ponta da ferramenta sobre a chapa.

Durante o processo de conformação incremental de chapa, são desenvolvidas as seguintes forças:

F_{ax} = Força axial de compressão que a ferramenta exerce sobre a chapa.

F_t = Força tangencial que a chapa exerce sobre a ferramenta.

F_{av} = Força que a chapa exerce na ferramenta na direcção de avanço.

A área útil de conformação é definida pela expressão:

$$A_{\text{útil}} = (a - 2r) \cdot (b - 2r) \quad (1.1)$$

Por sua vez, a diminuição da espessura da chapa é, de acordo com Jeswiet *et al.* [JES] contabilizada pela lei do seno.

$$t_f = t_i \cdot \sin \alpha \quad (1.2)$$

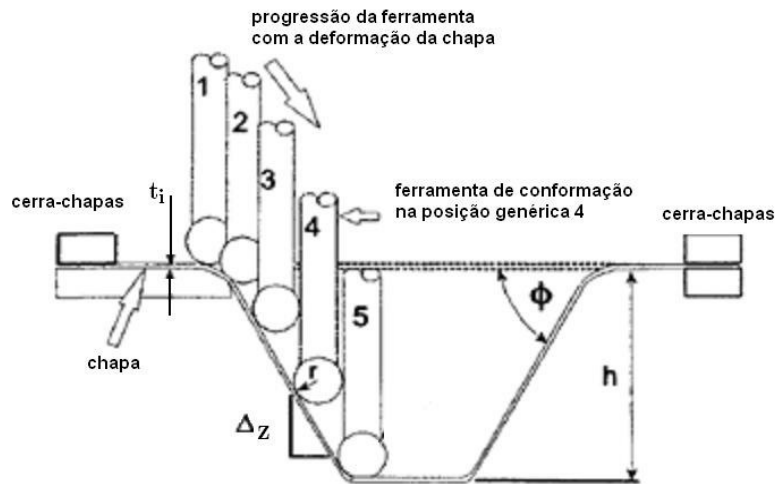


Fig. 2 - Parâmetros relevantes em estampagem incremental [JES2002].

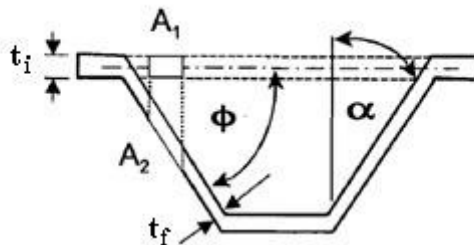


Fig. 3 - Geometria para a lei do seno [JES2002].

1.2 TIPOS DE CONFORMAÇÃO INCREMENTAL

1.2.1 CONFORMAÇÃO INCREMENTAL POR ÚNICO PONTO (SPIF)

A conformação incremental assimétrica por único ponto (*single point incremental forming - SPIF*) pode ser realizada por um punção sem qualquer suporte inferior (Fig.4-a), ou por dois punções em faces opostas da chapa (Fig.4-b), para um maior apoio e controlo do processo. Podem ser produzidos componentes com um elevado grau de personalização de uma forma mais flexível. Com ferramentas em oposição é necessário o uso de duas ferramentas activas e de uma sincronização entre estas.

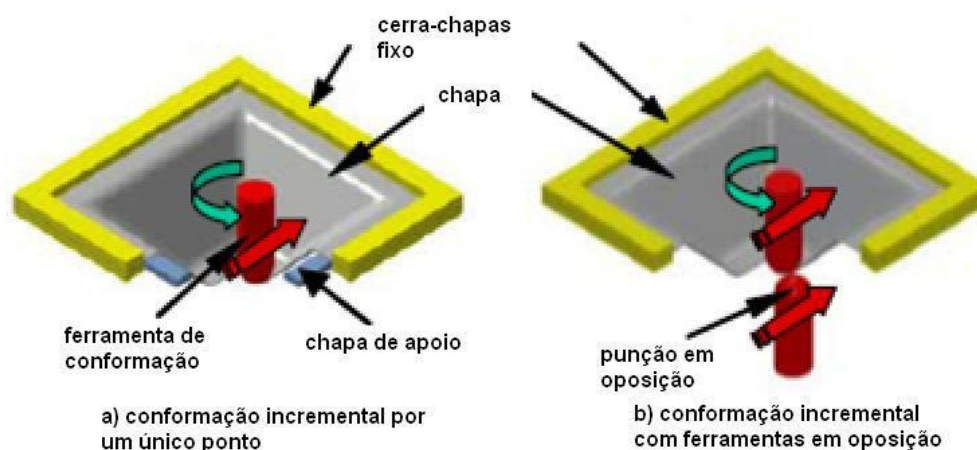


Fig. 4 a) e b) - Conformação incremental sem matriz dedicada [JES2005a].

1.2.2 CONFORMAÇÃO INCREMENTAL POR DOIS PONTOS (TPIF)

Na conformação incremental por dois pontos (*two points incremental forming- TPIF*), o punção conforma a chapa, que na face oposta está apoiada por uma estrutura que pode ser um varão de suporte, matriz parcial (Fig. 4-c) ou matriz completa da peça (Fig. 4-d). O uso de uma matriz parcial ou completa exige a execução de um componente adicional, que torna o processo mais moroso e dispendioso, mas também resulta em peças com maior precisão dimensional e geométrica.

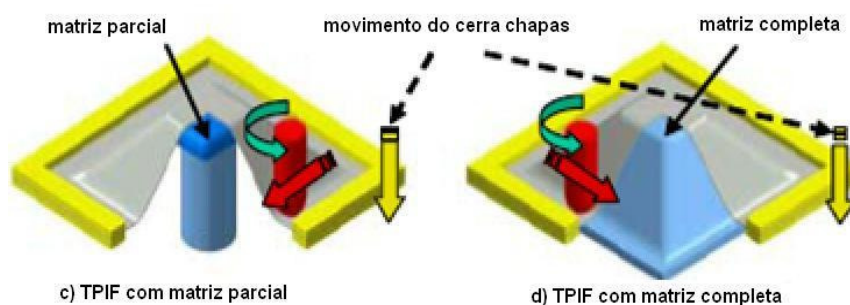


Fig. 4c) e d) - Conformação incremental com matriz dedicada [JES2005a].

1.3 PRINCIPAIS APLICAÇÕES

Uma das maiores aplicações do processo de *ISF* é a prototipagem rápida, com a vantagem de permitir obter peças funcionais que podem ser imediatamente usadas, em vez de apenas protótipos de aspecto.

Com isto, a indústria automóvel torna-se um campo de aplicação muito atractivo, sobretudo no fabrico de peças de substituição e de protótipos. A figura 5 mostra exemplos de peças produzidas por *ISF* para a indústria automóvel.

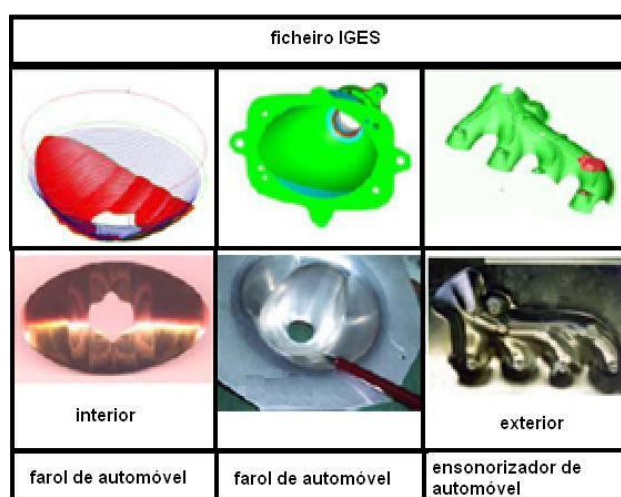


Fig. 5 - Algumas aplicações de *ISF* para prototipagem rápida na indústria automóvel [JES2001].

A figura 6 mostra outras aplicações de *ISF*: cavidade de forno solar, componentes personalizados para motociclos.

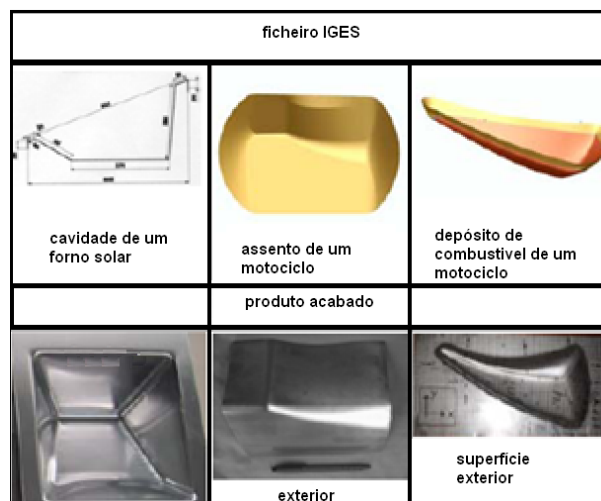


Fig. 6 - Aplicação de *ISF* em prototipagem rápida [JES2001].

O processo de *ISF* tem um elevado potencial de aplicação na indústria médica, mais especificamente no fabrico de próteses e talas. São produzidas cascas metálicas de implantes cranianos por estampagem incremental, usando como modelo CAD a geometria obtida através do levantamento de forma do crânio do paciente [VER20008].



Fig. 7 - Implante craniano em titânio, produzido pela SimiCure® [AMB2005].

Também são fabricadas talas para tornozelo a partir de um modelo real pelo processo de engenharia inversa [AMB2005]. Este tipo de produtos é o ideal para o processo de estampagem incremental devido ao seu elevado grau de personalização, e porque o preço do produto não representa um dos principais vectores de competitividade, característica que é comum a toda a indústria de fabrico de componentes para aplicações médicas.

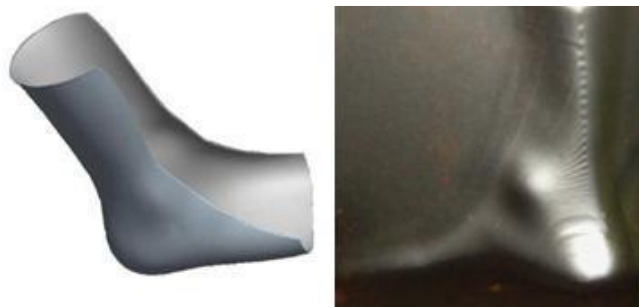


Fig. 8 - Modelo em formato IGES de uma tala para tornozelo, e produção [AMB2005].

A tabela 1 apresenta um resumo dos principais campos de aplicação de *ISF*.

Tabela 1 – Principais aplicações de *ISF* [ALL2004].

Aplicações:
<p>painéis e blindagens para a indústria automóvel : prototipagem, produção de pequenos lotes, desporto automóvel, substituição de peças, customização. reposição de peças estruturais e funcionais.</p>
<p>arquitectura e decoração: painéis decorativos, reprodução de entalhes e formas</p>
<p>produtos de diferenciação tardia.</p>
<p>reflectores e faróis para iluminação.</p>
<p>coroas dentárias.</p>
<p>fuselagens e blindagens para a indústria aeronáutica.</p>
<p>cascos e painéis para barcos.</p>

1.4 LIMITAÇÕES DO PROCESSO

A maior desvantagem dos processos de conformação incremental de chapa é o elevado tempo de conformação, bastante superior a outros processos, como por exemplo a embutidura profunda. Como resultado disto, em termos de viabilidade económica o processo está limitado à produção de pequenos lotes e peças únicas [JES2005a], [JAD2003].

Adicionalmente, a conformação de ângulos rectos não pode ser feita num único passo, sendo apenas possível através de uma abordagem multi-passo [VER2008]. Devido à conformação ser feita à custa da redução da espessura da chapa, o limite de formabilidade é um factor que deve ser contabilizado em função do material e geometria.

O retorno elástico também representa um problema neste processo, gerando falta de precisão dimensional e geométrica relativamente ao modelo CAD. Este fenómeno torna-se crítico para geometrias com ângulos de parede pequenos [VER2008]. No entanto, existem algoritmos a serem desenvolvidos para lidar com este problema [VER2008]. Foi apresentado por Meier *et al.* [MEI2009] um sistema de correcção em malha fechada de trajetórias de conformação, que consiste em fazer um levantamento em tempo real da superfície que está a ser gerada por conformação incremental, e calcular os desvios face ao modelo CAD. Os dados são introduzidos num algoritmo de correcção e novamente calculados os desvios para a iteração seguinte, até que o erro entre a superfície real e o modelo CAD esteja dentro da tolerância pretendida.

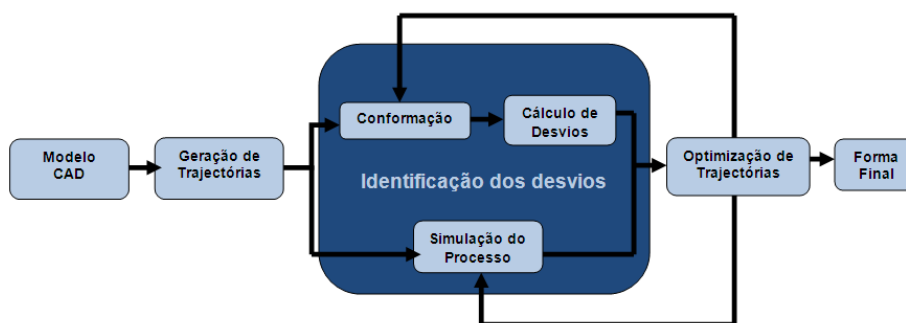


Fig. 9 - Diagrama de correcção de desvios [MEI2009].

1.5 MOTIVAÇÃO

Os meios para realizar conformação incremental de chapa ainda são muito limitados. Apesar de ser uma tecnologia em expansão, não existe uma implantação satisfatória na indústria. O mercado alvo da estampagem incremental são as empresas que se dedicam à concepção de produtos altamente especializados, pequenas séries, e peças únicas (lotes unitários), com elevado grau de personalização e com aplicação específica para cada cliente.

Os equipamentos actualmente utilizados para realizar estampagem incremental são na maioria fresadoras CNC, mas também algumas máquinas dedicadas e robots de cinemática série. No entanto as tecnologias existentes têm demasiadas limitações para que o processo se torne atractivo à indústria. Os centros de maquinagem possuem uma elevada rigidez, que favorece o bom acabamento superficial e a precisão dimensional, mas não têm flexibilidade suficiente para produzir peças com geometrias mais complexas. Os robots de cinemática série, em oposição, apresentam uma elevada flexibilidade mas uma baixa rigidez. As máquinas dedicadas representam um melhor compromisso entre rigidez e flexibilidade, mas constituem um investimento muito elevado e de retorno financeiro a longo prazo.

Neste projecto procura-se desenvolver um sistema que represente um bom compromisso entre rigidez e flexibilidade, de modo a atingir boa precisão dimensional e bom acabamento superficial das peças.

As limitações inerentes ao processo também constituem uma motivação para esta dissertação: as excessivas forças que se desenvolvem no plano perpendicular ao eixo da ferramenta induzem flexão na haste do punção e conduzem frequentemente a situações de

ruptura da ferramenta durante a conformação. Devido à posição do punção em relação ao plano da chapa, grande parte da força que actua na chapa é desperdiçada em atrito e não é utilizada na conformação.

Apesar da grande variedade de possíveis aplicações e das vantagens associadas, actualmente o processo de *ISF* tem duas limitações geométricas dominantes: a excessiva diminuição da espessura da chapa em zonas da peça com elevada inclinação em relação ao plano horizontal (ângulo de parede) e a precisão geométrica muito limitada [BAM2009]. Pretende superar estas limitações através da utilização de uma máquina com flexibilidade suficiente para a geração de trajectórias de conformação alternativas.

Por fim, pretende-se desenvolver um equipamento com bom desempenho e baixo custo, de forma a tornar o processo de estampagem incremental de chapa atractivo e de maior facilidade de implementação na indústria.

1.6 OBJECTIVOS DO PRESENTE TRABALHO E GUIA DE LEITURA

Pretende-se fazer o projecto de uma máquina de conformação incremental de chapa, de nome SPIF-A (*Single Point Incremental Forming at Aveiro*), com boa rigidez e flexibilidade, que realize a conformação através de um punção animado de movimento de traslação em três eixos principais, X Y e Z e de rotação em torno destes.

O punção será controlado por software CNC, que servirá também para a concepção de trajectórias de percurso da ferramenta.

De modo a concretizar os objectivos acima descritos, esta dissertação encontra-se assim dividida:

O presente capítulo: **Capítulo 1**, que engloba uma caracterização do processo de conformação incremental de chapa, seguido dos parâmetros relevantes ao processo de *ISF*, assim como a descrição das principais limitações do processo de *ISF*;

No **Capítulo 2**, é feita uma revisão do estado da arte, incluindo também a descrição de soluções existentes para realizar operações de conformação incremental de chapa;

O **Capítulo 3** descreve as propostas de soluções para a configuração dos sistemas mecânicos que integram a máquina para realizar operações de conformação incremental de chapa, acompanhadas da pesquisa de componentes para os sistemas mecânicos anteriormente referidos, assim como o seu projecto e dimensionamento. É também apresentado o projecto e dimensionamento dos componentes incluídos nas soluções propostas, e sempre que necessário, acompanhados de uma validação numérica por software auxiliar de cálculo.

No **Capítulo 4** são apresentadas as conclusões sobre a presente dissertação, assim como sugestões para trabalho futuro de desenvolvimento da máquina.

Os **Apêndices** contêm os resultados do dimensionamento de componentes através de software de cálculo, assim como da estrutura da máquina.

2 ESTADO DA ARTE

Neste capítulo apresentar-se-á uma revisão do estado da arte da conformação incremental de chapa, com particular interesse nos parâmetros experimentais e requisitos do projecto. Serão apresentadas algumas configurações actualmente existentes para a realização da *ISF*, começando pela descrição de montagens experimentais que resultam da adaptação de máquinas-ferramenta convencionais, seguidamente a apresentação de equipamentos construídos com o propósito de fazer operações de conformação incremental, actualmente denominados máquinas dedicadas, e por último a utilização de robots série na *ISF*. Para concluir é feita uma análise comparativa destas três soluções.

Seguir-se-á uma apresentação do estado da arte de parâmetros relevantes para o processo, sempre com a apresentação de resultados e soluções de vários autores, que sempre que possível, fundamentam as escolhas utilizadas na concepção deste projecto.

2.1 MÁQUINAS

2.1.1 MÁQUINAS ADAPTADAS E MONTAGENS EXPERIMENTAIS

De uma forma geral, todas as máquinas-ferramenta de 3 eixos controladas por CNC são adequadas para fazer estampagem incremental, devido à elevada rigidez e grandes volumes de trabalho. No caso particular das fresadoras, estas estão disponíveis em várias configurações que diferem em volume de trabalho, velocidade máxima de avanço, carga máxima, rigidez e preço de custo.

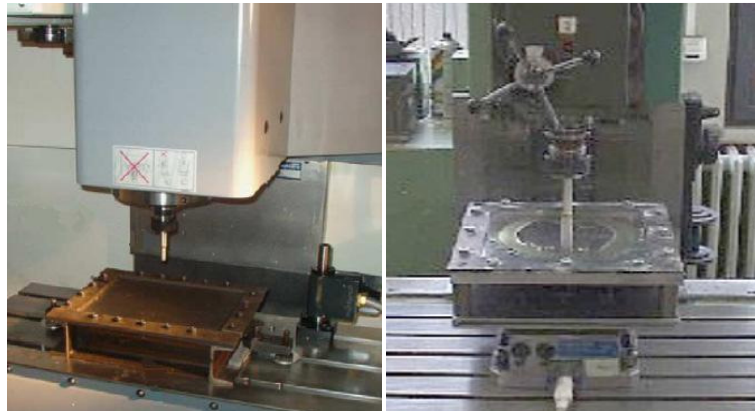


Fig. 10 - Máquinas-ferramenta adaptadas à estampagem incremental: centro de maquinagem (esq.) [AMB2005], e fresadora de bancada (dir.) [DUF2005].

As fresadoras CNC são projectadas para o corte por arranque de apara, que é um processo que envolve forças aplicadas na ponta da ferramenta muito menores do que as que são obtidas em *ISF*. Por isso, o processo está limitado a conformação de materiais mais macios. O uso de uma máquina ferramenta CNC torna-se atractivo devido aos baixos custos adicionais envolvidos na transformação de uma CNC numa máquina de estampagem incremental.

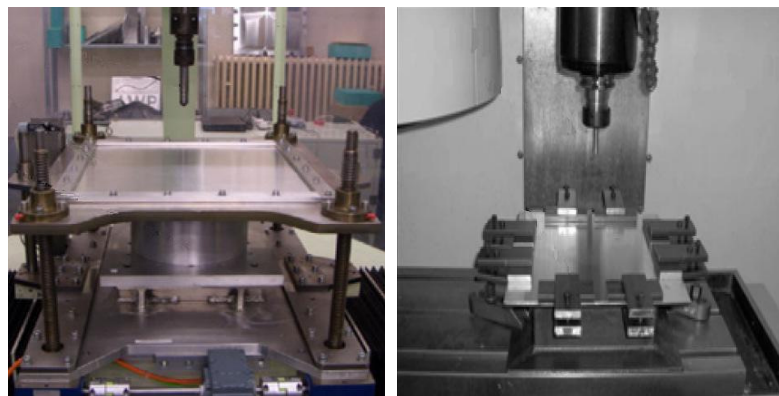


Fig. 11 - Máquinas-ferramenta adaptadas à estampagem incremental: fresadora de pórtico (esq.) [AER2009], e fresadora de consola (dir.) [DEJ2005].

No entanto, existem algumas desvantagens associadas: as fresadoras geralmente não são projectadas para suportar uma carga tão elevada no plano perpendicular ao eixo da ferramenta, e existe o risco de a fresadora ser danificada durante a conformação incremental; além disso, as fresadoras CNC não possuem por norma instrumentação adequada para a medição de forças nos três eixos principais na ponta da ferramenta; o acesso ao lado avesso da peça para fins de medição de forças e controlo geométrico também está dificultado devido à mesa de trabalho ser sólida. Este último aspecto torna-se significativo por duas razões: em primeiro, porque a modelação da conformação incremental de chapa é um processo complexo, e o tempo necessário para a conclusão da simulação é muito superior ao tempo de fabrico do produto, o que impede que o processamento das simulações seja suficientemente rápido para permitir a geração de trajectórias através do modelo CAD para a conformação incremental. Portanto uma precisão elevada neste processo só pode ser atingida através de um algoritmo de correcção em malha fechada que use a medição de forças e levantamento da superfície em tempo real para corrigir as trajectórias.

2.1.2 MÁQUINAS DEDICADAS (PURPOSE BUILT)

Actualmente existem máquinas dedicadas à conformação incremental de chapa. Com elevadas velocidades de avanço e volumes de trabalho médios, estas máquinas estão equipadas com um cerra-chapas móvel, para permitir maior flexibilidade ao processo. Têm a vantagem de combinar a elevada rigidez de uma máquina ferramenta com a elevada flexibilidade de um robot, permitindo assim o fabrico de peças com geometrias complexas, mantendo uma boa precisão e acabamento superficial. Seguem-se dois exemplos:

2.1.2.1 CAMBRIDGE ISF MACHINE

Em 2004 na Universidade de Cambridge, foi desenvolvida uma máquina para realizar operações de estampagem incremental, a *Cambridge ISF Machine* [ALL2005]. É constituída por uma estrutura em arcada, de aço de construção de perfil U que aloja três fusos de esferas accionados por servomotores para devolver movimento de translação em três eixos. O eixo vertical z é montado num pórtico móvel, e os eixos x e y são formados por dois veios de aço endurecido dispostos paralelamente onde correm os fusos de esferas.

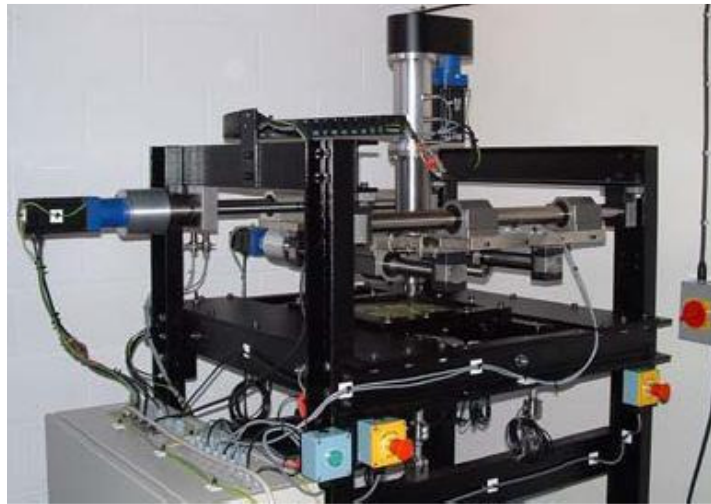


Fig. 12 - Cambridge *ISF* Machine [ALL2005].

A estrutura da máquina foi projectada para que a deflexão na ponta da ferramenta seja inferior a 5mm quando sujeita a um esforço axial de 13kN. A chapa é fixa a uma moldura construída em aço de perfil U 100x50mm por meio de parafusos, e todo o conjunto está montado sobre seis células de carga de 10kN para permitir a medição de esforços em seis graus de liberdade. A ferramenta utilizada na conformação é um punção troncónico com ângulo de abertura restrito a $67,5^\circ$ que desliza passivamente e quase sem atrito sobre a superfície da chapa.

Tabela 2 - Características da Cambridge *ISF Machine* [ALL2005].

Características	
Peça (área activa)	300x300 (mm)
Material	Aço macio até 1,6 (mm)
Força vertical	<13 (kN)
Força horizontal	<6,5 (kN)
Velocidade da ponta da ferramenta	<40 (mm/s)
Raio da ferramenta	5, 10 e 15 (mm)
Ângulo máximo de cone	67,5°
Curso máximo em z	100 (mm)

O desempenho da *Cambridge ISF Machine* foi inicialmente testado numa chapa de alumínio 5251-H22 com 1mm de espessura para conformar superfícies cónicas, onde as forças medidas foram baixas, e não ocorreram deflexões significativas da estrutura da máquina. O erro de posicionamento medido pelo controlador de movimento foi inferior a 50 μ m.

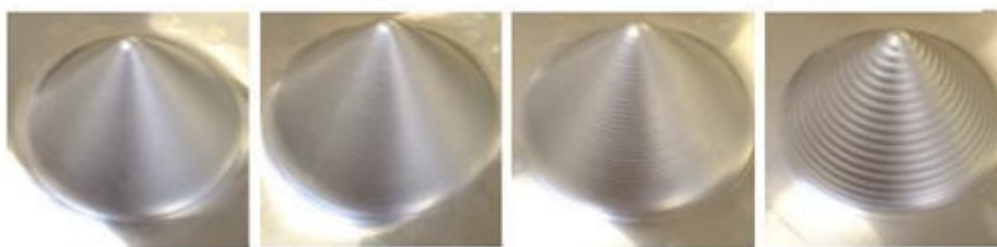


Fig. 13 - Cones produzidos pela Cambridge *ISF Machine*. Da esquerda para a direita: incremento vertical de 0.2mm, 1mm, 2mm, 4mm [ALL2005].

2.1.2.2 MÁQUINA DA AMINO CORPORATION[®]

A *Amino Corporation*[®] comercializa actualmente uma gama de máquinas para a conformação incremental de chapa com precisão suficiente para reproduzir peças

funcionais ou protótipos a partir apenas de um ficheiro *STL* [12]. As máquinas realizam conformação incremental por dois pontos (*TPIF*), formas côncavas e complexas, assim como operações de corte e dobragem.



Fig. 14 - Equipamento *Amino Dieless NC Forming*[®] [12].

Estão disponíveis dois modelos: um mais compacto, DLNC-RA_B adaptado às necessidades da investigação, e outro para o uso industrial, DLNC-PA_D que maximiza a produção com maior área de conformação, maior profundidade máxima, maiores velocidades de posicionamento, potências mais elevadas, e uma gama de espessuras de chapa conformáveis mais abrangente, minimizando assim o tempo de conformação e facilitando alterações ao projecto do produto. A tabela 3 reúne as principais características da *Amino Dieless NC Forming*[®].

O punção de conformação desliza passivamente sobre a chapa e é animado de movimento de translação na direcção vertical. Por sua vez, a mesa realiza movimento de translação nos três eixos principais x y e z. Pode ser conformada uma grande variedade de chapas metálicas: aço macios, alumínio e titânio, com uma espessura de 0.1mm a 5 mm.

Em termos de desempenho, a *Amino Dieless NC Forming*[®] é muito semelhante a uma fresadora CNC ou um centro de maquinagem. O software traduz a informação contida no ficheiro *STL*, e a partir daí gera as trajectórias da ferramenta. A chapa é presa por grampos à mesa, que por sua vez está animada de movimento de translação nos três eixos principais, X Y e Z. Com apenas uma máquina, a produção pode atingir um volume de 500 peças/mês, dependendo da complexidade geométrica da peça [12].

Tabela 3 - Características da gama *Amino Dieless NC Forming*[®] [12].

		DLNC- RA	DLNC- RB	DLNC- PA	DLNC- PB	DLNC- PC	DLNC- PD
Tamanho da chapa		400x400	600x600	1100x900	1600x1300	2100x1450	2600x1830
Área de conformação		300x300	500x500	1000x800	1500x1200	2000x1300	2500x1750
Profundidade max.		150	250	300	400	500	600
Curso(mm)	eixo X	330	550	1100	1600	2100	2600
	eixo Y	330	550	900	1300	1450	1900
	eixo Z	200	300	350	450	550	650
Área do cerra-chapas		700x750	100x950	1300x1100	1800x1500	2300x1650	2800x2030
Espessura admissível (mm)	aço	0.6-1.6	0.6-1.6	0.6-2.3	0.6-3.2	0.6-3.2	0.6-3.2
	aço inox	0.5-1.0	0.5-1.0	0.5-1.5	0.5-2.0	0.5-2.0	0.5-2.0
	alumínio	0.5-3.0	0.5-3.0	0.5-4.0	0.5-5.0	0.5-5.0	0.5-5.0
Velocidade máxima	eixo XY	30	30	60	60	60	60
	eixo Z	10	10	10	10	10	10
Potência do servomotor	eixo X	0.9	1.4	5.9	8.2	10.0	16.0
	eixo Y	0.9	1.4	4.5	4.5	4.5	7.0
	eixo Z	0.9	0.9	1.0	1.0	1.0	3.0
Peso(ton.)		3	5	6	8	10	18

2.1.3 ROBOTS COM CINEMÁTICA DO TIPO SÉRIE

Como alternativa às máquinas-ferramenta adaptadas, tem sido implementado o uso de manipuladores robóticos de cinemática série para realizar estampagem incremental. Esta solução torna-se atractiva devido à elevada flexibilidade e mobilidade em seis eixos que acrescentam ao processo de produção, permitindo a conformação na posição mais conveniente relativamente à chapa e a combinação de várias fases de produção numa única célula de fabrico e operadas por um único robot [SCH2004], [MEI2005], [LAM2005].

O processo de estampagem incremental com braços robóticos é muito semelhante ao descrito para os equipamentos anteriormente apresentados: o modelo CAD 3D da peça é fatiado em camadas horizontais no software CAM e convertido em trajetórias da ferramenta. Os robots industriais caracterizam-se por elevados volumes de trabalho, grandes variações de velocidade e rapidez de posicionamento, o que constitui uma vantagem na estampagem incremental, mas tanto a rigidez como as forças admissíveis são muito baixas. A técnica de usar manipuladores robóticos para realizar estampagem incremental denomina-se *Roboforming* e permite realizar *ISF* sem apoio, ou com outro manipulador robótico para realizar conformação com ferramentas em oposição [MEI2009].



Fig. 15 - Braço robótico a realizar estampagem incremental na horizontal [STR2005], e na vertical [DUF2007].



Fig. 16 - Estampagem incremental com ferramentas em oposição realizada por dois braços robóticos [MEI2009].

Para compensar a falta de rigidez do robot, Schaffer *et al.* [SCH2004] descrevem um método particular de aplicação de robots para conformação incremental, mas por batimento: neste caso, a ponta da ferramenta tem um movimento rápido de oscilação que martela a chapa até à forma desejada. Este método é especialmente indicado para ser efectuado por robots, porque o movimento de oscilação do punção compensa a falta de rigidez do robot, mas adiciona encruamento desnecessário à chapa, e conseqüente diminuição da formabilidade, o que conduz frequentemente à rotura da chapa.

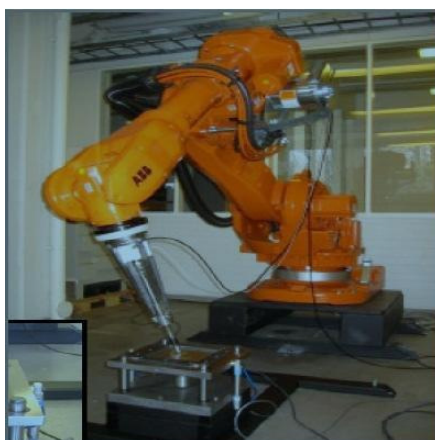


Fig. 17 – Aparato experimental de oscilação para estampagem incremental [SCH2004].

2.2 FUNDAMENTAÇÃO DO PROJECTO

2.2.1 FORÇAS DE CONFORMAÇÃO

O projecto de uma máquina ferramenta deve sempre contemplar as forças envolvidas no processo tecnológico em causa. Por isso, a chave para o projecto de uma máquina de conformação incremental reside na previsão das forças que actuam na ferramenta durante o processo [ALL2005].

Com base neste princípio, Allwood e Jackson [ALL2005] criaram um modelo para estimar as forças de conformação, baseado em cálculos aproximados, e posteriormente verificado por medição de binários num protótipo da *Cambridge ISF Machine*.

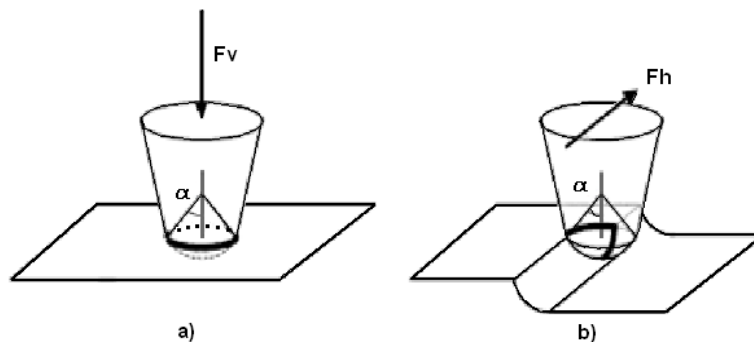


Fig. 18 - Base da estimativa das forças de conformação [ALL2005].

A figura 18 ilustra dois casos de carga extrema: (a) a ferramenta move-se numa direcção normal à chapa, causando uma indentação esférica, e em (b) a ferramenta move-se horizontalmente sobre a chapa deformada, criando um entalhe de um lado. Assumindo r como o raio do punção, t a espessura inicial da chapa, σ_y a tensão de cedência da chapa, e o ângulo interior do cone α , a força vertical é dada, a partir do caso (a) por:

$$F_v = \pi \cdot r \cdot t \cdot \sigma_y \sin(\alpha) \quad (2.1)$$

Assumindo que o movimento vertical conforma um disco de raio $r \cdot \sin(\alpha)$ através da chapa, resistido por uma tensão de corte de $\frac{\sigma_y}{2}$, e por uma tensão de compressão na chapa não deformada imediatamente à frente da ferramenta, a força horizontal é dada através de (b) por:

$$F_h = r \cdot t \cdot \sigma_y (\sin \alpha + 1 - \cos \alpha) \quad (2.2)$$

De acordo com este modelo, Allwood e Jackson [ALL2005] concluíram que para uma chapa de aço macio com 1,6 mm de espessura desenvolvem-se forças verticais de 13kN e horizontais de 6,5 kN.

Posteriormente, foi realizado por Duflou *et al.* [DUF2005] um estudo experimental que mostra a evolução das forças de conformação em função dos principais parâmetros do processo de *ISF*. Efectuou-se a medição de dois parâmetros: a força máxima atingida durante a conformação, F_p (do inglês *Force Peak*), e a média das componentes da força de conformação, F_s (do inglês *Force Sum*), em função da variação do incremento vertical, diâmetro do punção, espessura da chapa e ângulo de parede para chapas de alumínio AA 3003-O.

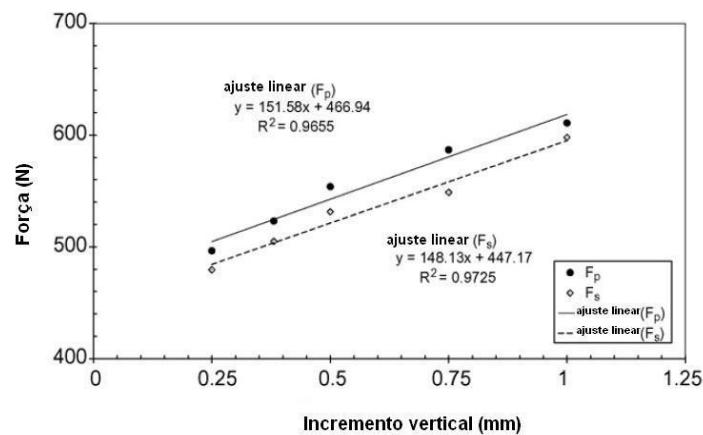


Fig. 19 - Resultados experimentais variando o incremento vertical Δ_z entre 0.25 e 1.0 mm [DUF2005].

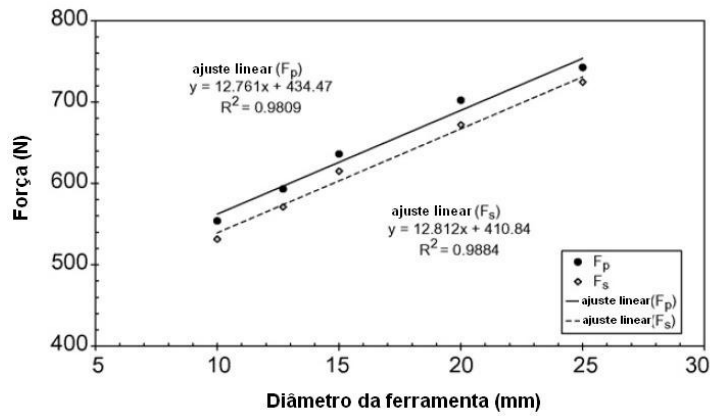


Fig. 20 - Resultados experimentais variando o diâmetro do punção desde 10 até 25mm [DUF2005].

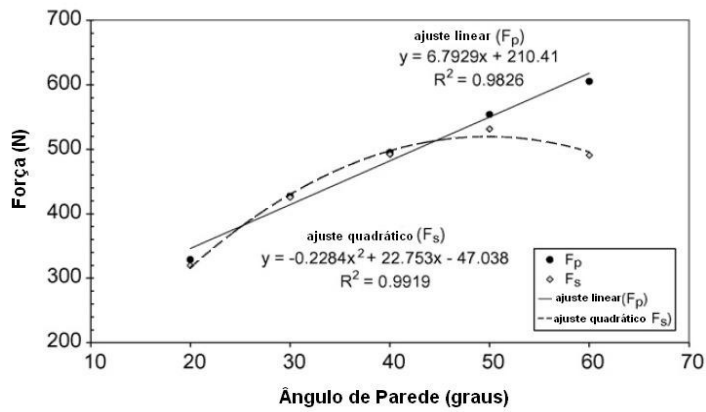


Fig. 21 - Resultados experimentais variando o ângulo de parede entre 20° e 60° [DUF2005].

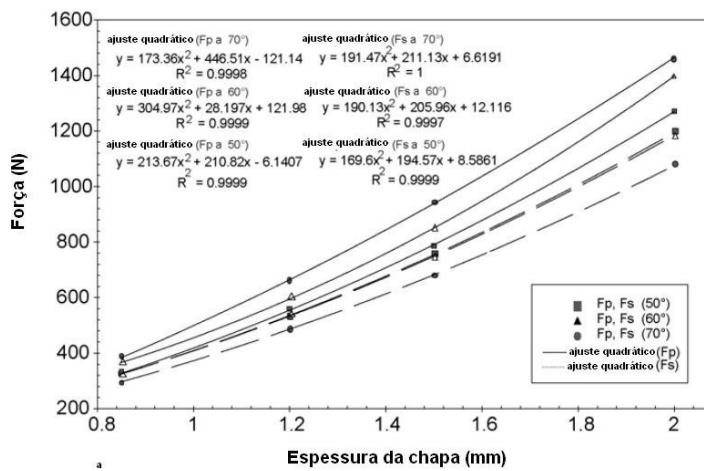


Fig. 22 - Resultados experimentais variando a espessura da chapa entre 0.85 e 2mm [DUF2005].

Adicionalmente foram efectuadas medições de força para diversas condições da chapa, com lubrificantes de viscosidade crescente.

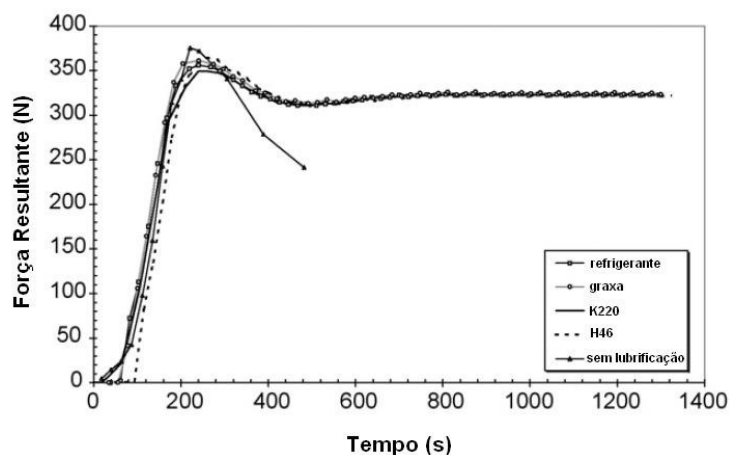


Fig. 23 - Resultados experimentais para lubrificantes com viscosidades crescentes [DUF2005].

Para efectuar medição de forças em estampagem incremental, Rauch *et al.* [RAU2009] usaram uma fresadora CNC, onde foram conformadas chapas 160x160mm de alumínio 5086-O com 0,6 mm de espessura para gerar pirâmides com 24 mm de altura. Foi usada uma ferramenta de ponta esférica com 10 mm de diâmetro. Os incrementos verticais aplicados variaram entre 0,5 e 1mm, e a resultante das forças de conformação está registada na tabela 4. Como se pode ver, o máximo da força é inferior a 900N.

Tabela 4 – Resultados experimentais variando o incremento vertical e o avanço [RAU2009].

Teste	Inc. Axial (mm)	Avanço (m/min)	Força (N)	Tempo (min)	Erro de perfil (mm)
1	0.5	0.5	637	23	0.18
		1.5	647	8	0.24
	1.0	0.5	890	12	0.05
		1.5	855	4	0.05
2	0.5	0.5	564	29	0.21
		1.5	545	10	0.24
	1.0	0.5	690	15	0.07
		1.5	671	5	0.18
3	0.5	0.5	598	23	0.55
		1.5	578	7	0.52
	1.0	0.5	746	12	0.79
		1.5	726	4	0.70

Jackson *et al.* [JAC2008] apresentaram resultados experimentais de testes de medição de forças em painéis sandwich de alumínio/polipropileno e aço macio/polipropileno de 175x175 mm com área total conformável de 140x140mm, para gerar pirâmides de 100x100 mm com um ângulo de parede de 40°. Usaram-se ferramentas de 5, 10 e 15 mm, com variação do incremento vertical entre 0,1 e 2mm, e velocidades de avanço de 0,040 m/min.

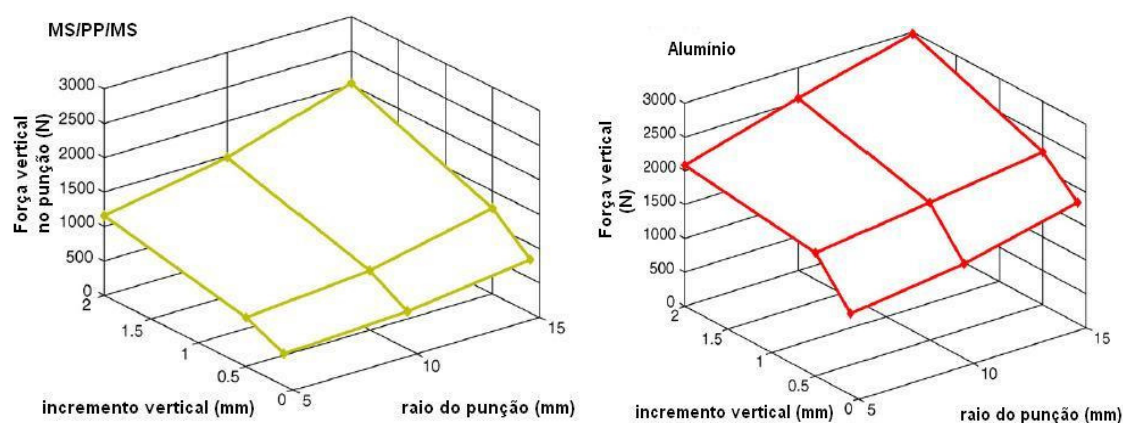


Fig. 24 – Resultados experimentais de medição de forças verticais a actuar no punção em função da variação do incremento vertical e do diâmetro da ferramenta [JAC2008].

As forças de conformação rondam os 2kN para o aço macio e 3kN para o alumínio com a ferramenta de 15mm de diâmetro e incremento vertical de 2mm.

Durante *et al.* [DUR2008] apresentaram valores máximos de 2kN de força vertical e 900N de força horizontal de conformação, obtidos em conformação incremental de chapas de alumínio AA 7075-T0 com 74x74mm, e 1mm de espessura, para obter pirâmides de 39mm de profundidade, ângulo de parede de 60°, e incrementos verticais de 0,5 mm.

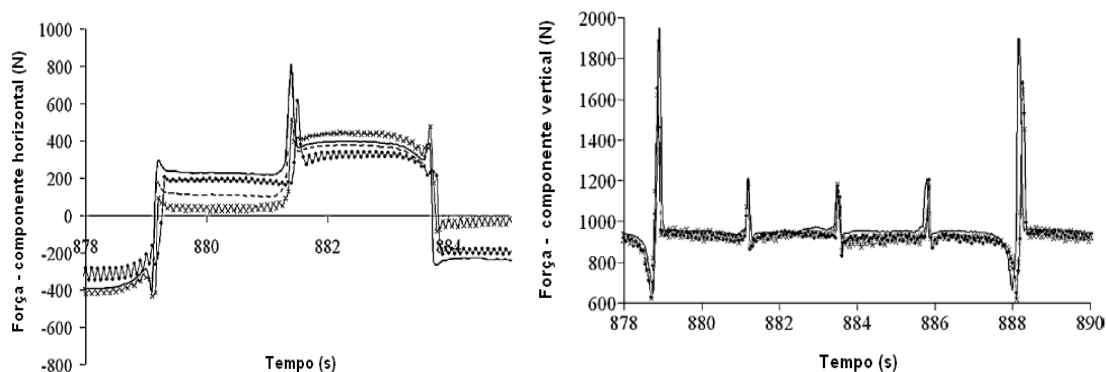


Fig. 25 - Resultados experimentais de medição de forças horizontais e verticais em *ISF* [DUR2008].

Para averiguar as forças desenvolvidas durante a estampagem incremental, diversos autores realizaram simulações numéricas por elementos finitos. Bouffieux *et al.* [BOU2007] levou a cabo um *line test* numa chapa de alumínio AA3103-O com 1,5 mm de espessura, fixada nos bordos por grampos, com uma ferramenta de ponta esférica com raio de 5 mm e com um incremento vertical de 5mm. O somatório das forças que actuam na ferramenta, durante a primeira passagem é de aproximadamente 500N. No entanto, para a segunda passagem no mesmo percurso a 10mm de profundidade, foram atingidos 1300N. O aumento da força no punção é devido ao encruamento sofrido pela chapa após a primeira passagem da ferramenta.

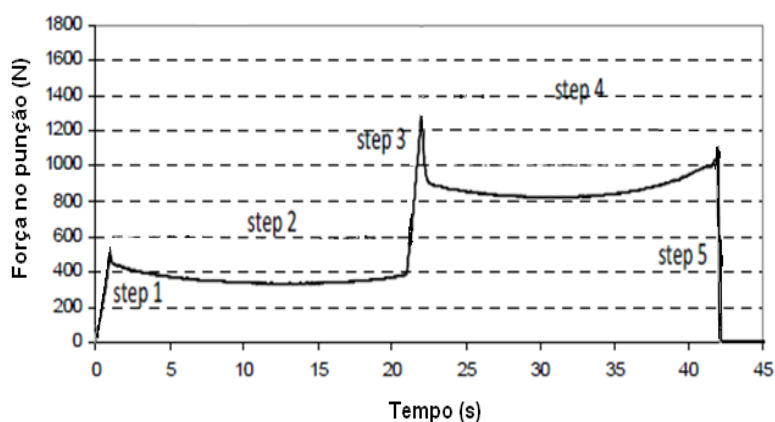


Fig. 26 - Evolução das forças exercidas no punção durante um *line test* [BOU2007].

Para estabelecer a comparação entre as forças medidas num teste de conformação incremental feito numa máquina de ensaios servo eléctrica e o mesmo teste simulado por elementos finitos, Decultot *et al.* [DEC2008] realizaram testes numa chapa circular de 130 mm de diâmetro, em liga de alumínio 2024-T3, encastrada no bordo. A chapa foi conformada com uma ferramenta de ponta esférica com 30mm de diâmetro. Para simular a interacção de contacto chapa/ferramenta foi usado um coeficiente de fricção de 0,2. O deslocamento vertical do punção foi sucessivamente aumentado até ao critério de paragem de rotura da chapa aos 15 mm. Para o somatório de forças foi obtido um valor máximo inferior a 12kN, atingido no momento da rotura.

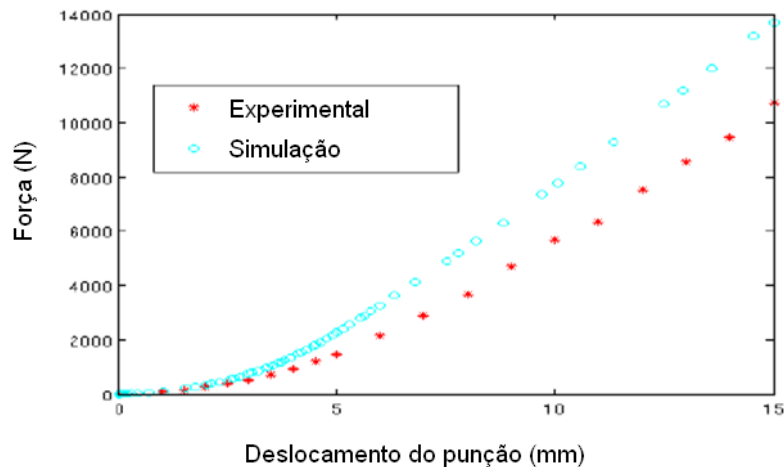


Fig. 27 - Evolução das forças de conformação com o deslocamento do punção [DEC2008].

Dos resultados apresentados por diversos autores, conclui-se que as forças que actuam no punção dependem essencialmente do incremento vertical, diâmetro do punção, ângulo de parede, espessura e material da chapa, condições de lubrificação e dureza da chapa. A presença de lubrificante em estampagem incremental não contribui significativamente para a diminuição das forças de conformação, mas previne a rotura da chapa e o desgaste severo do punção [DUF2005]. Conclui-se ainda que o incremento vertical, e a espessura e

material da chapa contribuem de uma forma mais significativa para o aumento das forças de conformação.

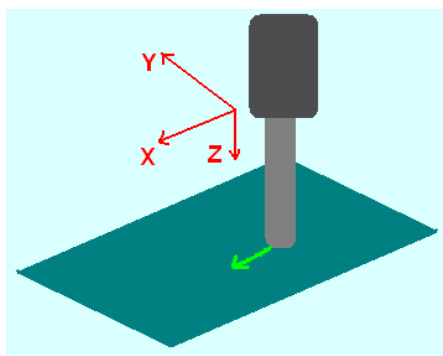
Tabela 5 - Resumo das forças obtidas por diversos autores em operações de estampagem incremental.

Autor	Força Máxima	Método
[ALL2005]	13 kN; 6,5 kN	Modelo Teórico
[DUF2005]	1,460 kN	Experimental
[RAU2006]	0,9 kN	Experimental
[JAC2008]	3 kN	Experimental
[DUR2008]	2 kN	Experimental
[BOU2007]	1,3 kN	Simulação
[DEC2008]	12 kN	Experimental
	14 kN	Simulação

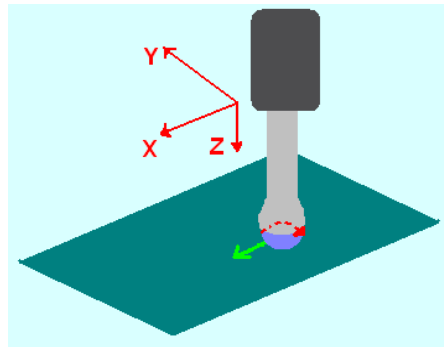
2.2.2 MECANISMOS DE INTERACÇÃO

A forma como a ferramenta interage com a chapa é um dos parâmetros mais importantes em *ISF*. Este mecanismo pode ocorrer de quatro formas:

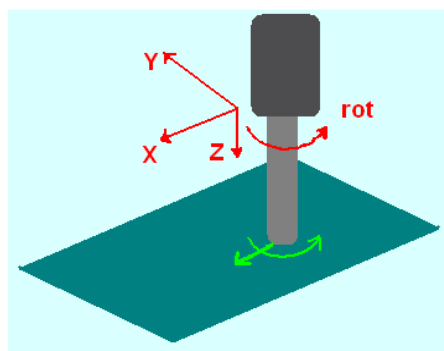
- a) a ferramenta desliza com atrito sobre a chapa, e o calor gerado vai contribuir significativamente para a deformação; (atrito de deslizamento)



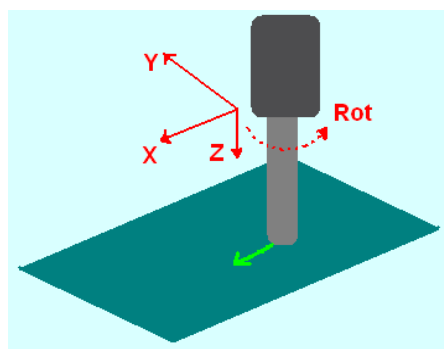
- b) a ferramenta rola quase sem escorregar sobre a superfície da chapa, e a conformação é feita pela pressão exercida pela ferramenta na chapa em conjunto com atrito de rolamento;



- c) a ferramenta é animada de rotação própria, e há geração de calor devido ao atrito na interface chapa/ferramenta;



- d) a ferramenta desliza passivamente sobre a superfície da chapa. O movimento de rotação que o punção adquire devido ao atrito com a chapa é permitido por meio de rolamentos de baixo atrito montados no porta-ferramentas.



O mecanismo de interação a) não necessita de adaptações no punção e qualquer varão metálico ou fresa não talhada, com rigidez adequada, pode ser utilizada como ferramenta de conformação. No entanto, o excessivo atrito de deslizamento gera demasiada flexão na extremidade do punção, levando-o frequentemente à rotura e degradando visivelmente a superfície.

Em oposição, na situação b) dá-se uma diminuição drástica do atrito de escorregamento, e consequente melhoria da qualidade superficial da peça porque existe um maior controlo do calor gerado por atrito. Mas o processo necessita de punções preparados com esfera de rolamento de metal duro e um circuito de fluido a alta pressão [JES2005a].

Quando o punção é animado de rotação própria, como ilustrado na alínea c) o calor gerado por atrito vai aumentar a formabilidade da chapa, mas em contrapartida a aproximação a uma conformação a quente gera fenómenos de adesão química da chapa ao punção, o que provoca a degradação das propriedades tribológicas da chapa e da qualidade de superfície, além de um consequente desgaste acelerado do punção de conformação. Durante *et al.* [DUR2008] defendem a existência de uma velocidade óptima de rotação do punção que minimiza a geração de calor e contribui para a melhoria da qualidade superficial da peça.

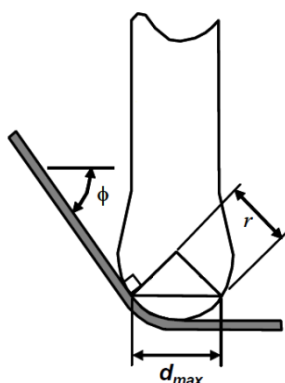


Fig. 28 - Geometria usada para deduzir a expressão da velocidade óptima de rotação própria do punção [JES2005a].

De acordo com Jeswiet *et al.* [JES2005a], para um determinado ângulo de parede ϕ , existe um ponto onde a chapa é tangente à esfera da ponta da ferramenta. Esta é a zona onde ocorre o máximo diâmetro de contacto, d_{max} que corresponde ao dobro do diâmetro médio do punção. Daí em diante, a chapa está em contacto com a ferramenta até ao fim da esfera, onde o diâmetro de contacto é nulo. Para minimizar a geração de calor por fricção, a ferramenta deve rolar sobre a chapa durante a conformação. Este princípio requer que a taxa de avanço seja igual à circunferência média da ferramenta em contacto com a chapa, multiplicada pela velocidade de rotação própria da ferramenta. A equação (1.5) contabiliza a velocidade óptima de rotação em função da taxa de avanço, do ângulo de parede e do raio do punção.

$$\omega = \frac{v}{\pi \cdot r \cdot \sqrt{\frac{(1 - \cos 2\phi)}{2}}} \quad (2.3)$$

Com o mecanismo de interacção d) dá-se uma redução do atrito de escorregamento, pois em situações de elevado atrito o punção responde passivamente com pequenas rotações. Pelo mesmo motivo não são desenvolvidos esforços de flexão apreciáveis na ponta da ferramenta e as forças horizontais de conformação diminuem. Esta solução tem sido largamente usada por autores que desenvolveram máquinas para operações de estampagem incremental, Allwood *et al.* [ALL2005] projectaram a *Cambridge ISF Machine* para que a árvore da máquina permitisse um movimento passivo do punção sobre a chapa. Os modelos de máquinas comercializados pela empresa Amino[®] [12] realizam estampagem incremental com uma interacção passiva do punção com a chapa. Adicionalmente, Duflou *et al.* [DUF2007] usaram um punção montado num porta-ferramentas passivo accionado por um braço robótico para realizar estampagem incremental.

2.2.3 FERRAMENTAS

A forma da ferramenta de conformação é um aspecto que influencia as forças de conformação, rugosidade da peça, e o tipo de interacção de contacto entre a peça e a ferramenta. A escolha do melhor punção depende da geometria da peça, o material da chapa e a profundidade máxima de conformação.

Actualmente em *ISF* usam-se punções de ponta lisa, por vezes ligeiramente arredondada com um chanfro muito pequeno, punções de ponta esférica, e esferas de material ultra duro que rolam quase sem escorregar sobre a superfície da chapa impulsionadas por um fluido pressurizado (*spherical roller*, Fig - 30). [JES2005a]



Fig. 29 – Punções de ponta esférica (esq.) e de ponta plana (dir.) usados em *ISF* [JES2005a].

A opção entre um determinado tipo de punção varia muito entre autores. No entanto, Ziran *et al.* [ZIR2009] fizeram uma análise comparativa entre ferramentas de ponta plana e esférica na conformação incremental de chapa, e concluíram que as ferramentas de ponta plana dão uma maior precisão geométrica à peça do que as de ponta esférica e o uso de uma ferramenta de ponta plana com um raio de ponta bem escolhido pode aumentar a formabilidade da chapa. Contrariamente ao que foi anteriormente concluído por outros investigadores, o aumento do raio de ferramenta nem sempre implica um decréscimo da

formabilidade, mas as forças de conformação da chapa diminuem com o uso de ferramentas de ponta esférica. Este é portanto um assunto em aberto no seio da comunidade científica.

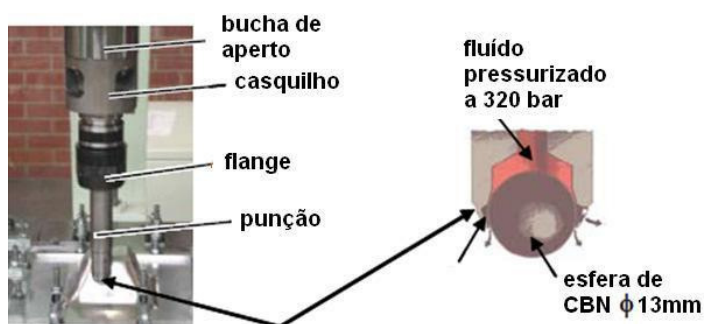


Fig. 30 – Ferramenta de conformação especialmente construída para estampagem incremental [JES2005a].

2.2.4 CURSO VERTICAL, Z

O curso vertical máximo condiciona a profundidade máxima das peças a serem conformadas. Este parâmetro é limitado por boa construção: quanto maior o curso vertical, maiores os momentos que se geram na estrutura da máquina devido às forças não axiais que a ferramenta tem de suportar. Também surgem questões económicas associadas a impor um elevado curso vertical a uma máquina-ferramenta: Allwood *et al.* [ALL2005] descrevem que a *Cambridge ISF Machine* têm o curso vertical restrito a 100mm porque é garantido por fusos de esferas, que se tornam bastante dispendiosos para grandes cursos. No caso do processo de *ISF* ser realizado por máquinas CNC adaptadas, para além da limitação de forças, o curso vertical está restringido à partida pela soma do curso vertical da árvore com o curso vertical da mesa.

Tabela 6 – Profundidade máxima de conformação de peças realizadas em estampagem incremental.

Autor	Peça	Profundidade máxima
[HUS2007]	pirâmide	53,47mm
[DEJ2009]	cone	50mm
[JES2005-2]	forno solar	74mm

2.2.5 ÁREA DE TRABALHO

Tal como no ponto anterior, a área de trabalho restringe o tipo e as dimensões das peças a serem produzidas. O processo de *ISF* têm áreas de aplicação desde a micro conformação de peças [OBI2009], até à conformação personalizada de capôs para automóveis e peças para motociclos [JES2001].

Tabela 7 - Áreas de conformação utilizadas por diversos autores para realizar estampagem incremental.

Autor	Área de conformação
[OBI2009]	20x20mm
[HUS2007]	140x140mm
[AMB2005]	290x210mm
[DEJ2009]	300x300mm
[ALL2005]	300x300mm

2.2.6 INCREMENTO VERTICAL (PASSO)

O incremento vertical Δ_z usado na estampagem incremental influencia o acabamento superficial das peças conformadas, e as forças geradas na ponta da ferramenta. O uso de um incremento vertical muito elevado implica uma grande deformação da chapa a cada passagem e conseqüentemente esforços de conformação elevados e, adicionalmente a

degradação geométrica e elevada rugosidade superficial. Em oposição a estampagem incremental com incrementos verticais muito pequenos aumenta o tempo necessário de conformação, tornando o processo menos viável e atractivo à implementação na indústria.

Finalmente, a definição de Δ_z implica uma primeira definição da gama de precisão da máquina.

Tabela 8 – Incrementos verticais utilizados por diversos autores para realizar estampagem incremental.

Autor	Δ_z
[OBI2009]	12 μ m
[HUS2007]	0,15mm
[AMB2005]	0,5mm
[DEJ2009]	0,2mm
[ALL2005]	[0,2-4]mm

Ainda que a precisão final da máquina seja um parâmetro que depende de inúmeros factores e de todos os componentes, os valores apresentados pelos diversos autores servem como referência para o presente projecto.

2.2.7 MATERIAIS

Os materiais mais utilizados na estampagem incremental são ligas de alumínio e aço, embora existam autores a usar outros materiais menos comuns, como placas de PVC [MAR2008], [FRA2009], [SIL2008], painéis sandwich de polipropileno com aço macio e de espumas metálicas com chapas de alumínio [JAC2009]. As ligas de alumínio, sobretudo as da série 3000 são mais frequentemente utilizadas devido à sua maior ductilidade e menor força de deformação em relação ao aço [SEN2009].

São também utilizadas, devido à forte componente de aplicação médica da estampagem incremental, as ligas biocompatíveis, tais como aço inoxidável, ligas à base de cobalto e cromo, e titânio e ligas à base de titânio.

A análise dos materiais utilizados em *ISF* torna-se importante de modo a prever as forças que actuam na ferramenta. De acordo com Allwood *et al.* [ALL2005], as forças horizontais verticais que actuam na ferramenta dependem da tensão de cedência do material a conformar.

Tabela 9 - Materiais usados em estampagem incremental.

Autor	Material	Espessura	Tensão de cedência
[HAM2007]	AA-5754	0,8-1,5 mm	106 MPa
	AA-6451		117 MPa
	AA-5182		130 MPa
[JES2005]	AA-3003 O	0,93-2,1 mm	41 MPa
[DUF2005]	AA-3003 O	0,85-1,5 mm	41 MPa
[MIC2007]	AA 1050-O	1,2mm	35 MPa
[AER2009]	AA 1050 O	1,06-1,2 mm	35 MPa
	AA-3003 O		41 MPa
	DC04		140 MPa
	AISI 304 O		241 MPa
[FRA2009]	PVC	3 mm	37-45 MPa
[JAC2008]	Propileno+aço inox	1,2-13,5 mm	14,5-21 MPa
	Propileno+alumínio		14,5-21 MPa

2.2.8 LUBRIFICAÇÃO

A utilização de lubrificantes em operações de *ISF* é muito comum para reduzir o atrito na interface chapa/ferramenta e consequentemente diminuir a temperatura gerada na conformação. A lubrificação promove a melhoria do acabamento superficial das peças, e

protecção contra o desgaste das ferramentas. Duflou *et al.* [DUF2005] testou o desempenho de diferentes lubrificantes na estampagem incremental e concluiu que sem lubrificação a chapa sofre rotura prematura.

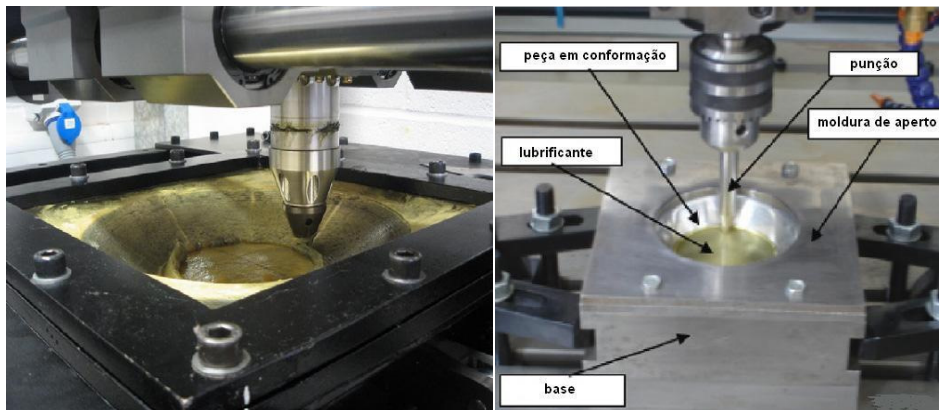


Fig. 31 - Estampagem incremental com massa de lítio (esq) [JAC2008] e óleo mineral (dir) [HUS2006].

3 PROJECTO

Dados os requisitos cinemáticos do processo de estampagem incremental, optou-se por projectar um sistema que anime o punção de conformação em três eixos de translação e três eixos de rotação. Desta forma permite-se que a conformação seja realizada com o punção quase sempre normal à superfície de conformação, minimizando os esforços de flexão no punção e aplicando a totalidade do esforço devolvido pela máquina na conformação da chapa. A tabela 10 resume as principais características de projecto da SPIF-A que se tentaram alcançar:

Tabela 10 - Principais características de projecto da SPIF-A.

Características	
Movimento de translação	3 eixos
Movimento de rotação	3 eixos
Curso vertical (z)	Mínimo de 200 mm
Área mínima de conformação	200x200mm

3.1 SISTEMA CINEMÁTICO

No decorrer deste projecto de desenvolvimento, foram consideradas e estudadas várias soluções para permitir as características cinemáticas requeridas:



Fig. 32 - Sistemas cinemáticos com seis graus de liberdade: cabeça rotativa de CNC [1], manipulador série [2], e manipulador paralelo [3].

As cabeças rotativas são muito usadas para aumentar a mobilidade de máquinas-ferramenta já existentes e integram a maioria dos centros de maquinagem modernos. São constituídas por um servomotor axial de íman permanente para produzir o movimento de rotação que pode ser transmitido directamente a uma cremalheira solidária com a árvore ou através de um sistema de engrenagens. É incluído um sistema de travagem, controlado por um sistema em malha fechada para garantir o maior grau de precisão e repetibilidade possível.

O manipulador série é um sistema largamente difundido para operações de estampagem incremental [DU2007]. É constituído por segmentos rígidos de geometria e tamanho variável, articulados num sistema muito semelhante às cabeças rotativas, mas aplicado a cada junta de articulação. Estes sistemas, de inspiração na arquitectura do braço humano, conseguem o posicionamento final da ferramenta como resultado da composição dos movimentos devolvidos por cada articulação. No entanto, devido a ter uma construção cinemática em série, os erros de posicionamento de cada junta somam-se no erro de posicionamento final, não permitindo uma elevada precisão de posicionamento.

O manipulador paralelo é composto por duas plataformas, uma fixa e outra móvel, ligadas a actuadores lineares independentes por meio de juntas prismáticas passivas de forma a construir um par cinemático com dois graus de liberdade, onde o curso dos actuadores é variado/incrementado para orientar e posicionar a plataforma móvel. A interacção entre a plataforma fixa e a plataforma móvel é garantida assim por seis cadeias cinemáticas, formando um sistema mecânico possível de controlar em malha fechada muito mais estável do que os típicos braços robóticos com sistemas de malha aberta.

Este tipo de sistemas tem em princípio uma elevada rigidez estrutural devido à plataforma móvel estar suportada por vários apoios em simultâneo, devolvendo assim uma

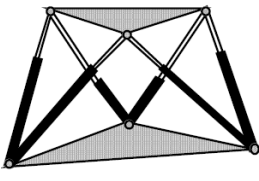
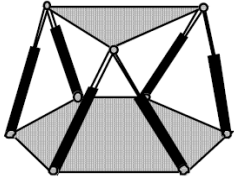
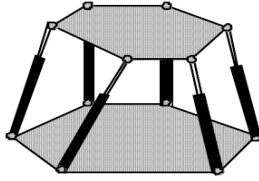

vasta gama de capacidades cinemáticas. As juntas de ligação dos actuadores às plataformas estão apenas sujeitas a esforços axiais de tracção e compressão, não sofrendo torção e aumentando assim a rigidez e precisão de posicionamento, permitindo simultaneamente uma construção mais leve. Como principal desvantagem possuem um espaço de trabalho limitado à geometria dos actuadores lineares, pois em certas posições estes podem colidir entre si, e cada actuador linear tem duas juntas passivas com um limite estrutural próprio.

Os manipuladores paralelos permitem um posicionamento mais rápido que os manipuladores em série, uma vez que os motores que accionam os actuadores lineares podem estar acoplados à plataforma fixa, reduzindo assim a massa móvel do sistema. Outro benefício dos manipuladores paralelos é a sua precisão de posicionamento, com os erros resultantes na plataforma móvel dados pela média dos erros de posicionamento de cada componente, em oposição aos manipuladores em série, onde os erros de cada componente são somados ao erro de posicionamento final do sistema.

Existem várias configurações de manipuladores paralelos baseadas no conceito original da plataforma Stewart: a configuração 3-3, em que os actuadores lineares saem da mesma junta com dois graus de liberdade na base fixa, e chegam à junta com dois graus de liberdade adjacente na base móvel; a configuração 6-3, em que os actuadores estão ligados a juntas com dois graus de liberdade individuais na base fixa e partilham uma junta com dois graus de liberdade na base móvel; e a configuração 6-6, que efectua ligações individuais à junta com dois graus de liberdade em ambas as bases. Existe também disponível no mercado uma configuração 3-3 alterada, em que com apenas 3 actuadores lineares, ligados à base fixa por juntas articuladas individuais e à base móvel através de

extensões rígidas conectadas às juntas prismáticas individuais da base fixa. Na tabela 11 são estabelecidas as comparações entre as configurações apresentadas.

Tabela 11 – Configurações da plataforma Stewart [BEN1999]

	3-3	6-3	6-6	3-3 alterada
Configuração				
Vantagens	Mais compacto; Menor número de componentes móveis.	Maior apoio na base fixa; Compacto.	Maior apoio, com seis pontos de suporte em ambas as bases; Distribuição de esforços; Juntas com dois graus de liberdade mais simples.	Elevada mobilidade e curso.
Desvantagens	Juntas com dois graus de liberdade duplas; Maior dependência de movimento nos actuadores; Menor aproveitamento do curso dos cilindros reduzindo a mobilidade.	Juntas com dois graus de liberdade duplas; Menor aproveitamento do curso dos cilindros reduzindo a mobilidade;	Maior número de juntas com dois graus de liberdade;	Falta de rigidez; Atravancamento; Menor apoio; Excentricidade.

Neste projecto optou-se por uma configuração 6-6 devido à maior facilidade de projecto e construção das cadeias cinemáticas que compõem a plataforma Stewart.

3.1.1 DESIGN DA PLATAFORMA STEWART

Após a procura de soluções para o sistema cinemático, optou-se pelo projecto de uma plataforma Stewart que devolvesse a mobilidade necessária à conformação incremental de chapa. Foram seleccionados actuadores hidráulicos de duplo efeito, tendo em consideração as seguintes restrições:

- a) a rigidez de um sistema hidráulico aumenta com o aumento da pressão de operação;
- b) o sistema teria de devolver força suficiente para se proceder à conformação, mesmo só com dois cilindros.
- c) O actuador deve ter curso suficiente para alcançar a área de trabalho pretendida ⁽¹⁾

3.1.1.1 CILINDROS ACTUADORES HIDRÁULICOS

Os critérios de escolha dos actuadores hidráulicos foram o curso, a área, e pressão de operação. Admitindo uma pressão de operação de 100 bar, a área mínima do actuador é dada pela lei de Pascal:

$$P = \frac{F}{2.A_{\min}} \Leftrightarrow 100 \cdot 1,013 \cdot 10^5 Pa = \frac{13 \cdot 10^3 N}{2.A_{\min}} \Leftrightarrow A_{\min} = 6,42 \cdot 10^{-4} m^2 \quad (3.1)$$

Em que:

P = pressão de operação;

F = força exercida pelos dois actuadores do mesmo nó;

¹ Trabalho actualmente a ser desenvolvido por outros membros da equipa de investigação.

A_{\min} = área mínima de cada actuador.

Então, o diâmetro mínimo do actuador é dado por

$$A_{\min} = \pi \cdot \left(\frac{d_{\min}}{2} \right)^2 \Leftrightarrow d_{\min} = 0,286 \cdot 10^{-2} m \quad (3.2)$$

Com base nestes dados foi pré-seleccionado um modelo de actuador hidráulico de duplo efeito com cursos entre 100 e 500 mm, e com vedantes de baixo atrito para garantir um movimento controlado.

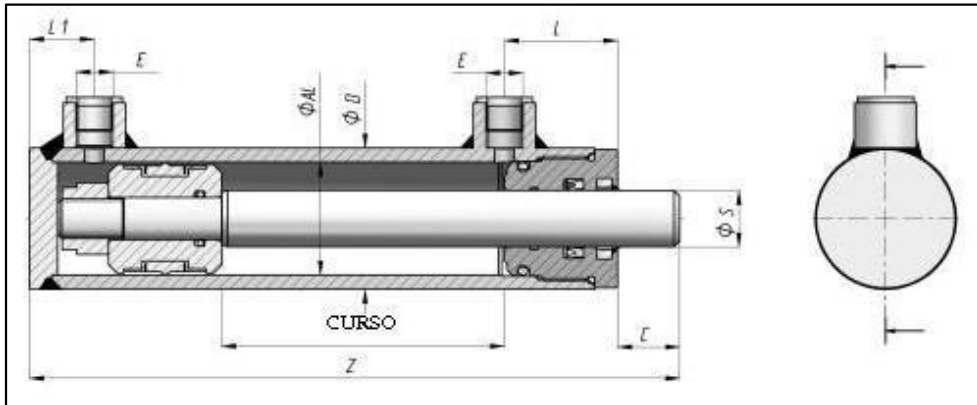


Fig. 33 - Cilindro actuador hidráulico [4].

Tabela 12 - Características do modelo de cilindro actuador seleccionado [4].

Referência	D	AL	S	F	Curso	Z	Kg	C	E	L	L1
	48		20								
HMOLM0400200100	48	40	20	50	100	195	1,73	12	1/4"	32	20
HMOLM0400200150	48	40	20	50	150	245	2,07	12	1/4"	32	20
HMOLM0400200200	48	40	20	50	200	295	2,41	12	1/4"	32	20
HMOLM0400200250	48	40	20	50	250	345	2,75	12	1/4"	32	20
HMOLM0400200300	48	40	20	50	300	395	3,09	12	1/4"	32	20
HMOLM0400200350	48	40	20	50	350	445	3,43	12	1/4"	32	20
HMOLM0400200400	48	40	20	50	400	495	3,77	12	1/4"	32	20
HMOLM0400200450	48	40	20	50	450	545	4,11	12	1/4"	32	20
HMOLM0400200500	48	40	20	50	500	595	4,45	12	1/4"	32	20
Êmbolo: Aço ST 52.3 DIN2393 ISO H9 Haste: Aço Ck 45 cromado											

3.1.1.2 JUNTAS COM DOIS GRAUS DE LIBERDADE

Para garantir que a ligação entre os actuadores e as plataformas devolvesse movimento em dois graus de liberdade, foram consideradas primeiramente algumas juntas com dois graus de liberdade existentes no mercado:

- a) Junta universal ou cardan: é uma junta com dois graus de liberdade composta por duas forquilhas articuladas por meio de pinos concorrentes numa cruzeta. As forquilhas têm furos para alojar veios lisos, roscados, estriados ou enchavetados. Podem também permitir uma fixação personalizada, com o furo feito pelo cliente.



Fig. 34 - Juntas universais [6].

- b) Junta esférica: é constituída por uma esfera metálica de articulação colocada no interior de um suporte de cavidade esférica. Esta disposição permite que haja contacto com a esfera em toda a superfície do suporte, resultado num movimento suave e com folgas mínimas. A aplicação de deste sistema nos actuadores hidráulicos seleccionados no ponto anterior exige uma peça de transição.



Fig. 35 - Junta esférica [5].

Projectou-se ainda uma solução feita à medida, para procurar obter uma junta mais compacta. Esta solução consiste no projecto de juntas universais para cada ligação, com ligação por soldadura entre o cardan da base fixa e o êmbolo do actuador, e com encaixe justo entre a haste do actuador e o cardan da base móvel, e ainda uma ligação aparafusada dos dois cardans a cada base.

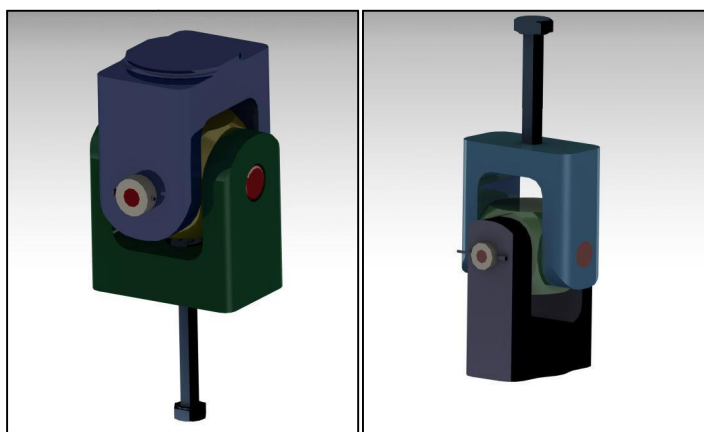


Fig. 36 - Junta universal projectada para os actuadores hidráulicos: ligação à base inferior (esq), e ligação à base superior (dir).

Posteriormente, considerou-se a hipótese de adaptar as fixações incluídas pelos fabricantes dos actuadores hidráulicos para construir uma junta com dois graus de liberdade, mas implicava a mudança para uma configuração 3-3 da plataforma Stewart. A adaptação consistia basicamente no uso dos olhais de cada cilindro para encaixar num garfo do

cardan. Esta proposta revelou-se inviável devido à restrição de movimento de rotação na junta prismática, não permitindo sequer a montagem da plataforma de Stewart.

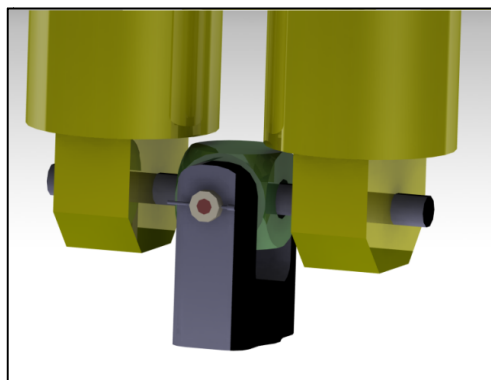


Fig. 37 - Fixação adaptada para construir junta universal.

Após a consulta de catálogos disponíveis no mercado, verificou-se pouca oferta para aplicação destes componentes para dimensões superiores a 20mm, no entanto apresenta-se seguidamente os resultados comparativos das soluções apresentadas na tabela 13.

Tabela 13 - Características das juntas apresentadas.

Solução	Ângulo admissível de rotação		Dimensões máximas		Referência
			Inferior	Superior	
Cardan comercial	---		Inferior	Ø50x122	[6]
			Superior	Ø26x56	
Junta esférica	Inferior	17°	Inferior	Ø118x40	[5]
	Superior	25°	Superior	Ø109x36	
Cardan personalizado	Inferior	45°	Inferior	100x70x45	---
	Superior	100°	Superior	66x40x30	

Conclui-se que a aplicação de cardans feitos à medida garante uma superior adaptação aos movimentos dos actuadores, maior compactação, rigidez e resistência aos esforços resultantes. O dimensionamento dos cardans foi baseado no projecto descrito por Simões Morais [SIM2006], e consiste em dois garfos articulados por meio de dois pinos

concorrentes numa cruzeta, garantindo desta forma a coaxialidade dos dois graus de liberdade, e permitindo a fácil desmontagem da junta para eventuais substituições de componentes.

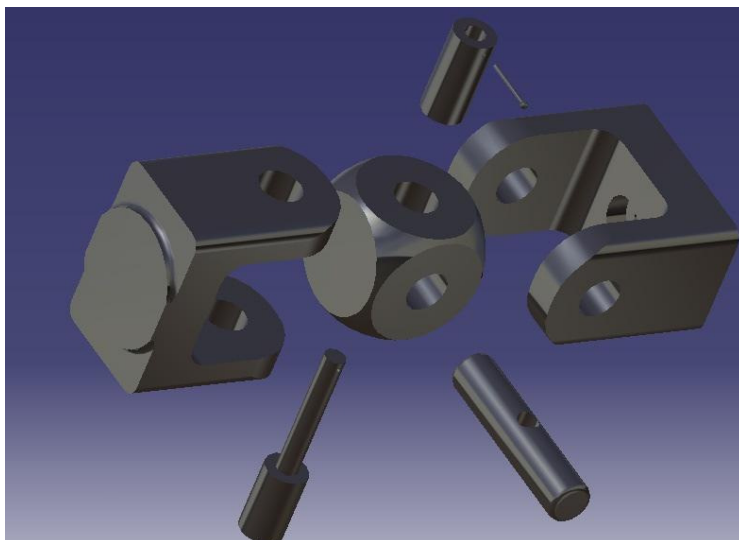


Fig. 38 – Vista explodida da junta universal.

Procedeu-se a uma análise por elementos finitos para avaliar o comportamento das juntas articuladas quando sujeitas à solicitação dos actuadores. Foi aplicada na ligação de cada junta universal ao actuador hidráulico, uma carga distribuída correspondente à pressão de operação de 100 bar a que cada actuador está sujeito, restringindo o seu movimento às bases da plataforma por meio de um encastramento correspondente ao aperto exercido pelas ligações aparafusadas. Para esta análise considerou-se que as juntas universais eram construídas em aço DIN Ck 45, equivalente a AISI 1045 com tensão limite elástica, $\sigma_y = 505 \text{ MPa}$, com endurecimento superficial para os pinos que convergem na cruzeta.

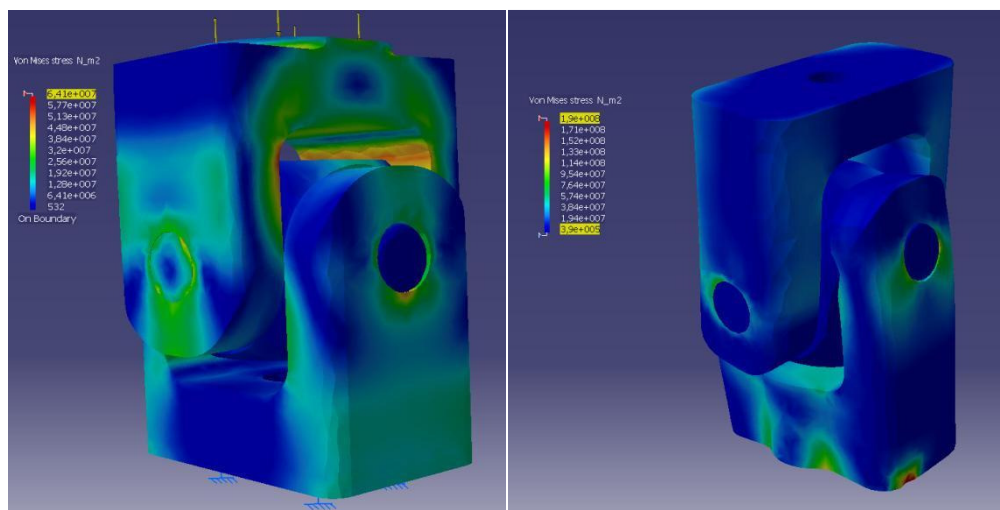


Fig. 39 - Simulação dos esforços suportados pelas juntas universais.

Tabela 14 - Resultados da análise dos esforços suportados pelas juntas universais.

Junta Universal	Inferior	Superior
Tensão (MPa)	128, 406	390,368
Deslocamento (mm)	0,0354	0,0629

3.1.1.3 BASES DA PLATAFORMA STEWART

A plataforma Stewart possui duas bases ligadas entre si por seis actuadores hidráulicos. As plataformas móveis e fixas têm três nós, posicionados nos vértices de um triângulo inscrito na circunferência de base, estando os triângulos de ambas as bases desfasados numa rotação de sessenta graus. De cada nó da base fixa partem dois actuadores lineares que se vão ligar aos dois nós adjacentes da base móvel. Apesar de se ter optado por uma configuração 6-6 para a plataforma, usou-se a geometria da configuração 3-3 para uma primeira aproximação, colocando-se posteriormente os seis pontos de apoio de cada cadeia cinemática à mínima distância possível sem causar interferência entre juntas articuladas.

As bases têm uma razão de diâmetro de $\frac{3}{4}$, sendo a base fixa a maior, garantindo uma diminuição do atravancamento na zona de conformação.

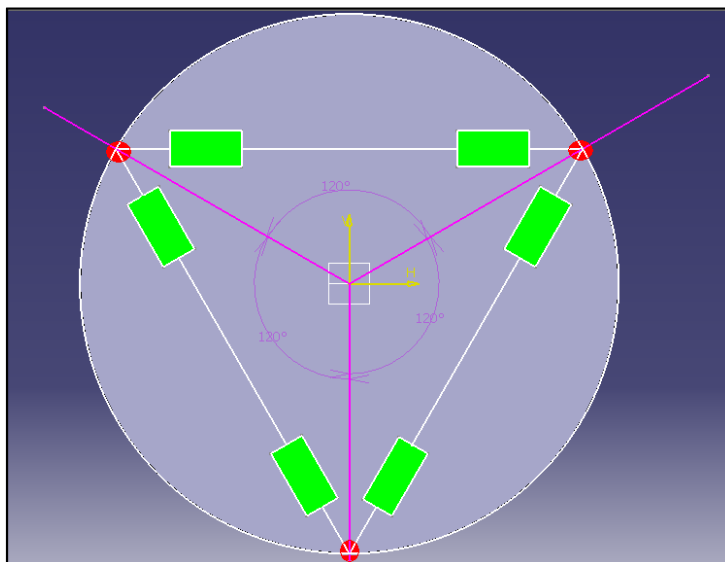


Fig. 40 – Posicionamento das juntas universais que ligam a plataforma aos actuadores lineares.

Na figura 41 estão representadas as bases projectadas para a plataforma Stewart, ambas possuem uma cavidade central não só por motivos de remoção de material e consequentemente diminuição do peso próprio, mas também para possibilitar a passagem de cabos e tubos. Também é possível observar a existência das cavidades rectangulares para a colocação das juntas universais definidas no ponto anterior nas quais é aberto um furo no qual é alojada a ligação parafuso H e porca H.

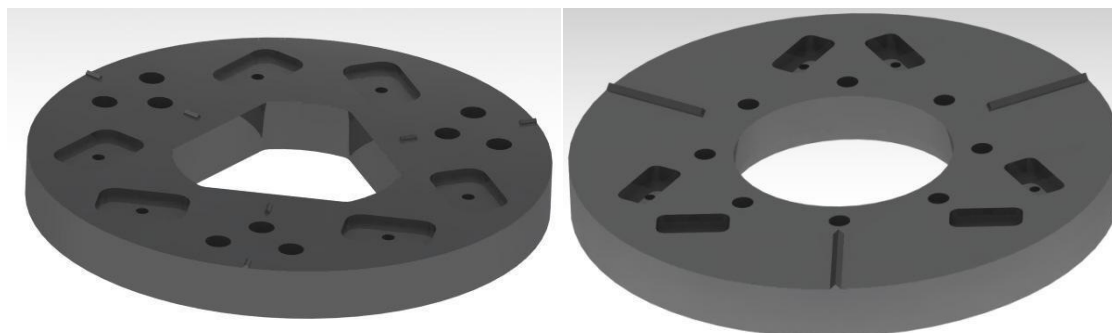


Fig. 41 – Bases da plataforma Stewart.

3.1.2 DESCRIÇÃO DOS COMPONENTES PARA O SISTEMA CINEMÁTICO

A base fixa da plataforma Stewart fica portanto definida em aço Ck45 com dimensões $\text{Ø}400 \times 40 \text{mm}$, com cavidades maquinadas sobre as quais assentam os seis garfos dos cardans inferiores, acoplados por meio de ligações por parafuso H e porca H. Os seis actuadores hidráulicos previamente seleccionados serão ligados aos garfos dos cardans inferiores por meio de soldadura. De forma semelhante, a base móvel da plataforma Stewart será construída em aço Ck45, com dimensões $\text{Ø}300 \times 30 \text{mm}$ e cavidades maquinadas para o alojamento dos seis garfos dos cardans superiores. A ligação dos cardans superiores aos cilindros actuadores será feita por meio de uma ligação veio cubo, com ajuste com interferência entre a haste do actuador e um furo maquinado no garfo do cardan. A sequência de montagem das ligações anteriormente descritas está ilustrada nas figuras 42 e 43. A figura 44 mostra a plataforma Stewart montada.

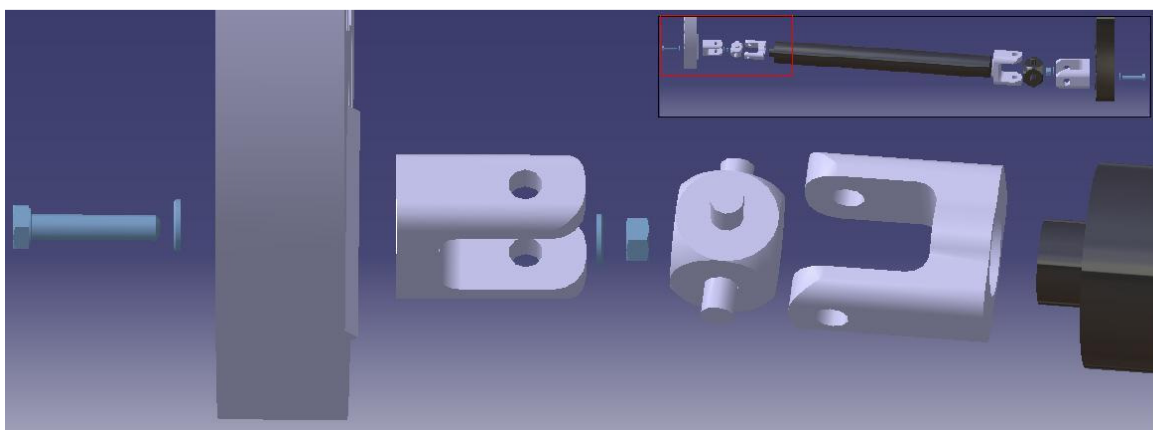


Fig. 42 – Esquema de montagem dos componentes da junta prismática na base superior da plataforma Stewart.

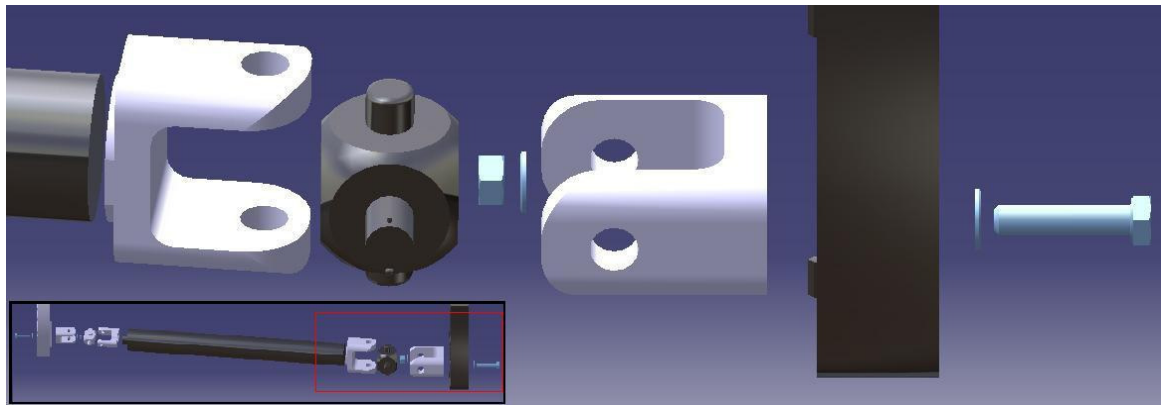


Fig. 43 – Esquema de montagem dos componentes da junta prismática na base inferior da plataforma Stewart.

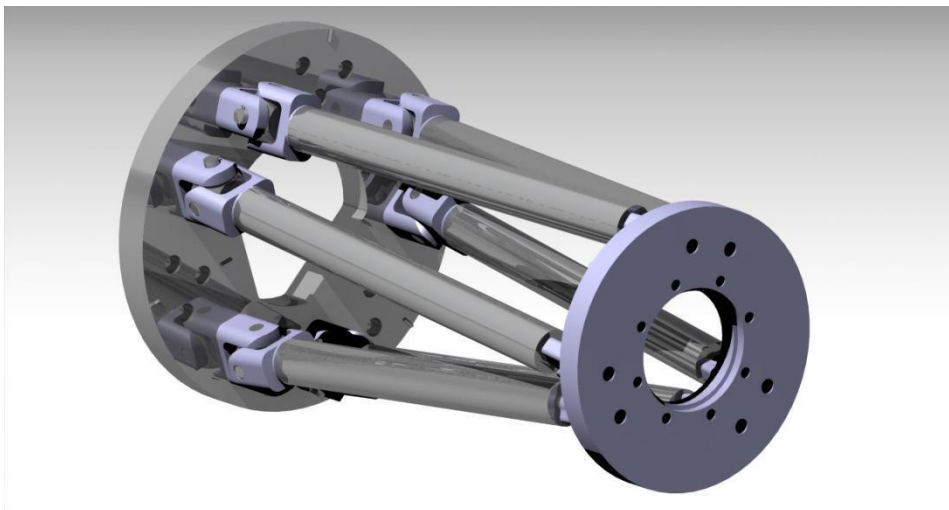


Fig. 44 - Aspecto final da plataforma Stewart projectada para a SPIF-A.

3.2 PROJECTO DA ÁRVORE

Tendo em conta o desenvolvimento dos esforços no plano da chapa, que actuam no punção durante a estampagem incremental, foi projectado um sistema de suporte mecânico para alojar o punção de conformação que fosse capaz de resistir às solicitações do processo, transmitindo-as de uma forma mais favorável à estrutura da máquina: a árvore.

A aplicação de uma árvore em detrimento do alojamento directo do punção na plataforma móvel permite uma maior acessibilidade à peça durante a conformação, uma vez que as dimensões da árvore são menores do que as da plataforma móvel, diminuindo assim o atravancamento. A árvore permite a selecção e controlo do mecanismo de interacção do punção com a chapa. Tal como apresentado anteriormente, o deslizamento passivo do punção sobre a chapa com o mínimo de atrito possível é a solução mais vantajosa para a estampagem incremental por único ponto.

De acordo com o modelo de deformação em estampagem incremental proposto por Allwood *et al.* [ALL2005] desenvolve-se um esforço axial de compressão de 13kN e tangencial de 6,5 kN na ponta da ferramenta. Apesar da generalidade dos autores apresentar resultados de medição de forças significativamente inferiores, foram usados estes resultados como referencia para o presente projecto para conferir maior versatilidade de uso da máquina e permitir o uso de materiais com maior dureza e espessura.

Ainda que o objectivo final deste projecto seja realizar a conformação incremental sempre normal à superfície da chapa a fim de minimizar os esforços de flexão e reconduzir o trabalho para a deformação da chapa e não para o gerar atrito entre a chapa e o punção, existem situações em que a geometria da peça e o atravancamento da máquina não permitem o posicionamento ideal, como ilustrado na figura 45. O desvio entre a trajectória

ideal e a trajetória possível de conformação vai provocar esforços tangenciais que têm de ser contemplados no projecto da árvore.

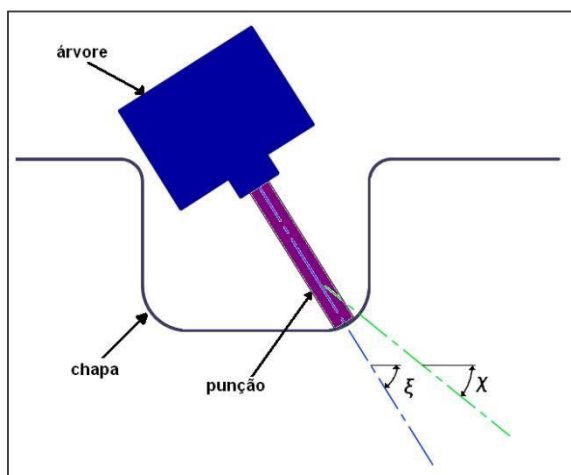


Fig. 45 - Inacessibilidade devido à geometria da peça, e definição do ângulo ideal de conformação (X), e do ângulo possível de conformação (ξ).

O projecto da árvore começou a partir do esboço ilustrado na figura 46, onde se podem distinguir os elementos principais: o veio que faz a ligação da árvore à ferramenta, a caixa que aloja o veio e faz a ligação da árvore à plataforma móvel, e rolamentos para garantir o correcto apoio e posicionamento do veio.

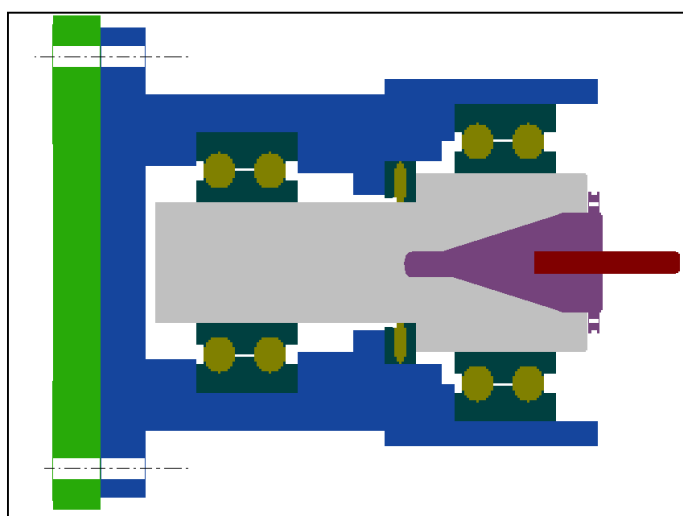
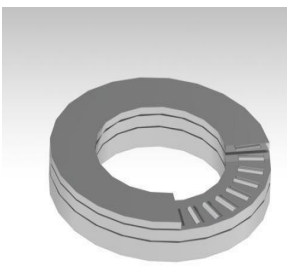
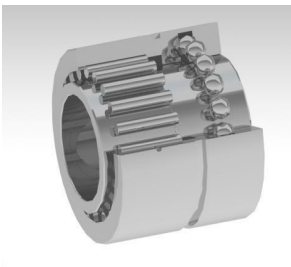



Fig. 46 - Esboço inicial da árvore da SPIF-A.

3.2.1 PROPOSTA 1 (PRIMEIRA PROPOSTA DA ÁRVORE DA SPIF-A)

A selecção dos rolamentos a aplicar na árvore obedece a três critérios: posicionar correctamente o veio, garantir o mínimo deslocamento possível e resistir aos esforços desenvolvidos durante o processo. Numa primeira abordagem foram escolhidos três rolamentos:

Tabela 15 - Características dos rolamentos seleccionados para o veio [8].

	A	B	C				
	Axial de rolos de agulhas	Rolos de agulhas combinados com axial de esferas	Rolamento rígido de uma carreira de esferas				
Tipo de rolamento							
Características	$C_0 = 60 \text{ kN}$ $C = 13,4 \text{ kN}$ $P_u = 6,7 \text{ kN}$ Esforço: Axial de compressão $v_{ref} = 3800 \text{ rpm}$ $v_{lim} = 7500 \text{ rpm}$ Massa= 0,007 Kg	<table border="1"> <tr> <td> Radial: $C_0 = 25 \text{ kN}$ $C = 15,4 \text{ kN}$ $P_u = 2,9 \text{ kN}$ </td> <td> Axial $C_0 = 28,5 \text{ kN}$ $C = 12,4 \text{ kN}$ $P_u = 1,06 \text{ kN}$ </td> </tr> <tr> <td colspan="2"> Esforço: Flexão e compressão (guiamento e apoio) $v_{ref} = 5600 \text{ rpm}$ $v_{lim} = 6300 \text{ rpm}$ Massa= 0,12 Kg </td> </tr> </table>	Radial: $C_0 = 25 \text{ kN}$ $C = 15,4 \text{ kN}$ $P_u = 2,9 \text{ kN}$	Axial $C_0 = 28,5 \text{ kN}$ $C = 12,4 \text{ kN}$ $P_u = 1,06 \text{ kN}$	Esforço: Flexão e compressão (guiamento e apoio) $v_{ref} = 5600 \text{ rpm}$ $v_{lim} = 6300 \text{ rpm}$ Massa= 0,12 Kg		$C_0 = 2,6 \text{ kN}$ $C = 4,36 \text{ kN}$ $P_u = 0,125 \text{ kN}$ Esforço: Flexão (guiamento e apoio) $v_{lim} = 11000 \text{ rpm}$ Massa= 0,022 Kg
Radial: $C_0 = 25 \text{ kN}$ $C = 15,4 \text{ kN}$ $P_u = 2,9 \text{ kN}$	Axial $C_0 = 28,5 \text{ kN}$ $C = 12,4 \text{ kN}$ $P_u = 1,06 \text{ kN}$						
Esforço: Flexão e compressão (guiamento e apoio) $v_{ref} = 5600 \text{ rpm}$ $v_{lim} = 6300 \text{ rpm}$ Massa= 0,12 Kg							

Para determinar qual a configuração de rolamentos mais estável, foram testadas várias disposições, assumindo um veio sólido de aço Ck 45, diâmetro $\phi=25\text{mm}$ e comprimento aproximado de 100mm, com uma concordância para alojarmos o rolamento axial de agulhas:

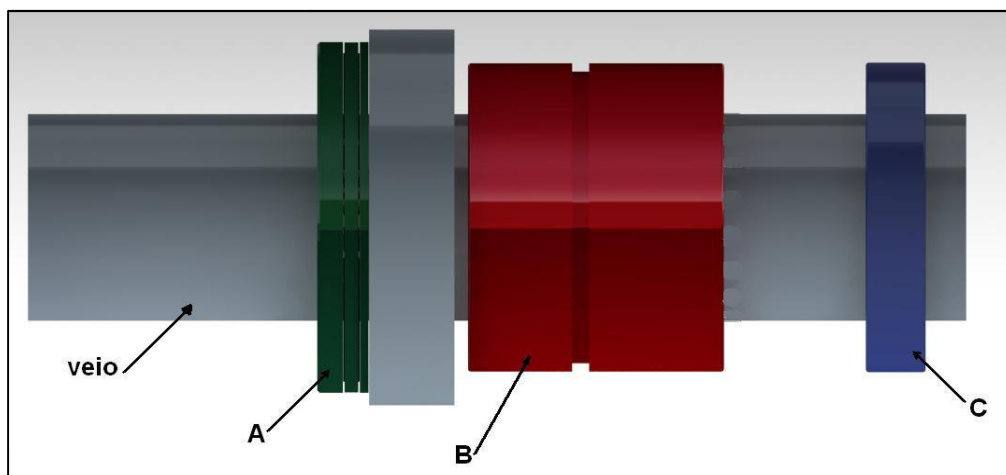


Fig. 47 - Configuração I da disposição dos rolamentos no veio.

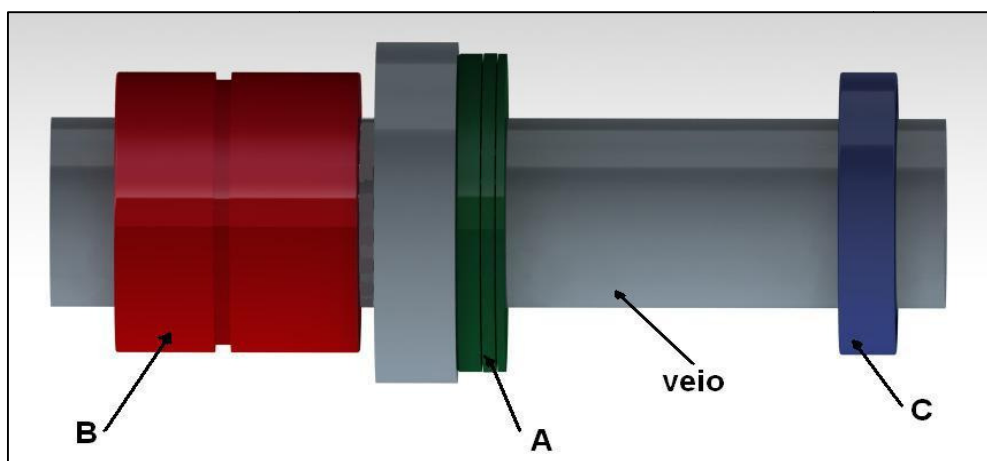


Fig. 48 - Configuração II da disposição dos rolamentos no veio.

Na tabela 16 apresenta-se o dimensionamento à flexão das duas configurações, que foram posteriormente comparados com os limites indicados por Morais [MOR2007] para garantir perfeita funcionalidade. Em anexo encontram-se os resultados pormenorizados desta análise.

Tabela 16 - Resultados do dimensionamento à flexão do veio da árvore.

	M_z	θ_{\max}	δ_{\max}
Configuração I	52 Nm	0,2920 mrad	3,454
Configuração II	52 Nm	0,2955 mrad	3,494

Ainda que ambas as configurações apresentem resultados aceitáveis de dimensionamento, a configuração I permite que os esforços de compressão da árvore sejam melhor suportados pelo rolamento de agulhas entre a concordância do veio e a caixa de alojamento. Posto isto, foi projectada a árvore da máquina para alojar à base móvel da plataforma Stewart com a configuração I.

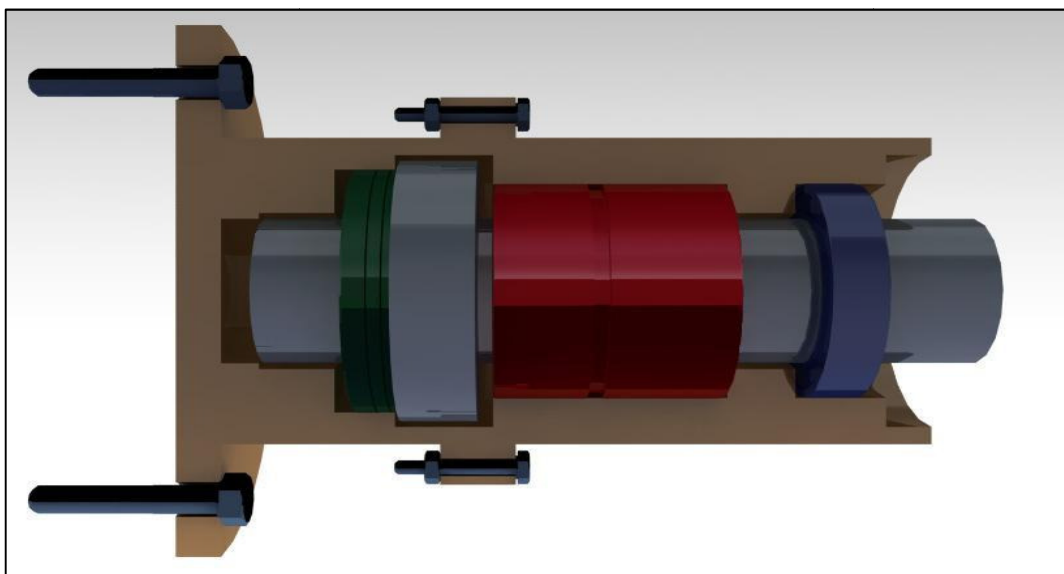


Fig. 49 - Proposta de árvore para a SPIF-A.

Esta solução é composta por duas caixas, ligadas entre si por parafusos, e posteriormente alojada a árvore na base móvel também por meio de ligações aparafusadas. Com a árvore definida, partiu-se para a escolha de um meio de fixação para o punção de conformação acoplar à árvore.

3.2.2 SELECÇÃO DO PORTA-FERRAMENTAS

O porta-ferramentas age como uma interface entre o veio da árvore e o punção de conformação, transmitindo passivamente o movimento de rotação do punção para o veio e de maneira a que não seja diminuída a eficiência dos elementos de interface [7]. Desta

forma é um elemento fundamental no presente projecto, e requer especial atenção na análise dos três pontos seguintes:

- a) **Concentricidade:** os eixos de rotação da árvore e do punção devem ser mantidos concêntricos;
- b) **Força de fixação:** a ferramenta deve ser segurada firmemente para evitar a sua rotação dentro do mandril, ou que se liberte durante o trabalho, representando situações potencialmente perigosas;
- c) **Padronização:** os diferentes componentes devem ser uniformes entre si. A selecção de um porta-ferramentas deve estar de acordo com a árvore onde vai ser montado, garantindo assim que não há perda de precisão excessiva entre componentes;

Existem inúmeras soluções no mercado para porta-ferramentas para os diversos processos tecnológicos, mas devido à conformação incremental de chapa ser um processo relativamente recente, com pouco desenvolvimento ao nível de equipamentos para o realizar, não existem porta-ferramentas disponíveis no mercado especialmente construídos para *ISF*. Por este motivo, o porta-ferramentas para a SPIF-A terá de ser escolhido de um já existente para outro processo tecnológico, ou adaptado às necessidades específicas da conformação incremental de chapa.

Os critérios para a selecção de um porta-ferramentas incluem a versatilidade, precisão e tipo de esforços desenvolvidos durante o processo tecnológico em causa. No caso de *ISF*, com a vasta gama de diâmetros de punções utilizados, o porta-ferramentas deve ter a universalidade de alojar punções com diâmetros de $\varnothing 5$ até $\varnothing 30$ mm. Adicionalmente, o

porta-ferramentas deve estar preparado para suportar cargas axiais de compressão e cargas tangenciais.

3.2.2.1 PORTA-FERRAMENTAS COMERCIALMENTE DISPONÍVEIS

Um porta-ferramentas é constituído por três elementos principais: o cone, a flange, e o sistema de fixação da ferramenta.

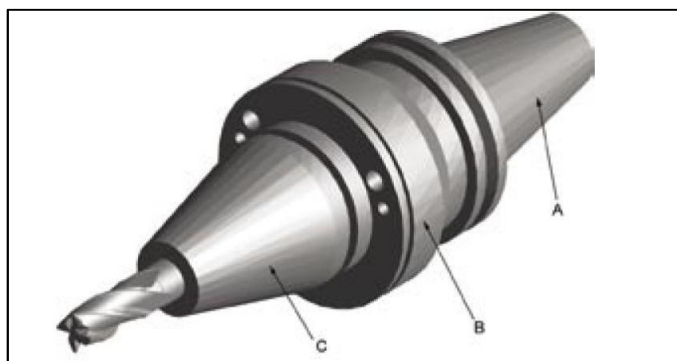


Fig. 50 - Arquitetura de um porta-ferramentas: A-cone, B-flange, C- sistema de fixação [7].

O cone realiza a interface entre o veio da máquina e o porta-ferramentas e pode ser de vários tipos:

a)Cone (CAT, ISO, DIN): é o caso mais comum e versátil usado actualmente na indústria. Usado em fresadoras e centros de maquinagem, permite um bom balanceamento sem a complexidade de outras soluções existentes. Não necessita de muitos requisitos para o alojamento à árvore, e constitui uma solução ideal em protótipos e máquinas com troca manual de ferramentas.

b)HSK com haste oca: as conexões HSK existem em seis padrões normalizados para hastes e para os respectivos furos de alojamento. Caracterizam-se por uma superfície de contacto cone/furo alojador plana. São especialmente indicados para maquinagem a alta velocidade devido ao elevado balanceamento que atingem, sobretudo a elevadas rotações.

Possuem elevada rigidez estática e dinâmica, fixação centralizada que permite cargas de flexão que podem ser até duas vezes superiores aos porta-ferramentas cónicos comuns

c) Flutuante, especialmente indicados para operações de roscagem e alargamento, devido a estarem preparados para o complexo equilíbrio de movimento de rotação e axial que se desenvolve durante a geração de rosca. Este tipo de cones é no entanto desaconselhado para processos que envolvam flutuações radiais, não oferecendo resistência à flexão.



Fig. 51 - Cones a) DIN, b) HSK e c) flutuante [9]

A flange permite a fixação e sustentação, através do seu diâmetro externo, de todo o porta-ferramentas ao veio da árvore, caso seja necessário, e a troca automática de ferramentas em centros de maquinagem.

Existem quatro tipos de sistemas de fixação para o aperto da ferramenta ao porta-ferramentas:

- a) Mandril de Pinças (DIN 6388 e DIN 6499): o aperto é feito por uma bucha metálica em torno da haste cilíndrica da ferramenta, que é accionada por uma porca de trava.
- b) Mandril Hidráulico: utiliza um reservatório de óleo para equilibrar a pressão de fixação em torno da haste da ferramenta.

- c) Mandril de contracção ou aperto térmico: opera em conjunto com um aquecedor. O mandril aproveita a dilatação e a contracção térmica para prender a ferramenta num ajustamento com interferência. À temperatura ambiente, o furo no qual a ferramenta está montada é ligeiramente menor comparado com a haste da ferramenta. O aquecimento do mandril dilata este furo permitindo a inserção da ferramenta. Quando o mandril arrefece, o furo contrai-se em torno da ferramenta criando uma fixação concêntrica muito rígida.
- d) Mandril Weldon e Whistle Notch: neste tipo de aperto, um parafuso radial aperta contra a haste da ferramenta, fixando-a. A ferramenta necessita de ter uma área plana rectificada na haste.



Fig. 52 - Sistemas de fixação do punção: a) porta pinças [9], b) mandril hidráulico [10], c) mandril de contracção [9], d) mandril Weldon [9].

A melhor solução para responder aos esforços desenvolvidos no processo de conformação incremental de chapa é o mandril de contracção ou aperto térmico, pois permite um encastramento perfeito da haste do punção no porta-ferramentas. No entanto, esta solução implica a aquisição do aquecedor de mandris, o que constitui um investimento inicial de cerca de 4000 euros [9]. Alternativamente, sugere-se a aplicação de um mandril Weldon ou Whistle Notch, que apesar de implicar operações preparatórias de maquinagem do punção,

torna-se vantajoso devido à elevada rigidez do aperto e facilidade de manuseio, mesmo por operadores não especializados. Os mandris de pinças têm a vantagem de se adaptar a soluções mais versáteis de alojamento, e ainda que não apresentem uma rigidez tão elevada, são ideais para protótipos de máquinas.

3.2.2.2 ALOJAMENTO DO PORTA-FERRAMENTAS

Para garantir a fixação do porta-ferramentas ao veio da árvore, são apresentadas várias soluções:

A. Aparafusamento do sistema de fixação ao veio:

O sistema de fixação é composto por uma peça de transição (1) que aloja um parafuso que aperta no veio da árvore, e uma pinça metálica (2) alojada na peça de transição, assim como uma porca de trava (3) para ao rosca apertar o punção (4) no interior da pinça metálica.

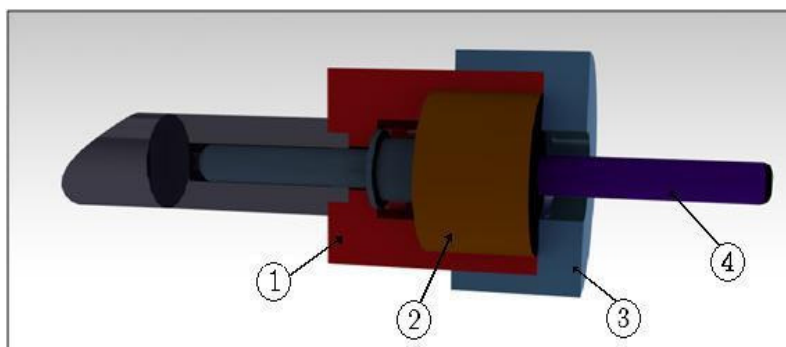


Fig. 53 - Aparafusamento do sistema de fixação ao veio.

B. Ajustamento do sistema de fixação ao veio:

A peça de transição (1) tem um furo quadrado que aloja a geometria de secção quadrada maquinada no veio da árvore. Da mesma forma, a peça de transição aloja a pinça metálica (2) que aperta o punção (4) por meio de uma porca de trava (3).

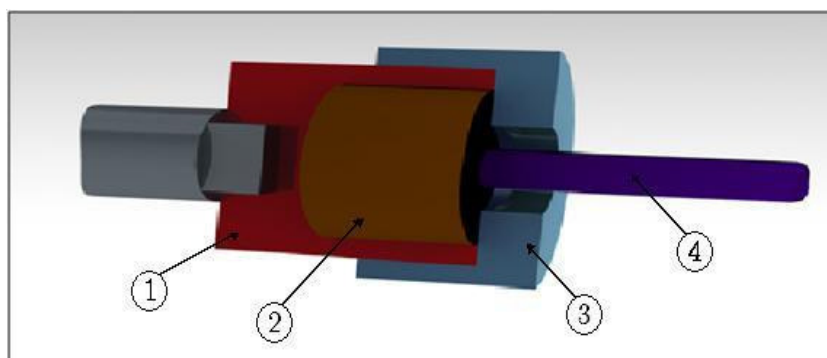


Fig. 54 - Ajustamento do sistema de fixação ao veio.

C. Roscagem do sistema de fixação ao veio:

A peça de transição (1) tem uma rosca fêmea para alojar a rosca aberta no veio da árvore. O restante sistema de fixação é comum às soluções anteriores.

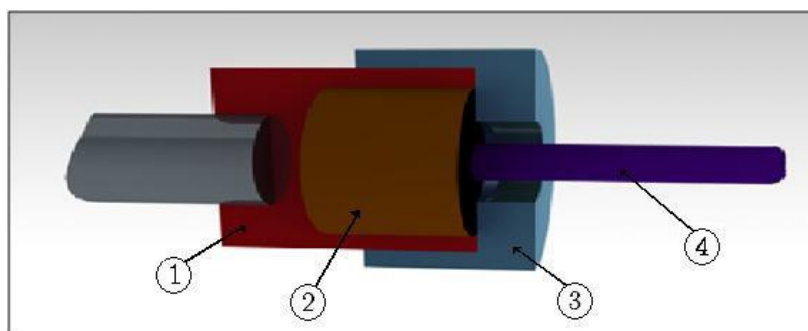


Fig. 55 - Roscagem do sistema de fixação ao veio.

D. Pinça de aperto:

A pinça de aperto é uma solução muito comum utilizada em máquinas-ferramenta convencionais, que permite uma imobilização segura e uma troca rápida do porta-

ferramentas. Ao contrário das soluções de alojamento anteriormente apresentadas, é testada e normalizada para aplicações industriais. O sistema de aperto é constituído por uma barra de tracção (3), parcialmente roscada, que aloja na extremidade superior um conjunto de molas de disco pré-carregadas (2) e, na extremidade oposta uma pinça metálica (4) que aperta o tirante de tracção alojado no cone do porta-ferramentas. A libertação do cone é feita quando o cilindro actuador (1) que pode ser hidráulico ou pneumático, aperta as molas de disco, fazendo a barra de tracção deslocar-se para a frente e abrir a pinça metálica.



Fig. 56 - Sistema de aperto por pinça metálica [11].

A capacidade de imobilização do sistema é quantificada pela tracção que a pinça metálica exerce sobre o tirante de tracção, e depende do número de discos aplicados na barra de tracção. A tabela 17 mostra valores de referência para a tracção em função do tipo de cone e do tamanho.

Tabela 17 - Forças de aperto recomendadas para imobilização de porta-ferramentas em operações de fresagem, em função do tamanho e tipo de cone [11].

	30	40	50	60
ISO/SK	5,5-6 kN	10,5-12 kN	23-25 kN	60-65 kN
HSK	6,8 kN	7,8 kN	10,3 kN	12,3 kN

Estes valores foram obtidos através da experiência de fabricantes de máquinas-ferramenta para operações de maquinagem convencional, onde as forças de corte são

significativamente menores aos esforços do projecto da SPIF-A. Apesar disto, o maior esforço sobre a árvore será de compressão e não diminui a força de aperto exercida pela pinça de aperto no porta-ferramentas. Para libertar o porta-ferramentas é exercida uma compressão sobre as molas, que pode ser de accionamento manual, ou através de um actuador hidráulico ou pneumático. Um bom sistema de encastramento do porta-ferramentas é de extrema importância para garantir uma boa precisão e repetitividade no processo de estampagem. A tracção exercida pela pinça de aperto tende a diminuir com o tempo, provocando ressaltos no punção e contribuindo activamente para a degradação da árvore e do porta-ferramentas, assim como uma diminuição da qualidade superficial das peças [11].

3.2.3 RE-DESIGN DA ÁRVORE (SEGUNDA PROPOSTA DA ÁRVORE DA SPIF-A)

A árvore foi redimensionada para proporcionar um alojamento do porta-ferramentas com pinça de aperto. Foi escolhido um sistema da empresa Ott-Jakob® [11] que permite a libertação automática do porta-ferramentas através de um actuador hidráulico integrado na árvore.

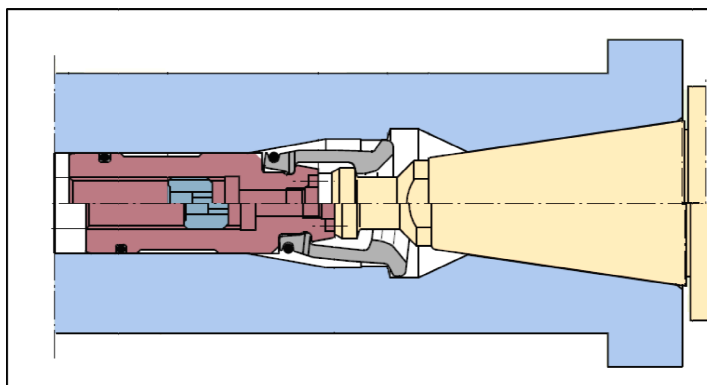

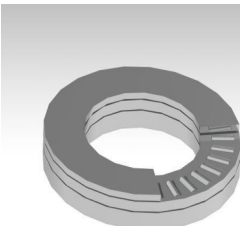
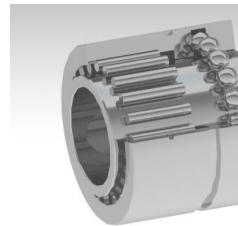
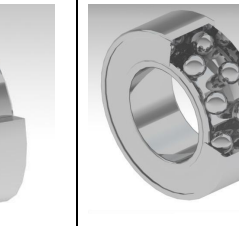



Fig. 57 - Desenho esquemático do sistema de aperto incluído na segunda solução [11].

Procedeu-se a um aumento de diâmetro e comprimento do veio, que foi redesenhado para poder alojar o sistema de aperto no seu interior. O conjunto de rolamentos também foi redimensionado para esta nova solução

Tabela 18 – Características dos rolamentos seleccionados para o veio [8].

Tipo de rolamento	Duas carreiras de esferas com contacto angular	Axial de rolos de agulhas	Rolos de agulhas combinados com axial de esferas		Duas carreiras de esferas com contacto angular
					
Características	Diâmetro 70mm $C_0 = 80$ kN $C = 88,4$ kN $P_u = 3,4$ kN $v_{lim} = 4500$ rpm Massa= 1,90 Kg	$C_0 = 186$ kN $C = 34,5$ kN $P_u = 22,4$ kN $v_{ref} = 2200$ rpm $v_{lim} = 4300$ rpm Massa= 0,028 Kg	Axial $C_0 = 16,7$ kN $C = 9,27$ kN $P_u = 0,69$ kN	Radial: $C_0 = 104$ kN $C = 57,2$ kN $P_u = 13,2$ kN	Diâmetro 55mm $C_0 = 47,5$ kN $C = 60$ kN $P_u = 2$ kN $v_{lim} = 4500$ rpm Massa= 1,05 Kg
			$v_{ref} = 6300$ rpm $v_{lim} = 7000$ rpm Massa= 0,56 Kg		

Esta solução apresenta duas caixas exteriores para alojamento de rolamentos, fixadas entre si por ligações aparafusadas. A fixação da árvore à plataforma é feita por parafusos. Foram incorporados dois rolamentos de esferas de duas carreiras com contacto angular, um em cada extremidade da árvore, para permitir maior guiamento. O veio é oco para proporcionar o alojamento do sistema de fixação por pinça de aperto. Tem também uma concordância exterior para colocação do rolamento axial de agulhas, que permite a resistência à compressão. A inserção do cone do porta-ferramentas é garantida pelo furo de conicidade 7/24 na extremidade do veio.

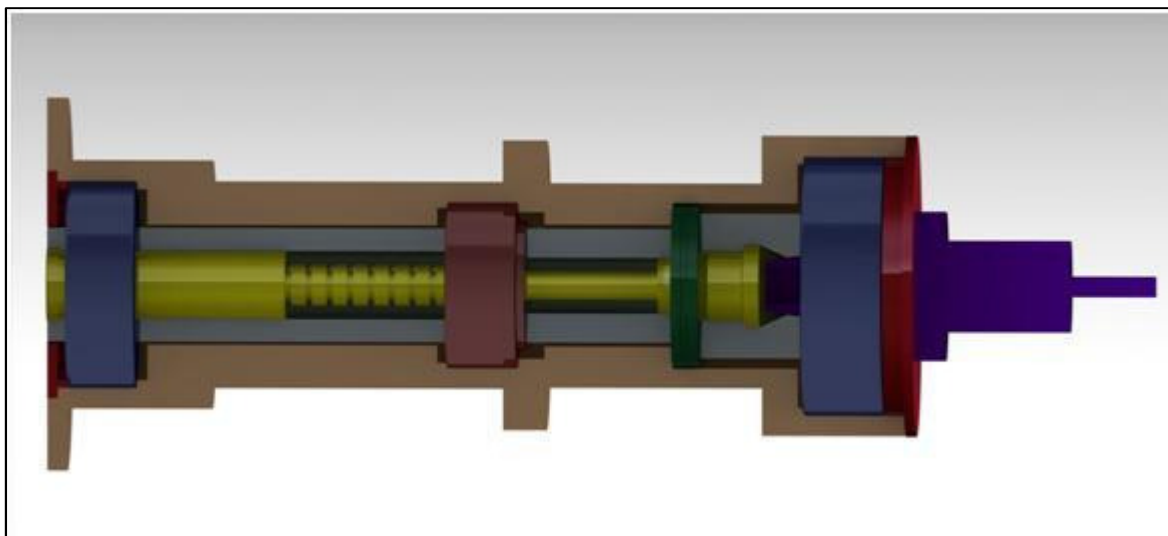


Fig. 58 - Árvore da proposta 2, em corte, onde se pode ver a disposição dos diferentes elementos, e do sistema de aperto do porta-ferramentas.

Foram também adicionadas duas tampas, uma em cada extremidade da árvore, fixadas por parafusos, para ajudar a posicionar os rolamentos e prevenir contaminação por impurezas.

Tabela 19 – Resultados do dimensionamento à rigidez do veio da proposta 2.

	M_z	θ_{\max}	δ_{\max}
Proposta 2	48,75 Nm	$1,045 \cdot 10^{-2}$ mrad	$4,469 \cdot 10^{-1} \mu m$

3.2.4 RE-RE-DESGIN DA ÁRVORE (TERCEIRA PROPOSTA PARA A ÁRVORE DA SPIF-A)

Com o excessivo comprimento e esbeltez verificados na proposta anterior, foram necessárias algumas alterações na árvore da SPIF-A. Apesar da proposta 2 estar muito próxima em configuração e dimensões a uma típica árvore de fresadora, os esforços desenvolvidos no corte por arranque de aparas são muito inferiores aos assumidos neste projecto, e o momento que se desenvolve na base móvel da plataforma Stewart devido às forças tangenciais na ponta do punção é muito elevado, conduzindo a instabilidades e deslocamentos excessivos. Com base nisto, tentou-se alcançar uma construção mais compacta, menos esbelta, que permitisse uma maior robustez, tentando sempre manter a flexibilidade e acessibilidade à peça.

A árvore da proposta 3 é constituída apenas por uma caixa exterior cónica que aloja o veio e os rolamentos. Um dos rolamentos de duas carreiras de esferas de contacto angular foi eliminado, pois não é necessário o apoio do veio na ligação da árvore à plataforma Stewart. A maioria dos componentes foi redesenhada para encaixar nesta nova proposta.

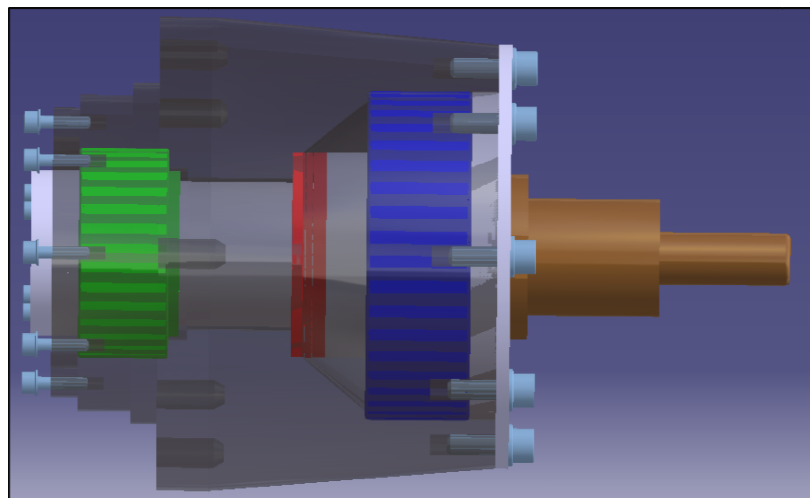


Fig. 59 - Árvore da proposta 3.

O sistema de aperto do porta-ferramentas foi alterado, passando a ter accionamento manual, e segundo a norma DIN 2080. Isto permitiu o projecto de um veio mais curto. A árvore passou a ser cónica para minimizar os deslocamentos, e está parcialmente alojada no interior da plataforma Stewart.

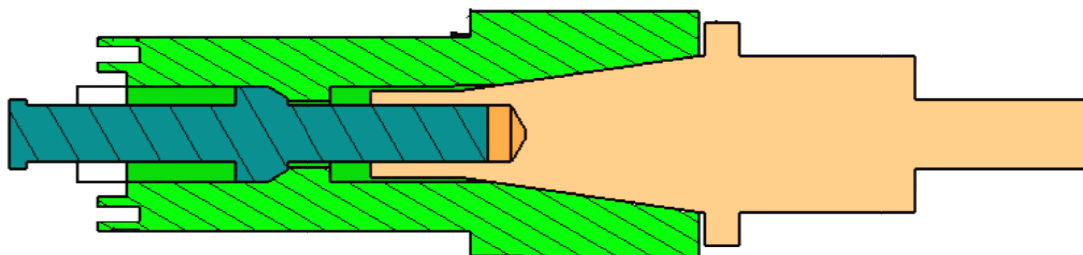


Fig. 60 - Pormenor do sistema de fixação do porta-ferramentas da árvore 3.

3.2.4.1 DIMENSIONAMENTO DA ÁRVORE

Para validar a solução apresentada na proposta 3 para a árvore da SPIF-A foi feito o anteprojecto de dimensionamento do seu veio, que consistiu em uma primeira análise de rigidez, comum a todas as configurações e propostas anteriormente apresentadas, e posteriormente um dimensionamento à fadiga, de acordo com o recomendado por Morais [MOR2007].

Tabela 20 - Resultados do dimensionamento à rigidez do veio da proposta 3.

	M_z	θ_{\max}	δ_{\max}
Proposta 3	43,33 Nm	$1,045 \cdot 10^{-2}$ mrad	$6,672 \cdot 10^{-1}$

O material escolhido para o veio é um aço de liga de alta resistência, 30CrNiMo8, temperado e revenido para garantir o melhor desempenho da árvore. Para validar a resistência à fadiga, o veio deve obedecer ao critério parabólico de Gerber:

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_e} + \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_u} \right)^2 \leq 1, \quad (3.3)$$

em que a tensão limite de fadiga é dada por:

$$\sigma_e = k_{as} \cdot k_{ta} \cdot k_{sl} \cdot \overline{\sigma_{eb}} \cdot \frac{1}{Y_{ME}}. \quad (3.4)$$

Para o cálculo do valor da tensão média de rotura à tracção, $\overline{\sigma_u}$ tem-se:

$$\overline{\sigma_u} \approx 1,1 \cdot \sigma_u \approx 1210 MPa. \quad (3.5)$$

O factor de acabamento superficial,

$$k_{as} = a \cdot \overline{\sigma_u}^{-b}, \quad (3.6)$$

que para uma superfície rectificada e maquinada, $a = 1,58$ e $b = -0,086$. Fica então:

$$k_{as} = 1,58 \cdot 1210^{-0,086} = 0,858099. \quad (3.7)$$

O factor de tamanho do veio é contabilizado por

$$k_{ta} (d > 51mm) = 0,859 - \frac{d}{1195} = 0,812975, \quad (3.8)$$

para um veio com diâmetro superior a 51 mm.

Para incluir os efeitos da natureza da solicitação imposta ao veio, calcula-se o factor

$$k_{sl} = 1,43 \cdot \overline{\sigma_u}^{-0,0788} = 0,823181 \quad (3.9)$$

para veios sujeitos a cargas axiais.

O limite de fadiga à flexão rotativa é expresso por

$$\overline{\sigma_{eb}} = 0,506 \cdot \overline{\sigma_u} = 612,26 MPa. \quad (3.10)$$

Por fim, é contabilizado o coeficiente de segurança parcial para o dimensionamento à fadiga,

$$Y_{ME} = 1,9 \quad , \quad (3.11)$$

para esforços axiais e de flexão. Existem então condições para determinar a tensão limite de fadiga:

$$\sigma_e = 0,858099 \cdot 0,812975 \cdot 0,823181 \cdot 612,26 \cdot \frac{1}{1,9} = 185,051MPa \quad . \quad (3.12)$$

A amplitude de tensão é função das tensões nominais máxima e mínima a que o veio está sujeito:

$$\sigma_a = K_f \cdot \frac{\sigma_{n,\min} - \sigma_{n,\max}}{2} \quad . \quad (3.13)$$

Para determinar o factor de concentração de tensões à fadiga, K_f , é necessário estimar o factor teórico de concentração de tensões K_t . Este é função da razão entre o diâmetro máximo e mínimo do veio, D e d , e do raio de concordância, r do entalhe do veio:

$$r = \frac{70 - 55}{2} = 7,5mm \quad (3.14)$$

$$r/d = \frac{55}{7,5} = 0,136 \quad (3.15)$$

$$D/d = \frac{70}{55} = 1,27 \quad , \quad (3.16)$$

e a partir do quadro recomendado por Morais [MOR2007], obtêm-se uma estimativa para o valor de K_t :

$$K_t \approx 1,58 \quad . \quad (3.17)$$

O factor cálculo de sensibilidade aos entalhes do veio é função do tipo de entalhe, sendo neste caso dado pelo produto:

$$C_a \cdot \overline{\sigma}_u = 278 \Leftrightarrow C_a = \frac{278}{1210} = 0,229752 \quad . \quad (3.18)$$

Desta forma K_f é dado por:

$$K_f = \frac{K_t}{1 + \frac{C_a}{\sqrt{r}} \cdot \frac{K_t - 1}{K_t}} = 1,5328 \quad . \quad (3.19)$$

As tensões nominais instaladas no veio são determinadas a partir do momento máximo verificado na análise de rigidez:

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{z,\max} \cdot y}{I_z} \quad (3.20)$$

$$\sigma_{\min} = \frac{M_{z,\min} \cdot y}{I_z} \quad , \quad (3.21)$$

em que a inércia de uma secção circular oca de diâmetro exterior, d_{ext} e diâmetro interior d_{int} é dada por:

$$I_z = \frac{\pi \cdot (d_{ext}^4 - d_{int}^4)}{64} = \frac{\pi \cdot (70^4 - 44,45^4)}{64} = 9,86961 \cdot 10^{-7} m^4 \quad . \quad (3.22)$$

A máxima distancia, segundo a direcção y , ao centro do veio é 0,035m, que corresponde ao raio da secção maior do veio, e o momento flector actuante é máximo na extremidade do veio mais afastada da ponta da ferramenta, $M_{z,\max} = 1,840 \cdot 10^3 Nm$.

$$\sigma_{\max} = \frac{1,840 \cdot 10^3 \cdot 0,035}{9,86961 \cdot 10^{-7}} = 6,53 \cdot 10^7 Pa \quad (3.23)$$

Da mesma forma,

$$M_{z,\min} = 0,093.10^3 Nm \quad (3.24)$$

$$\sigma_{\min} = \frac{0,093.10^3 \cdot 0,035}{9,86961.10^{-7}} = 3,30.10^6 Pa \quad (3.25)$$

A amplitude da tensão é então dada por:

$$\sigma_a = K_f \cdot \frac{6,53.10^7 + 3,30.10^6}{2} = 5,43.10^7 Pa \quad (3.26)$$

O cálculo da tensão média é também função das tensões máxima e mínima instaladas no veio:

$$\sigma_m = K_f \cdot \frac{\sigma_{n,\max} - \sigma_{n,\min}}{2} \Leftrightarrow \sigma_m = K_f \cdot \frac{6,53.10^7 - 3,30.10^6}{2} = 4,91.10^7 Pa \quad (3.27)$$

A validação do critério de Gerber obedece à desigualdade:

$$\left(\frac{5,43.10^7}{185,51.10^6} \right) + \left(\frac{4,91.10^7}{1100.10^6} \right)^2 \leq 1 \Leftrightarrow 0,295 \leq 1 \quad (3.28)$$

Conclui-se portanto que o veio é resistente á fadiga.

A árvore da SPIF-A está sujeita a esforços de compressão, e segundo Morais [MOR2007], a fadiga pode conduzir à ruína de um sistema mecânico sujeito a esforços de compressão quando

$$\sigma_a = \sigma_e \quad (3.29)$$

e neste caso $\sigma_a \ll \sigma_e$ portanto não constitui um problema.

Após o dimensionamento do veio, foram determinadas as cargas admissíveis nos elementos rolantes da árvore, e com sucesso verificou-se que as reacções resultantes do veio são muito inferiores à capacidade de carga dos rolamentos, o que leva a concluir que há um considerável sobredimensionamento dos rolamentos para esta árvore.

3.2.4.2 DESCRIÇÃO DOS COMPONENTES CONSTITUINTES DA ÁRVORE.

A árvore da SPIF-A é constituída por um veio oco em aço de liga de alta resistência, 30CrNiMo8, torneado que aloja no interior o cone e o parafuso de aperto, rodando este conjunto livremente apoiado nos rolamentos previamente seleccionados. O rolamento de duas carreiras de esferas com contacto angular assenta na zona de inserção do cone restrito pela tampa do veio, pelo corpo da caixa e por um casquilho espaçador garantindo o correcto posicionamento deste com o rolamento axial de agulhas, por sua vez assente na concordância do veio e restrito contra a caixa da árvore. O rolamento combinado radial de agulhas com axial de esferas fixa-se na extremidade oposta do veio, e o seu correcto posicionamento é garantido pela tampa do veio, o encosto à caixa e um casquilho espaçador. Foram aplicadas ligações aparafusadas nas tampas, para garantir união de todo este sistema. A figura 61 apresenta a vista explodida da árvore com a disposição dos componentes descritos.

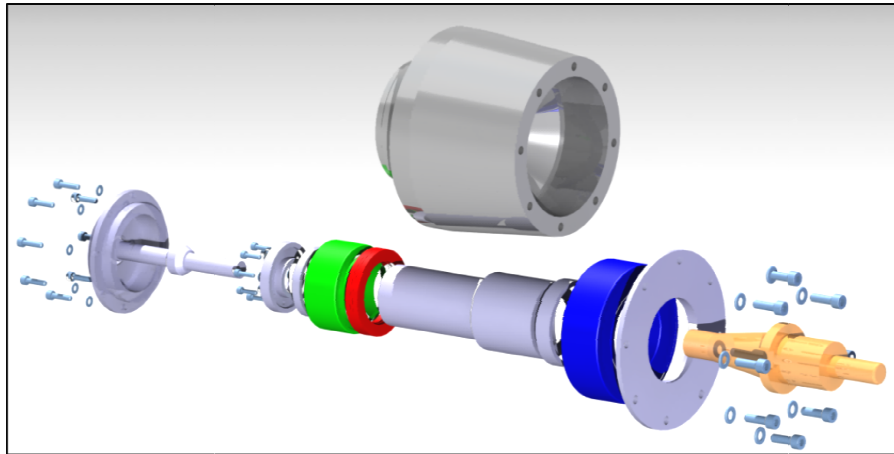


Fig. 61 – Vista explodida da árvore

Na caixa da árvore foram inseridas furações para a fixação de todo o conjunto à base superior da plataforma Stewart, garantidas por ligações de parafuso H com porca H. De forma a proporcionar o mais correcto posicionamento e apoio foram colocados rebaixas na árvore e na base da plataforma.

3.3 PROJECTO DA ESTRUTURA

A estrutura de uma máquina ferramenta tem como função alojar todos os seus componentes, garantindo a execução de todos os movimentos necessários, estando apta a suportar as cargas estáticas e dinâmicas daí resultantes com a menor deflexão possível, assegurando a estabilidade e precisão da máquina, com a menor taxa de desgaste possível. Existem duas configurações típicas aplicadas a máquinas-ferramenta convencionais: as estruturas abertas ou C, e estruturas fechadas ou arcada. As estruturas abertas dão uma excelente acessibilidade à ferramenta e à peça, com um corpo constituinte sólido que garante baixas deflexões. Exemplos típicos de estruturas abertas podem ser encontrados em furadoras, fresadoras, rectificadoras entre outras. As estruturas fechadas têm aplicação em centros de maquinagem e prensas de grande porte, podem ser suportadas por montantes maciços ou por vigas perfiladas estando assim aptas a suportar elevadas solicitações e grandes volumes de trabalho.



Fig. 62 – Prensa mecânica de estrutura em C [16], e prensa hidráulica de estrutura em arcada [15].

A configuração da estrutura de suporte da máquina ferramenta é ditada pela combinação dos movimentos e cursos necessários, bem como da capacidade e tamanho efectivo de conformação que é consequência da potência necessária a desenvolver e o seu projecto deve contemplar uma simples e eficiente montagem dos módulos para garantir um suporte estável e duradouro. Esta tem implicações na forma como se acede ao equipamento tanto para acções de manutenção, troca de ferramentas ou instalação das chapas a conformar. Adicionalmente, o grau de precisão da produção é afectado pelas deflexões da estrutura, e devem ser mantidas dentro de limites específicos.

A avaliação do comportamento da estrutura da máquina ferramenta é feita através da avaliação das suas características estáticas e dinâmicas. As características estáticas dizem respeito à deflexão estática sob forças de corte estáticas, peso dos componentes móveis, e forças de inércia e de atrito. Estas afectam a precisão das partes da máquina, e são normalmente medidas pela rigidez estática. Por outro lado, as características dinâmicas são normalmente determinadas pela deflexão dinâmica e pelas frequências naturais e afectam a trepidação da máquina e como tal, a estabilidade da operação. As deflexões estáticas e dinâmicas da estrutura da máquina dependem da forma como as forças de operação são transmitidas e distribuídas e do comportamento de cada unidade estrutural sob as condições de operação.

O projecto da estrutura de suporte para a SPIF-A deve então garantir o suporte e execução dos seus componentes, sendo estes a plataforma Stewart acoplada à árvore com a mesa de conformação. A estrutura deve alocar e guiar os módulos em concordância com a posição requerida entre a peça e a ferramenta, de forma a transmitir o trabalho realizado pelos actuadores hidráulicos da plataforma à chapa fortemente presa à mesa de conformação.

3.3.1 ARQUITECTURA ESTRUTURAL A ADOPTAR PARA A SPIF-A.

A definição e escolha de um suporte para o equipamento até aqui projectado, exigiu a abordagem de várias e distintas propostas para solucionar o problema, que contemplaram a escolha de diferentes materiais, diversas posições de conformação, e fixação dos módulos à estrutura, tendo sempre em consideração a transmissão e suporte das cargas exercidas pelo processo na estrutura e na mesa de conformação.

De entre várias arquitecturas estudadas, considerou-se a hipótese adoptar uma estrutura de suporte tipo baliza onde num dos lados fosse acoplado o conjunto plataforma e árvore, e no outro fosse assente a mesa de conformação. Tal proposta mostrou-se inviável devido a não garantir o posicionamento relativo da chapa com o punção, além de uma excessiva flexão da estrutura, que exige o reforço e encastramento da estrutura ao chão.

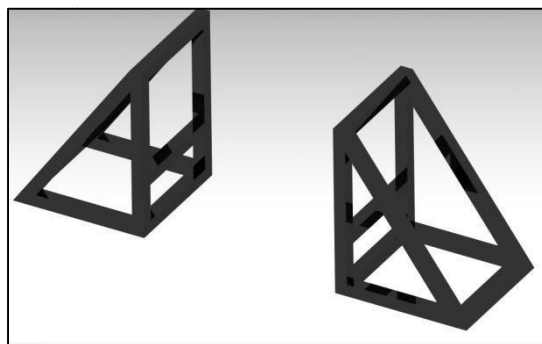


Fig. 63 - Estrutura de suporte inicialmente proposta.

Posteriormente concebeu-se outra abordagem baseada na descrição de Alwood *et al.* [ALL2005], que consistia numa estrutura em arcada também verificada nas máquinas comercializadas pela empresa AMINO®. Esta solução revela uma maior robustez e rigidez

para suportar os movimentos e cargas gerados pela estampagem incremental, onde as bases que assentam o sistema cinemático e a mesa de conformação estão solidárias.

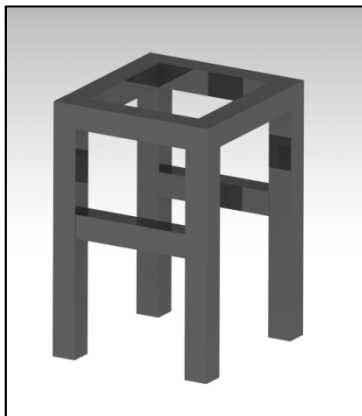


Fig. 64 - Estrutura de suporte em arcada.

3.3.2 ESCOLHA DO PERFIL

Numa primeira abordagem foi projectada uma estrutura constituída por um perfil de alumínio extrudido fornecido pela empresa Bosch[®]. Este material torna-se atractivo devido à facilidade e rapidez de montagem e desmontagem dos perfis e a possibilidade de alteração ou reedição da sua arquitectura, em qualquer altura.

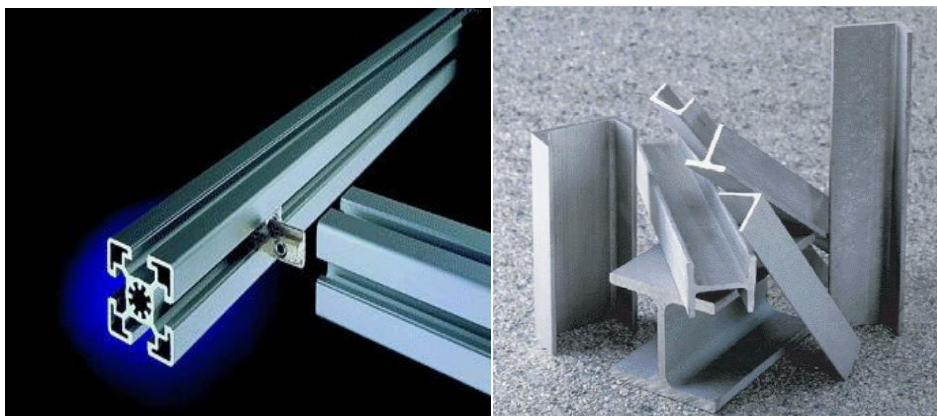


Fig. 65 – Materiais usados para construção de estruturas mecânicas: perfil de alumínio extrudido [17], e diversos perfis de aço [13].

A maior limitação deste produto reside nas características impróprias do material constituinte em aplicações estruturais, resultante dos fenómenos de fadiga dos materiais não ferrosos o que constitui uma grande desvantagem. Por este motivo foi considerada a utilização de perfis de aço para construir a estrutura da SPIF-A. Existe uma vasta oferta de perfis de aço, com diversas geometrias e tamanhos para a construção mecânica geral, a preços mais acessíveis.

3.3.3 CONFIGURAÇÃO ESTRUTURAL ADOPTADA

No projecto da estrutura da SPIF-A, recorreu-se a vigas de aço AISI 316L de perfil U 100x50mm com 6mm de espessura [13], para a construção de duas molduras 800x800 mm, unidas por seis vigas de 2 m reforçadas no centro por outras duas de comprimento de 700mm na perpendicular. Para permitir o apoio e um maior reforço na zona de inserção da plataforma Stewart, uma das molduras foi reforçada com um par de vigas cruzadas. A mesa de conformação assenta sobre duas vigas dispostas paralelamente às molduras, colocadas pelo interior da estrutura. Na tabela 21 encontra-se uma lista dos elementos usados para construir a estrutura.

Tabela 21 - Elementos usados para o projecto da estrutura da SPIF-A.

Elemento	Dimensões	Nº de peças
Molduras	1000mm	8
Vigas de ligação	2000mm	6
Vigas de suporte da mesa	900mm	2
Vigas de reforço superior	300mm	2
	130mm	2
	370mm	2
	900mm	2

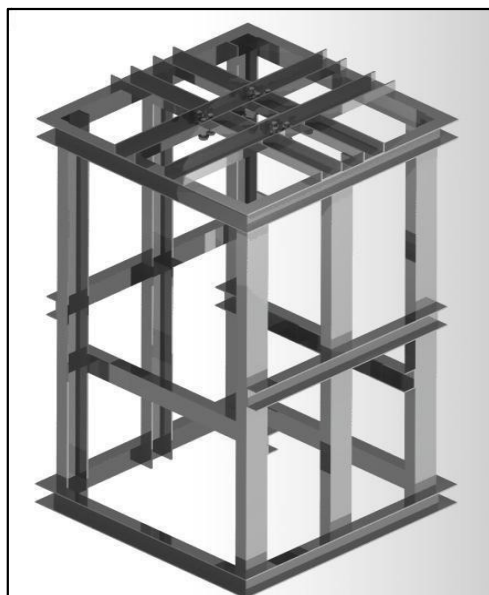


Fig. 66 - Estrutura projectada para a SPIF-A.

Adicionalmente foi levada a cabo uma análise dos esforços resultantes, onde se verificou a viabilidade da estrutura para suportar os restantes componentes da SPIF-A. A análise foi realizada com software de cálculo estrutural, onde se consideraram todas as ligações entre os elementos da estrutura como sendo rígidas. Os elementos da estrutura apoiados no chão ligam a nós simplesmente apoiados, restritos ao deslocamento nas três direcções X Y Z. Ao carregamentos aplicados à estrutura correspondem à carga máxima actuante em cada conjunto de três ligações aparafusadas. Adicionalmente foram aplicados momentos equivalentes, resultantes da reacção da chapa para uma acção no punção, com valor máximo de 13kN no centro da mesa de conformação. Foram também incluídas as reacções geradas por um esforço tangencial máximo de 6,5kN no punção. A tabela 22 mostra os valores mais extremos resultantes desta análise, ocorrem nos elementos de ligação da estrutura à plataforma Stewart. Em anexo encontram-se os resultados detalhados desta análise.

Tabela 22 - Resultados da análise à rigidez da estrutura da SPIF-A.

δ_{\max} (mm)	θ_{\max} (mrad)
1,388	3,898

3.3.4 MESA DE CONFORMAÇÃO

A mesa de conformação é constituída por duas molduras complementares que encastram a chapa auxiliadas com ligações aparafusadas. Um rebaixo maquinado em ambas as molduras garante simultaneamente o guiamento e encaixe da ligação. A moldura superior é amovível e auxilia a fixação da chapa durante a conformação. A moldura inferior é fixa e está solidária à estrutura da máquina através da fixação às células de carga, apoiadas nas vigas interiores dos pórticos. A moldura de aperto da chapa pode ser removida com a chapa encastrada para possibilitar a realização de operações de medição da geometria conformada, assim como tratamentos térmicos posteriores.

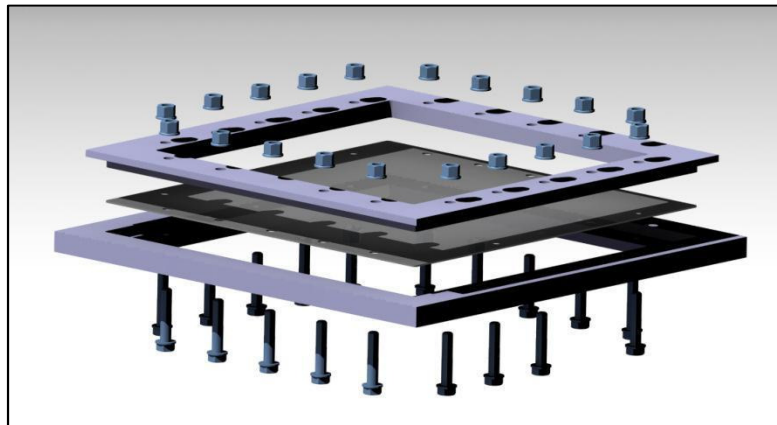


Fig. 67 - Mesa de conformação.

Para a construção da mesa de conformação, é necessário maquinar duas chapas grossas, retirando todo o seu interior por fresagem, e posterior furação para o alojamento de vinte ligações parafuso H com porca H, apertada por cima da moldura superior.

Tabela 23 - Características da mesa de conformação.

	Material	Dimensões (mm)
Moldura inferior	Aço AISI 316L	700x700x30
Moldura superior	Aço AISI 316L	700x700x25

3.4 LIGAÇÕES E MONTAGEM DA MÁQUINA

O dimensionamento dos sistemas de interacção de módulos é um aspecto de extrema importância no projecto de uma máquina. É não só necessário garantir a coesão de funcionamento de um determinado sistema isolado, mas também da sua interacção com os restantes sistemas constituintes do conjunto.

O presente ponto descreve as técnicas de montagem projectadas para acoplar os diferentes componentes da SPIF-A. Foram definidas duas ligações principais: o acoplamento da árvore à plataforma Stewart e o acoplamento da plataforma Stewart à estrutura. O dimensionamento das ligações aparafusadas na presente dissertação é feito de acordo com o descrito por Morais [MOR2007].

3.4.1 ACOPLAMENTO DA ÁRVORE À PLATAFORMA STEWART

Este acoplamento é feito através de uma ligação por parafuso e peça roscada entre a base superior da plataforma Stewart e a caixa da árvore. Adicionalmente foi incluído um rebaixo maquinado em ambas as peças para garantir a concentricidade entre o eixo da árvore e o eixo da base superior.

Os esforços que actuam nos parafusos são devidos ao momento e forças de corte gerados pelo esforço de flexão actuante na ponta do punção.

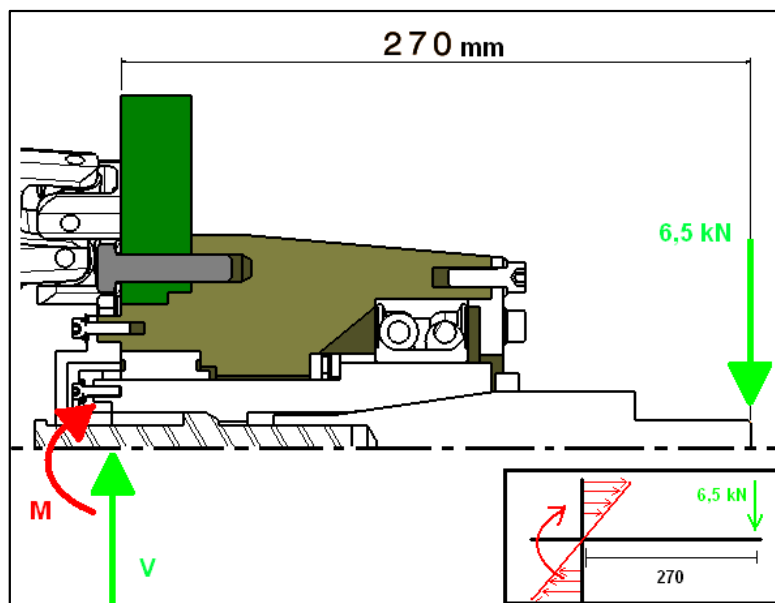


Fig. 68 – Esforços actuantes nas ligações aparafusadas da árvore à plataforma Stewart.

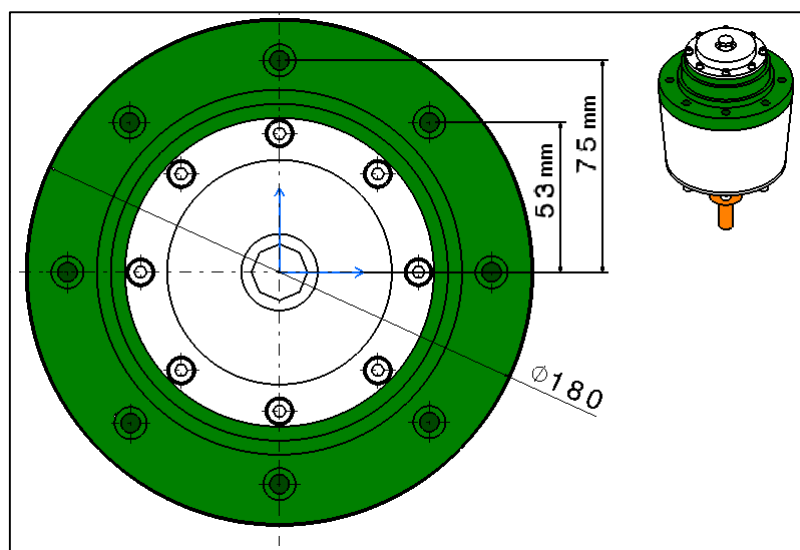


Fig. 69 – Vista inferior da caixa envolvente da árvore.

A força horizontal que actua na ponta do punção durante a conformação gera na ligação aparafusada um esforço de corte V de igual módulo à força horizontal mas em sentido oposto, e um momento flector M . Para determinar o efeito do esforço de corte é primeiramente contabilizada a carga limite de escorregamento na junta de ligação:

$$F_s = 0,24 \cdot F_m \cdot n_b \cdot n_s \quad , \quad (3.30)$$

em que F_m é a força de compressão exercida em média por cada parafuso sobre os elementos ligantes, n_b é o número de parafusos da ligação e n_s é o número de planos de escorregamento, que toma o valor 1 para juntas de sobreposição simples como é o caso. Na ausência de forças de tracção actuanes, F_m é igual ao pré-esforço do parafuso, F_i . Então,

$$F_m = F_i = \eta_i \cdot A_s \cdot \sigma_{ob} \quad , \quad (3.31)$$

em que η_i é a fracção de pré-carga, A_s a área de secção resistente da rosca, e σ_{ob} a tensão de cedência do parafuso.

Os cálculos iniciaram-se assumindo parafusos M12, com:

$$A_s = 84,3mm^2 \quad (3.32)$$

$$\eta_i = 0,75 \quad , \quad (3.33)$$

valor recomendado para ligações desmontáveis.

Impondo que o esforço de corte não pode superar a carga limite de escorregamento da ligação, tem-se:

$$\begin{aligned} 6,5kN &\leq 0,24(\eta_i \cdot A_s \cdot \sigma_{ob})n_b \cdot n_s \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow 6,5kN &\leq 0,24(0,75 \cdot 84,3 \cdot \sigma_{ob})n_b \cdot 1 \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow \sigma_{ob} \cdot n_b &\geq 428,360MPa \end{aligned} \quad (3.34)$$

Com esta condição, são possíveis as seguintes soluções:

- a) Pelo menos 6 parafusos de classe 8.8, com coeficiente de segurança

$$\gamma_s = 5;$$

b) Pelo menos 6 parafusos de classe 9.8, com coeficiente de segurança

$$\gamma_s = 10.$$

O momento flector M que actua na ligação provoca esforços de tracção nos parafusos e tensões de compressão na zona inferior da base móvel da plataforma Stewart. A determinação desses esforços passa por admitir que M apenas gera forças de tracção ou de compressão nas zonas de influência dos parafusos e que esses esforços variam linearmente com a distância ao eixo central da base. O momento que actua na ligação aparafusada é

$$M = 6,5 \cdot 0,270 = 1,755 \text{ kNm} \quad , \quad (3.35)$$

e o esforço daí resultante é função da posição do parafuso.

A carga máxima na ligação é suportada pelos parafusos que estão na posição mais exterior, situados a uma distancia de 75 mm do ponto de aplicação do momento que é dada por:

$$P = \frac{1,755 \cdot 0,075}{4 \cdot (0,053)^2 + 2 \cdot (0,075)^2 + 2 \cdot (0)^2} = 5,853 \text{ kN} \quad . \quad (3.36)$$

Para validar a ligação aparafusada, tem de ser cumpridos os critérios (3.37) e (3.38):

$$P \leq \frac{F_i}{(1 - C_b) \gamma_s} \quad (3.37)$$

$$C_b \cdot \gamma_s \cdot P \leq (1 - \eta_i) A_s \cdot \sigma_{ob} \quad , \quad (3.38)$$

onde C_b designa a constante de rigidez da ligação aparafusada, que está para situações de furo normal dentro dos valores 0,20 a 0,25, e podem ser adoptados conservadoramente

como limites de dimensionamento da ligação. A tensão máxima admissível do parafuso resulta de:

$$\begin{aligned}
 P(1 - C_b)\gamma_s &\leq F_i \Leftrightarrow \\
 \Leftrightarrow P(1 - C_b)\gamma_s &\leq \eta_i \cdot A_s \cdot \sigma_{ob} \Leftrightarrow \\
 \Leftrightarrow \frac{\sigma_{ob}}{\gamma_s} &\geq \frac{5,853 \cdot (1 - 0,25)}{0,75 \cdot 83,4} \Leftrightarrow & (3.39) \\
 \Leftrightarrow \frac{\sigma_{ob}}{\gamma_s} &\geq 74,067 MPa.
 \end{aligned}$$

Com esta condição são possíveis as seguintes soluções:

- a) Parafusos classe 8.8, com coeficiente de segurança $\gamma_s = 8$;
- b) Parafusos classe 9.8, com coeficiente de segurança $\gamma_s = 9$.

Adicionalmente tem-se a condição :

$$\begin{aligned}
 \frac{\sigma_{ob}}{\gamma_s} &\geq \frac{C_b \cdot P}{(1 - \eta_i) A_s} \Leftrightarrow \\
 \Leftrightarrow \frac{\sigma_{ob}}{\gamma_s} &\geq \frac{0,20 \cdot 5,853}{(1 - 0,75) 84,3} \Leftrightarrow & (3.40) \\
 \Leftrightarrow \frac{\sigma_{ob}}{\gamma_s} &\geq 69,431 MPa \quad ,
 \end{aligned}$$

com a qual são válidas as seguintes hipóteses:

- a) Parafusos classe 8.8, com coeficiente de segurança $\gamma_s = 8$;
- b) Parafusos classe 9.8, com coeficiente de segurança $\gamma_s = 10$.

A ligação aparafusada da base da plataforma à caixa da árvore é portanto viável com parafusos CHC M12 de classe 8.8 ou superior.

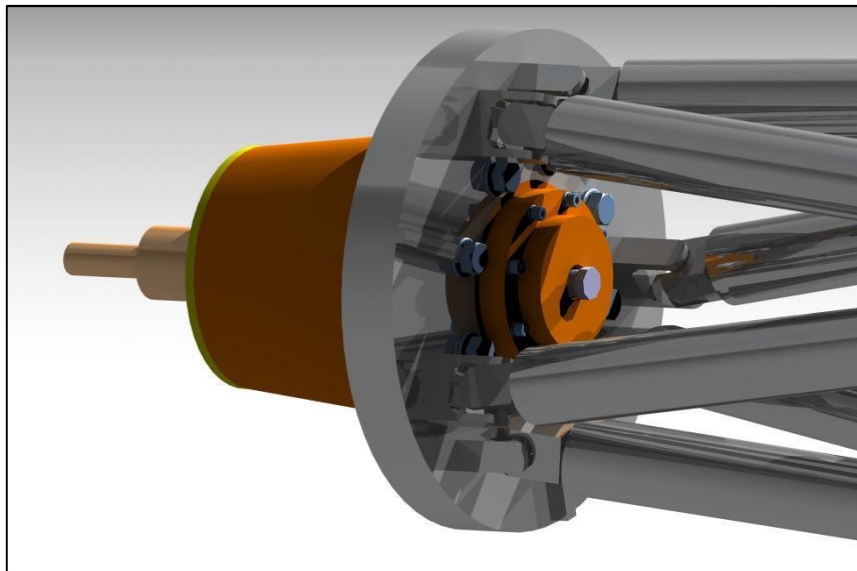


Fig. 70 – Pormenor do sistema de fixação da árvore.

3.4.2 ACOPLAMENTO DA PLATAFORMA STEWART À ESTRUTURA.

A união entre estes dois módulos deve garantir a fixação da base inferior da plataforma Stewart com as vigas cruzadas do topo da estrutura, através de nove ligações aparafusadas, parafuso H com porca H. De forma a obter maior suporte e posicionamento foram incluídas nas vigas cruzadas chapas adicionais que restringem a rotação da plataforma Stewart através da fixação pelo anel interior da base inferior do sistema cinemático.

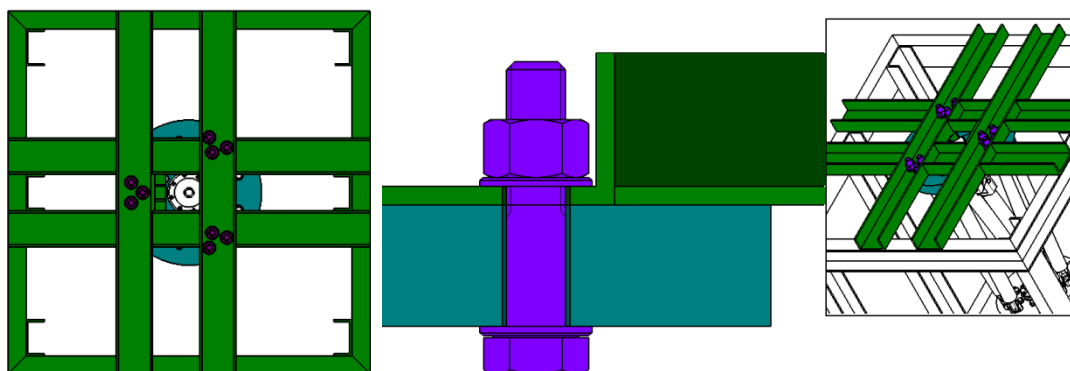


Fig. 71 – Ligação da plataforma Stewart à estrutura.

Para o dimensionamento desta ligação foram considerados os esforços exercidos pelos cilindros actuadores na base fixa da plataforma Stewart e a forma como estes são suportados pelas ligações aparafusadas que unem a plataforma à estrutura. Foi projectada uma ligação parafuso H com porca H, sujeita a esforços de compressão, assegurada por três conjuntos de três parafusos M20 dispostos em alinhamento com as juntas universais, mas rodados sessenta graus. O equilíbrio de forças verticais que actuam na base fixa da plataforma é dado por:

$$\sum P_{act} + \sum P_{par} = 0 \quad . \quad (3.41)$$

A carga exercida por cada actuador, P_{act} é dada pela lei de Pascal, considerando a pressão máxima de operação do actuador de 100bar, e a área de secção do actuador 7238 mm^2 :

$$\begin{aligned} P &= \frac{P_{act}}{A_{act}} \Leftrightarrow P_{act} = P \cdot A_{act} \Leftrightarrow P_{act} = 1,013 \cdot 10^7 \cdot 7,238 \cdot 10^{-3} \Leftrightarrow \\ &\Leftrightarrow P_{act} = 73,323 \text{ kN} \quad . \end{aligned} \quad (3.42)$$

Consequentemente a carga exercida pelo conjunto de actuadores:

$$\sum P_{act} = 6 \cdot 73,323 \text{ kN} = 439,960 \text{ kN} \quad , \quad (3.43)$$

que é distribuída pelos nove parafusos da ligação. Logo,

$$P_{par} = \frac{\sum P_{act}}{9} = 48,882 \text{ kN} \quad . \quad (3.44)$$

Para validar a ligação tem de ser cumprida a condição:

$$\begin{aligned}
 P_{par} &\leq \frac{F_i}{(1 - C_b) \gamma_s} \Leftrightarrow \\
 &\Leftrightarrow P_{par} (1 - C_b) \gamma_s \leq \eta_i \cdot A_s \cdot \sigma_{ob} \Leftrightarrow \\
 &\Leftrightarrow \frac{\sigma_{ob}}{\gamma_s} \geq \frac{48,882 \cdot (1 - 0,25)}{0,75 \cdot 245} \Leftrightarrow \\
 &\Leftrightarrow \frac{\sigma_{ob}}{\gamma_s} \geq 199,518 MPa \quad ,
 \end{aligned} \tag{3.45}$$

com a qual são válidas as seguintes hipóteses:

- a) Parafusos classe 10.9 com coeficiente de segurança $\gamma_s = 4$;
- b) Parafusos classe 12.9 com coeficiente de segurança $\gamma_s = 5$.

Adicionalmente tem-se a condição:

$$\begin{aligned}
 C_b \cdot \gamma_s \cdot P &\leq (1 - \eta_i) A_s \cdot \sigma_{ob} \Leftrightarrow \\
 &\Leftrightarrow \frac{\sigma_{ob}}{\gamma_s} \geq \frac{C_b \cdot P}{(1 - \eta_i) A_s} \Leftrightarrow \\
 &\Leftrightarrow \frac{\sigma_{ob}}{\gamma_s} \geq \frac{0,20 \cdot 48,882}{(1 - 0,75) 245} \Leftrightarrow \\
 &\Leftrightarrow \frac{\sigma_{ob}}{\gamma_s} \geq 159,615 MPa \quad ,
 \end{aligned} \tag{3.46}$$

com a qual são válidas as seguintes hipóteses:

- a) Parafusos classe 10.9 com coeficiente de segurança $\gamma_s = 5$;
- b) Parafusos classe 12.9 com coeficiente de segurança $\gamma_s = 7$.

A ligação aparafusada da base fixa da plataforma Stewart à estrutura da máquina é portanto viável com parafusos CHC M20 de classe 10.9 ou superior.

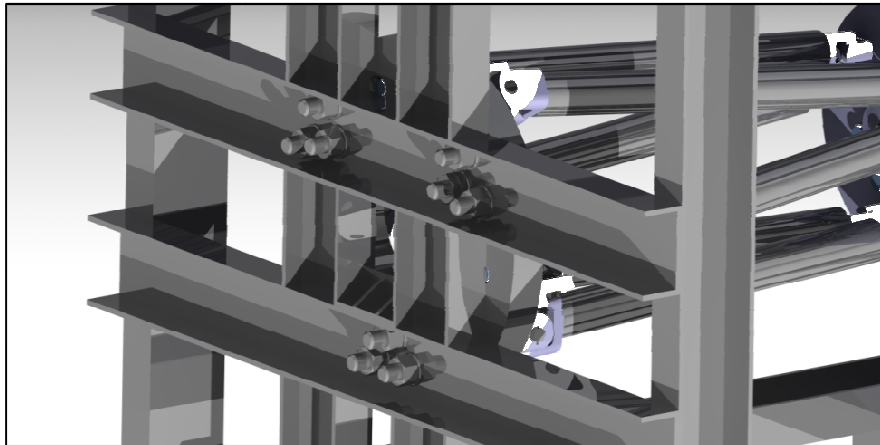


Fig. 72 - Pormenor de ligação aparafusada da plataforma à estrutura da SPIF-A.



Fig. 73 – SPIF-A

4 CONCLUSÕES

A realização do presente trabalho teve por base o projecto de um equipamento para a realização de operações de estampagem incremental, que inclui o desenvolvimento de um sistema cinemático com seis graus de liberdade, uma árvore que aloja o punção de conformação e suporta os esforços desenvolvidos durante o processo, e uma estrutura que permite o alojamento e o correcto posicionamento relativo de todos os componentes da máquina.

Neste capítulo apresentam-se as conclusões mais relevantes a retirar do trabalho desenvolvido, assim como algumas limitações encontradas durante a realização do projecto de desenvolvimento da SPIF-A, e um conjunto de sugestões para trabalho futuro.

4.1 CONCLUSÕES SOBRE O TRABALHO DESENVOLVIDO

No que diz respeito à fundamentação do projecto, desenvolvida a partir de publicações de vários autores listados na bibliografia, conclui-se que a estampagem incremental por único ponto é um processo recente, e em forte expansão na comunidade científica, com algumas áreas de conhecimento ainda muito inexploradas e procedimentos adaptados de outros processos tecnológicos, nomeadamente o corte por arranque de apara. Por este motivo, alguns pontos importantes na concepção da SPIF-A foram difíceis de decidir. As forças de conformação a utilizar como referência no projecto foram cuidadosamente consideradas devido à divergência de resultados obtidos pelos diversos autores, tendo-se por segurança escolhidos valores que garantiam um elevado sobredimensionamento do projecto.

O mecanismo de interacção a adoptar no presente projecto também foi sujeito a uma análise muito criteriosa, pois há uma utilização generalizada de ferramentas animadas de rotação própria, mas em máquinas-ferramenta adaptadas para a estampagem incremental, que já incluem na sua construção a rotação da ferramenta em torno do seu próprio eixo, factor indispensável no corte por arranque de apara. Por outro lado, todos os equipamentos construídos apenas com o propósito de realizar operações de estampagem incremental adoptaram um mecanismo de interacção com rotação passiva do punção.

Outros pontos do projecto foram iterados e modificados no decorrer do desenvolvimento da presente dissertação para corresponder a soluções exequíveis, práticas e o mais simples e modular possível. O custo foi um factor restritivo, uma vez que a SPIF-A será de facto construída a curto-médio prazo.

A concepção do sistema cinemático para obedecer ao requisito inicial de realizar a conformação sempre normal à superfície da chapa impôs uma pesquisa exaustiva de soluções utilizadas na indústria para devolver movimento em seis eixos. No entanto as soluções encontradas mostraram-se muito dispendiosas e difíceis de implementar. A própria concepção da plataforma Stewart é um processo iterativo de construção mecânica, tentando adaptar as juntas universais aos actuadores e às bases. A correcta adaptação entre os diferentes elementos da cadeia cinemática é fundamental para um projecto viável e bem sucedido da plataforma Stewart.

Em relação ao projecto da árvore, concluí-se que é necessária uma grande experiência e conhecimento prático no domínio da concepção de máquinas-ferramenta para realizar uma proposta viável, pois tal como no ponto anterior é um processo muito iterativo e de evolução por tentativa e erro. Devido a isto, a concepção da árvore para a SPIF-A teve um desenvolvimento lento, resultando em várias soluções. A escolha dos diversos

elementos que compõem a árvore baseou-se na necessidade de suportar os esforços que se desenvolvem durante o processo de estampagem incremental, no entanto os componentes foram sucessivamente alterados entre versões da árvore para se adaptarem a uma configuração optimizada.

A estrutura foi projectada para proporcionar um *dress-up* e alojamento dos restantes elementos da máquina. Uma construção fechada revela-se, neste caso, de maior interesse uma vez que a estabilidade da estrutura é de maior importância que a melhor acessibilidade à peça. Conclui-se também que é mais seguro o uso de perfil de aço inox em detrimento de perfil de alumínio para a construção da estrutura, pois além de maior resistência à fadiga, as ligações soldadas tornam-se mais fáceis de executar.

Durante o desenvolvimento da presente dissertação, foram realizados os seguintes progressos:

- 1) Definição dos parâmetros mais relevantes ao projecto de equipamentos para realizar operações de estampagem incremental;
- 2) Adaptação de mecanismos provenientes de outros processos tecnológicos para realizar estampagem incremental;
- 3) Compreensão dos requisitos tecnológicos do processo de estampagem incremental;
- 4) Percepção dos mecanismos inerentes ao processo de estampagem incremental.
- 5) Capacidade de resposta a uma necessidade tecnológica com o projecto de um equipamento;

- 6) Compreensão dos diversos estágios de desenvolvimento de um projecto de equipamento para estampagem incremental;
- 7) Definição da orientação e desenvolvimento de bases científicas para realizar trabalhos futuros de desenvolvimento de equipamentos para estampagem incremental.

Em suma, foram apresentados os principais assuntos em discussão sobre o desenvolvimento da SPIF-A, assim como as decisões tomadas e o trabalho desenvolvido.

4.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A continuação do trabalho iniciado com a presente dissertação incidirá essencialmente em dois pontos-chave: a construção da máquina, e a concepção de sistemas auxiliares de controlo e monitorização.

A construção da SPIF-A deverá incluir a produção e, quando necessário, aquisição de componentes para os diversos sistemas, assim como as necessárias operações de montagem. Propõe-se para posterior optimização a inclusão de uma árvore com troca automática de ferramentas, como descrita na segunda proposta da árvore. Apesar de ser um sistema de mais difícil implementação, pode trazer vantagens significativas na redução do tempo total de conformação, assim como conferir uma maior flexibilidade ao processo, e maior facilidade de implementação da SPIF-A na indústria.

A concepção de sistemas auxiliares de controlo e monitorização contempla a inclusão de células de carga na mesa de conformação para medição das forças desenvolvidas durante a conformação. Adicionalmente será necessário incluir uma unidade de potência hidráulica

que devolva a pressão e o caudal necessário aos actuadores, e um módulo de controlo que garanta o desempenho do sistema cinemático com resolução adequada e conseqüentemente o correcto posicionamento do punção.

Referências bibliográficas

[AER2009] Aerens R., Eyckens P., Van Bael A., Duflou J. R., Force prediction for single point incremental forming deduced from experimental and FEM observations, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* (2009), DOI 10.1007/s00170-009-2160-2.

[ALL2005] Allwood J. M., Houghton N. E., Jackson K. P., The design of an Incremental Forming machine, *11th Conference on Sheet Metal*, pp 471-478 Erlangen 2005.

[ALL2004] Allwood J. M., King G., Duflou J.R., Structured Search for Applications of the Incremental Sheet Forming Process by Product Segmentation, *IMECH E* (2004) *Proceedings Part B, Journal of Engineering and Manufacture* Vol 219, No.B2, pp 239-244.

[AMB2005] Ambrogio G., De Napoli L., Filice L., Gagliardi F., Muzzupappa M., Application of Incremental Forming process for high customized medical product manufacturing, *Journal of Materials Processing Technology* (2005), Vol. 162, pp.156-162.

[AMB2006] Ambrogio G., Filice L., Micari F., A force measuring based strategy for failure prevention in incremental forming, *Journal of Materials Processing Technology* (2006) 177 413–416

[AMI 2002] Amino, H., Lu, Y., Maki, T., Osawa, S., Fukuda, K., Dieless NC Forming, Prototype of Automotive Service Parts, *Proceedings of the 2nd International Conference on Rapid Prototyping and Manufacturing (ICRPM)*, Beijing 2002.

[ATT06] Attanasio A., Ceretti E., Giardini C., Optimization of tool path in two points incremental forming, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 177, pp. 409-412, 2006.

- [BAM2003] Bambach, M., Hirt, G., Junk, S., Modelling and experimental evaluation of the incremental CNC sheet metal forming process, *Proceedings VII International Conference on Computational Plasticity*, Barcelona, 2003.
- [BAM2009] Bambach M., Taleb Araghi B., Hirt G., Strategies to improve the geometric accuracy in asymmetric single point incremental forming *Production, Engineering. Research. Development.* (2009) Vol 3:145–156.
- [BEN1999] Ben-Horin R., Shoham M., Djerassi S., Kinematics dynamics and construction of a planarly actuated parallel robot, *Proceedings of 1999 ASME Design Engineering Technical Conferences and Computers in Engineering Conference.*
- [BOU2007] Bouffieux C., Eyckens P., Henrard C., Aerens R., Van Bael A., Sol H., Dufloy J. R., Habraken A.M., Identification of material parameters to predict Single Point Incremental Forming forces, *Proceedings of IDDRG Conference*, Győr 2007.
- [CER2004] Ceretti E., Giardini C., Attanasio A., Experimental and simulative results in sheet incremental forming on CNC machines, *Journal of Materials Processing Technology* 152 (2004) 176–184
- [DEC2008] Decultot N., Velay V., Robert L., Bernhart G., Massoni E., Behaviour modelling of aluminium alloy sheet for Single Point Incremental Forming, *Article in Press.*
- [DEJ2009] Dejardin S., Thibaud S., Gelin J.C., Michel G., Experimental investigations and numerical analysis for improving knowledge of Incremental Sheet Forming process for sheet metal parts, *Journal of Materials Processing Technology* (2009), doi:10.1016/j.jmatprotec.2009.09.025

[DUF2005] Duflou J.R., Szekeres A., VanHerck A., Force Measurements for Single Point Incremental Forming and experimental study, *Journal of Advanced Materials Research*, Vols. 6-8, 2005, pp 441 – 448.

[DUF2007] Duflou J.R., Callebaut B., Verbert J., De Baerdemaeker H., Laser Assisted Incremental Forming: Formability and Accuracy Improvement, *Annals of the CIRP* Vol. 56/1/2007 doi:10.1016/j.cirp.2007.05.063

[DUF2008] Duflou J.R., Verbert J., Belkassam B., Gu J., Sol H., Henrard C. , Habraken A., Process window enhancement for single point incremental forming through multi-step toolpaths, *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 57 (2008) 253–256

[DUR2008] Durante M., Formisano A., Langella. A., Minutolo F., The influence of tool rotation on an incremental forming process, *Journal of Materials Processing Technology* 2008.

[FIL2002] Filice L., Fratini L., Micari F., Analysis of Material Formability in Incremental Forming, *Annals of the CIRP*, vol. 51/1/2002: 199-202. Elsevier 2002

[FRA2009] Franzena V., Kwiatkowska L., Martins P. , Tekkayaa A., Single point incremental forming of PVC, *Journal of materials processing technology* 209 (2009) 462–469.

[FRA2004] Fratini L., Ambrogio G., Di Lorenzo R., Filice L., Micari F., Influence of mechanical properties of the sheet material on formability in single point incremental forming, *Journal of Materials Processing Technology* 153–154 (2004) 501-507

[HAG2004] Hagan E., Jeswiet J., Analysis of surface roughness for parts formed by computer numerical controlled incremental forming, *Proceedings of International*

Conference of Mechanical Engineering Vol. 218 Part B: J. Engineering Manufacture B00404 IMechE 2004

[HAM2006] Ham M., Jeswiet J., Single Point Incremental Forming and the Forming Criteria for AA3003. *CIRP Annals Manufacturing Technology*, Vol. 55, pp. 241-244, 2006.

[HAM2007] Ham M., Jeswiet J., Forming Limit Curves in Single Point Incremental Forming *Annals of the CIRP* Vol. 56/1/2007, Doi:10.1016/j.cirp.2007.05.064

[HUS2006] Hussain G., Dar N.U., Gao L., Chen M.H., A comparative study on the forming limits of an aluminum sheet-metal in negative incremental forming, *Journal of Materials Processing Technology* 187–188 (2007) pp 94–98

[HUS2007] Hussain G., Gao L., A novel method to test the thinning limits of sheet metals in negative incremental forming, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 47 (2007) 419–435

[JAC2008] Jackson K., Allwood J., Landert M., Incremental forming of sandwich panels, *Journal of Materials Processing Technology* 204 (2008) 290–303.

[JAC2009] Jackson K., Allwood J., The mechanics of incremental sheet forming, *Journal of materials processing technology* 209 (2009) 1158–1174.

[JAD2003]Jadhav S., Goebel R., Homberg W., Kleiner M., Process optimization and control for incremental sheet metal forming, *Proceedings of the International Deep Drawing Research Group Conference, IDDRG* 165-171, Bled 2003.

[JES2001]Jeswiet J., Hagan E., Rapid Proto-typing of an Headlight with Sheet Metal, *Proceedings of Shemet*, April 2001, pp 165-170.

- [JES2002] Jeswiet J., Hagan E., Szekeres A., Forming parameters for incremental forming of aluminium alloy sheet metal *Proceedings of International Conference of Mechanical Engineering, Part B : Engineering Manufacture*, 2002, 216(B10),pp 1367–1371.
- [JES2005a] Jeswiet J., Micari F., Hirt G., Bramley A., Duflou J., Allwood J., Asymmetric Single Point Incremental Forming of Sheet Metal, *CIRP Annals-Manufacturing Technology* Vol 54 Issue 2, (2005) pp 88-114.
- [JES2005b] Jeswiet J., Duflou J., Szekeres A., Levebre P., Custom Manufacture of a Solar Cooker – a case study, *Journal Advanced Materials Research*, 6-8, 2005, pp 487-492.
- [KIM2001] Kim T.J., Yang D.Y., Improvement of formability for the incremental sheet metal forming process, *International Journal of Mechanical Sciences*, vol.42, pp. 1271-1286, 2001.
- [KOP2005] Kopac J., Kampus Z., Incremental sheet metal forming on CNC milling machine-tool, *Journal of Materials Processing Technology*, 162–163 (2005) 622–628.
- [LAM2005] Lamminen L., Tuominen T., Kivivuori S., Incremental sheet forming with an industrial robot- forming limits and their effects on component design, *Proceedings of 3rd International Conference on Advanced Materials Processing (ICAMP-3)*, Finland 2005, pp. 331.
- [LEA2001] Leach D., Green A.J., Bramley A.N., A new incremental sheet forming process for small batch and prototype parts., *9th International Conference on Sheet Metal, 2001*, Leuven, p. 211-218.
- [LES1967] Leszak E., Patent US3342051A1, published 1967- 09-19. Apparatus and Process for Incremental Dieless Forming.

- [MAR2008] Martins P., Bay N., Silva M., Theory of single point incremental forming, *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 57 (2008) 247–252
- [MAT1994] Matsubara S., Incremental Backward Bulge Forming of a Sheet Metal with a Hemispherical Tool, *Journal of Spacecraft Technology*, vol. 35, pp. 1311-1316, 1994.
- [MEI2005] Meier H., Dewald O., Zhang J., Development of a Robot-Based Sheet Metal Forming Process, *Steel Research, Issue* 2005, Dusseldorf.
- [MEI2009] Meier H., Buff B., Laurischkat R., Smukala V., Increasing the part accuracy in dieless robot-based incremental sheet metal forming, *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 58 (2009) 233–238 0007-8506 2009 Doi:10.1016/j.cirp.2009.03.056
- [MIC2007] Micari F., Ambrogio G., Filice L., Shape and dimensional accuracy in Single Point Incremental Forming: State of the art and future trends, *Journal of Materials Processing Technology* 191 (2007) 390–395. Doi:10.1016/j.jmatprotec.2007.03.066
- [MIN2007] Minutolo F., Durante M., Formisano A., Langella A., Evaluation of the maximum slope angle of simple geometries carried out by incremental forming process, *Journal of Materials Processing Technology* 194 (2007) 145–150.
- [MOR2007] Morais A., *Sebenta de Sistemas Mecânicos: textos de apoio*, Universidade de Aveiro 2007.
- [OBI2009] Obikawa T., Satou S., Hakutani T., Dieless incremental micro-forming of miniature shell objects of aluminum foils, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 49 (2009) pp 906–915.
- [POW1992] Powell N., Andrew C., Incremental forming of flanged sheet metal components without dedicated dies. *IMECHE1992 part B, Journal of Engineering Manufacture*, Vol 206, pp 41 – 47.

- [PET2009] Petek A., Jurisevic B., Kuzmana K., Junkara M., Comparison of alternative approaches of single point incremental forming processes, *Journal of Materials Processing Technology* 209 (2009) 1810–1815
- [RAU2009] Rauch M., Hascoet J.Y., Hamann J.C., Plennel Y., Tool path programming optimization for incremental sheet forming applications, *Computer-Aided Design* (2009), doi:10.1016/j.cad.2009.06.006
- [SCH2004] Schafer T., Schraft R.D., Incremental sheet forming by industrial robots using a hammering tool, *10th European Forum on Rapid Prototyping*, Association Francais de Prototypage Rapid - *AFPR* 2004.
- [SEN2009] Sena J., Dissertação de mestrado: Estampagem incremental: Um novo conceito de Produção, Universidade de Aveiro 2009.
- [SIM2006] Simões Morais J. M., *Desenho Técnico Básico, Volume 3: Desenho de Construções Mecânicas*, ISBN 972-96525-2-X.
- [SIL2008] Silva M.B., Skjoedt M., Atkins A.G., Bay N., Martins P.A.F., Single point incremental forming & formability/failure diagrams, *Journal of Strain Analysis Engineering Design* (2008) Vol. 43, 15–35.
- [STR2005] Strano M., Technological Representation of Forming Limits for Negative Incremental Forming of Thin Aluminum Sheets, *Journal of Manufacturing Processes* Vol 7 n°2 2005
- [TAK2008] Takano H., Kitazawa K., Goto T., Incremental forming of nonuniform sheet metal: Possibility of cold recycling process of sheet metal waste, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 48 (2008) 477–482

[VER2008] 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.

[YOU2008]Yousef H. A., El- Hofy H., Machining Technology- Machine Tools and Operations .ISBN-13: 978-1-4200-4339-6CRC Press-Taylor & Francis Group.

[ZHA2009] Zhang Q., Xiao F., Guo H., Li C., Gao L., Guo X., Hand W., Bondarev A., Warm negative incremental forming of magnesium alloy AZ31 Sheet: New lubricating method, *Journal of Materials Processing Technology* (2009) article in Press.

[ZIR2009] Ziran X., Gao L., Hussain G., Cui Z., The performance of flat end and hemispherical end tools in single-point incremental forming, *International Journal of Advanced Manufacturing and Technology* (2009), Doi 10.1007/s00170-009-2179-4

[1] www.fischerprecise.com (2010)

[2] www.kuka-robotics.com (2010)

[3] www.abb.com (2010)

[4] www.contarini.net (2010)

[5] www.thk.com (2010)

[6] www.huco.com (2010)

[7] www.dormertools.com (2010)

[8] www.skf.com (2010)

[9] www.haimer.es (2010)

[10] www.kennametal.com (2010)

[11] www.ott-jakob.de (2010)

[12] www.aminonac.ca (2010)

[13] www.irestal.com (2010)

[14] www.hidrogarne.com (2010)

[15] www.bliss-bret.com (2010)

Anexo A – Resultados da análise de rigidez do veio da árvore

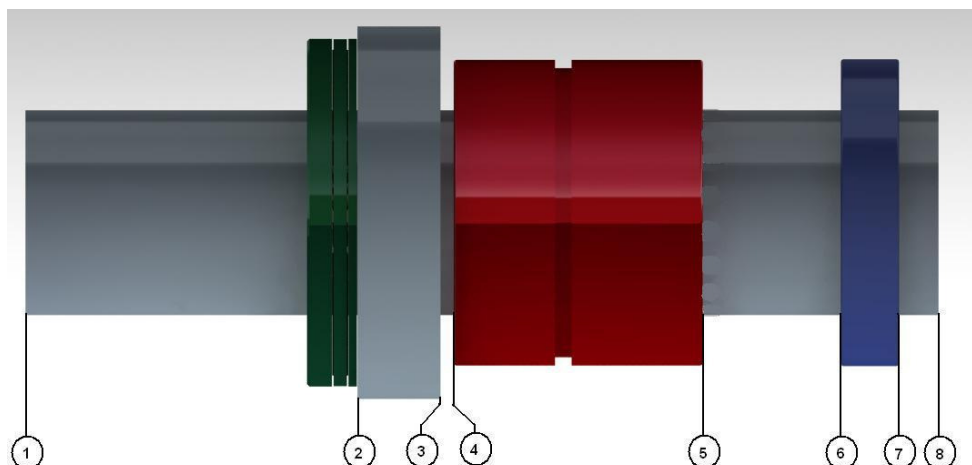


Fig. 74 – Discretização do veio para a configuração I da primeira proposta da árvore.

Tabela 24 - Resultados da análise de rigidez do veio para a configuração I da primeira proposta da árvore.

$x(mm)$	nó	$d_x(mm)$	$d_y(mm)$	$\theta_z(mrad)$	$R_x(kN)$	$R_y(kN)$	$V_y(kN)$	$M_z(kN)$
0	1	-3,102e-22	-1,061e-4	3,538e-3	-1,236e-19	-2,842e-17	2,842e-17	0,000e+0
18	2	2,746e-7	-4,298e-5	3,538e-3	7,229e-18	2,848e-17	0,000e+0	0,000e+0
28	3	0,000e+0	-7,076e-6	3,538e-3	-7,105e-18	-3,638e-15	3,638e-15	0,000e+0
30	4	0,000e+0	0,000e+0	3,538e-3	-9,874e-4	-8,649e-2	-8,650e-2	0,000e+0
60	5	0,000e+0	0,000e+0	-7,076e-3	-1,970e-3	4,080e-1	3,215e-1	1,000 e-3
97	6	0,000e+0	0,000e+0	2,732e-2	2,958e-3	-1,651e+1	-1,619e+1	-3,000 e-3
104	7	0,000e+0	0,000e+0	-6,362e-2	1,300e+1	2,269e+1	6,500e+0	5,200 e-2
120	8	-5,577e-4	-3,454e-3	-2,920e-1	0,000e+0	0,000e+0	6,500e+0	0,000e+0

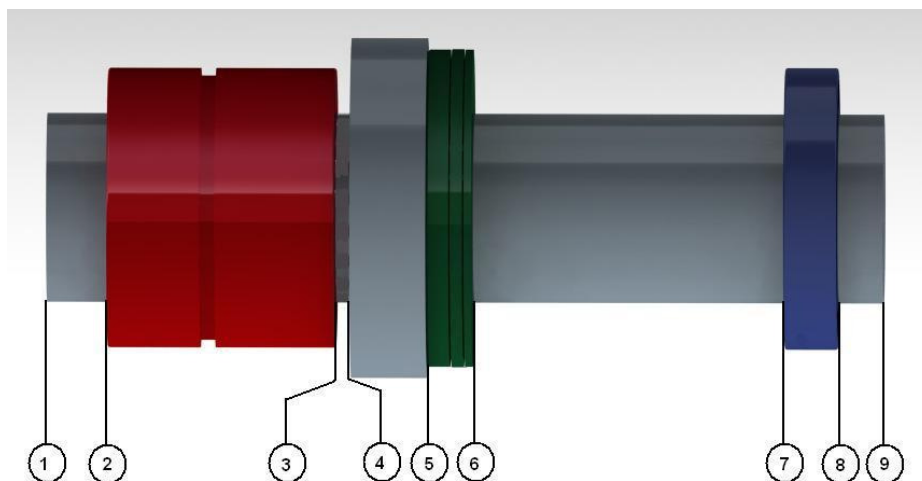


Fig. 75 - Discretização do veio para a configuração II da primeira proposta da árvore.

Tabela 25 - Resultados da análise de rigidez do veio para a configuração II da primeira proposta da árvore.

$x(mm)$	$nó$	$d_x(mm)$	$d_y(mm)$	$\theta_z(mrad)$	$R_x(kN)$	$R_y(kN)$	$V_y(kN)$	$M_z(kN)$
0	1	0,000e+0	-3,052e-5	3,815e-3	0,000e+0	-2,274e-16	2,274e-16	0,000e+0
8	2	0,000e+0	0,000e+0	3,815e-3	0,000e+0	-9,182e-2	-9,182e-2	1,000e-3
38	3	0,000e+0	0,000e+0	-7,630e-3	0,000e+0	3,038e-1	2,120e-1	3,000e-3
40	4	0,000e+0	-1,671e-5	-9,039e-3	0,000e+0	0,000e+0	2,120e-1	1,000e-3
50	5	0,000e+0	-1,092e-4	-9,371e-3	0,000e+0	0,000e+0	2,120e-1	4,140 e-3
87	6	0,000e+0	0,000e+0	2,868e-2	0,000e+0	-1,616e+1	-1,595e+1	-4,800 e-3
94	7	0,000e+0	0,000e+0	-6,475e-2	1,300e+1	2,245e+1	6,500e+0	5,200 e-2
110	8	-5,577e-4	-3,494e-3	-2,952e-1	0,000e+0	0,000e+0	6,500e+0	0,000e+0

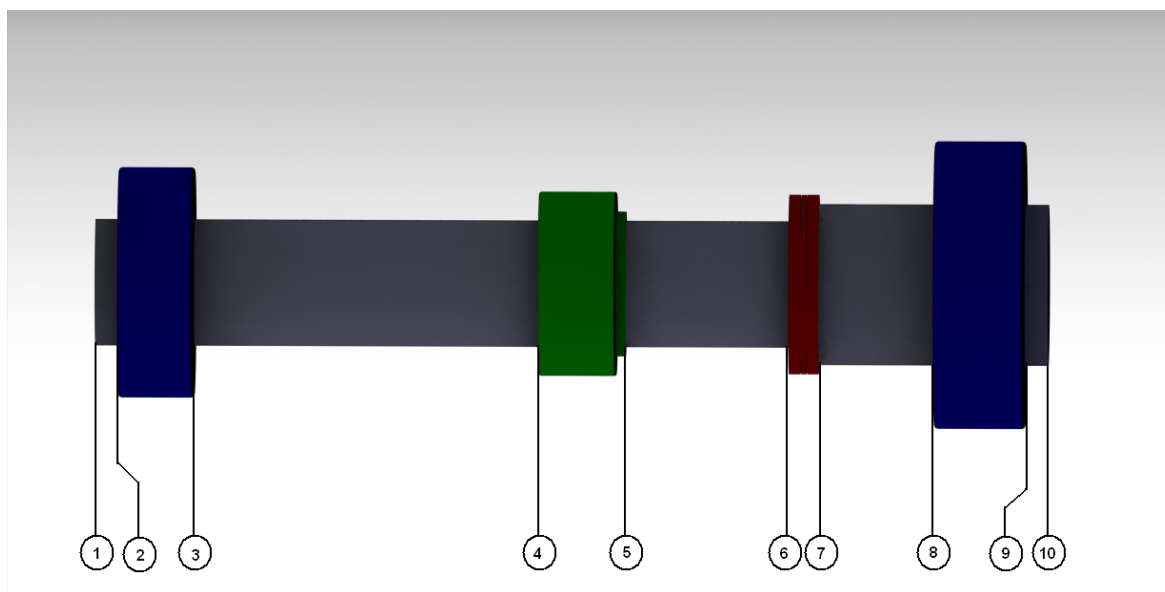


Fig. 76 - Discretização do veio para a segunda proposta da árvore.

Tabela 26 - Resultados da análise de rigidez do veio para a segunda proposta da árvore.

$x(mm)$	$nó$	$d_x(mm)$	$d_y(mm)$	$\theta_z(mrad)$	$R_x(kN)$	$R_y(kN)$	$V_y(kN)$	$M_z(kN)$
0	1	0,000e+0	-1,160e-7	1,160e-5	0,000e+0	7,105e-18	7,105e-18	0,000e+0
10	2	0,000e+0	0,000e+0	1,160e-5	0,000e+0	-5,140e-3	5,140e-3	8,481e-5
43	3	0,000e+0	0,000e+0	-2,321e-5	0,000e+0	9,030e-3	3,890e-3	-1,221e-4
193	4	0,000e+0	0,000e+0	2,047e-4	0,000e+0	-1,258e-1	1,219e-1	1,659e-3
227	5	0,000e+0	0,000e+0	-4,968e-4	0,000e+0	2,275e-1	1,219e-1	9,170 e-4
315	6	0,000e+0	-7,418e-5	5,070e-4	0,000e+0	0,000e+0	1,056e-1	-8,206 e-3
365	7	0,000e+0	0,000e+0	2,695e-3	0,000e+0	-2,814e+0	2,709e+0	4.333 e-2
405	8	0,000e+0	0,000e+0	-6,547e-3	1,300e+1	9,209e+0	6,500e+0	4,875e-2
420	9	-4,469e-4	-1,372e-4	-1,045e-2	0,000e+0	0,000e+0	6,500e+0	0,000e+0

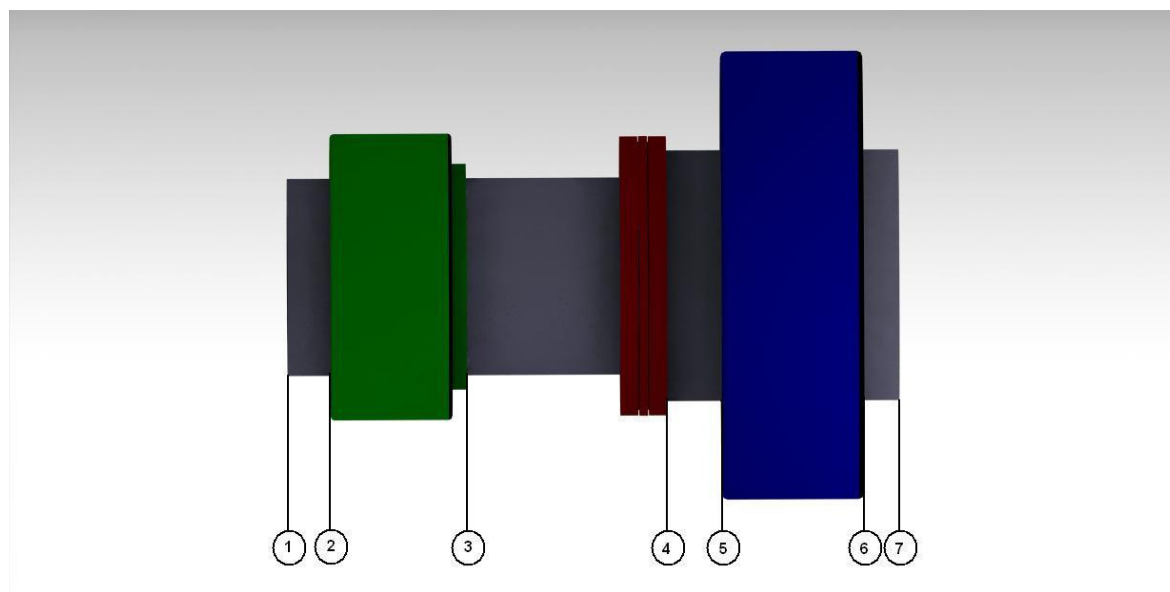


Fig. 77 - Discretização do veio para terceira proposta da árvore

Tabela 27 - Resultados da análise de rigidez do veio para a terceira proposta da árvore

$x(mm)$	$nó$	$d_x(mm)$	$d_y(mm)$	$\theta_z(mrad)$	$R_x(kN)$	$R_y(kN)$	$V_y(kN)$	$M_z(kN)$
0	1	0,000e+0	3,115e-5	-2,596e-3	0,000e+0	-1,819e-15	1,819e-15	0,000e+0
12	2	0,000e+0	0,000e+0	-2,596e-3	0,000e+0	8,672e-1	8,672e-1	8,481e-5
50	3	0,000e+0	0,000e+0	5,192e-3	0,000e+0	-2,844e+0	1,976e+0	-1,221e-4
106	4	0,000e+0	2,139e-4	-1,040e-2	0,000e+0	0,000e+0	1,976e+0	1,659e-3
121	5	0,000e+0	0,000e+0	-1,798e-2	0,000e+0	2,297e+1	2,099e+1	9,170 e-4
161	6	0,000e+0	0,000e+0	4,738e-2	1,300e+1	-2,099e+1	1,164e-13	-8,206 e-3
171	7	-2,979e-4	6,672e-4	8,606e-2	0,000e+0	-1,164e-13	1,164e-13	4,333 e-2

Anexo B – Resultados da análise da rigidez da estrutura

B1 – Condições de fronteira e carregamentos

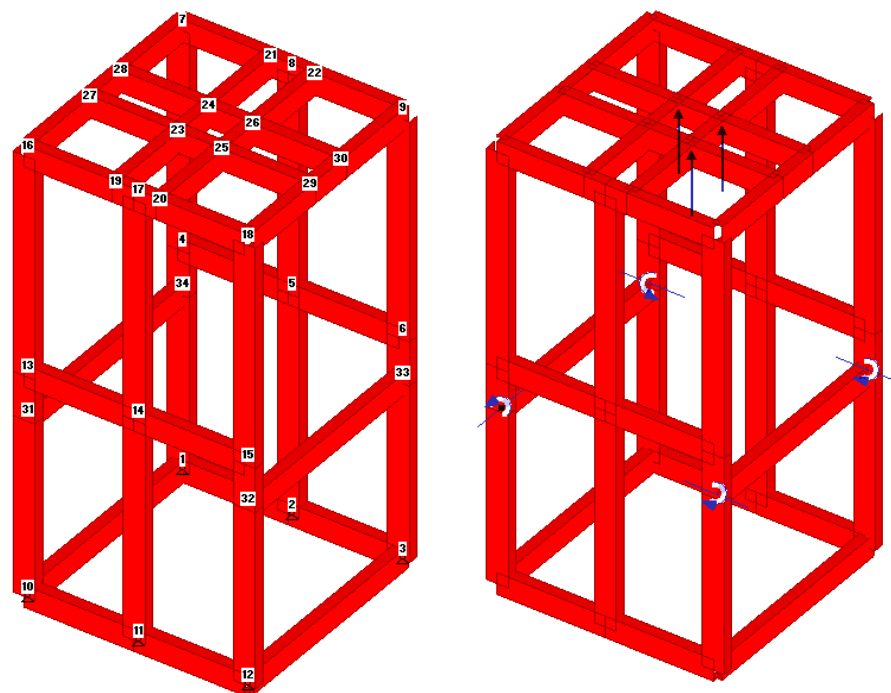


Fig. 78 - Discretização da estrutura, aplicação de condições de fronteira e carregamentos.

B2 – Resultados da análise

Tabela 28 - Resultados da análise de rigidez da estrutura.

<i>nó</i>	$d_x(mm)$	$d_y(mm)$	$d_z(mm)$	$\theta_x(mrad)$	$\theta_y(mrad)$	$\theta_z(mrad)$
1	0,000e+0	0,000e+0	0,000e+0	-2,333e-1	-3,584e-3	2,073e-2
2	0,000e+0	0,000e+0	0,000e+0	-5,500e-2	7,714e-3	9,709e-3
3	0,000e+0	0,000e+0	0,000e+0	-1,080e-2	-5,765e-4	3,422e-2
4	-7,330e-2	3,917e-2	2,503e-1	9,584e-1	1,608e-1	7,096e-2
5	-7,431e-2	7,776e-2	9,017e-2	3,553e-1	5,749e-1	1,595e-2

6	-7,537e-2	3,323e-2	-2,985e-1	1,421e-1	7,732e-1	3,372e-3
7	-1,444e-1	6,919e-2	-3,827e-1	-1,686e+0	-1,274e-1	2,738e-1
8	-1,432e-1	1,646e-1	-3,307e-1	-2,285e+0	-1,153e-1	8,612e-3
9	-1,421e-1	7,514e-2	-2,773e-1	-2,080e+0	-1,219e-1	-2,088e-1
10	0,000e+0	0,000e+0	0,000e+0	1,542e-1	1,089e-4	-1,471e-1
11	0,000e+0	0,000e+0	0,000e+0	-2,596e-1	4,473e-3	8,467e-2
12	0,000e+0	0,000e+0	0,000e+0	4,493e-2	-5,268e-3	7,695e-2
13	-2,476e-1	1,732e-2	-2,195e-1	-1,016e+0	5,160e-1	3,423e-1
14	-2,452e-1	7,068e-2	-4,606e-1	-7,273e-1	2,750e-1	2,941e-2
15	-2,445e-1	6,004e-2	-4,773e-1	-1,142e+0	-1,000e-1	1,006e-1
16	-3,020e-1	4,692e-2	-3,825e-1	1,573e+0	-1,265e-1	1,774e-1
17	-3,005e-1	1,419e-1	-3,287e-1	2,050e+0	-1,165e-1	9,089e-2
18	-2,995e-1	9,870e-2	-2,755e-1	2,133e+0	-1,327e-1	-1,618e-1
19	-3,008e-1	1,336e-1	-3,413e-1	3,472e+0	-1,318e-1	1,115e-1
20	-3,003e-1	1,514e-1	-3,172e-1	3,792e+0	-1,200e-1	5,431e-2
21	-1,435e-1	1,649e-1	-3,420e-1	-3,807e+0	-1,191e-1	3,926e-2
22	-1,430e-1	1,653e-1	-3,181e-1	-3,898e+0	-1,319e-1	-4,202e-2
23	-2,359e-1	1,273e+0	-3,417e-1	1,484e+0	-1,310e-1	1,096e+0
24	-2,074e-1	1,333e+0	-3,418e-1	-1,020e+0	-1,323e-1	9,827e-1
25	-2,359e-1	1,368e+0	-3,175e-1	1,402e+0	-1,328e-1	-2,852e-1
26	-2,074e-1	1,388e+0	-3,177e-1	-1,243e+0	-1,308e-1	-4,809e-1
27	-2,360e-1	5,708e-1	-3,828e-1	6,388e-1	-1,415e-1	2,074e+0
28	-2,073e-1	5,861e-1	-3,828e-1	-5,032e-1	-1,372e-1	2,291e+0

29	-2,360e-1	7,823e-1	-2,760e-1	7,191e-1	-1,375e-1	-2,038e+0
30	-2,073e-1	7,713e-1	-2,764e-1	-8,192e-1	-1,415e-1	-2,056e+0
31	-1,120e-1	1,249e-2	-2,791e-2	-8,365e-1	5,124e-2	1,052e+0
32	-2,086e-1	5,112e-2	-2,236e-1	-1,354e+0	-2,027e-1	2,459e-1
33	-6,833e-2	2,349e-2	-2,285e-1	-9,543e-1	5,638e-2	6,330e-2
34	-5,717e-2	3,270e-2	-3,237e-2	1,874e+0	-5,428e-2	8,896e-2

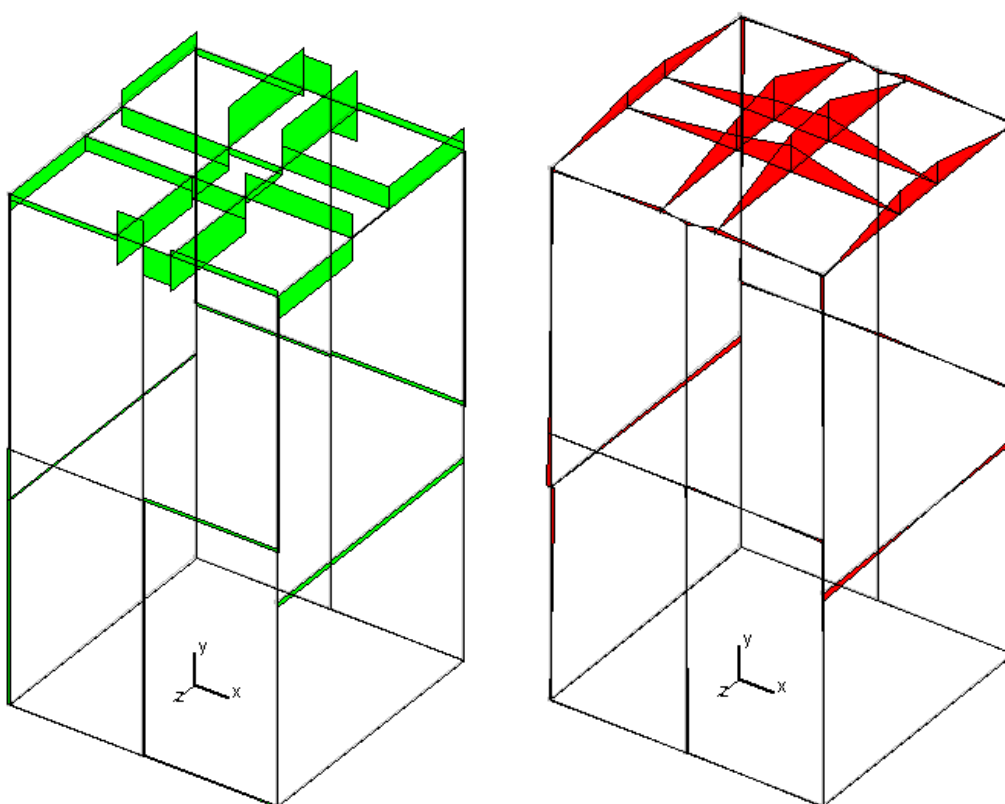


Fig. 79 - Diagrama de esforços transversos e momentos flectores da estrutura .

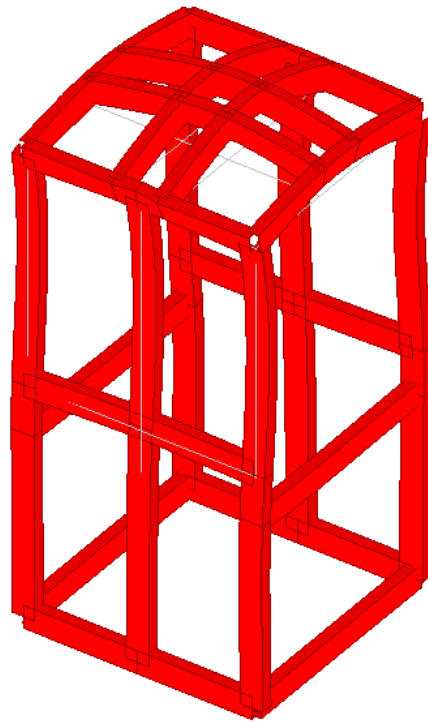


Fig. 80 - Deformada da estrutura .