



FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS  
E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE  
ENGENHARIA MECÂNICA

# **Ferramenta adaptativa de soldadura por fricção linear em termoplásticos para plataforma robótica**

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

**Autor**

**Tiago André Silva Marques Castelão**

**Orientador**

**Professor Doutor Pedro Mariano Simões Neto**

**Júri**

**Presidente** Professor Doutor **Diogo Mariano Simões Neto**  
Professor Auxiliar Convidado da Universidade de Coimbra

**Vogais** Professor Doutor **Ivan Rodolfo Pereira Garcia de Galvão**  
Professor Adjunto Convidado do Instituto Superior de  
Engenharia de Lisboa

Professor Doutor **Pedro Mariano Simões Neto**  
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

**Coimbra, Setembro, 2015**



“A mente que se abre a uma nova ideia jamais voltará ao seu tamanho original.”

Albert Einstein, 1879-1955.

À minha mãe.



## Agradecimentos

Este trabalho apenas foi possível graças ao contributo prestado por algumas pessoas. A todos os intervenientes um muito obrigado pelo apoio e conhecimento transmitido.

Desde logo ao meu orientador, Doutor Pedro Neto, agradeço todo o conhecimento partilhado. O seu apoio foi essencial para a motivação e a capacidade de ultrapassar alguns obstáculos com que me fui deparando.

Agradeço ao Doutor Nuno Mendes por acompanhar o meu trabalho e por ajudar no enriquecimento do mesmo. O seu apoio e motivação foram uma constante ao longo deste trabalho.

Agradeço ao Luís por todo o apoio e conhecimento, prestado no desenvolvimento dos protótipos.

Agradeço a todos os meus amigos, pela ajuda prestada em momentos de maior desânimo e cansaço, mas sobretudo pela paciência.

À minha família, foi uma preciosa fonte de motivação e apoio incondicional em todos os momentos da minha vida. Este foi mais um desses momentos. À minha Mãe a quem estou muito grato por tudo. Ao meu Pai, que teria muito orgulho em presenciar esta conquista da minha formação académica.

A todos, Obrigado.



## Resumo

Nesta dissertação pretende-se desenvolver uma nova ferramenta de soldadura por fricção linear para soldar termoplásticos. Pretende-se que esta seja adaptável a geometrias curvas e que possa ser utilizada como ferramenta num robô industrial. O processo de desenvolvimento desta ferramenta inclui as seguintes etapas: definição do conceito, projeto e produção dos protótipos.

Inicialmente foi efetuado um estudo sobre as ferramentas utilizadas atualmente no processo de soldadura por fricção linear de polímeros. Assim, detetou-se que embora existam alguns modelos de ferramentas estudados em laboratório que sirvam o propósito, nenhuma está apta a soldar superfícies curvas, sendo esta a grande limitação na industrialização deste processo. Porém existe uma ferramenta que apresentou bons resultados na soldadura de placas planas - a *Hot Shoe* - tendo sido, a base do seu funcionamento e o conceito desta ferramenta, o ponto de partida para a criação da nova ferramenta que se adapta às superfícies curvas.

Após a idealização do novo conceito, seguiram-se as etapas de conceção: o projeto da ferramenta e o desenvolvimento dos protótipos, este último auxiliado pela tecnologia de prototipagem rápida. Foi elaborado um estudo a fim de selecionar a geometria para a base da ferramenta e é apresentado o desenho detalhado das ferramentas: num primeiro *design* apresentando apenas uma articulação na base e noutra apresentando duas articulações na base. Neste estudo pode-se ainda visualizar as suas características específicas e componentes. É também desenvolvido o conceito para que o pino da ferramenta se ajuste às diferentes espessuras da superfície a soldar. A última etapa desta dissertação foi a conceção dos protótipos e a conseguinte análise e observação do seu funcionamento em superfícies curvas.

**Palavras-chave:** FSW Polímeros, Ferramenta FSW, Robô Industrial, Conceção, Prototipagem Rápida





## Abstract

In this dissertation, it was intended to develop a new friction stir welding tool, for thermoplastics. It was intended that it be adaptable to curves and that can be used as a tool of an industrial robot. The process of developing this tool comprises the several steps: concept definition, design and prototype production.

Initially, a study was performed on the tools currently used in the process of polymer welding. Thus, it was detected that although there are some models that serve the purpose, among those which were studied in the laboratory, none is able to weld curved surfaces, which is the major limitation of the industrialization of this process. However there is a tool that showed good results in welding flat plates - the "Hot Shoe" – therefore, its basis of operation and concept were the starting point for the creation of a new tool applicable to curved surfaces.

The idealization of the new concept was followed by the steps of design and the development of prototypes by 3D printing technology. It was conducted a study to select the base geometry of the tool and it is shown the detailed design of the tool: a first design having only one joint at the base and another featuring two joints. In this study, one can also conceive its specific characteristics, components and operation. It is finally developed the concept for which the tool pin can fit the different thicknesses of the surface to be welded. The last step of this work was the design of prototypes and the subsequent analysis and observation of its operation on curved surfaces.

**Keywords** FSW Polymers, FSW Tool, Industrial Robot, Rapid Prototyping



---

## Índice

Índice de Figuras .....	xi
Índice de Tabelas .....	xv
Simbologia e Siglas .....	xvii
Simbologia.....	xvii
Siglas .....	xviii
1. Introdução.....	1
1.1. Motivação .....	2
1.1.1. Aplicação .....	3
1.1.2. Limitações .....	3
1.1.3. Vantagens .....	3
1.1.4. Vantagens na Utilização da Plataforma Robótica .....	4
1.1.5. Impacto económico.....	5
1.2. Objetivos.....	6
2. Estado da Arte .....	7
2.1. Soldadura de Polímeros .....	7
2.1.1. Soldadura por placa quente.....	8
2.1.2. Soldadura por gás quente.....	8
2.1.3. Soldadura por laser .....	9
2.1.4. Soldadura por ultrassom .....	9
2.1.5. Soldadura por vibração .....	9
2.1.6. Soldadura por rotação .....	9
2.2. Soldadura por Fricção Linear em Polímeros .....	10
2.2.1. O Processo de Soldadura por Fricção Linear .....	10
2.2.2. Parâmetros do Processo de SFL em Polímeros .....	11
2.2.3. Ferramentas de SFL em polímeros.....	13
2.2.4. Patentes.....	19
2.3. Base da Ferramenta.....	21
2.3.1. Articulação da Base da Ferramenta .....	21
3. Base da Ferramenta .....	25
3.1. Soldadura de Polipropileno.....	25
3.2. Otimização da base da ferramenta articulada ao raio de curvatura mínimo .....	27
3.3. Estudo da mola da ferramenta.....	30
3.3.1. Tipo de mola utilizada .....	31
3.3.2. Material das molas.....	32
3.3.3. Aplicação da mola à ferramenta .....	32
3.3.4. Dimensões da Mola .....	33
4. Conceito e Projeto da ferramenta .....	41
4.1. Pino da Ferramenta .....	42
4.1.1. Componentes do Pino .....	43

4.2. Ferramenta com uma articulação.....	44
4.2.1. Componentes da Ferramenta com uma articulação.....	45
4.3. Ferramenta com duas articulações.....	48
4.3.1. Componentes da ferramenta com duas articulações .....	48
4.4. Desenvolvimento e Teste dos Protótipos.....	49
4.4.1. Montagem dos Protótipos.....	50
4.4.2. Teste dos Protótipos em Superfície Curva .....	51
5. Conclusão.....	55
5.1. Trabalhos Futuros .....	57
Referências Bibliográficas .....	59
Anexos.....	63
A1. Resistência elétrica flexível utilizada na base da ferramenta .....	63
A2. Rolamento utilizado nas ferramentas .....	64
A3. Fita de Aço utilizada na base da ferramenta.....	66
A4. Desenhos técnicos da ferramenta com uma articulação .....	67
A5. Desenhos técnicos da ferramenta com duas articulações.....	70
A6. Análise estática da ferramenta com uma articulação na base .....	74
A7. Análise estática da Ferramenta com duas articulações na base.....	75

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 – Soldadura por Fricção Linear utilizando a plataforma Robótica (Mendes, 2014).....	4
Figura 2.1 – Diagrama dos principais processos de soldadura de polímeros.....	7
Figura 2.2 – Esquema do processo de SFL.....	10
Figura 2.3 – Principais pãrametros do processo de soldadura por fricção linear.....	11
Figura 2.4 – Ferramenta Hot Shoe (Nelson et al., 2004).....	14
Figura 2.5 – Ferramenta com base estacionária em madeira (Rezgui et al., 2010).....	15
Figura 2.6 – Esquema do funcionamento do processo de SFL para polímeros (Z. Kiss & Czigány, 2012).....	15
Figura 2.7 – Fotografia e esquema da ferramenta de SFL (Azarsa & Mostafapour, 2013).....	15
Figura 2.8 – Esquema e fotografia da ferramenta de SFL do tipo <i>Hot Shoe</i> (Bagheri et al., 2013).....	16
Figura 2.9 – Ferramenta de FSW com uma base longa e pino cónico (Mendes, 2014b)....	16
Figura 2.10 – Ferramenta convencional com uma base larga (Aydin, 2010).....	17
Figura 2.11 – Fresas Convencionais (Zoltán Kiss & Czigány, 2007).....	17
Figura 2.12 – Ferramenta Self-reacting (Pirizadeh et al., 2014).....	18
Figura 2.13 – Geometria da ferramenta (Pinzón S., 2014).....	18
Figura 2.14 – Processo de soldadura e aparência externa da soldadura (Pinzón S., 2014).....	19
Figura 2.15 – Desenho da ferramenta de SFL com o pino ajustável.....	19
Figura 2.16 – Desenho e esquema da ferramenta <i>Hot Shoe</i> .....	20
Figura 2.17 – Desenho da ferramenta com a base adaptável.....	20
Figura 2.18 – Elos da Lagarta da Plataforma Pantera (Yamashita, 1904).....	22
Figura 2.19 – Aplicação da Calha Porta-Cabos Articulada (Iigus, s.d.).....	22
Figura 2.20 – CAD da Calha Porta-Cabos Articulada (Iigus, s.d.).....	22
Figura 2.21 – Desenho da ligação de secções da lagarta.....	23
Figura 2.22 – Desenho das secções da lagarta, com o pormenor do pino de ligação.....	23
Figura 2.23 – Desenho dos elos de ligação das lagartas.....	24
Figura 2.24 – Desenho da ligação de duas secções da lagarta.....	24
Figura 3.1 – Tempo de arrefecimento vs. Espessura da placa.....	27
Figura 3.2 – Esquema representativo da base com comprimento $L$ , sobre a circunferência com raio de curvatura $RC$ .....	28

Figura 3.3 – Representação teórica da base da ferramenta sobre a superfície com um raio de curvatura, $Rc$ : (a) sem articulação ( $L = 90mm$ ), (b) com uma articulação ( $L = 45mm$ ) e (c) com duas articulações ( $L = 30mm$ ).....	29
Figura 3.4 – Otimização da base da ferramenta, sem articulação ( $L = 90mm$ ), com uma articulação ( $L = 45 mm$ ) e com duas articulações ( $L = 30mm$ ) ao raio de curvatura, $Rc$ .....	30
Figura 3.5- Molas helicoidais de compressão (a) e de torção (b). .....	31
Figura 3.6 – Constantes $m$ e $A$ e custo relativo do material Cromo-silício para molas. ....	32
Figura 3.7 – Mola helicoidal de compressão.....	32
Figura 3.8 – Representação da aplicação da mola: (a) base com uma articulação (b) base com duas articulações. ....	33
Figura 3.9 – Representação esquemática da força na mola, $F$ proveniente da carga $P$ .....	33
Figura 3.10 – Relação entre a variação do comprimento livre da mola $L0$ e o comprimento da mola comprimida $L1$ , com as forças correspondentes. ....	34
Figura 3.11 – Representação esquemática do ângulo $\alpha$ e do triângulo retângulo formado pela articulação ao apoio da mola, utilizado para calcular o ângulo $\alpha$ pelas razões trigonométricas.....	35
Figura 3.12 – Representação esquemática do ângulo $\alpha - \beta$ , formado quando a mola está comprimida, para o cálculo do comprimento da mola comprimida.....	35
Figura 3.13 – Desenho técnico da mola da ferramenta com uma articulação (a) e da ferramenta com duas articulações (b). ....	39
Figura 4.1 - Vista tridimensional do desenho 3D CAD do Pino da Ferramenta.....	43
Figura 4.2 – Vista explodida do Pino da Ferramenta com a nomenclatura dos vários componentes constituintes. ....	43
Figura 4.3 – Desenho técnico do Pino com as cotas de atravacamento e indicação das posições extremas do Pino ajustável e respetivo Parafuso de Afição Vertical. ....	44
Figura 4.4 – Vista tridimensional do desenho 3D CAD da ferramenta com uma articulação na base.....	45
Figura 4.5 – Vista explodida da Ferramenta com uma articulação com a nomenclatura dos vários constituintes.....	45
Figura 4.6 – Parâmetros utilizados na soldadura (Mendes, 2014). ....	46
Figura 4.7 – Fita de Aço.....	47
Figura 4.8 – Desenho técnico da Fita de aço aplicada nas ferramentas. ....	47
Figura 4.9 – Vista tridimensional do desenho 3D CAD da ferramenta com uma articulação na base.....	48
Figura 4.10 – Vista explodida da Ferramenta com Uma Articulação com a nomenclatura dos vários constituintes. ....	49

---

Figura 4.11 – Componentes utilizados na construção do protótipo da ferramenta com uma articulação. ....	50
Figura 4.12 – Protótipo da ferramenta com uma articulação na base.....	50
Figura 4.13 – Componentes utilizados na construção do protótipo com duas articulações.	51
Figura 4.14 – Protótipo da ferramenta com duas articulações na base.....	51
Figura 4.15 – Teste dos protótipos numa superfície côncava com um raio de curvatura de aproximadamente 400 <i>mm</i> . ....	52
Figura 4.16 – Teste dos protótipos numa superfície convexa com um raio de curvatura de aproximadamente 415 <i>mm</i> . ....	52
Figura 4.17 – Teste dos protótipos numa superfície convexa com um raio de curvatura de aproximadamente 600 <i>mm</i> . ....	53
Figura 4.18 – Teste dos protótipos numa superfície convexa com um raio de curvatura de aproximadamente 175 <i>mm</i> . ....	53
Figura 5.1 – Representação 3D da ferramenta com duas articulações no raio de curvatura otimizado.....	56





---

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1.1 - Comparação de características técnicas em processos de união de polímeros (Strand, 2003).....	4
Tabela 1.2 – Características dos diferentes equipamentos utilizados na SFL. (Mendes, 2014).....	5
Tabela 1.3 – Comparação de processos de soldaduras de polímeros, valores indicativos (Strand, 2003).....	5
Tabela 3.1 – Propriedades do polipropileno (PP) na tecnologia de moldação por injeção (Basell Polyolefins, 2006).....	26
Tabela 3.2 – Equações das propriedades da mola, utilizadas para o cálculo das dimensões da mola.....	37
Tabela 3.3 – Valores aproximados do número de espirais inativas e comprimento das molas de compressão.....	38
Tabela 3.4 – Propriedades e dimensões das molas utilizadas na ferramenta com uma articulação na base e duas articulações na base, respectivamente.....	38
Tabela 5.1 – Ferramenta Adaptativa com uma articulação na base e duas articulações na base vs Ferramenta “Hot Shoe” – Vantagens e Desvantagens.....	56



---

## SIMBOLOGIA E SIGLAS

### Simbologia

$\alpha$  – Difusividade térmica

$\beta$  – Ângulo formado pela base articulada no raio de curvatura

$\lambda$  – Condutividade térmica

$\rho$  – Densidade

$\sigma_R$  – Resistência à tração

$\sigma_c$  – Tensão de cedência

$\tau_c$  – Tensão de cedência ao corte

$\tau_{adm}$  – Tensão de corte admissível

$\tau_{máx}$  – Tensão de corte máxima

$\varphi$  – Ângulo formado pelos apoios da mola comprimida à articulação

$a$  – Comprimento da base articulada

$b$  – Comprimento de penetração da base na superfície de soldadura

$b_1$  – Comprimento de penetração da base com uma articulação na superfície

$b_2$  – Comprimento de penetração da base com duas articulações

$C$  – Índice da mola

$C_p$  – Calor específico

$d$  – Diâmetro do arame da mola

$D$  – Diâmetro médio de enrolamento da mola

$F$  – Força da mola

$F_{min,1}$  – Força mínima da mola da ferramenta com uma articulação

$F_{min,2}$  – Força mínima da mola da ferramenta com duas articulações

$F_{máx.}$  – Força máxima da mola da ferramenta

$h$  – Altura da articulação ao apoio da mola

$K_s$  – Fator de correção da tensão de corte

$L$  – Comprimento da base

$L_0$  – Comprimento livre da mola

$L_1$  – Comprimento da mola comprimida

$L_2$  – Comprimento da articulação ao apoio da mola

$n$  – Coeficiente de segurança

$N_a$  – Número de espiras ativas

$p$  – Passo da mola

$P$  – Carga exercida pela base sobre a superfície de soldadura

$R_C$  – Raio de curvatura

$s$  – Espessura

$t_{arref}$  – Tempo de arrefecimento

$T_f$  – Temperatura de fusão

$T_w$  – Temperatura do molde

$T_E$  – Temperatura de Ejeção

$v$  – Velocidade de translação

## **Siglas**

ABS – Acrilonitrila Butadieno Estireno

CAD – Computer aided design

HDPE – High-density polyethylene

PEAD – Polietileno de alta densidade

PR – Prototipagem Rápida

PVC – Policloreto de Vinila

SFL – Soldadura por Fricção Linear

TWI – The Welding Institute





## 1. INTRODUÇÃO

Embora os metais sejam usados atualmente para muitas aplicações, os polímeros tem vindo progressivamente a ganhar lugar na indústria, sendo hoje projetadas e fabricadas as mais variadas peças em polímero e material compósito. Do mesmo modo, muitas peças que são fabricadas atualmente em metal estão a ser redesenhadas e fabricadas em plástico.

Os polímeros oferecem várias vantagens sobre os metais, têm maior resistência em relação ao peso, requerem menos energia para se mover, devido à diminuição da inércia, o que se traduz em benefícios económicos (Nelson, 2004). Simultaneamente com este facto ocorre a necessidade de encontrar tecnologias mais avançadas de produção e transformação destes materiais. Um bom exemplo é o novo processo de união de termoplásticos utilizando a Soldadura por Fricção Linear (SFL).

Em 1991 a soldadura por fricção linear foi desenvolvida pelo *The Welding Institute (TWI)* (Thomas et al., 1991). Este novo conceito de soldadura constituiu um enorme desenvolvimento a nível industrial, uma vez que permite soldar materiais de baixa soldabilidade que anteriormente eram praticamente impossíveis de ligar recorrendo à soldadura por fusão, nomeadamente as ligas de alumínio (Mishra & Ma, 2005). Apesar de ter sido inicialmente desenvolvida para este tipo de ligas, mais tarde foi aplicada com sucesso em polímeros. A aplicação da soldadura por fricção linear em polímeros começou a ser estudada em 1997 na Universidade de Brinham Young (Strand, 2003), desde então o processo continua a ser estudado e melhorado com a criação de novas ferramentas e com a análise de novos parâmetros.

O processo de SFL pode ser realizado utilizando os seguintes equipamentos: fresadoras, máquinas de SFL, robôs paralelos (Fleming et al., 2010) e os robôs antropomórficos (Zimmer, 2010). Cada equipamento apresenta as suas próprias vantagens e desvantagens, diferenciando-se na capacidade de carga, rigidez, espaço de trabalho, custos, controlo, etc.

Nesta dissertação, vai ser desenvolvido o conceito de uma nova ferramenta de SFL em termoplásticos para superfícies que apresentem geometrias curvas para aplicação a um robô antropomórfico.

## 1.1. Motivação

A engenharia de polímeros está hoje a desenvolver-se e a afirmar-se na indústria de modo vertiginoso. O aumento exponencial do uso deste material deve-se a aspetos económicos e a algumas propriedades que estes possuem em relação aos materiais metálicos convencionais, nomeadamente, redução do peso, transformação em *designs* complexos e inovadores, aumento da segurança, tempo de produção, apresentam alta tolerância a danos e à corrosão, possuem uma excelente resistência a solventes, alta tenacidade à fratura, alta resistência ao impacto, boa resistência à fadiga, baixo custo de armazenamento e vida útil infinita (Mark, 2007). Em simultâneo com este desenvolvimento surge a necessidade de trabalhar e produzir formas mais avançadas no processamento e junção deste material, tornando a sua aplicação mais fiável.

Os processos de soldadura nos polímeros surgiram para substituir os processos de colagem com vantagem de serem mais limpos, apresentarem menor custo, maior qualidade e resistência.

A nível industrial o processo de soldadura em estudo nesta dissertação designado por fricção linear aplicada aos polímeros ainda não é um processo de soldadura viável, vários parâmetros e fatores desta tecnologia necessitam de melhoria e de ser comprovados.

Os fatores mais importantes e relevantes são o facto de esta tecnologia estar limitada a soldar placas planas, não existindo ainda uma ferramenta capaz de soldar superfícies com geometrias curvas e angulares, algo que é indispensável na indústria dos polímeros, pois um dos principais motivos da utilização de polímeros é a possibilidade de *designs* complexos e inovadores, sendo esta a principal motivação para a elaboração e criação de uma ferramenta que se adapte a superfícies com *designs* complexos. O outro fator é a limitação da ferramenta a soldar placas de espessuras homogéneas, que torna este processo de soldadura dispendiosos quando existe a necessidade de utilizar parâmetros geométricos com elevada diversidade.

A utilização da ferramenta de soldadura por fricção linear para termoplásticos acoplada a um robô industrial, com a base adaptada a soldar superfícies curvas e com um pino que se ajuste a diferentes espessuras, representará uma evolução muito relevante nas diversas indústrias que utilizam plástico nos seus processos produtivos.



### **1.1.1. Aplicação**

A Soldadura por Fricção Linear em polímeros poderá ter inúmeras aplicações em quase toda a indústria que utiliza este material. A SFL poderá ser usada para soldar painéis, tanques de combustível, recipientes, vasos, janelas de plástico, molduras de portas, união de tubos e na indústria automóvel.

### **1.1.2. Limitações**

Existem algumas limitações na industrialização do processo de soldadura por fricção linear, quer ao nível dos metais quer dos polímeros, como a dificuldade em manter o material na junta de soldadura, baixa velocidade de soldadura, dificuldades na mistura do material e soldadura não uniforme (Michael, 2009).

Até à data, este processo de soldadura de polímeros está apenas estudado e aprovado em laboratório para a produção de soldadura lineares em placas planas que limita o processo a nível industrial.

### **1.1.3. Vantagens**

A SFL aplicada a materiais termoplásticos, irá trazer vantagens, desde a redução de custos da soldadura até ao aumento da produtividade.

Em relação aos processos de soldadura de termoplásticos existentes a SFL apresenta maior produtividade, possibilidade de uma soldadura contínua, capacidade de soldar quase todos os termoplásticos e matérias dissimilares (Strand, 2003). O processo pode ser automatizado, o que resulta numa melhoria da gestão da qualidade e na redução de falhas na soldadura. O facto de ser uma soldadura cuja operação é máquina-ferramenta significa que os operadores não necessitam de qualificação na área. Neste processo de soldadura não existe material de adição, fazendo desta tecnologia, uma tecnologia amiga do ambiente. A SFL será assim um processo de soldadura seguro e limpo e com custos relativamente baixos.

Na tabela 1.1 está representado a comparação de algumas características que a SFL apresenta em relação a outros processos de soldadura.

Tabela 1.1 - Comparação de características técnicas em processos de união de polímeros (Strand, 2003).

Process	Joint Efficiency	Repeatability	Continuous	Discrete
Ultrasonic	75 %	high	No	Yes
Hot-plate	90 %	high	No	Yes
Hot-gas	60 %	fair	Difficult	Yes
Extrusion	70 %	fair	Difficult	Yes
Friction	85 %	high	No	Yes
Adhesives	90 %	fair	No	Yes
FSW	95 %	high	Yes	Yes

#### 1.1.4. Vantagens na Utilização da Plataforma Robótica

Os benefícios resultantes da automação deste processo de soldadura pelo recurso à utilização de robôs traduz-se principalmente pela melhoria da qualidade da soldadura, soldaduras mais consistentes, tempos de ciclo mais reduzidos, melhor controlo da produção e melhor controlo dos parâmetros utilizados neste processo de soldadura. A principal vantagem é que o robô consegue ter uma área de trabalho muito maior e fazer soldaduras curvas, isto porque tem 6 graus de liberdade. Além disso o robô é mais barato. A desvantagem é que o robô não tem rigidez estrutural para aguentar os elevados esforços criados neste processo de soldadura.

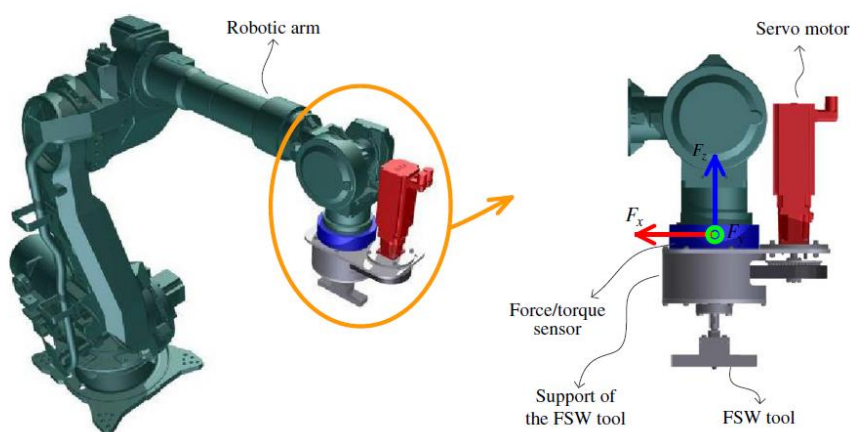


Figura 1.1 – Soldadura por Fricção Linear utilizando a plataforma Robótica (Mendes, 2014).

Na tabela 1.2 pode-se comparar as principais vantagens no uso de um robô industrial neste processo de soldadura com o uso da máquina de SFL.

**Tabela 1.2** – Características dos diferentes equipamentos utilizados na SFL. (Mendes, 2014).

Characteristics ↓	Equipment			
	Milling machine	FSW machine	Parallel robot	Anthropomorphic robot
Flexibility	Low	Low/medium	High	High
Cost	Medium	High	High	Low
Stiffness	High	High	High	Low
Working volume	Medium	Medium	Low	High
Setup time	Low	High	Medium	Medium
Number of programming options	Low	Medium	High	High
Capacity to produce complex welds	Low	Medium	High	High
Control type	Motion	Motion/force	Motion	Motion

Através da tabela 1.2, conclui-se que o uso do robô industrial apresenta uma maior flexibilidade, menor custo, grande capacidade de produzir soldaduras complexas e um grande número de opções de programação quando comparado com a máquina de SFL (Mendes, 2014).

### 1.1.5. Impacto económico

A introdução desta tecnologia na indústria vai minimizar os custos associados à soldadura de termoplásticos. Vão-se reduzir os custos do processo, devido à exigência de equipamento com o mínimo de especialização. Esta soldadura não exige operadores qualificados, não necessita de material de adição e não necessita de preparação de junta. Os custos de segurança também irão reduzir, pois o processo de SFL é limpo e seguro. Na tabela 1.3 estão representados os custos dos diferentes processos de soldadura em polímeros, onde se verifica que a SFL apresenta vantagens em relação a outros processos de soldadura.

**Tabela 1.3** – Comparação de processos de soldaduras de polímeros, valores indicativos (Strand, 2003).

Process	Preparation	Process time	Total Time	Consumables	Machine/ Tool, consumable cost
Ultrasonic	energy directors	1-3 sec.	5-10 min.	none	\$30,000
Hot-plate	none	30-40 sec.	60-90 sec.	none	\$47,000
Hot-gas	v- groove	8-10 min.	15 min.	gas, filler	\$3,500
Extrusion	v- groove	8- 10 min.	15 min.	gas, filler	\$5,500
Friction	flatten face	10-15 sec.	6- 8 min.	none	\$89,000
Adhesives	clean	3 min.	2-3 hours	cleaner, adhesive	\$3,000
FSW	none	2 min.	3 min.	none	\$11,000

## **1.2. Objetivos**

Os principais objetivos a atingir com este trabalho são:

1. Definição do conceito de uma ferramenta para SFL em polímeros que se adapte a superfícies curvas para aplicação em robô industrial;
2. Conceção e projeto da ferramenta;
3. Conceção dos protótipos, utilizando a tecnologia de prototipagem rápida (PR);
4. Teste e análise dos protótipos desenvolvidos em superfícies com geometria curva e angular;

## 2. ESTADO DA ARTE

### 2.1. Soldadura de Polímeros

Os polímeros são divididos em dois grandes grupos: os termoendurecíveis e os termoplásticos. Os termoendurecíveis não têm a capacidade de sofrer uma nova plastificação, pois apresentam uma estrutura macromolecular linear que sob a aplicação de calor e pressão, adquire ligações cruzadas, permanentes entre cadeias lineares criando uma estrutura rígida, que impede o movimento das moléculas. Os termoplásticos são aqueles que plastificam sob a ação de calor e solidificam após o arrefecimento, moldando-se no formato desejado. A soldadura em polímeros é realizada apenas em termoplásticos (Michael, 2009).

No desenvolvimento da soldadura por fricção linear como um processo de união viável para termoplásticos, é importante compará-la com os processos existentes. Existem vários processos que têm vindo a dominar no campo da soldadura de peças plásticas.

Vamos introduzir este ponto com uma breve revisão dos processos mais comuns enumerando os seus pontos fortes e pontos fracos.

Os processos de soldadura de polímeros estão divididos em três categorias: térmico, por atrito e o eletromagnético, apresentados na figura 2.1 (Amanat, 2010).

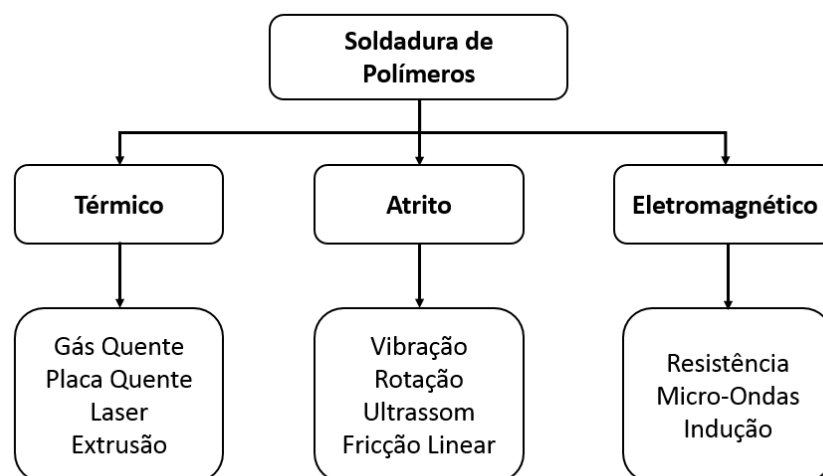


Figura 2.1 – Diagrama dos principais processos de soldadura de polímeros.

Conforme a figura 2.1, cada método apresenta uma grande variedade de processos e cada processo adapta-se a aplicações específicas, capital disponível, espaço, operadores, qualidade da soldadura, volume da produção, preocupações ambientais, flexibilidade, geometria das peças. Todos estes fatores influenciam na escolha do processo de soldadura. Infelizmente, a maioria dos processos de soldadura eficazes, requerem equipamento especializado e são caros. Um processo que utilize as máquinas existentes, oferecendo custos mais baixos, maior flexibilidade, aumento da segurança e de fácil automatização iria atender às necessidades industriais.

Todas as técnicas de soldadura nos polímeros progridem através de três fases comuns. A primeira fase caracteriza-se pela fusão das faces de material que se pretende soldar. Na segunda fase vai ser exercida uma força de pressão sobre a junta de soldadura que ajudará a acomodar o material na mesma. Durante a terceira fase o material no estado viscoso é deixado arrefecer de modo gradual. A pressão criada na segunda fase deverá ser mantida durante o arrefecimento gradual de modo a eliminar possíveis deformações e defeitos na junta de soldadura. Os métodos de soldadura mais comuns nos polímeros são: a soldadura por ultrassons, soldadura por vibração, soldadura por rotação, soldadura por placa quente, soldadura dielétrica, soldadura por gás quente e soldadura por laser (Yousefpour, 2004).

### **2.1.1. Soldadura por placa quente**

É o processo mais antigo de soldadura de polímeros, que utiliza a energia elétrica como fonte de calor para fundir o material. O aquecimento ocorre nas duas faces do material em simultâneo. Apesar de poder ser realizada com vários tipos de polímeros, só pode ser utilizada com materiais do mesmo tipo e exige um grande controlo de temperatura e pressão.

Este processo é aplicado em peças de geometria complexa e de grandes dimensões (Michael, 2009).

### **2.1.2. Soldadura por gás quente**

Este processo é utilizado em peças grandes. Consiste na aplicação de gás quente nas superfícies e no bocal de soldadura, que é constituído pelo mesmo material que será soldado, sendo consumido durante o processo. É um processo manual geralmente aplicado para soldar PVC (Engineering, Technology, 2002).

### **2.1.3. Soldadura por laser**

Trata-se de um processo de soldadura por aquecimento através da transmissão de calor por radiação. A soldadura por laser garante ciclos rápidos de soldadura, é um processo limpo, produtivo e possibilita a soldadura de peças com geometrias complexas. As principais desvantagens são a limitação do tamanho das peças produzidas e o custo dos equipamentos. É utilizado preferencialmente em peças plásticas sensíveis, que não podem ser submetidas a calor e a vibração, como em peças para uso médico-cirúrgico (Kagan & Pinho, 2004).

### **2.1.4. Soldadura por ultrassom**

A soldadura por ultrassons é um processo de soldadura no estado sólido, em que se produz uma soldadura por aplicação local de uma vibração de alta frequência, que origina calor que leva a junta à temperatura de fusão. As peças são soldadas sem o auxílio de qualquer material de adição e aquecidas por ação da vibração de um feixe de ultrassons. A aplicação da pressão faz-se durante um determinado tempo, efetuando a soldadura. É um processo utilizado em praticamente todos os plásticos. (Truckenmüller, 2006).

### **2.1.5. Soldadura por vibração**

De modo similar ao processo ultrassónico, a soldadura por vibração também utiliza a fricção superficial entre as duas superfícies a soldar. Este tipo de soldadura pode ser usado para soldar resinas amorfas e cristalinas, além de soldar materiais dissimilares. É usada em peças com grandes áreas de soldadura e geometrias complexas, destacando-se por estas características de outros tipos de soldadura de plásticos. Deste modo, é um processo de soldadura com uma grande aplicação na indústria automóvel, naval e aeronáutica (Varga, 2008).

### **2.1.6. Soldadura por rotação**

A soldadura por rotação funciona pelo mesmo princípio da soldadura por vibração, através do calor gerado pelo atrito de fricção das peças plásticas. Porém, este processo é somente destinado a peças cilíndricas, que podem ser de qualquer diâmetro, como tanques, tubos e filtros (Company, 1988).

## 2.2. Soldadura por Fricção Linear em Polímeros

Ao contrário do processo de SFL nos metais, que está altamente desenvolvido e em crescimento exponencial na indústria, a soldadura por fricção nos polímeros é recente por isso requer ainda investigação na área.

O sucesso conseguido na soldadura por fricção linear em polímeros não tem tido como base o desenvolvimento do processo desta soldadura nos metais, nomeadamente nas ligas de alumínio, devido às diferentes propriedades físicas e mecânicas dos dois materiais. As principais diferenças entre os termoplásticos e metais que limitam a aplicação do processo de soldadura por fricção linear nos polímeros são a baixa condutividade térmica, a baixa temperatura de fusão e as propriedades viscoelásticas. O uso de ferramentas convencionais de SFL para metais nos polímeros resulta em soldaduras com vários defeitos, tais como cavidades no cordão de soldadura e a projecção do material a partir da região de soldadura que resulta num cordão de soldadura com aparência não uniforme e consequente baixa resistência à tração (Nelson et al., 2004). Com a finalidade de resolver estas dificuldades várias ferramentas de SFL têm sido desenvolvidas e exploradas.

### 2.2.1. O Processo de Soldadura por Fricção Linear

A Soldadura por Fricção Linear (SFL) é um processo de ligação no estado sólido desenvolvido pelo *Welding Institute (TWI)* em 1991 (Thomas et al., 1991), consiste numa das mais inovadoras formas de unir materiais. Tem como base uma ferramenta rotativa, que ao girar sobre o material a unir, friccionando-o, aquece este mesmo material amaciando-o devido a intensa deformação plástica, ao ponto de haver “mistura” do material no estado sólido através do seu escoamento em torno do eixo de soldadura (Meran, 2006).

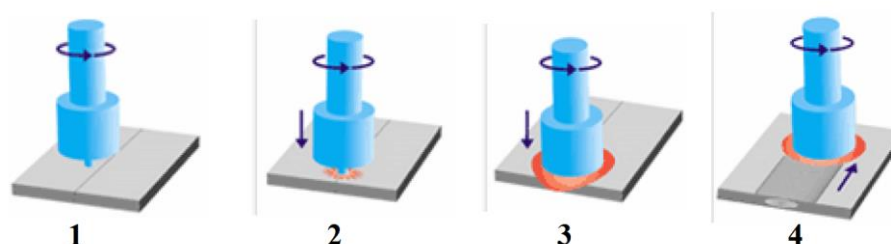


Figura 2.2 – Esquema do processo de SFL.



Na figura 2.2 encontra-se esquematizado o princípio geral de funcionamento do processo utilizado neste tipo de soldadura. Inicialmente a ferramenta posiciona-se sobre a zona de ligação, já em rotação (1). É então que se pressiona a ferramenta com uma força axial (2), de modo a haver a penetração do pino na zona de junção e a base da ferramenta mantém a pressão suficiente sobre a superfície superior das peças a soldar (3). A ferramenta desloca-se linearmente de modo a executar uma soldadura contínua (4). Ao longo de todo o processo, apenas a base e o pino estão em contacto com a peça a soldar.

Como este processo de soldadura é um método de ligação no estado sólido, as soldaduras obtidas apresentam composição química semelhante à do material base, sendo possível soldar materiais dissimilares (Leal & Loureiro, 2004).

### 2.2.2. Parâmetros do Processo de SFL em Polímeros

Os parâmetros do processo de SFL desempenham um papel importante na qualidade da soldadura nos materiais termoplásticos. Há um grande número de parâmetros no processo que podem afetar a qualidade da SFL nos termoplásticos, os mais importantes são: a geometria da ferramenta, a velocidade de rotação do pino da ferramenta, a velocidade transversal da ferramenta, a força axial e a temperatura da ferramenta, representados na figura 2.3 (Mishra & Ma, 2005).

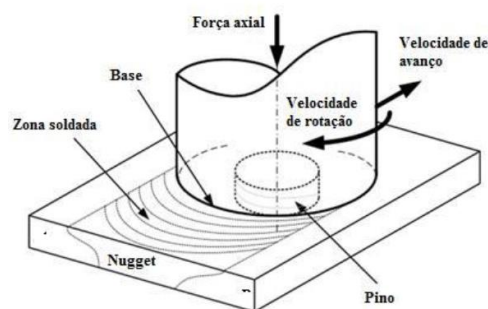


Figura 2.3 – Principais parâmetros do processo de soldadura por fricção linear.

A velocidade de rotação do pino da ferramenta é um parâmetro importante na SFL de termoplásticos. Kiss e Czigány, em placas de polipropileno (PP) utilizando a ferramenta *Hot Shoe* com a base não aquecida produziram soldaduras com velocidades de rotação de 2000 rpm e 3000 rpm e com uma velocidade transversal de 60 (mm/min). Concluíram que as soldaduras produzidas com a maior velocidade de rotação apresentaram a resistência à tração mais elevada, 86% da resistência à tração do material base, enquanto

que a soldadura produzida a 2000 rpm apresentou apenas 55% da resistência à tração do material base. Além disso, observou-se que a morfologia do cordão de soldadura era semelhante à do material base, resultado da taxa de arrefecimento lento da soldadura (Z. Kiss & Czigány, 2012).

Kiss e Czigány conseguiram soldar com sucesso placas de PP e polietileno (PETG) usando a ferramenta *Hot Shoe*. Foram obtidas soldaduras de elevada resistência à tração em ambos os materiais, chegando a 90% da resistência à tração do material base. Neste estudo foi desenvolvido e estudado o fator K, que depende da velocidade de rotação do pino, da velocidade de avanço da ferramenta e do diâmetro da ferramenta, conforme a equação abaixo, com o fundamento de obter uma boa qualidade na soldadura.

$$K = \frac{\text{velocidade de rotação [rpm]}}{\text{velocidade de avanço [mm/min]}} \cdot \text{diâmetro da ferramenta [mm]}$$

O fator K deve variar entre 150 e 400, com cada parâmetro a variar dentro dos limites operacionais máximos e mínimos, consoante o material a soldar. No entanto, o fator K não abrange o efeito do aquecimento externo ou a força axial, parâmetros que influenciam fortemente a formação de defeitos na soldadura (Z. Kiss & Czigány, 2012)

Bozkurt estudou a influência dos parâmetros, velocidade de rotação, velocidade de avanço e ângulo de inclinação em SFL de chapas de polietileno de alta densidade (PEAD). Concluiu que a velocidade de rotação é o parâmetro mais influente na qualidade da soldadura, enquanto, que o ângulo de inclinação é o parâmetro menos influente (Bozkurt, 2012).

Arici e Selale estudaram a SFL em PE utilizando a ferramenta convencional de SFL com uma base grande para estudar o efeito do ângulo de inclinação da ferramenta no desempenho da soldadura, concluíram que a resistência à tração diminui com o aumento do ângulo de inclinação da ferramenta, devido à diminuição da espessura da soldadura (Arici & Sinmaz, 2005).

Squeo et al. utilizaram uma ferramenta convencional de SFL com uma base grande para estudar o pré-aquecimento da ferramenta, bem como o pré-aquecimento da junta de soldadura em PE. Várias combinações de parâmetros de soldadura foram estudadas

(velocidade de rotação, velocidade de avanço, pino da ferramenta), conclui-se que o pré-aquecimento melhora a qualidade da soldadura (Squeo, 2009).

Um estudo realizado por Bagheri et al. em acrilonitrilo-butadieno-estireno (ABS) mostra a influência do pré-aquecimento do pino da ferramenta *Hot Shoe*, a velocidade de rotação e velocidade de avanço sobre a qualidade da soldadura. Foram considerados três níveis de parâmetros de pré-aquecimento, 50°C, 80°C e 100°C, de velocidade de rotação, 800 rpm, 1250 rpm e 1600 rpm e velocidade de avanço, 20 mm/min, 40mm/min e 80 mm/min. Concluíram que com o aumento da velocidade de rotação, a temperatura do material soldado vai aumentar, resultando numa melhor qualidade da soldadura. No entanto, quando o aquecimento da junta de soldadura (pelo aquecimento externo da base da ferramenta) é demasiado elevado, irá queimar a superfície de soldadura. Os mesmo autores também concluíram que quanto menor for a velocidade de avanço, maior é a resistência à tração da soldadura, porque a zona de soldadura é aquecida por mais tempo. O aspeto negativo deste estudo foi a conclusão que com a menor velocidade de avanço, 20 mm/min, obteve-se uma melhoria significativa na resistência à tração da soldadura em relação à velocidade de avanço de 40mm/min e 80 mm/min, que, do ponto de vista industrial é pouco atraente. (Bagheri, 2013).

N. Mendes et al. estudou a SFL em placas de ABS utilizando uma ferramenta com uma base longa estacionária, realizada por um robô com um sistema híbrido de controlo força/precisão, concluindo que é possível produzir soldaduras com boa qualidade sem aquecimento externo da ferramenta. Para produzir soldaduras sem defeitos, a velocidade de rotação deve ser superior a 1250 rpm e a força axial deve ser superior a 1,5 KN. A principal influência da velocidade de avanço, quando o aquecimento externo não é utilizado, é na aparência do cordão de soldadura (Mendes, 2014a).

### **2.2.3. Ferramentas de SFL em polímeros**

#### **2.2.3.1. Ferramenta *Hot shoe***

De entre todas as ferramentas de SFL em polímeros exploradas a que apresenta os melhores resultados é a “*Hot Shoe*” (Nelson et al., 2004), representada na figura 2.4. Esta ferramenta consiste na utilização de um pino giratório envolvido por uma base que tem um movimento independente da rotação do pino. Esta base funciona como uma superfície limitadora e vai impedir a ejeção de material no estado viscoso da região de soldadura,

assistindo assim à reconsolidação do material devido à força de pressão que esta exerce sobre o material soldado.

Outra função benéfica da base estática é a possibilidade de controlar o arrefecimento com a utilização de uma resistência elétrica. O arrefecimento uniforme e controlado do cordão da soldadura reduz a formação de defeitos, sendo muito importante promover uma velocidade de arrefecimento e de solidificação uniforme em toda a soldadura, pois irá reduzir as tensões internas na soldadura.

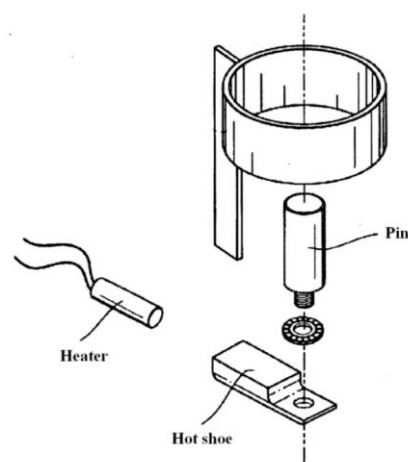


Figura 2.4 – Ferramenta Hot Shoe (Nelson et al., 2004).

Rezgui et al. avaliou a viabilidade de uma ferramenta do tipo *Hot Shoe* em SFL de HDPE. A ferramenta é caracterizada pela base em madeira, que impede que o calor gerado pelo pino se dissipe para a base e conseqüentemente se liberte para o ar através da parte superior da base, devido ao facto da madeira apresentar uma condutividade térmica baixa. Concluíram que com esta ferramenta o calor gerado pelo atrito de rotação do pino concentra-se na junta de soldadura, sobreaquecendo o HDPE, resultando na formação de defeitos na soldadura (Rezgui et al., 2010).

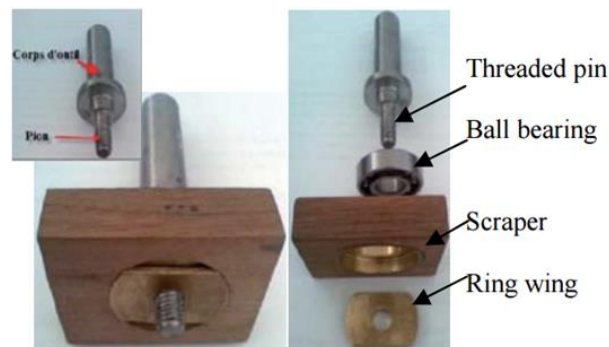


Figura 2.5 – Ferramenta com base estacionária em madeira (Rezgui et al., 2010).

Kiss e Czigány projetaram uma ferramenta com uma base estacionária não aquecida feita em politetrafluoretileno conectada por uma ferramenta de fresar (pino), resultando numa ferramenta semelhante a “*Hot Shoe*”, representada na figura 2.6. Esta nova ferramenta apresentou resultados interessantes, apesar de não ter sido devidamente explorada (Z. Kiss & Czigány, 2012)

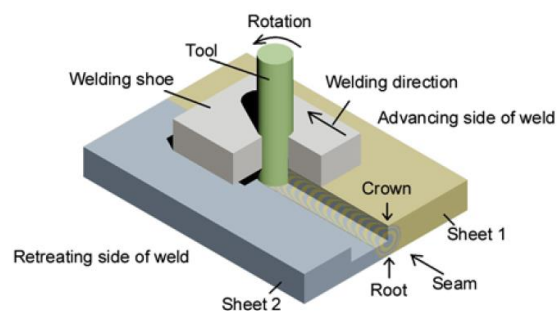


Figura 2.6 – Esquema do funcionamento do processo de SFL para polímeros (Z. Kiss & Czigány, 2012).

Mostafapour e Azarsa desenvolveram uma ferramenta baseada na *Hot Shoe* com a base estacionária em alumínio, com um pino rotativo e com uma resistência elétrica introduzida na base da ferramenta responsável pelo aquecimento externo, conforme está representado na figura 2.7 (Azarsa & Mostafapour, 2013).

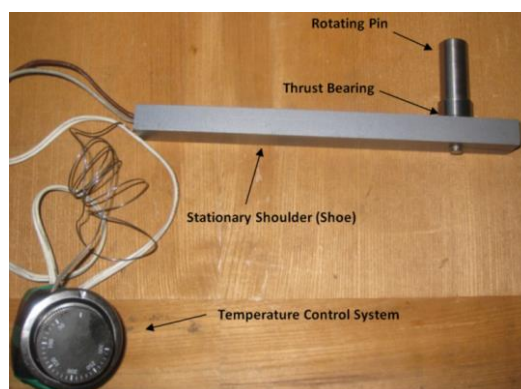


Figura 2.7 – Fotografia e esquema da ferramenta de SFL do tipo *Hot Shoe* (Azarsa & Mostafapour, 2013).

Bagheri et al. utilizou uma ferramenta do tipo *Hot Shoe* para minimizar os defeitos na soldadura e os problemas na mistura do material. O pino é montado sobre um rolamento de esferas radiais de modo a separar o seu movimento de rotação da base da ferramenta equipada com aquecimento externo. Introduziram um termopar perto do pino da ferramenta para controlar a temperatura aproximada da zona do pino e com um potenciómetro permitindo o ajustamento da potência da resistência elétrica. Na figura 2.8 pode-se ver o esquema dos componentes da ferramenta *Hot Shoe* (Bagheri et al., 2013).

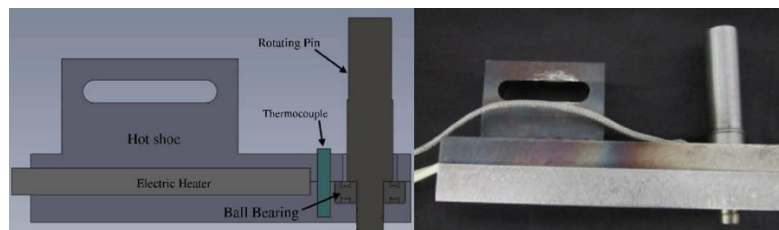


Figura 2.8 – Esquema e fotografia da ferramenta de SFL do tipo *Hot Shoe* (Bagheri et al., 2013).

Mendes et al. desenvolveu a ferramenta de SFL baseada na *Hot Shoe* representada na figura 2.9 caracterizada por uma base estacionária longa de modo a permitir o aquecimento na parte dianteira e traseira do pino da ferramenta (Mendes, 2014b)

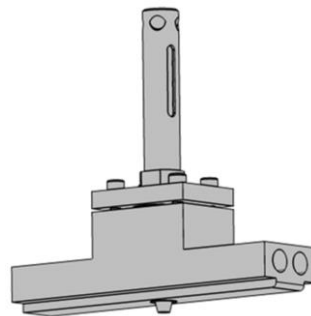


Figura 2.9 – Ferramenta de FSW com uma base longa e pino cónico (Mendes, 2014b).

### 2.2.3.2. Ferramenta convencional com base larga

Aydin desenvolveu uma ferramenta convencional de SFL com uma base maior, em comparação à ferramenta utilizada neste processo na soldadura de materiais metálicos. Tem um sistema de aquecimento colocado junto à junta de soldadura o que permite a produção de soldaduras sem defeitos. No entanto, o acabamento superficial da soldadura será defeituoso, sendo esta a principal desvantagem das soldaduras produzidas com esta ferramenta (Aydin, 2010).



Figura 2.10 – Ferramenta convencional com uma base larga (Aydin, 2010).

### 2.2.3.3. Fresas Convencionais

Kiss e Czigány utilizaram fresas convencionais que trabalham na direção oposta à direção de fresagem, evitando assim a moagem do material e promovendo a sua mistura em placas de polipropileno (PP). As soldaduras produzidas por estas fresas foram bem conseguidas, mas as propriedades mecânicas da soldadura eram pobres. As duas ferramentas utilizadas neste estudo estão apresentadas na figura 2.11 (Zoltán Kiss & Czigány, 2007).



Figura 2.11 – Fresas Convencionais (Zoltán Kiss & Czigány, 2007).

### 2.2.3.4. Ferramenta *Self-reacting*

A ferramenta de SFL que apareceu mais recentemente na literatura de SFL de termoplásticos é a *Self-Reacting* que está representada na figura 2.12. Esta ferramenta caracteriza-se pela presença de duas bases estáticas, uma sobre a superfície superior e a outra sobre a superfície inferior das placas submetidas à soldadura, ambas ligadas pelo pino. Enquanto o pino roda para produzir calor de fricção e misturar o material, as bases evitam a ejeção do material amolecido para o exterior da junta de soldadura. Esta ferramenta apresenta boas soldaduras, mas ainda são necessárias mais pesquisas para explorar todo o seu potencial. Esta ferramenta apresenta algumas vantagens sobre as ferramentas já anteriormente mencionadas, com esta ferramenta não há necessidade de apoiar a peça sobre o postigo, além disso a máquina utilizada para operar a ferramenta não necessita de exercer

uma carga axial tão grande em relação às ferramentas mencionadas anteriormente. A desvantagem desta ferramenta é o modo como entra em contacto com as peças de trabalho, a soldadura deverá começar e terminar fora das peças de trabalho, de modo a eliminar colisões entre as peças e as bases da ferramenta (Pirizadeh, 2014).

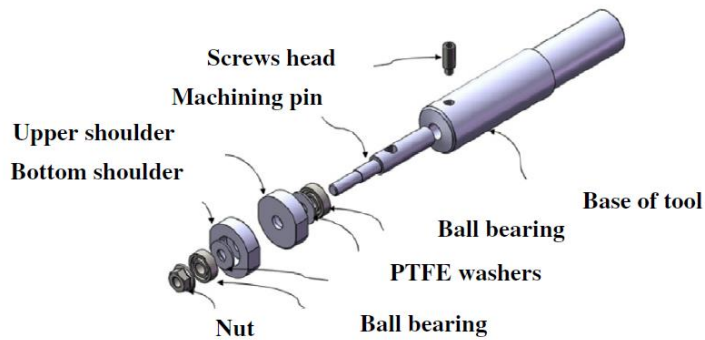


Figura 2.12 – Ferramenta *Self-reacting* (Pirizadeh et al., 2014).

#### 2.2.3.5. Ferramenta de SFL para soldar tubos de polietileno

Pinzón S. desenvolveu uma ferramenta de SFL em polímeros para soldar tubos de polietileno para gás natural. Concluiu posteriormente que as juntas de soldadura produzidas com esta ferramenta, apresenta diversos defeitos e um acabamento superficial pobre, para o fim proposto pelo autor, devido à dificuldade deste processo de soldadura em superfícies curvas.

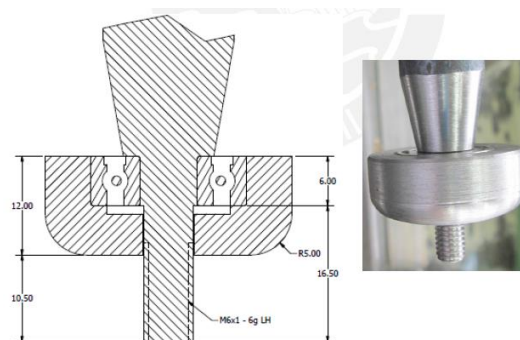


Figura 2.13 – Geometria da ferramenta (Pinzón S., 2014).

As melhores soldaduras foram alcançadas a uma velocidade de rotação do pino de 2000 rpm representada na figura 2.14.





Figura 2.14 – Processo de soldadura e aparência externa da soldadura (Pinzón S., 2014).

Pinzón S. aconselha em trabalhos futuros a concentração sobre o efeito dos ciclos térmicos nos polímeros e no melhoramento da geometria da ferramenta para alcançar uma maior uniformização nas diferentes zonas de soldadura (Pinzón S., 2014).

## 2.2.4. Patentes

Com base em ir ao encontro de algumas patentes de ferramentas

### 2.2.4.1. Ferramenta de soldadura por fricção linear com o pino ajustável

**Inventor:** Donald H. Wykes

**Data:** 16 de Dezembro de 1997

**Número da Patente:** 5697544

Ferramenta de soldadura por fricção linear com um pino de comprimento variável em relação à base da ferramenta para soldar peças de superfícies variáveis, a base adapta-se às superfícies de soldadura.

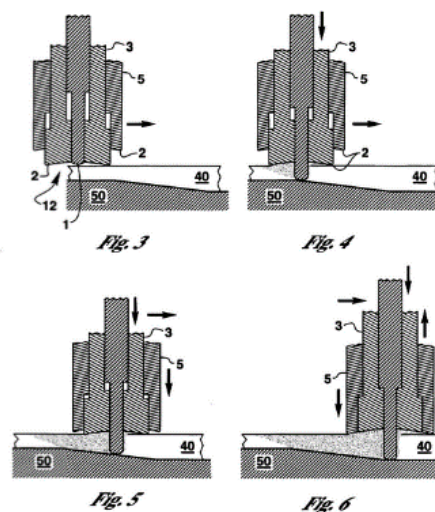


Figura 2.15 – Desenho da ferramenta de SFL com o pino ajustável.

### 2.2.4.2. Ferramenta de soldadura por fricção linear de termoplásticos

**Inventores:** Nelson et al.

**Data:** 2 de Novembro de 2004

**Número da Patente:** 6811632

Ferramenta para soldadura por fricção linear utilizando um pino, elemento rotativo, com a função de induzir a energia na forma de calor proveniente do atrito entre este e a junta de soldadura, amolecendo e misturando o material e uma base estacionária utilizada para limitar a ejeção de material da junta de soldadura. Opcionalmente, poderá ser utilizado um sistema de aquecimento utilizando resistências elétricas.

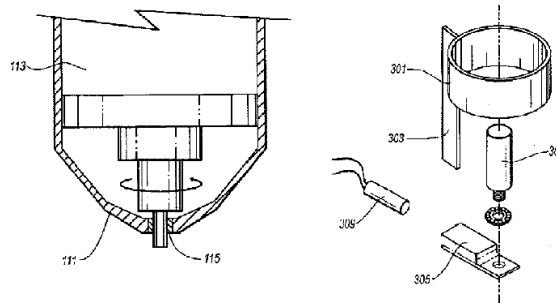


Figura 2.16 – Desenho e esquema da ferramenta *Hot Shoe*.

### 2.2.4.3. Ferramenta de soldadura por fricção linear com uma base adaptável

**Inventores:** Ulrike Henneboehle e Jürgen Silvanus

**Data:** 22 de Março de 2011

**Número da Patente:** 7909225

Ferramenta de SFL com pino rotativo envolvido por uma base que se adapta à superfície de soldadura. A base da ferramenta encontra-se estacionária em relação ao pino.

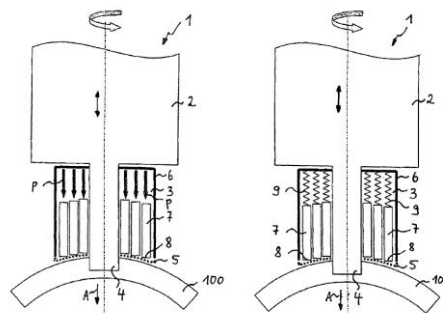


Figura 2.17 – Desenho da ferramenta com a base adaptável.

## **2.3. Base da Ferramenta**

De modo a ir ao encontro da necessidade de adaptar a base da ferramenta às geometrias curvas e angulares da superfície de soldadura vai-se modificar a base da ferramenta que atualmente apresentou os melhores resultados, a *Hot Shoe*, sendo esta caracterizada por uma base longa, o que dificulta na adaptação à geometria curva da superfície. Após alguma pesquisa e reflexão, optou-se por articular a base da ferramenta. Ao longo desta secção são apresentadas as ideias e conceitos de articulações estudadas para aplicar na base da ferramenta de modo a conseguir adaptá-la às superfícies curvas de soldadura.

### **2.3.1. Articulação da Base da Ferramenta**

Com a ideia da adição do elemento mecânico dobradiça para articular a base da ferramenta, convergiu na ideia de articular a base sem a adição de qualquer dispositivo mecânico, tornando assim a ferramenta mais compacta e mais simples. Este foi o ponto de partida para o conceito da ferramenta de SFL adaptativa apresentada nesta dissertação. Para implementar o conceito da base articulada, analisou-se algumas articulações mecânicas, como as “lagartas” das máquinas, as calhas porta-cabos utilizadas na indústria para a proteção dos cabos e algumas patentes, de modo a encontrar a melhor geometria para a articulação da base, sabendo que para uma boa qualidade de soldadura a base tem de estar em perfeito contacto com a superfície de soldadura.

#### **2.3.1.1. Lagartas**

As lagartas possuem duas funções básicas. A primeira é distribuir a força exercida pelas rodas de apoio por uma área suficientemente grande para evitar que o veículo afunde em terreno acidentado, permitindo a sua locomoção. A outra é transmitir ao solo a força de tração criada pelo sistema de propulsão (Yamashita, 1904).

Em quase todos os casos as lagartas são compostas por segmentos rígidos ligados por um pino, que permite à lagarta a flexibilidade e o nível de acoplamento desejado.

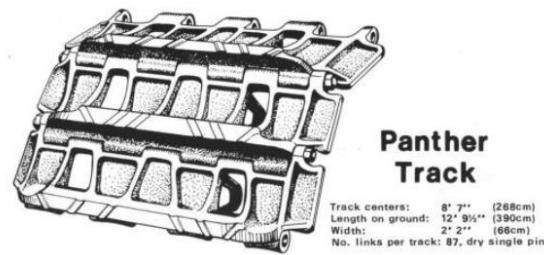


Figura 2.18 – Elos da Lagarta da Plataforma Pantera (Yamashita, 1904).

### 2.3.1.2. Calha Porta-Cabos Articulada

Os sistemas de calhas porta-cabos articuladas são como o cordão umbilical da máquina moderna. Elas fornecem energia, dados e ar, e encontram-se constantemente em movimento. Estas calhas são hoje usadas em robots, gruas, máquinas-ferramentas e em aplicações em condições extremas de trabalho (Iigus, s.d.).

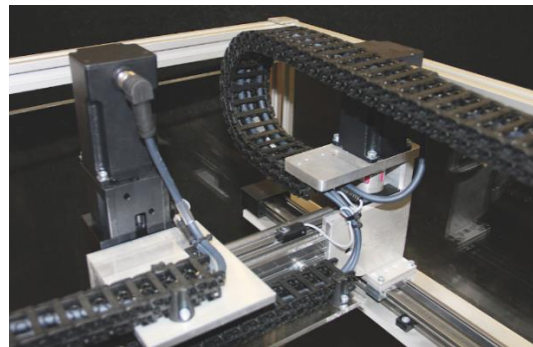


Figura 2.19 – Aplicação da Calha Porta-Cabos Articulada (Iigus, s.d.).

Esta calhas articuladas, apresentam articulações com geometrias muito apelativas que vão ao encontro do pretendido na articulação da base da ferramenta em estudo nesta dissertação. O facto de conseguirem atingir raios de curvatura pequenos e mantendo a sua geometria compacta, conforme a figura 2.20, foi a razão que me levou a transportar este tipo de articulação para a base da ferramenta em estudo.

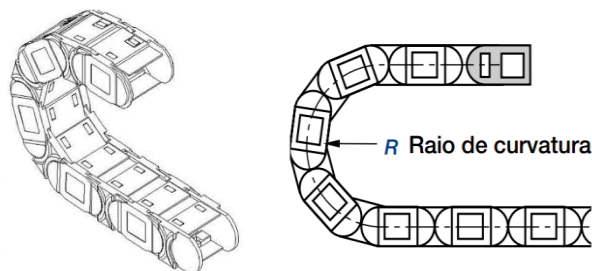


Figura 2.20 – CAD da Calha Porta-Cabos Articulada (Iigus, s.d.).

### 2.3.1.3. Patente lagartas mecânicas para veículos

**Inventor:** H. A. Knox

**Data:** 28 de Setembro de 1933

**Número da Patente:** 1970568

Esta invenção aplica-se em lagartas mecânicas para veículos terrestres. O seu objetivo é permitir uma nova montagem da combinação de encaixes do pino de união das secções. Adicionou-se um rolamento feito com um material resiliente, como borracha, entre os pinos de ligação e as secções.

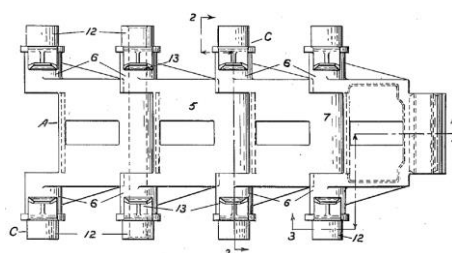


Figura 2.21 – Desenho da ligação de secções da lagarta.

### 2.3.1.4. Patente construção de lagartas

**Inventores:** C. E. Sorensen et al.

**Data:** 28 de Janeiro de 1943

**Número da Patente:** 2391524

Esta invenção introduziu melhoramentos à construção de qualquer veículo de lagartas. A especial importância desta invenção deve-se à sua adaptabilidade a veículos militares. Neste tipo de lagarta, os elos de ligação rígidos são unidos com dobradiças formando uma esteira rolante contínua. Nas dobradiças, os pinos ficam isolados por rolamentos de borracha que, com a pressão certa, fornecem o aperto assim como a flexibilidade necessários para compensar os movimentos angulares relativos gerados quando a lagarta gira à volta das rodas dentadas.

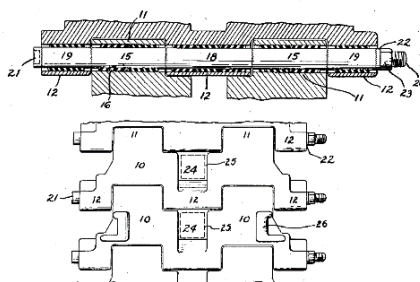


Figura 2.22 – Desenho das secções da lagarta, com o pormenor do pino de ligação.

### 2.3.1.5. Patente lagartas

**Inventor:** F. L. Haushalter

**Data:** 11 de Junho de 1946

**Número da Patente:** 2402042

Esta invenção aplica-se em lagartas mecânicas para veículos terrestres. Nestas cadeias flexíveis compostas por secções independentes interligadas achou-se desejável a utilização de elos de ligação que permitissem a substituição das secções e a utilização, em paralelo, de cabos ou outros elementos de tensão. A invenção permite maior flexibilidade às lagartas nas juntas de união, assim como a facilidade na desmontagem para substituição de elementos.

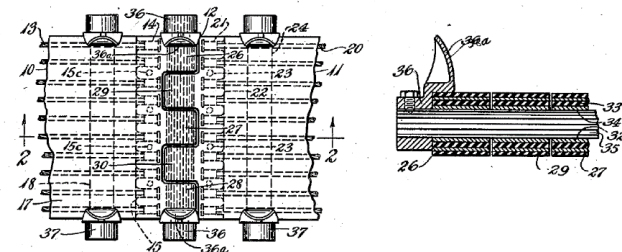


Figura 2.23 – Desenho dos elos de ligação das lagartas.

### 2.3.1.6. Patente casquilho polimérico utilizado na articulação das lagartas

**Inventor:** Adrian Ruddell

**Data:** 1 de Abril de 1980

**Número da Patente:**4195887

Esta invenção consiste num casquilho polimérico com aplicação na construção de veículos de lagartas. As uniões dos segmentos das lagartas são formadas por aberturas circulares e acopladas com pinos octogonais. O casquilho polimérico com forma elíptica é inserido numa manga metálica também elíptica e a bucha é forçada para dentro da abertura circular no elo da lagarta de modo a que o casquilho fique sob compressão. A invenção elimina em parte o desgaste por fricção e o barulho do funcionamento da lagarta.

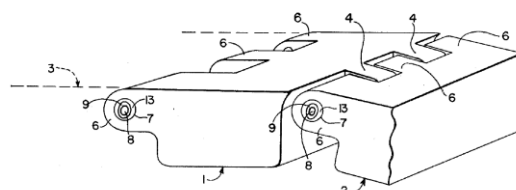


Figura 2.24 – Desenho da ligação de duas secções da lagarta.

### 3. BASE DA FERRAMENTA

Neste capítulo vai-se estudar e otimizar o conceito aplicado na base da ferramenta de modo a adaptá-la às curvas da superfície.

Como já foi referido anteriormente, a base da ferramenta terá de ter o comprimento suficiente para manter o material sob pressão e controlar o seu arrefecimento com a introdução de resistências elétricas na base da ferramenta. Como a base é articulada estas resistências terão de ser flexíveis, apresentadas em anexo (Anexo A1) de modo a minimizar possíveis defeitos da superfície soldada e a melhorar o acabamento superficial. Este comprimento da base da ferramenta terá de ser otimizado, pois quanto menor for este comprimento melhor será a sua adaptação à superfície curva de soldadura.

#### 3.1. Soldadura de Polipropileno

Como ponto de partida para a otimização da base da ferramenta escolheu-se como material para a peça submetida à soldadura, o polipropileno (PP). O Polipropileno é um termoplástico semi-cristalino, de baixo custo e fácil de processar, é um material de uso comum em muitas aplicações de engenharia. Um dos fatores que me levou a estudar a soldadura neste material é o ser muito difícil colá-lo devido à baixa energia de superfície, pelo que a soldadura é uma excelente solução na união deste material.

Com base na tecnologia de moldação por injeção e com as características deste material representado na tabela 3.1, onde  $\rho$  é a densidade,  $\alpha$  é a difusividade térmica,  $T_f$  é a temperatura de fusão,  $T_W$  é a temperatura do molde e  $T_E$  a temperatura de ejeção, vai-se calcular o tempo de arrefecimento deste material no processo de moldação por injeção, que é contabilizado desde o fim da fase de compactação até ao momento da extração da peça do interior do molde. Ajustando à tecnologia de SFL em polímeros será o tempo que a base da ferramenta terá de permanecer em contacto com o material soldado de modo a manter a pressão suficiente e a controlar o arrefecimento para garantir a estabilidade dimensional e minimização dos defeitos da soldadura.

**Tabela 3.1** – Propriedades do polipropileno (PP) na tecnologia de moldação por injeção (Basell Polyolefins, 2006).

$\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	Resistência à tração [MPa]	Deformação à rutura [%]	$\alpha$ [mm <sup>2</sup> /s]	$T_f$ [°C]	$T_W$ [°C]	$T_E$ [°C]
<b>0,905</b>	27 ± 1	20	0,067	165	30	70

Para simplificar, supõe-se que o arrefecimento só se inicia após a passagem do pino da ferramenta responsável pela mistura do material. Assume-se que o material tem a mesma temperatura na zona de soldadura em contacto com a base da ferramenta e que a temperatura da base da ferramenta permanece constante durante o tempo de arrefecimento. O processo de arrefecimento pode ser descrito pela equação de Fourier,

$$\frac{\delta T}{\delta t} = \alpha \frac{\delta^2 T}{\delta x^2} \quad (3.1)$$

Em que,  $\alpha$ , é a difusividade térmica, dado por,

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho \cdot C_p} \quad (3.2)$$

A difusividade térmica é a razão entre a condutividade térmica,  $\lambda$ , e o produto da densidade,  $\rho$ , com o calor específico,  $C_p$ . Para resolver a equação diferencial 3.1, a difusividade térmica é considerada constante.

Através da equação diferencial de Fourier é possível determinar o tempo mínimo de arrefecimento,  $t_{arref,min}$ , de acordo com a equação 3.3 (Kimerling, 2002). Deste modo verifica-se que o tempo de arrefecimento é proporcional ao quadrado da espessura da peça,  $s$ , e inversamente proporcional à difusividade térmica,  $\alpha$ . É ainda proporcional ao logaritmo da razão entre a diferença de temperaturas do fundido (temperatura do material misturado proveniente da soldadura),  $T_f$ , e da temperatura da base da ferramenta  $T_W$ , pela diferença da temperatura de ejeção (temperatura da soldadura no momento em que a base deixa de estar em contacto com esta),  $T_E$ , e da temperatura da base da ferramenta,  $T_W$ .

$$t_{arref,min} = \frac{s^2}{\pi^2 \alpha} \ln \left| \frac{4}{\pi} \cdot \left( \frac{T_f - T_W}{T_E - T_W} \right) \right| \quad (3.3)$$

A partir da equação 3.3 verifica-se que o tempo de arrefecimento é dado em função da espessura da superfície de soldadura. Este varia exponencialmente com o aumento da espessura, conforme se pode ver na figura 3.1.



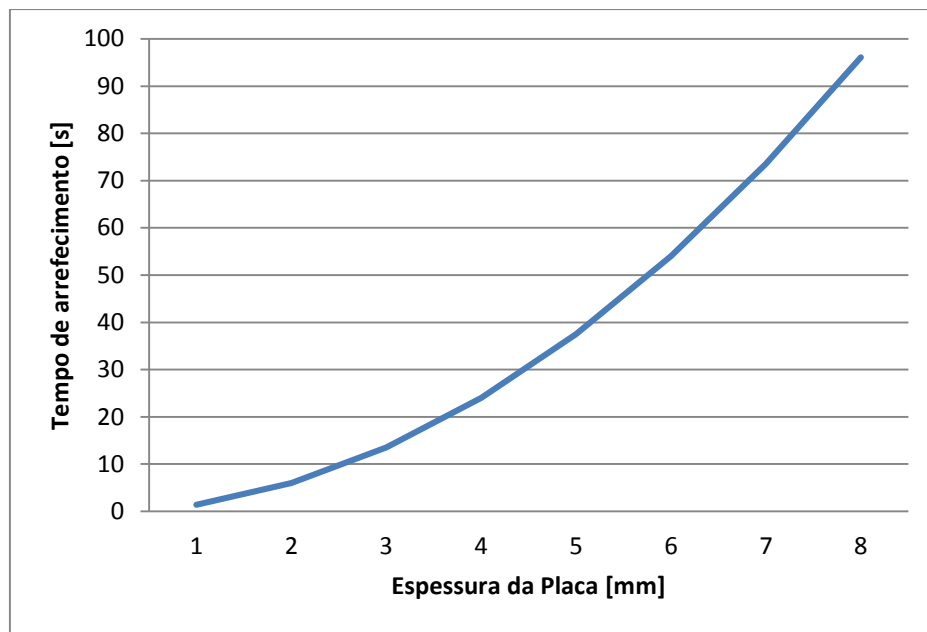


Figura 3.1 – Tempo de arrefecimento vs. Espessura da placa.

Considerando que a espessura da peça é 6mm, conforme a figura 3.1 tem-se um tempo de arrefecimento de aproximadamente 54 segundos.

Com o tempo de arrefecimento e a velocidade de avanço da ferramenta baseada nos melhores resultados obtidos com base em bibliografia anterior (Mendes, 2014a), tem-se:

$$\left\{ \begin{array}{l} v = 100 \text{ mm/min} \cong 1,67 \text{ mm/s} \\ t_{\text{arrefecimento}} \cong 54 \text{ s} \end{array} \right. \Leftrightarrow L \cong 90 \text{ mm}$$

O comprimento mínimo para a base da ferramenta responsável por manter a pressão sobre o material soldado pelo pino é 90 mm, de modo a garantir o controlo do tempo de arrefecimento necessário para a boa qualidade da soldadura.

### 3.2. Otimização da base da ferramenta articulada ao raio de curvatura mínimo

Nesta secção vai-se analisar a base da ferramenta sem articulação para os diferentes raios de curvatura, introduz-se uma articulação e executa-se a respetiva análise, por último, analisa-se a base com duas articulações, no final compara-se e discute-se os resultados obtidos.

Para a realização deste estudo começou-se por colocar a base da ferramenta sobre a superfície com um raio de curvatura,  $R_c$ , sabe-se que na zona em que o pino perfura a superfície a base tem de estar em perfeito contacto para não existir nenhum espaço entre esta e a superfície de soldadura, ou seja, no lado oposto, para que o perfeito contacto seja respeitado na zona do pino a base com comprimento,  $L$ , vai transpor a superfície de soldadura, como representado na Figura 3.2 pelo comprimento,  $b$ . O comprimento  $b$ , pode ser calculado com o recurso à equação da circunferência com centro em  $(x_0, y_0)$  e raio  $R_c$ , representado na figura 3.2.

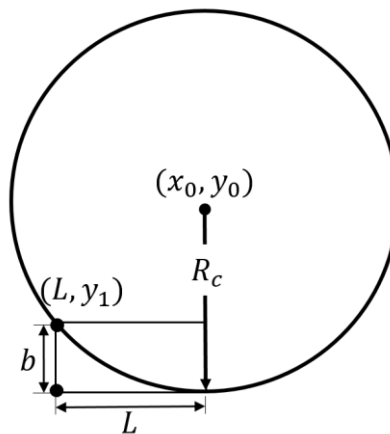


Figura 3.2 – Esquema representativo da base com comprimento  $L$ , sobre a circunferência com raio de curvatura  $R_c$ .

A equação da circunferência é, neste caso, dada pela seguinte equação,

$$R_c^2 = (L - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2 \quad (3.4)$$

Admitindo que o centro da circunferência  $(x_0, y_0) = (0,0)$ , calcula-se facilmente a coordenada  $y_1$ , através da seguinte equação,

$$R_c^2 = L^2 + y_1^2 \Leftrightarrow y_1 = \sqrt{R_c^2 - L^2} \quad (3.5)$$

Com a coordenada  $y_1$  e com o valor do raio de curvatura,  $R_c$ , o valor da dimensão de penetração da base da ferramenta na superfície de soldadura,  $b$ , será dado pela seguinte equação,

$$b = R_c - y_1 \Leftrightarrow b = R_c - \left(\sqrt{R_c^2 - L^2}\right) \quad (3.6)$$

Verifica-se que  $b$ , depende diretamente do raio de curvatura,  $R_c$  e do comprimento da base da ferramenta,  $L$ .

O principal objetivo deste estudo é minimizar o comprimento de transposição,  $b$ . Este comprimento de transposição da base sobre a superfície de soldadura tende para zero se aumentar o raio de curvatura,  $R_c$ , e se diminuir o comprimento da base,  $L$ .

Na figura 3.3 (a), está representada a base da ferramenta com um comprimento,  $L$  de 90 mm e a respetiva transposição teórica da base,  $b$  na superfície de soldadura com um raio de curvatura,  $R_c$ . Na figura 3.3 (b), está representado a base da ferramenta com uma articulação, que resulta na minimização do comprimento de transposição,  $b$ , para um novo comprimento de transposição,  $b_1$ , para o mesmo raio de curvatura,  $R_c$  da superfície. Na figura 3.3 (c), está representado a base da ferramenta com duas articulações que resulta na minimização do comprimento de transposição,  $b$ , de uma articulação para um novo comprimento,  $b_2$ , para o mesmo raio de curvatura  $R_c$ .

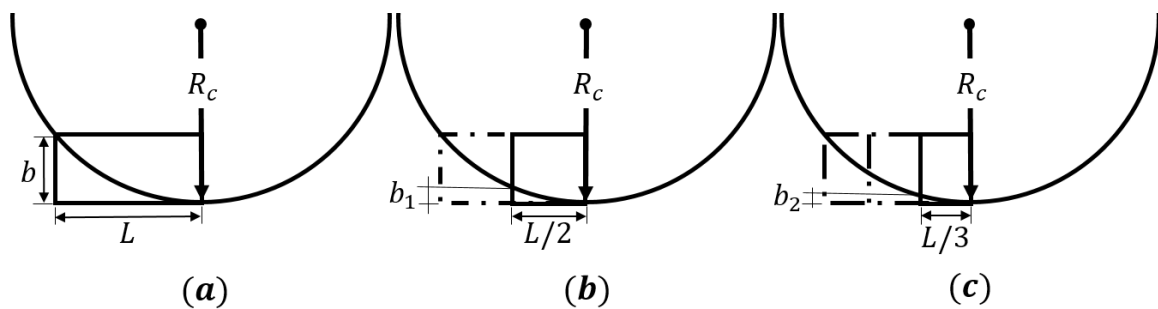


Figura 3.3 – Representação teórica da base da ferramenta sobre a superfície com um raio de curvatura,  $R_c$ : (a) sem articulação ( $L = 90\text{mm}$ ), (b) com uma articulação ( $L = 45\text{mm}$ ) e (c) com duas articulações ( $L = 30\text{mm}$ ).

Na figura 3.4 pode-se verificar a evolução das exponenciais decrescentes do comprimento de transposição da base,  $b$ , na superfície com o aumento do raio de curvatura,  $R_c$ , com a base da ferramenta sem articulação,  $L$ , com uma articulação,  $L/2$  e com duas articulações  $L/3$ .

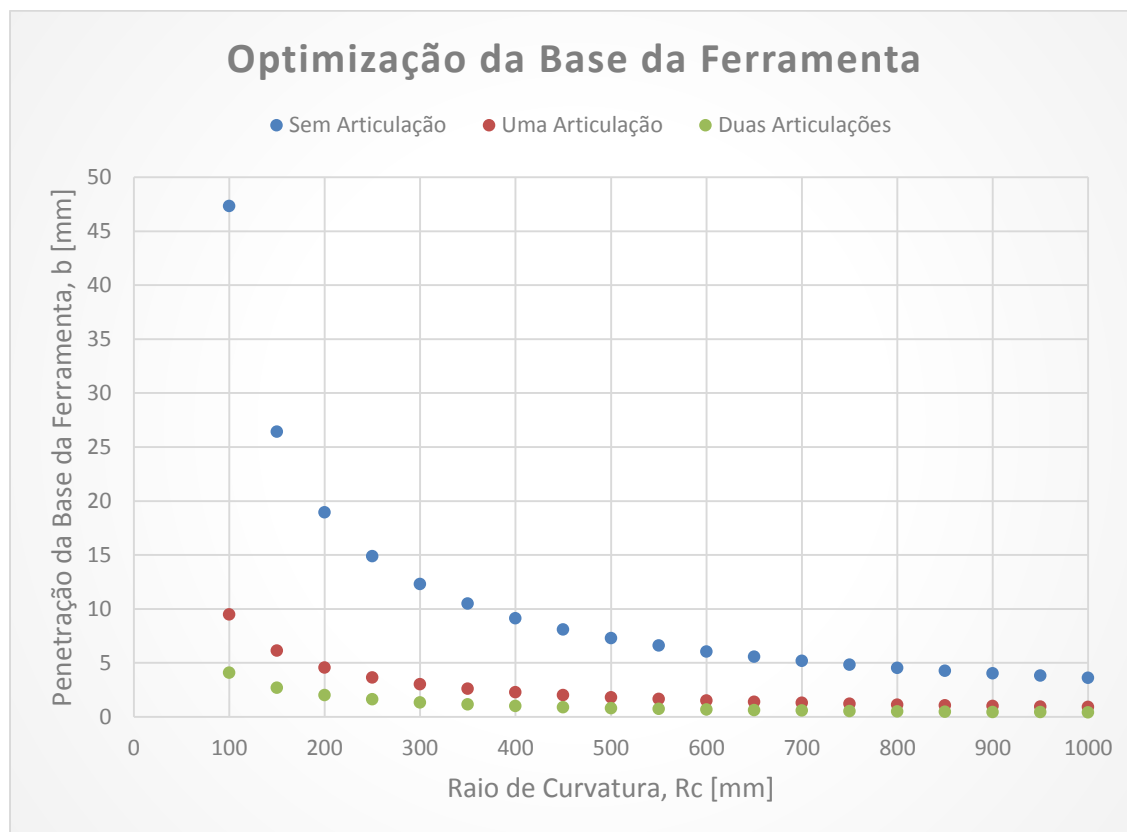


Figura 3.4 – Optimização da base da ferramenta, sem articulação ( $L = 90mm$ ), com uma articulação ( $L = 45 mm$ ) e com duas articulações ( $L = 30mm$ ) ao raio de curvatura,  $R_c$ .

Para adaptar a base da ferramenta ao raio de curvatura mínimo da superfície de soldadura, de forma a maximizar o contacto da base da ferramenta com superfície, minimizando os defeitos de soldadura, para uma e duas articulações respetivamente, na figura 3.4, verifica-se que para uma articulação o raio de curvatura mínimo para a execução da soldadura de modo a ter um comprimento de penetração da peça na superfície abaixo de 1mm é de 900 mm e para duas articulações é de 400 mm.

A solução mais versátil é a ferramenta com duas articulações, pelo facto de se conseguir adaptar a uma maior gama de raios de curvatura.

Neste trabalho foram estudados e projetados os dois casos, ferramenta com uma articulação e com duas articulações.

### 3.3. Estudo da mola da ferramenta

A mola vai ser o elemento usado na ligação da articulação da base da ferramenta, para se conseguir apresentar a flexibilidade desejada e a transmissão de força capaz de

exercer a pressão suficiente da base articulada sobre a superfície de soldadura, mantendo o material soldado pressionado de modo a minimizar os defeitos e possíveis derrames de material para o exterior da junta de soldadura.

### 3.3.1. Tipo de mola utilizada

Para seleccionar o tipo de mola é preciso ter em conta certos fatores como, o espaço ocupado, peso, durabilidade, relações entre a força aplicada e deformação.

Existem diversos tipos de molas sendo as mais comumente encontradas em aplicações mecânicas as helicoidais que apresentam secção transversal circular, estas em geral, apresentam um preço baixo, dimensionamento e montagem fácil e pode ser aplicada em forças de tração e compressão. A diversidade de molas deriva do facto de existirem aplicações com constrangimentos particulares, sendo como o espaço útil para a utilização da mola e de especificações próprias dos projetos, como por exemplo a necessidade de utilizar uma mola com constante de elasticidade variável.



Figura 3.5- Molas helicoidais de compressão (a) e de torção (b).

Na articulação da base da ferramenta aplicou-se uma mola helicoidal de compressão ao invés de uma mola helicoidal à torção que era a outra possibilidade.

A escolha da mola helicoidal à compressão deve-se ao facto de minorar a alteração da geometria da ferramenta, a aplicação de uma mola à torção iria obrigar a uma mudança da geometria da ferramenta, pois esta não podia ser aplicada diretamente na articulação, devido aos constrangimentos que criava. A solução da mola helicoidal à compressão permite a transmissão de força desejada, sem uma mudança arrojada na geometria da ferramenta e na sua manutenção, é muito mais fácil de retirar, reparar e trocar.

### 3.3.2. Material das molas

A escolha do material de fabrico das molas é muito importante nesta aplicação, porque a base da ferramenta vai estar exposta a elevadas temperaturas, provenientes da resistência elétrica e do próprio processo de soldadura.

Com base nestes fatores, escolheu-se o material de fabrico da mola que apresenta as temperaturas de serviço mais elevadas, o aço cromo silício, é um excelente material para o fabrico de molas altamente solicitadas que requerem longa duração, apresentam durezas Rockwell de C50 a C53 e são utilizadas a temperaturas de serviço de até 250°C (Branco et al., 2012)

Material	Especificações equivalentes	Custo relativo médio para $d=2\text{mm}$ [5]	gama de diâmetros (mm)	m [6]	A (MPa) [6]
Cromo-vanádio	UNS G61500; AISI 6150; ASTM 231-41; BS 735 A 50	-	0,8 - 12	0,167	2000
Cromo-silício	UNS G 92540; AISI 9254	4	1,6 - 10	0,112	2000

Figura 3.6 – Constantes m e A e custo relativo do material Cromo-silício para molas.

### 3.3.3. Aplicação da mola à ferramenta

A mola aplicada na ferramenta será uma mola helicoidal de compressão representada na figura 3.7, onde,  $D$  é o diâmetro médio de enrolamento,  $d$  é o diâmetro do arame,  $p$  é o passo da mola,  $H$  é o comprimento da mola e  $N_a$  o número de espiras ativas da mola.

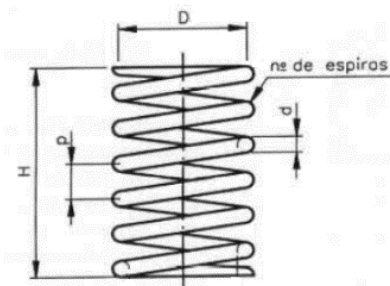


Figura 3.7 – Mola helicoidal de compressão.

A mola irá ser aplicada na ferramenta com uma articulação e duas articulações conforme o esquema apresentado figura 3.8.

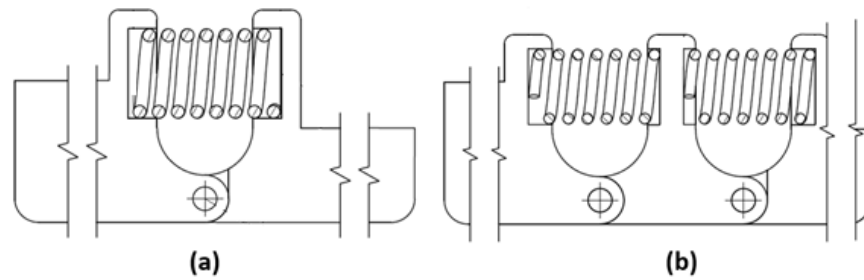


Figura 3.8 – Representação da aplicação da mola: (a) base com uma articulação (b) base com duas articulações.

### 3.3.4. Dimensões da Mola

Para calcular as dimensões da mola, o diâmetro médio de enrolamento  $D$ , e o diâmetro do arame,  $d$ , vai-se inicialmente estabelecer a força que a mola terá de exercer para se conseguir a pressão desejada da base articulada na superfície de soldadura de modo a realizar uma soldadura sem defeitos e com bom acabamento superficial. A base articulada da ferramenta apenas terá de apresentar a pressão necessária para que o material se mantenha na junta de soldadura, para isto, uma carga  $P$ , de  $20\text{ kgf}$  será o suficiente, pois a base que contém o pino incorporado já introduz uma força que garante o aplainamento, as restantes bases apenas terão a função de introduzir a pressão necessária para manter o material na junta de soldadura, garantindo a estabilidade dimensional e um bom acabamento superficial, esta carga irá exercer a reação na mola representada na figura 3.9.

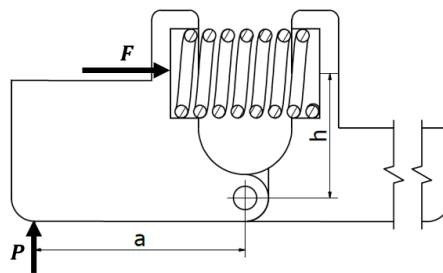


Figura 3.9 – Representação esquemática da força na mola,  $F$  proveniente da carga  $P$ .

A força na mola,  $F$ , proveniente da carga  $P$ , será dada pela seguinte relação de momentos,

$$F \cdot h = P \cdot a \Leftrightarrow F = P \cdot \left(\frac{a}{h}\right) \quad (3.7)$$

onde  $P$  é a carga necessária para manter a pressão na superfície soldada,  $a$  o comprimento da articulação,  $L/2$  para uma articulação e  $L/3$  para duas articulações, ao ponto de aplicação da força  $F$ , e  $h$  a altura da articulação ao ponto de aplicação da força.

A carga mínima será,

$$P_{min} = 20 \times 9,81 = 196,2 \text{ N} \quad (3.8)$$

Logo a força mínima aplicada na mola está representada na equação 3.9 para a ferramenta com uma articulação e representada na equação 3.10 para a ferramenta com duas articulações.

$$F_{min,1} = 196,2 \times \frac{45}{26,5} = 314,66 \text{ N} \quad (3.9)$$

$$F_{min,2} = 196,2 \times \frac{30}{26,5} = 222,11 \text{ N} \quad (3.10)$$

Através da figura 3.10 pode-se ver a relação entre a variação do comprimento da mola e a variação da força correspondente.

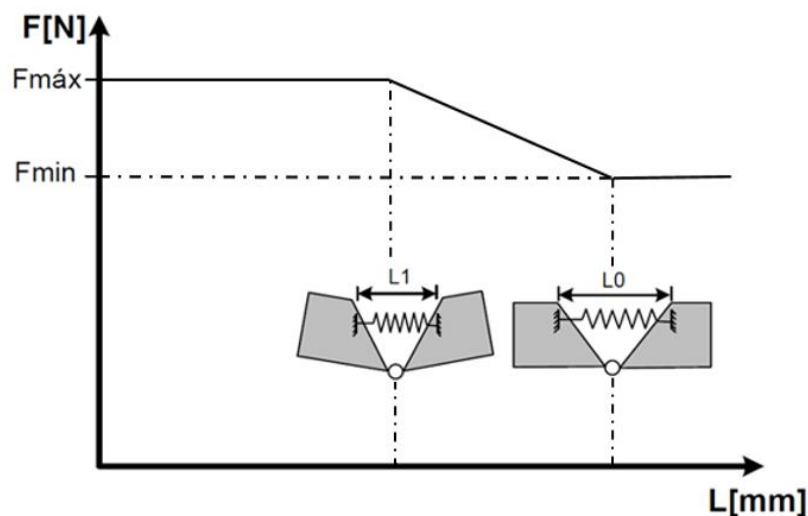


Figura 3.10 – Relação entre a variação do comprimento livre da mola  $L_0$  e o comprimento da mola comprimida  $L_1$ , com as forças correspondentes.

Inicialmente calcula-se o comprimento livre da mola,  $L_0$ , com recurso as razões trigonométricas, sabendo, o comprimento da articulação ao apoio da mola,  $L_2$  e a altura da articulação ao apoio da mola,  $h$  calcula-se o ângulo  $\alpha$ , formado pelos apoios da mola em relação a articulação na posição inicial, como está esquematizado na figura 3.11.



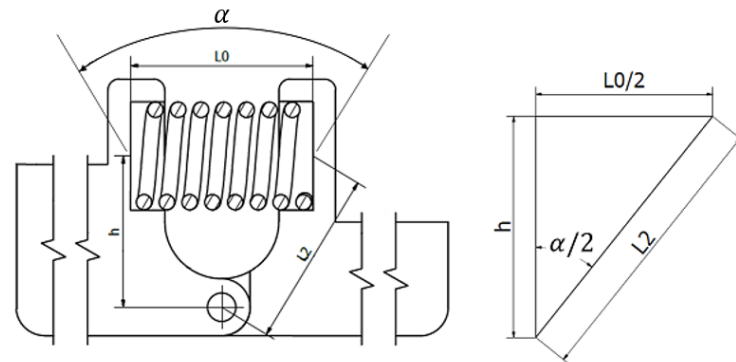


Figura 3.11 – Representação esquemática do ângulo  $\alpha$  e do triângulo retângulo formado pela articulação ao apoio da mola, utilizado para calcular o ângulo  $\alpha$  pelas razões trigonométricas.

A partir do esboço da ferramenta, sabe-se a dimensão de  $L_2$  e de  $h$ , portanto,

$$\cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) = \frac{h}{L_2} \Leftrightarrow \frac{\alpha}{2} = \cos^{-1}\left(\frac{h}{L_2}\right) \Leftrightarrow \alpha = 2 \times \cos^{-1}\left(\frac{h}{L_2}\right) \quad (3.11)$$

Então o comprimento livre da mola será dado pela equação 3.12,

$$\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) = \frac{L_0/2}{L_2} \Leftrightarrow L_0 = 2 \times \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \times L_2 \quad (3.12)$$

Existe igualmente informação para calcular o comprimento da mola comprimida,  $L_1$ . Este comprimento irá depender do raio de curvatura mínimo admissível para a execução da soldadura, de modo a que a mola responda à situação limite, conforme a secção anterior, os raio de curvatura mínimo admissível para a execução de soldadura para a ferramenta com uma articulação é  $900 \text{ mm}$  e para a ferramenta com duas articulações é  $400 \text{ mm}$ .

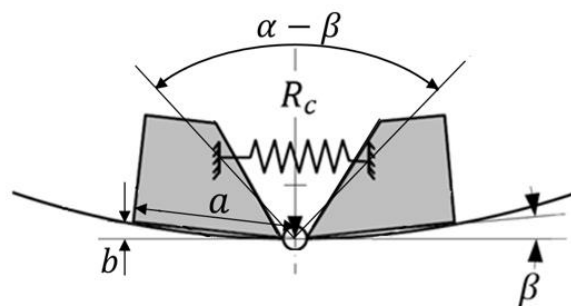


Figura 3.12 – Representação esquemática do ângulo  $\alpha - \beta$ , formado quando a mola está comprimida, para o cálculo do comprimento da mola comprimida.

Através da figura 3.12, onde está representado o esquema da base da ferramenta sobre a superfície com o raio de curvatura mínimo,  $R_c$ , com recurso às razões

trigonométricas e com as dimensões conhecidas, do comprimento da base articulada,  $a$ , para uma articulação  $45\text{ mm}$  e para duas articulações  $30\text{ mm}$  e o comprimento teórico de penetração da base da ferramenta,  $b$  de  $1\text{ mm}$  para o raio de curvatura mínimo,  $R_c$ , calcula-se o ângulo  $\beta$ , proveniente do comprimento base articulada da ferramenta no raio de curvatura mínimo e o comprimento teórico de penetração da base na superfície,  $b$ , segundo a equação 3.13.

$$\sin \beta = \left(\frac{b}{a}\right) \Leftrightarrow \beta = \sin^{-1} \left(\frac{b}{a}\right) \quad (3.13)$$

Para calcular o comprimento da mola comprimida,  $L_1$ , subtrai-se o ângulo  $\beta$  ao ângulo  $\alpha$ , calculado na equação 3.11, formando um novo ângulo  $\varphi$ , entre a articulação e os dois apoios da mola, conforme a equação 3.14.

$$\varphi = \alpha - \beta \quad (3.14)$$

Com o novo angulo  $\varphi$ , usa-se mais uma vez as razões trigonométricas para calcular o comprimento da mola comprimida,  $L_1$ , conforme a equação 3.15.

$$\sin \left(\frac{\varphi}{2}\right) = \frac{L_1/2}{L_2} \Leftrightarrow L_1 = 2L_2 \cdot \sin \left(\frac{\varphi}{2}\right) \quad (3.15)$$

A deformação axial da mola é definida pela seguinte equação,

$$\Delta L = L_0 - L_1 \quad (3.16)$$

Com isto está-se em condições de calcular as dimensões da mola.

Inicialmente, atribui-se um valor para o índice da mola  $C$ , este é definido pela relação entre o diâmetro médio de enrolamento  $D$  e o diâmetro da secção transversal do fio de arame  $d$ , cujo valores para a maioria das aplicações variam entre 6 e 12.

$$C = \frac{D}{d} \quad (3.17)$$

O critério de dimensionamento será  $\tau_{max} \leq \tau_{adm}$ , em que  $\tau_{max}$  é a tensão de corte no arame devida ao esforço transversal,

$$\tau_{max} = K_s \cdot \frac{8F_{max}D}{\pi d^3} \quad (3.18)$$

onde  $K_s$  é o factor de correção da tensão de corte, que tem apenas em conta o efeito do esforço cortante definido pela expressão,

$$K_s = 1 + \frac{0,5}{C} \quad (3.19)$$

A tensão de corte admissível,  $\tau_{adm}$ , depende da resistência mecânica dos arames da mola. Começa-se por calcular a resistência à tração dos arames da mola,  $\sigma_R$ , este varia com o diâmetro do arame,

$$\sigma_R = \frac{A}{d^m} \quad (3.20)$$

onde A e m são constantes do material do arame, que neste caso é o aço cromo silício, apresentado na figura 3.6. As molas devem trabalhar abaixo da tensão limite de elasticidade, pelo que será muito importante conhecer a tensão de cedência ao corte do arame para proceder ao correto dimensionamento da mola. Neste caso o seu valor não é conhecido, pode-se estimar o valor da tensão de cedência ao corte do arame, considerando,

$$\sigma_c \cong 0,75 \cdot \sigma_R \quad (3.21)$$

utilizando o critério de *Von Mises*,

$$\tau_c = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \sigma_c \quad (3.22)$$

logo no dimensionamento estático da mola vamos ter,

$$\tau_{max} = K_s \cdot \frac{8 \cdot F_{max} \cdot D}{\pi d^3} \leq \tau_{adm} = \frac{\tau_c}{n} \quad (3.23)$$

Admitindo que o índice da mola é 6, na tabela 3.2, estão apresentadas as equações que nos permitem calcular os diâmetros da mola, diâmetro da secção transversal do fio de arame,  $d$ , e o diâmetro médio de enrolamento,  $D$ .

**Tabela 3.2** – Equações das propriedades da mola, utilizadas para o cálculo das dimensões da mola.

Propriedades	Equação
Índice da Mola	$C = \frac{D}{d} \Leftrightarrow D = 6d$
Resistência Mecânica do Arame da Mola	$\tau_{max} = 1,08 \cdot \frac{8 \cdot F_{max} \cdot 6d}{\pi d^2} \leq \tau_{adm} = \frac{\tau_c}{n}$
Rigidez	$K = \frac{Gd^4}{8D^3N_a} \Leftrightarrow K = \frac{Gd^4}{8(6d)^3N_a}$
Força Máxima	$F_{max} = F_{min} + K \cdot \Delta L$
Comprimento Livre da mola	$L_0 = d(N_a + 2) \Leftrightarrow N_a = \frac{L_0}{d} - 2$

Tem-se 5 equações e 4 incógnitas, o diâmetro da secção transversal do fio do arame,  $d$ , a rigidez,  $K$ , a força máxima,  $F_{máx}$  e o número de espiras ativas,  $N_a$ . O número de espiras activas é calculado, através da equação retirada da tabela 3.3, para o tipo de extremidades da mola esquadriz e afagada.

**Tabela 3.3** – Valores aproximados do número de espirais inativas e comprimento das molas de compressão.

Tipo de extremidades	Nº de espiras inactivas	Nº total de espiras $N_t$	Comprimento da mola fechada $L_S$	Comprimento livre da mola, $L_f$
Em ponta	0,5	$N + 0,5$	$L_S = (N_t + 1)d = (N + 1,5)d$	$N_p + 1,5 d$
Em ponta e afagada	1	$N + 1$	$L_S = N_t d = (N + 1)d$	$N_p + d$
Em esquadriz	1	$N + 1$	$L_S = (N_t + 1)d = (N + 2)d$	$N_p + 2 d$
Em esquadriz e afagada	2	$N + 2$	$L_S = N_t d = (N + 2)d$	$N_p + 2 d$

Está-se em condições de calcular as dimensões da mola para uma articulação e duas articulações da base da ferramenta. Estas dimensões e restantes propriedades estão representadas na tabela 3.4.

**Tabela 3.4** – Propriedades e dimensões das molas utilizadas na ferramenta com uma articulação na base e duas articulações na base, respectivamente.

Propriedades	Base c/ 1 articulação	Base c/ 2 articulações
$C$	6	6
$A$ [MPa]	2000	2000
$m$ [ ]	0,112	0,112
$G$ [MPa]	77200	77200
$L_0$ [mm]	31	29
$L_1$ [mm]	30	27
$N_i$	2	2
$N_a$	8	9
$F_{min}$ [N]	314,66	222,11
$F_{máx}$ [N]	338	270
$\tau_{adm}$ [MPa]	774,9	785
$\tau_{máx}$ [MPa]	767,5	774,2
$\tau_{máx} \leq \tau_{adm}$	Verifica	Verifica
$K$ [N/m]	14	12
$D$ [mm]	16,2	14,4
$d$ [mm]	2,7	2,4

Com base na tabela 3.4, pode-se verificar que para a ferramenta com uma articulação, a mola vai ter um diâmetro médio de enrolamento,  $D$ , de  $16,2\text{ mm}$  e um diâmetro da secção transversal do fio de arame,  $d$ , de  $2,7\text{ mm}$ . Para a base com duas articulações o diâmetro médio de enrolamento,  $D$ , é  $14,4\text{ mm}$  e o diâmetro da secção transversal do fio de arame,  $d$  é  $2,4\text{ mm}$ .

Na figura 3.13, está representado o desenho 2D da mola em CAD para a ferramenta com uma articulação e duas articulações, respetivamente.

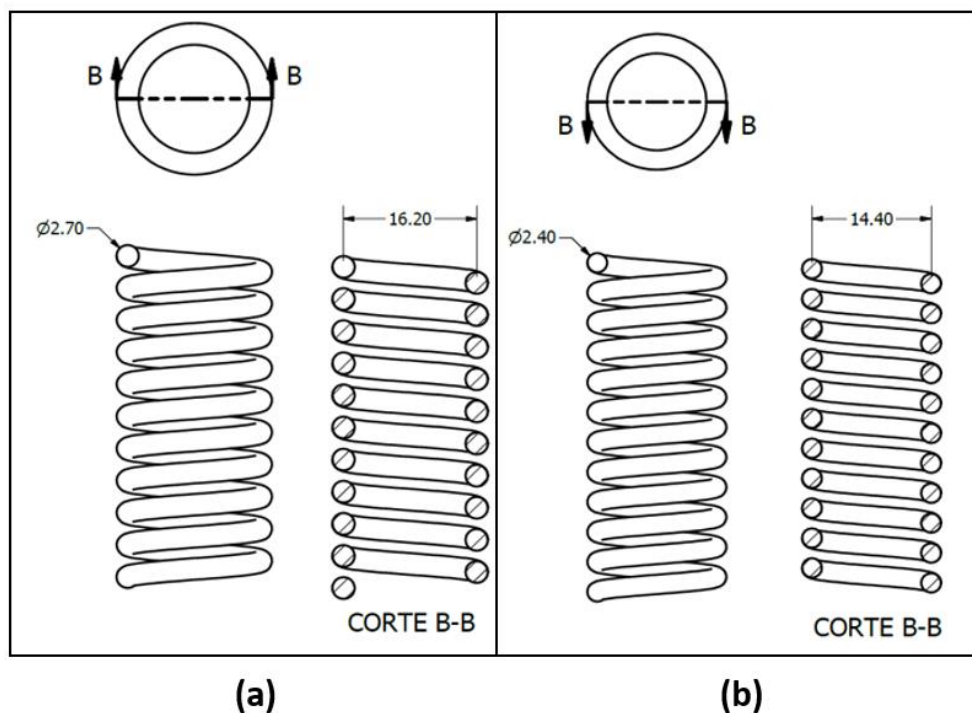


Figura 3.13 – Desenho técnico da mola da ferramenta com uma articulação (a) e da ferramenta com duas articulações (b).



## 4. CONCEITO E PROJETO DA FERRAMENTA

O projeto detalhado da nova ferramenta adaptativa de SFL com uma e duas articulações respetivamente é descrito e aprofundando, neste capítulo.

Ao longo do capítulo, vai-se apresentar o conceito/projeto da ferramenta de SFL polímeros adaptável, de uma e duas articulações, respetivamente, estudada e desenvolvida ao longo da dissertação e vão ser analisadas e comparadas quanto ao seu desempenho em superfícies curvas.

Nesta ferramenta foi estudado a utilização de uma articulação e duas articulações na base e a respetiva adaptabilidade ao raio de curvatura mínimo possível de soldar sem defeitos e sem a ejeção de material do cordão de soldadura. O outro foco do estudo deste trabalho foi desenvolver um conceito para ajustar o pino a diferentes espessuras de superfícies a soldar, outra grande limitação deste processo nos polímeros.

Na conceção do projeto da ferramenta utilizou-se um *software* de CAD, indispensável na exploração e visualização das ideias dos conceitos abordados ao longo do trabalho e no seu design. O uso do *software* CAD permitiu a criação, modificação, análise e otimização de cada componente individual antes da produção dos protótipos. Mesmo toda a montagem dos componentes foi estudada e analisada através deste *software*. Esta foi uma ferramenta muito importante no processo de desenvolvimento desta ferramenta de soldadura.

Na última fase deste trabalho utilizou-se a prototipagem rápida (PR), que abarca um conjunto de tecnologias de modelação física para produzir rapidamente modelos e protótipos a partir da informação dos desenhos gerados em CAD 3D. Numa fase de pré-processamento, o modelo sólido em CAD é convertido em representação STL, isto é numa malha triangular superficial. Em seguida, através do *software* do equipamento de PR, este modelo é cortado em planos paralelos (“*slicing*”) cuja distância corresponde à espessura de camada a ser depositada pela tecnologia aditiva. A popularidade da PR relativamente aos métodos tradicionais de fabricação manual de modelos baseia-se na capacidade de produzir acuradamente peças complexas rapidamente. Os tradicionais longos períodos de vários meses gastos na conceção e desenvolvimento de um novo produto anteriores à decisão da sua aceitação pela empresa podem agora ser substituídos por semanas, por vezes, mesmo

dias, poupando muito tempo e dinheiro. Infelizmente, só uma gama relativamente estreita de matérias podem ser usados para produzir protótipos com as técnicas de PR. Consequentemente, embora a visualização e a verificação geométrica/dimensional seja possível, os testes funcionais de protótipos frequentemente não são possíveis devidos às diferentes propriedades físicas (mecânicas e térmicas) exigidas pelo protótipo e o produto manufacturado (Groover, 2010)

As tecnologias de PR permitem a obtenção de protótipos e ferramentas numa fase precoce do desenvolvimento do produto. É assim possível testar novas ideias com mais rigor antes da sua concretização, evitando-se interpretações defeituosas, incentivando-se a crítica construtiva, envolvendo-se os técnicos de todos os sectores relacionados com o ciclo do produto, prestando-se antecipadamente informações aos fornecedores e fabricantes de ferramentas e até reduzindo-se a necessidade de informação na forma de desenho 2D. Todos estes benefícios previnem erros e custos, diminuem tempo de produção e aumentam as possibilidades de melhoria e sucesso do *design*, o que permite afirmar que as tecnologias de fabrico rápido de ferramentas surgem como ótimas ferramentas ao serviço da engenharia concorrente.

#### **4.1. Pino da Ferramenta**

Uma grande limitação da ferramenta atual de soldadura por fricção linear em polímeros é o facto de o pino da ferramenta estar limitado a soldar superfícies com uma espessura homogénea. O estudo feito nesta secção vai ao encontro disso, vai-se conceber um novo sistema estrutural do pino da ferramenta ajustável a diferentes espessuras, com base no sistema Modular Dual da Ferramenta utilizada na soldadura de alumínio (Vilaça, 2009) e (Vidal, 2013).

Esta nova conceção visa facilitar e tornar menos dispendioso este processo tecnológico quando existe a necessidade de usar diferentes dimensões do pino da ferramenta, permitindo a sua flexibilidade e a versatilidade numa vasta gama de espessuras de superfícies a soldar. Necessidades desta ordem são diagnosticadas na indústria, sendo esta uma das razões pelo qual a utilização deste processo de soldadura em polímeros não tenha aprovação industrial.



A ideia base consiste na possibilidade de afinação vertical do comprimento do pino, representada na figura 4.1.

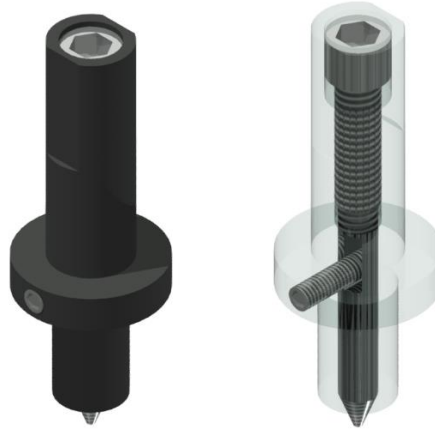


Figura 4.1 - Vista tridimensional do desenho 3D CAD do Pino da Ferramenta.

#### 4.1.1. Componentes do Pino

O módulo do pino é constituído por 4 componentes, conforme se pode ver na figura 4.2, para os quais se adotou a seguinte nomenclatura: 1) Chassi; 2) Parafuso de Afinação Vertical do Pino; 3) Parafuso de Fixação do Pino; 4) Pino.

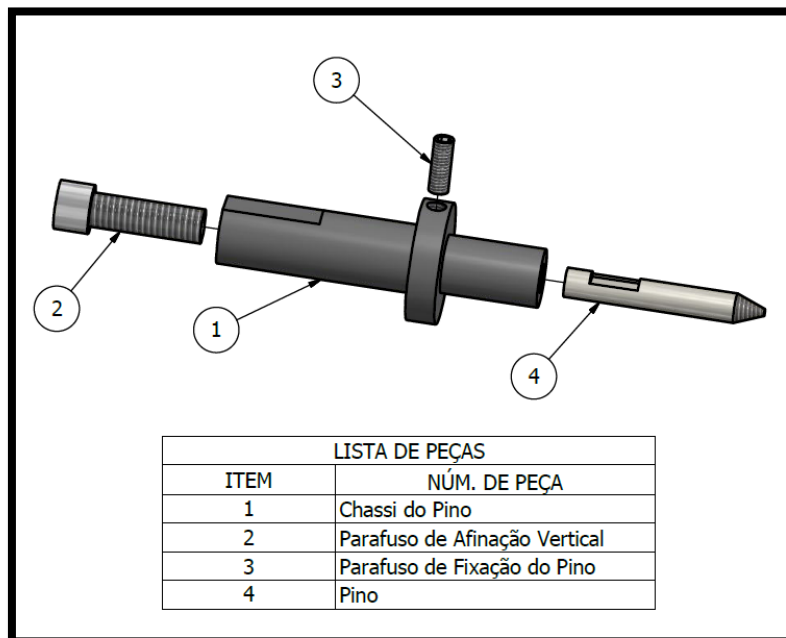


Figura 4.2 – Vista explodida do Pino da Ferramenta com a nomenclatura dos vários componentes constituintes.

O *Chassi do Pino (1)*, é o componente estrutural que serve de suporte aos restantes componentes responsáveis pela afinação do Pino e do próprio *Pino (4)*, e que permite a adaptação à pinça do robot na realização do processo de SFL.

O *Parafuso de afinação Vertical (2)*, introduzido e alinhado com o eixo de concentricidade do *Chassi do Pino (1)*, suporta a carga vertical aplicada sobre o *Pino (4)* e permite regular a sua posição vertical.

O *Pino (4)* apresenta na sua geometria uma face plana central que em conjunto com o *Parafuso de Fixação do Pino (3)* impede o movimento de rotação relativamente ao *Chassi do Pino (1)*.

O deslocamento permitido para o Parafuso de Afinação Vertical (2) garante um comprimento saliente do Pino (4) relativamente ao Chassi do Pino (1) compreendido no intervalo [6,10] mm, conforme a Figura 4.3.

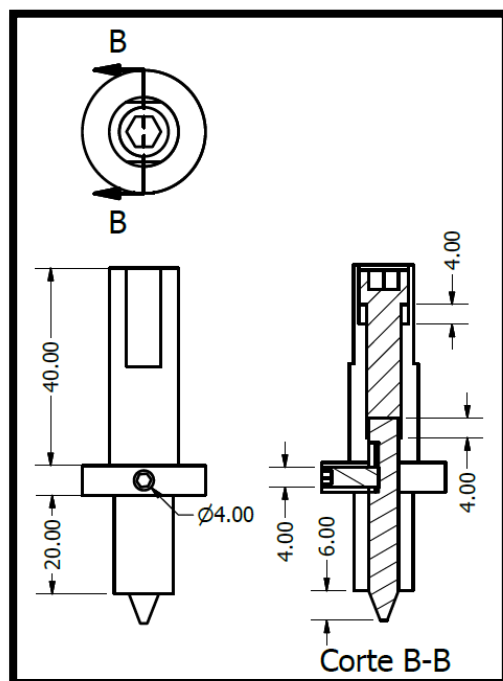


Figura 4.3 – Desenho técnico do Pino com as cotas de atravacamento e indicação das posições extremas do Pino ajustável e respetivo Parafuso de Afinação Vertical.

## 4.2. Ferramenta com uma articulação

Inicialmente, desenvolveu-se o conceito da base da ferramenta com uma articulação representada na figura 4.4.

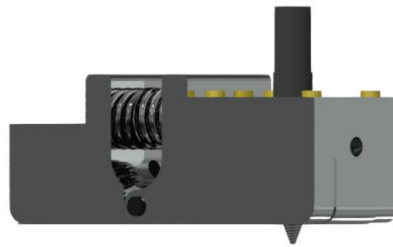


Figura 4.4 – Vista tridimensional do desenho 3D CAD da ferramenta com uma articulação na base.

As principais características desta ferramenta em relação à ferramenta com a base com duas articulações é uma maior rigidez, simplicidade e a maior capacidade de carga, mas com o inconveniente de apresentar uma menor gama de adaptabilidade a superfícies curvas quando comparada com a ferramenta de duas articulações.

#### 4.2.1. Componentes da Ferramenta com uma articulação

O módulo da ferramenta com uma articulação é constituído por 10 componentes, conforme se pode ver na figura 4.5, para os quais se adotou a seguinte nomenclatura: 1) Pino Ajustável de Soldadura; 2) Tampa; 3) Base que alberga o pino de soldadura; 4) Rolamento QJ 307 MA\*; 5) Anilha; 6) Base Articulada; 7) Parafusos de Fixação da Tampa; 8) Mola Helicoidal de Compressão; 9) Pino da Articulação e 10) Fita de Aço

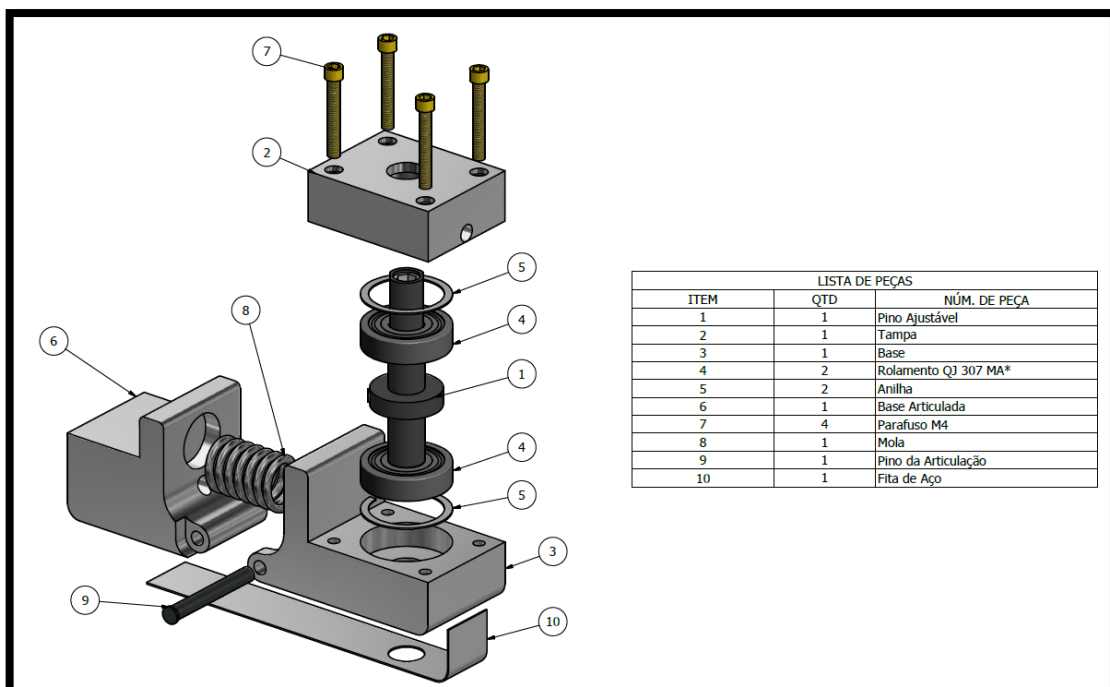


Figura 4.5 – Vista explodida da Ferramenta com uma articulação com a nomenclatura dos vários constituintes.

Os principais componentes da ferramenta com uma articulação são a *Base (3)* que alberga o *Módulo do Pino Ajustável (1)*, a *Base Articulada (6)* responsável por manter a pressão necessária sobre o material soldado e controlar o tempo de arrefecimento, pois permite a introdução de resistências elétricas flexíveis, apresentadas em anexo (Anexo A1), para o aquecimento externo da mesma de modo a minimizar o gradiente de temperatura entre o material soldado e a base articulada da ferramenta controlando assim o tempo de arrefecimento do material, minimizando os defeitos da soldadura.

A *Mola (8)* é o elemento usado na ligação da articulação da base da ferramenta, para se conseguir apresentar a flexibilidade desejada e a transmissão de força capaz de exercer a pressão suficiente da *Base Articulada (6)* sobre a superfície a soldar.

São utilizados dois *Rolamentos (4)* de esferas com quatro pontos de contactos, estes são projetados para suportar elevadas cargas axiais em ambos os sentidos que é a principal carga aplicada no Pino da ferramenta. Para a seleção dos *Rolamentos (4)*, teve-se em conta, as cargas axiais e radiais utilizadas em bibliografia anterior, na área da SFL em polímeros realizada por um robô com um sistema híbrido de controlo força/posição, cujos parâmetros estão apresentados na figura 4.6, onde se observa uma força axial de 4000 N e uma força radial de 2000 N (Mendes et al., 2014).

Parameter	Threshold value
Axial force ( $F_z$ )	4,000 N
ABS plates thickness	6 mm
Tool rotational speed	1,500 rpm
Traverse and side force ( $\sqrt{F_x^2 + F_y^2}$ )	2,000 N
Torque ( $M$ )	4 Nm

Figura 4.6 – Parâmetros utilizados na soldadura (Mendes, 2014).

Deste modo, com auxílio do site da SKF ([www.skf.com](http://www.skf.com)), escolheu-se o rolamento designado de QJ 307 MA\*, com todas as especificações em anexo (Anexo A2), que suporta as cargas desejadas, apresenta o mínimo espaço de ocupação radial e axial e tem uma fiabilidade elevada. Através da calculadora de rolamentos da SKF, este rolamento apresenta uma fiabilidade de aproximadamente 95%, conforme o anexo (Anexo A2).

Na base da ferramenta em contacto com a superfície a soldar, vai ser aplicada uma *Fita de Aço (10)*, soldada na *Base (3)*, que alberga o *Pino (1)*, e solta nas restantes articulações, de modo a adaptar-se com a *Base Articulada (6)* à curvatura das superfícies

submetidas à soldadura. A *Fita de Aço (10)* é caracterizada pelo alto teor de carbono temperado, é obtida através do processo de laminação a frio e tratamento térmico. Após têmpera, que garante a homogeneidade em todo o produto, realiza-se um processo de acabamento superficial que garante ao material tolerâncias restritas e propriedades mecânicas especiais. São aplicadas em molas, facas, lâminas de serras, espátulas, etc.



Figura 4.7 – Fita de Aço.

A utilização deste componente na base da ferramenta vai melhorar a adaptabilidade da ferramenta às superfícies curvas, diminuir significativamente o atrito entre a base e a superfície de soldadura e resolve os problemas de infiltração de material nas juntas das articulações da base da ferramenta. Com o auxílio do catálogo da *Sandvik*, escolheu-se o material que melhor se adapta às condições exigidas na soldadura, este vai estar em contacto com temperaturas elevadas, provenientes de todo o processo de soldadura, com isto, selecionou-se o material que apresenta as maiores temperaturas de serviço, o material escolhido para a fita de aço foi o *Nickel-base alloy*, apresentado no anexo (Anexo A3). Conforme, a figura 4.8, a fita de aço terá uma largura de 20 mm e uma espessura de 0,25 mm.

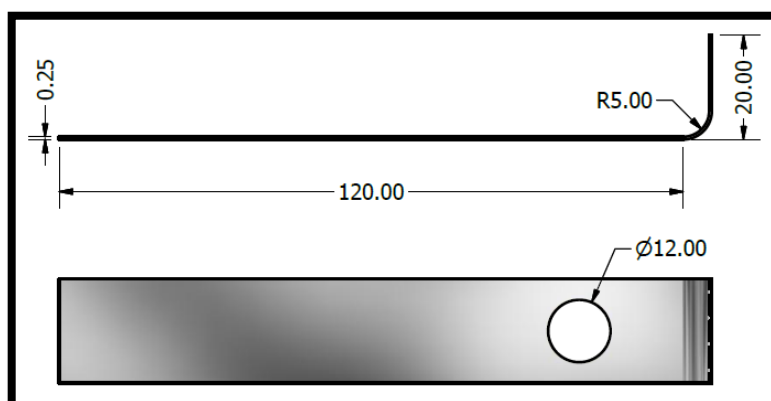


Figura 4.8 – Desenho técnico da Fita de aço aplicada nas ferramentas.

Para finalizar o projeto da ferramenta com uma articulação, foi feita uma análise estática apresentada em anexo (Anexo A6) a cada elemento da base da ferramenta com o

auxílio do *SolidWorks*, garantindo que as peças não oferecem perigo de deformação plástica para a gama de utilização pretendida.

### 4.3. Ferramenta com duas articulações

A ferramenta caracterizada com a base com duas articulações é apresentada na figura 4.9.

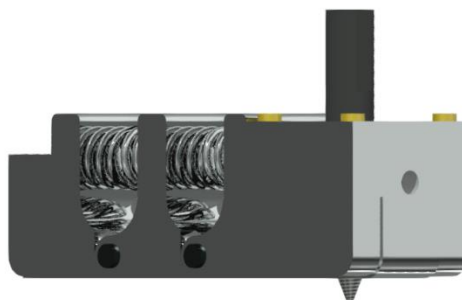


Figura 4.9 – Vista tridimensional do desenho 3D CAD da ferramenta com uma articulação na base.

Esta ferramenta em relação à ferramenta com uma articulação na base tem a vantagem de apresentar uma maior gama de adaptabilidade a geometrias curvas, objetivo primordial na realização desta dissertação.

#### 4.3.1. Componentes da ferramenta com duas articulações

O módulo da ferramenta com duas articulações é constituído por 11 componentes, conforme se pode ver na figura 4.10, para os quais se adotou a seguinte nomenclatura: 1) Pino Ajustável de Soldadura; 2) Rolamento QJ 307 MA\*; 3) Anilha; 4) Base que alberga o pino de soldadura; 5) Base Articulada 1; 6) Base Articulada 2; 7) Parafusos de Fixação da Tampa; 8) Tampa; 9) Mola Helicoidal de Compressão; 10) Pino da Articulação e 11) Fita de Aço

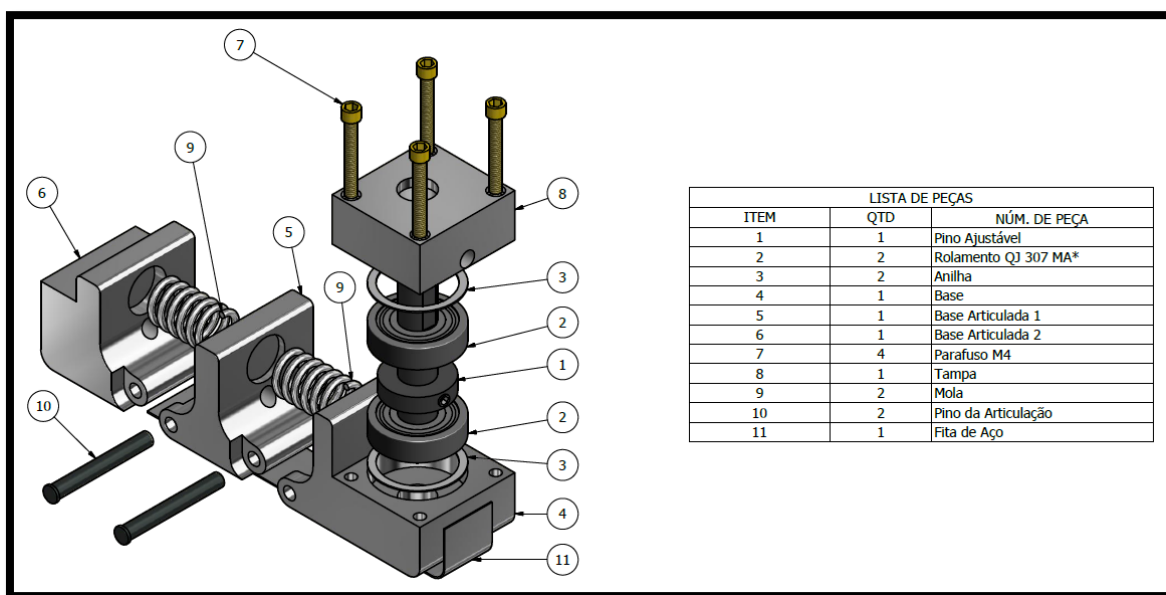


Figura 4.10 – Vista explodida da Ferramenta com Uma Articulação com a nomenclatura dos vários constituintes.

Esta ferramenta em relação à ferramenta de uma articulação apresenta duas articulações, onde integram a *Base Articulada 1* (5) e a *Base Articulada 2* (6), existindo a necessidade de adicionar também mais uma *Mola* (9) em relação à ferramenta de uma articulação, isto é, para a mesma dimensão da ferramenta com uma articulação, esta apresenta duas articulações, aumentando a gama de adaptabilidade da ferramenta às superfícies curvas. A *Base* (4) que alberga o *Pino* (1), também sofreu alteração nas dimensões, otimizada para a menor dimensão possível, de modo a permitir o acomodamento dos *Rolamentos QJ 307 MA\** (2), que são os mesmos utilizados na ferramenta com uma articulação. A *Fita de Aço* (11), também é similar à utilizada na ferramenta com uma articulação.

Para finalizar o projeto da ferramenta com duas articulações na base, foi feita uma análise estática apresentada em anexo (Anexo A7) a cada elemento da base da ferramenta com o auxílio do *SolidWorks*, garantindo que as peças não oferecem perigo de deformação plástica para a gama de utilização pretendida.

#### 4.4. Desenvolvimento e Teste dos Protótipos

Nesta secção, são apresentados os protótipos das duas ferramentas, apresentando todos os componentes utilizados no projeto e na sua conceção, os mesmos vão ser analisados e comparados em superfícies curvas.

#### 4.4.1. Montagem dos Protótipos

Nesta secção, estão representados os componentes utilizados na montagem dos protótipos das ferramentas, com uma articulação e duas articulações, respetivamente.

##### 4.4.1.1. Protótipo da Ferramenta com uma articulação

A figura 4.11 mostra os componentes utilizados na construção do protótipo da ferramenta com uma articulação. A base, a base articulada, o chassi do pino, a tampa e os rolamentos foram obtidos pela tecnologia de prototipagem rápida.

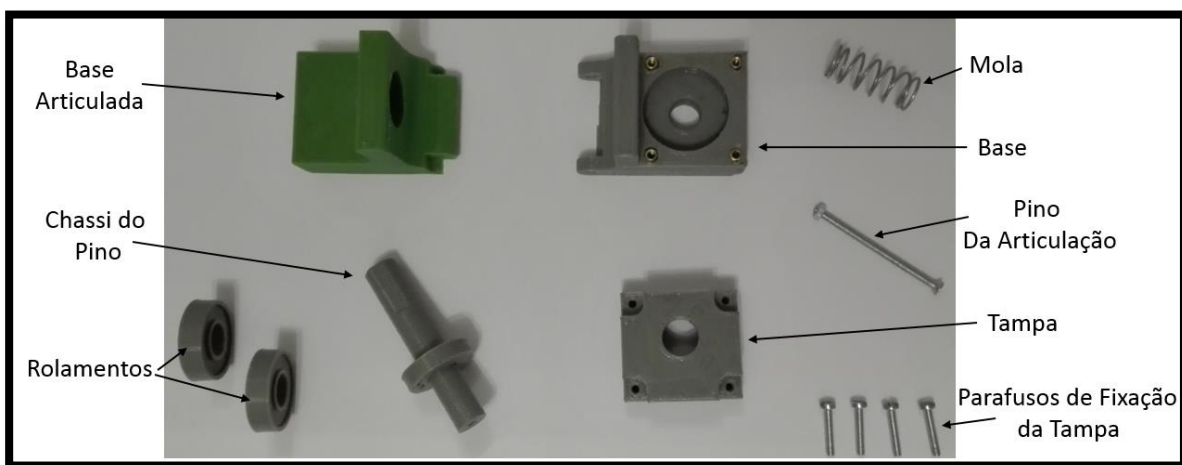


Figura 4.11 – Componentes utilizados na construção do protótipo da ferramenta com uma articulação.

Na figura 4.12 está apresentado o protótipo da ferramenta com uma articulação, este apresenta uma base com comprimento de  $120\text{mm}$ , e o comprimento das bases responsáveis pela pressão do material soldado (comprimento compreendido entre o pino da ferramenta até ao final da base articulada) de  $90\text{mm}$ , com base no estudo realizado no Capítulo 3.



Figura 4.12 – Protótipo da ferramenta com uma articulação na base.



#### 4.4.1.2. Protótipo da Ferramenta com duas articulações

A figura 4.13 apresenta os componentes utilizados na construção do protótipo da ferramenta com duas articulações.

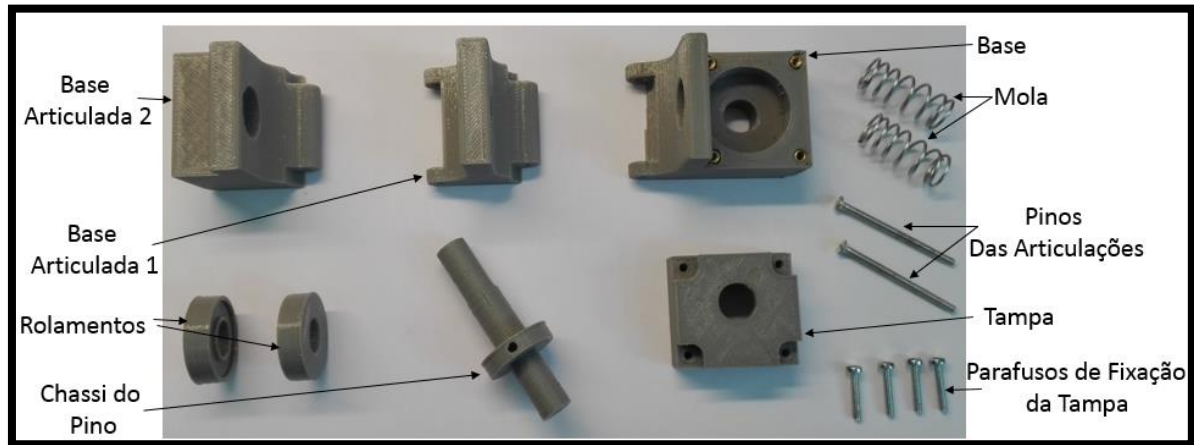


Figura 4.13 – Componentes utilizados na construção do protótipo com duas articulações.

Na figura 4.14 está apresentado o protótipo da ferramenta com duas articulações, este apresenta as mesmas dimensões que o protótipo da ferramenta com uma articulação com a particularidade de apresentar mais uma articulação, resultando na melhoria da adaptabilidade às superfícies curvas quando comparado com a ferramenta com uma articulação.

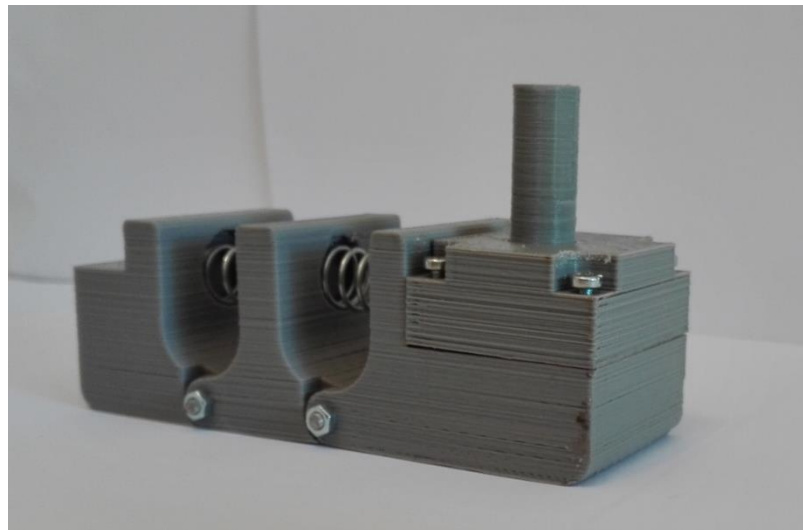


Figura 4.14 – Protótipo da ferramenta com duas articulações na base.

#### 4.4.2. Teste dos Protótipos em Superfície Curva

Nesta secção, vai-se fazer uma análise e comparação da adaptação dos protótipos da ferramenta com uma articulação e duas articulações, a diferentes raios de curvatura.

Foram realizados quatro observações dos protótipos das ferramentas em diferentes superfícies curvas. Inicialmente analisou-se as duas ferramentas numa superfície côncava, com aproximadamente  $400\text{ mm}$  de raio de curvatura, ilustrado na figura 4.15.

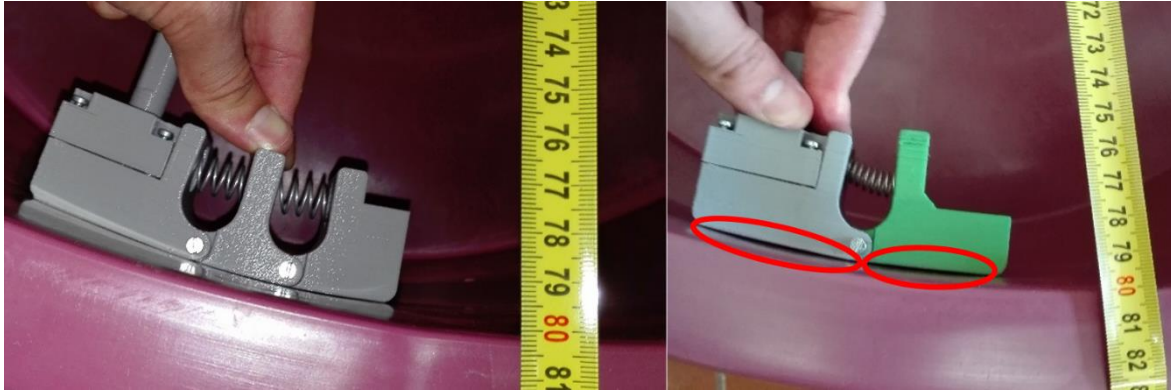


Figura 4.15 – Teste dos protótipos numa superfície côncava com um raio de curvatura de aproximadamente  $400\text{ mm}$ .

Da análise da figura 4.15, conclui-se que o protótipo com duas articulações na base, otimizada para um raio de curvatura mínimo de  $400\text{ mm}$ , apresenta uma adaptação à curvatura da superfície côncava quase perfeita em relação ao protótipo com uma articulação na base, que apresenta duas lacunas bem visíveis entre cada base e a superfície curva, assinalado na figura 4.15.

Na figura 4.16, está ilustrado a adaptação dos protótipos à superfície convexa com aproximadamente  $415\text{ mm}$  de raio de curvatura, semelhante ao que aconteceu na superfície côncava a ferramenta com duas articulações apresenta uma melhor adaptação à superfície em relação a ferramenta com uma articulação.

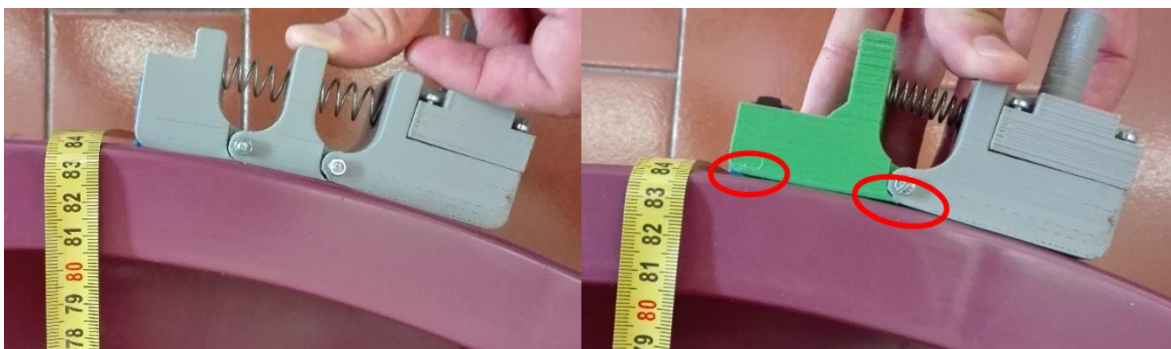


Figura 4.16 – Teste dos protótipos numa superfície convexa com um raio de curvatura de aproximadamente  $415\text{ mm}$ .

Na próxima análise, ilustrada na figura 4.17, os protótipos apresentam-se sobre uma superfície convexa, com  $600\text{ mm}$  de raio de curvatura. É observada uma melhoria na adaptação da ferramenta com uma articulação

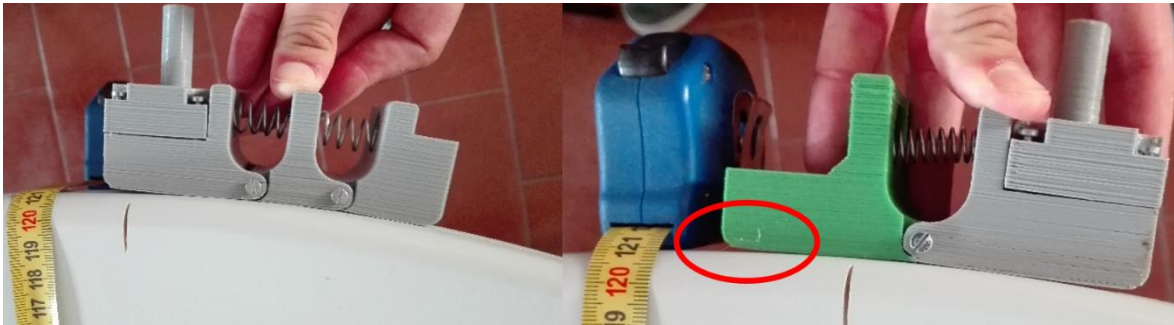


Figura 4.17 – Teste dos protótipos numa superfície convexa com um raio de curvatura de aproximadamente  $600\text{ mm}$ .

Esta última análise, ilustrada na figura 4.18, consistiu em apresentar os protótipos numa superfície convexa com um raio de curvatura de aproximadamente  $175\text{ mm}$ , muito abaixo do raio de curvatura que foi otimizado para ambas as ferramentas e verificou-se que o protótipo com duas articulações, na zona das bases responsáveis pela pressão e controlo do tempo de arrefecimento do material soldado, apresenta uma adaptação razoável à superfície. O protótipo com uma articulação apresenta um *gap* na zona da articulação assinalado na figura 4.18.

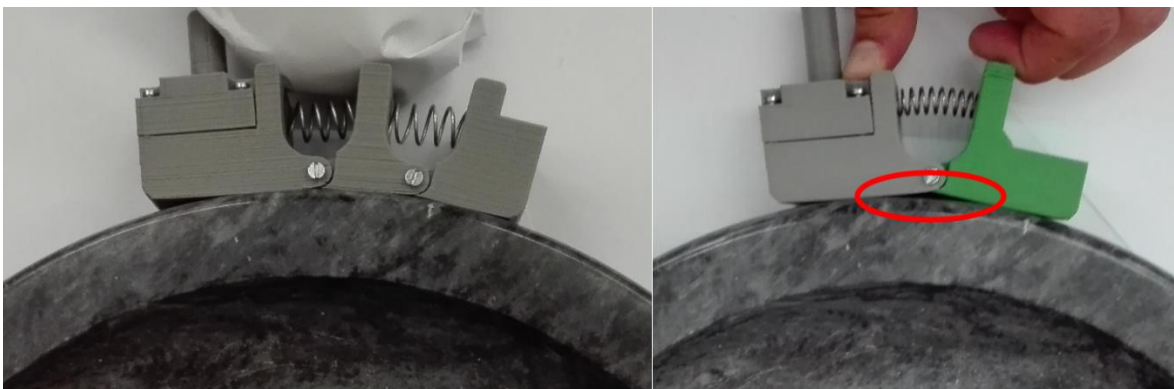


Figura 4.18 – Teste dos protótipos numa superfície convexa com um raio de curvatura de aproximadamente  $175\text{ mm}$ .

Após a análise dos protótipos sobre as superfícies curvas, conclui-se que a ferramenta com duas articulações é a melhor solução, pois apresenta uma adaptabilidade a uma maior gama de raios de curvatura, como já tinha sido referido no capítulo 3, após a otimização das duas ferramentas ao raio de curvatura mínimo.



## 5. CONCLUSÃO

Após a análise das ferramentas de SFL para polímeros existentes, constatou-se que este processo de soldadura não é apelativo para o uso industrial, devido às limitações que estas ferramentas apresentam na soldadura de superfícies curvas, tornando a ferramenta pouco versátil. Na tentativa de suprimir esta limitação, foi proposto o desenvolvimento de uma nova ferramenta capaz de soldar estas superfícies. Como ponto de partida, baseou-se no conceito de uma ferramenta já existente a *Hot Shoe* desenvolvida para a soldadura de placas planas, que apresentou os melhores resultados neste processo de soldadura nos polímeros. O que impede a *Hot Shoe* de soldar superfícies curvas é a dimensão da sua base.

A primeira ideia para uma nova ferramenta surgiu desta limitação e consiste em segmentar a base da ferramenta, permitindo assim um melhor contacto entre a sua base e a superfície curva.

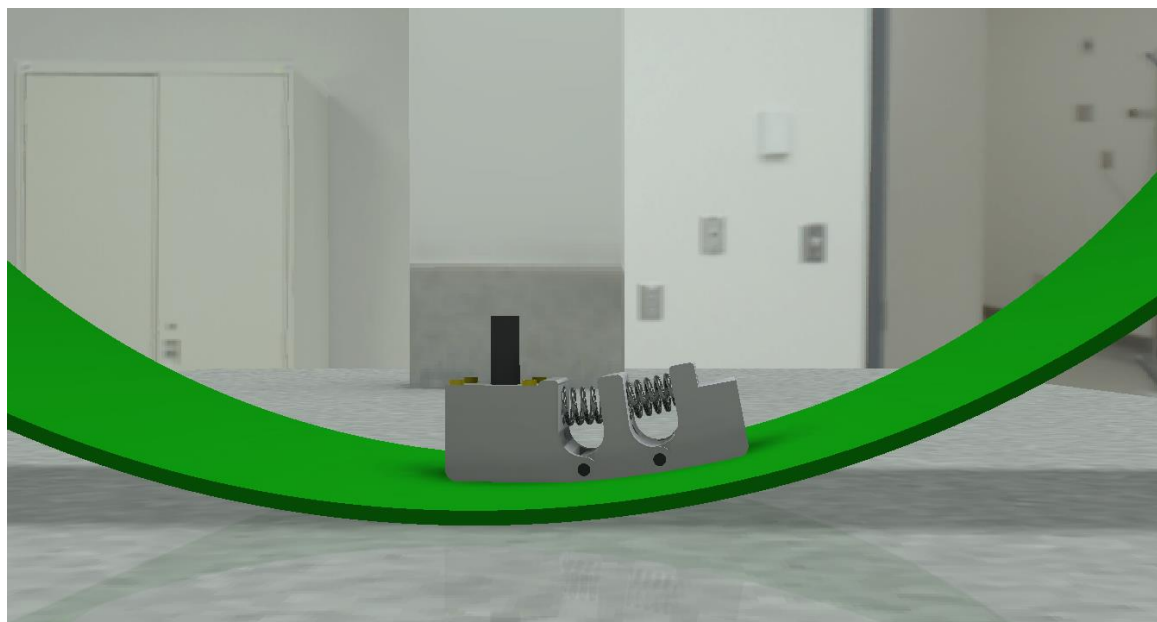
O contacto perfeito da base da ferramenta com a superfície curva é função do número de articulações, pelo que, era necessário ter um número infinito de articulações para haver a plenitude no contacto da base da ferramenta articulada com a superfície. Como o aumento infinito do número de articulações é uma solução impraticável, de modo a melhorar a adaptabilidade, surgiu a ideia de adaptar uma chapa fina de aço-mola fixa apenas na base da primeira articulação que incorpora o pino. Com isto, vai-se alcançar a adaptabilidade desejada, com a particularidade de diminuir o atrito entre a base e as superfícies e resolver os problemas de infiltração de material soldado nas juntas das articulações.

Após a idealização da nova ferramenta, seguiram-se as etapas de conceção e projeto. Na etapa de conceção foi selecionada a melhor geometria, concebendo-se duas ferramentas, uma primeira, com uma articulação na base, e a segunda com duas articulações na base. Estas duas soluções são comparadas na tabela 5.1, com a ferramenta *Hot Shoe*.

**Tabela 5.1** – Ferramenta Adaptativa com uma articulação na base e duas articulações na base vs Ferramenta “Hot Shoe” – Vantagens e Desvantagens.

	Ferramenta Adaptativa		Ferramenta “Hot Shoe”
	Base c/ Uma Articulação	Base c/ Duas Articulações	
<b>Adaptabilidade à uma gama razoável de curvatura</b>	Média	Alta	Baixa
<b>Adaptabilidade a uma gama de espessura</b>	Alta	Alta	Baixa
<b>Simplicidade</b>	Média	Média	Alta
<b>Estabilidade</b>	Média	Média	Alta
<b>Rigidez</b>	Média	Média	Alta

Com a análise da tabela 5.1, verifica-se que as duas soluções desenvolvidas nesta dissertação, a que apresenta melhores características em relação ao objetivo primordial deste trabalho é a ferramenta com duas articulações na base, pois apresenta adaptabilidade a uma maior gama de raios de curvatura da superfície de soldadura, representada na figura 5.1.



**Figura 5.1** – Representação 3D da ferramenta com duas articulações no raio de curvatura otimizado

Durante o desenvolvimento deste trabalho foram feitos vários protótipos e estudadas várias opções. Os resultados obtidos indicam que o número de articulações é determinante para um contacto perfeito, contudo este número tem um limite prático.

Os protótipos desenhados e fabricados vieram contribuir para fortalecer o estudo e foram um passo determinante para em trabalhos futuros se desenvolver uma ferramenta com as mesmas características mas que possa ser devidamente testada, de modo a otimizar e a melhorar parâmetros do processo utilizados no desenvolvimento e projeto desta ferramenta.

### **5.1. Trabalhos Futuros**

No desenvolvimento de trabalhos futuros seria importante analisar os seguintes aspetos:

- Estudar o aumento do número de articulações da base da ferramenta de modo a manter a capacidade de carga requerida para a elaboração da soldadura, sem afetar o desempenho da mesma;
- Aprofundar e estudar o conceito do pino ajustável apresentado nesta dissertação;
- Desenvolver a ligação entre a ferramenta desenvolvida e o robô, de modo a retirar o máximo proveito dos 6 graus de liberdade que este possui, na soldadura de geometrias complexas;
- Estudar parâmetros de soldadura como a velocidade de avanço da ferramenta, a velocidade de rotação e a temperatura, de modo a conseguir melhorar a adaptabilidade da base da ferramenta à superfície curva de soldadura;
- Construção do modelo e respetivos testes de modo a melhorar alguns parâmetros utilizados na conceção do conceito da ferramenta apresentada nesta dissertação.





---

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Amanat, N., James, N. L., & McKenzie, D. R. (2010). Welding methods for joining thermoplastic polymers for the hermetic enclosure of medical devices. *Medical Engineering and Physics*, 32(7), 690–699.
- Arici, A., & Sinmaz, T. (2005). Effects of double passes of the tool on friction stir welding of polyethylene. *Journal of Materials Science*, 40, 3313–3316.
- Aydin, M. (2010). Effects of Welding Parameters and Pre-Heating on the Friction Stir Welding of UHMW-Polyethylene. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 49(February 2015), 595–601.
- Azarsa, E., & Mostafapour, A. (2013). On the feasibility of producing polymer-metal composites via novel variant of friction stir processing. *Journal of Manufacturing Processes*, 15(4), 682–688.
- Bagheri, A., Azdast, T., & Doniavi, A. (2013). An experimental study on mechanical properties of friction stir welded ABS sheets. *Materials and Design*, 43(August), 402–409.
- Basell Polyolefins. (2006). Injection Molding Polypropylene, 1–20. Retrieved from [www.basell.com](http://www.basell.com)
- Bozkurt, Y. (2012). The optimization of friction stir welding process parameters to achieve maximum tensile strength in polyethylene sheets. *Materials and Design*, 35, 440–445.
- Company, G. E. (1988). Analysis of the friction ( spin ) -welding process for thermoplastics. *New York*, 23.
- Engineering, P., Technology, T., & H-, E. (2002). Polymer joints, 46(2), 117–126.
- Fleming, P. a., Hendricks, C. E., Cook, G. E., Wilkes, D. M., Strauss, A. M., & Lammlein, D. H. (2010). Seam-tracking for friction stir welded lap joints. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 19(8), 1128–1132.
- Groover, M. P. (2010). Fundamentals of Modern Manufacturing: materials, processes and systems, 1025.
- Kagan, V. a., & Pinho, G. P. (2004). Laser Transmission Welding of Semicrystalline Thermoplastics - Part II: Analysis of Mechanical Performance of Welded Nylon. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 23(1), 95–107.

- Kimerling, T. (2002). Injection Molding Cooling Time Reduction and Thermal Stress Analysis, 1–5.
- Kiss, Z., & Czigány, T. (2007). Applicability of friction stir welding in polymeric materials. *Periodica Polytechnica, Mechanical Engineering*, 51, 15–18.
- Kiss, Z., & Czigány, T. (2012). Microscopic analysis of the morphology of seams in friction stir welded polypropylene. *Express Polymer Letters*, 6(1), 54–62.
- Leal, R. M., & Loureiro, A. (2004). Defects Formation in Friction Stir Welding of Aluminium Alloys. *Materials Science Forum*, 455-456, 299–302.
- Mark, J. E. (2007). *Physical Properties of Polymers*.
- Mendes, N., Loureiro, a., Martins, C., Neto, P., & Pires, J. N. (2014a). Effect of friction stir welding parameters on morphology and strength of acrylonitrile butadiene styrene plate welds. *Materials and Design*, 58, 457–464.
- Mendes, N., Loureiro, a., Martins, C., Neto, P., & Pires, J. N. (2014b). Effect of friction stir welding parameters on morphology and strength of acrylonitrile butadiene styrene plate welds. *Materials and Design*, 58, 457–464.
- Mendes, N., Neto, P., Simão, M. a., Loureiro, a., & Pires, J. N. (2014). A novel friction stir welding robotic platform: welding polymeric materials. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*.
- Meran, C. (2006). The joint properties of brass plates by friction stir welding. *Materials and Design*, 27(9), 719–726.
- Michael, J. (2009). *Handbook of Plastics Joining. Handbook of Plastics Joining*.
- Mishra, R. S., & Ma, Z. Y. (2005). Friction stir welding and processing. *Materials Science and Engineering R: Reports*, 50(1-2), 1–78.
- Nelson, W., Sorenson, C. D., & Art, P. (2004). (12) United States Patent, 2(12).
- Pirizadeh, M., Azdast, T., Rash Ahmadi, S., Mamaghani Shishavan, S., & Bagheri, A. (2014). Friction stir welding of thermoplastics using a newly designed tool. *Materials and Design*, 54, 342–347.
- Rezgui, M. A., Ayadi, M., Cherouat, A., Hamrouni, K., Zghal, A., & Bejaoui, S. (2010). Application of Taguchi approach to optimize friction stir welding parameters of polyethylene. *EPJ Web of Conferences*.
- Squeo, E. A., Bruno, G., Guglielmotti, A., & Quadrini, F. (2009). Friction stir welding of polyethylene sheets. *The Annals of “DUNĂREA DE JOS” University of Galati Fascicle V, Technologies in Machine Building*, 241–146.

- Strand, S. (2003). Joining plastics - can friction stir welding compete? *Proceedings: Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing and Coil Winding Technology Conference (Cat. No.03CH37480)*.
- Thomas, W. M., Nicholas, E. D., Needham, J. C., Murch, M. G., Temple-Smith, P., & Dawes, C. J. (1991). Friction welding.
- Truckenmüller, R., Ahrens, R., Cheng, Y., Fischer, G., & Saile, V. (2006). An ultrasonic welding based process for building up a new class of inert fluidic microsensors and -actuators from polymers. *Sensors and Actuators, A: Physical*, 132(1 SPEC. ISS.), 385–392.
- Varga, J., Ehrenstein, G. W., & Schlarb, a. K. (2008). Vibration welding of alpha and beta isotactic polypropylenes: Mechanical properties and structure. *Express Polymer Letters*, 2(3), 148–156.
- Vidal, C., Infante, V., & Vilaça, P. (2013). Effect of microstructure on the fatigue behavior of a friction stirred channel aluminium alloy. *Procedia Engineering*, 66, 264–273.
- Vilaça, P., & Santos, T. G. (2009). Non-Destructive Testing Techniques for Detecting Imperfections in Friction Stir Welds of Aluminium Alloys.
- Yamashita, M. T. (1904). LAGARTAS, 1–10.
- Yousefpour, A., Hojjati, M., & Immarigeon, J.-P. (2004). Fusion Bonding/Welding of Thermoplastic Composites. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 17(4), 303–341.
- Zimmer, S. (2010). Contribution a l' industrialisation du soudage par friction malaxage Docteur 1 ' École Nationale Supérieure d ' Arts et Métiers par.



## ANEXOS

### A1. Resistência elétrica flexível utilizada na base da ferramenta

A resistência utilizada na base da ferramenta articulada terá de apresentar a flexibilidade necessária, para conseguir aquecer todos os módulos articulados da base da ferramenta. Com isto, utilizou-se uma resistência elétrica flexível com revestimento a silicone e proteção em fibra de vidro.



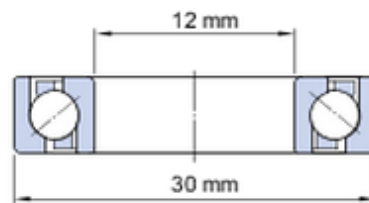
Estas resistências apresentam as seguintes características:

- Excelente resistência mecânica;
- Fabricada para trabalhar entre 60 e 200 °C;
- Potência: 50 W/m
- Secção dos condutores[mm<sup>2</sup>]: 2 × 1,50 mm
- Rigidez dielétrica: 1500 V
- Tensão de alimentação: 220 V




## A2. Rolamento utilizado nas ferramentas

Na escolha do rolamento teve-se em conta o facto, de este ter de suportar elevadas cargas axiais, portanto, foi seleccionado um rolamento de esferas com quatro pontos de apoio, pois estes são projetados para suportar elevadas cargas axiais em ambos os sentidos.



<b>Designation</b>	QJ 307 MA *
<b>d</b>	12 mm
<b>D</b>	30 mm
<b>B</b>	8 mm
<b>C</b>	64 kN
<b>C<sub>0</sub></b>	51 kN
<b>Type</b>	Angular contact ball bearing

O rolamento escolhido pela *SKF* para uma fiabilidade de aproximadamente 95%, é designado de QJ 307 MA\*. Está representado na página seguinte o cálculo da vida deste rolamento, realizado pela calculadora online da *SKF*.

Bearing life : QJ 307 MA	
Input parameters 	
<b><math>F_r</math></b> Radial load	2 kN
<b><math>F_a</math></b> Axial load	4 kN
<b><math>n_i</math></b> Rotational speed of the inner ring	1500 r/min
<b>Operating temperature</b> Bearing outer ring	120 °C
<b><math>\eta_c</math> specification method</b>	Cleanliness classification(recommended)
<b>Lubricant type and cleanliness</b>	Normal cleanliness (e.g. shielded bearing)
<b>Viscosity calculation input type</b>	Viscosity input at 40 °C (VI is 95)
<b>Viscosity at 40 °C</b>	80 mm <sup>2</sup> /s
Result	
<b><math>L_{10mh}</math></b> SKF rating life	9630 hour
<b><math>a_{SKF}</math></b> SKF life modification factor $a_{SKF}$	0.54
<b><math>\kappa</math></b> Viscosity ratio	0.49
<b>P</b> Equivalent dynamic bearing load	5.48 kN
<b><math>\eta_c</math></b> Factor for contamination level	0.17
<b><math>v_1</math></b> Required kinematic viscosity for $\kappa=1$	12.7 mm <sup>2</sup> /s
<b><math>L_{10h}</math></b> Basic rating life	17700 hour
<b>C/P</b> Load ratio	11.7

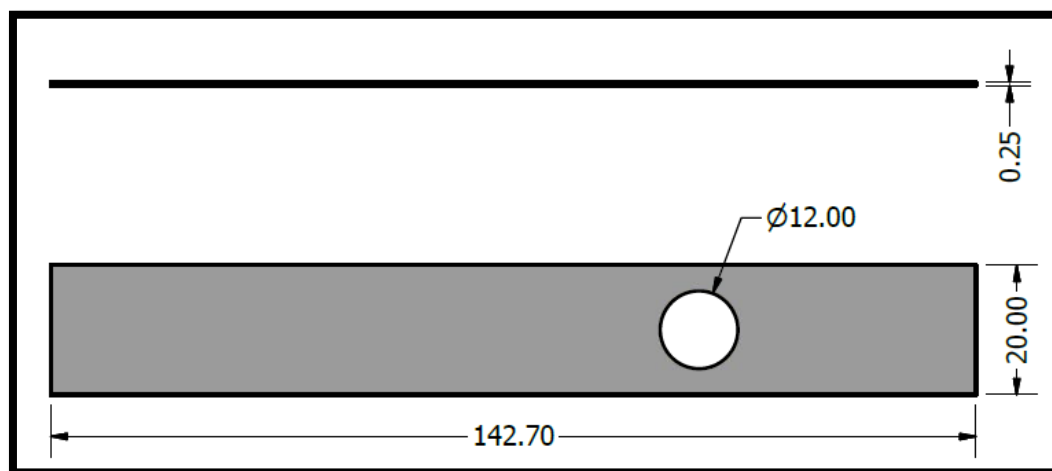
### A3. Fita de Aço utilizada na base da ferramenta

A fita de aço, aplicada na base da ferramenta, foi escolhida com o auxílio do catálogo da Sandvik, escolheu-se o material Nickel-base alloy. Este apresenta uma temperatura de serviço elevada, que irá corresponder as altas temperaturas envolvidas neste processo de soldadura.

#### Steel grades

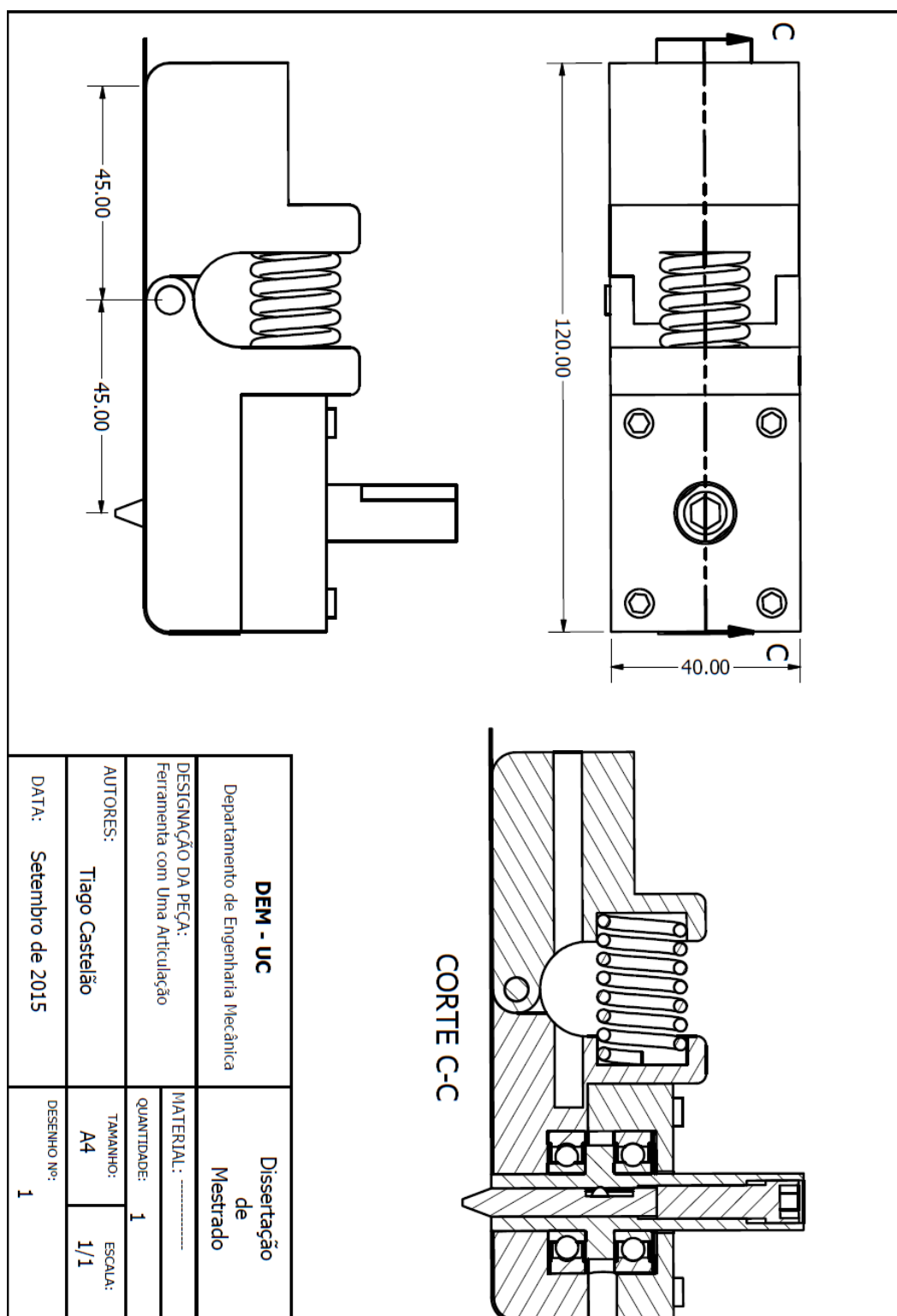
Sandvik grade	Standard	Chemical composition <sup>1)</sup> %	Tensile strength <sup>2)</sup> MPa <sup>3)</sup> (ksi)	Distinguishing property	Examples of applications
<b>Nickel-base alloy</b>					
Sanicro 75X	UNS N07750	C ≤0.020 Ni 72 Cr 16 Ti 2.5 Al 0.7 Nb 0.8	C 750–1350 (109–196)	Mechanical properties at elevated temperatures up to 800°C. Resistance to gas corrosion at high temperatures. Spring properties up to 600°C.	Positioner devices in nuclear power fuel assemblies. Springs and other parts exposed to high temperatures and/or a very corrosive environment.  Low cobalt composition makes it especially suitable for nuclear applications

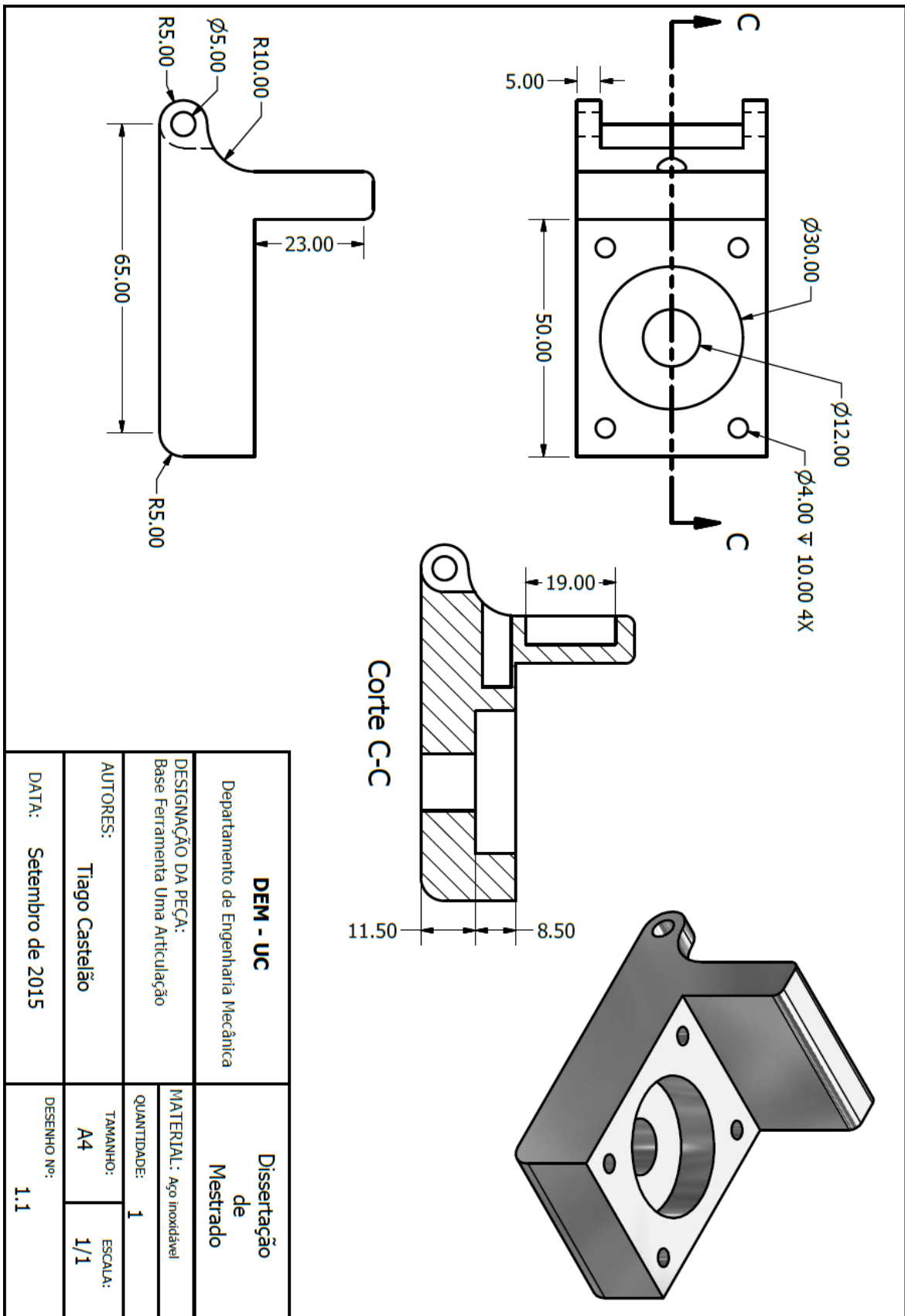
Sandvik grade	Tensile strength, MPa (ksi)	Width, mm (in.)	Thickness, mm (in.)
<b>Ni-base alloy</b>			
Sanicro 75X	750–1350 (109–196)	2–200 (0.08–7.9)	0.015–4 (.0006–.16)

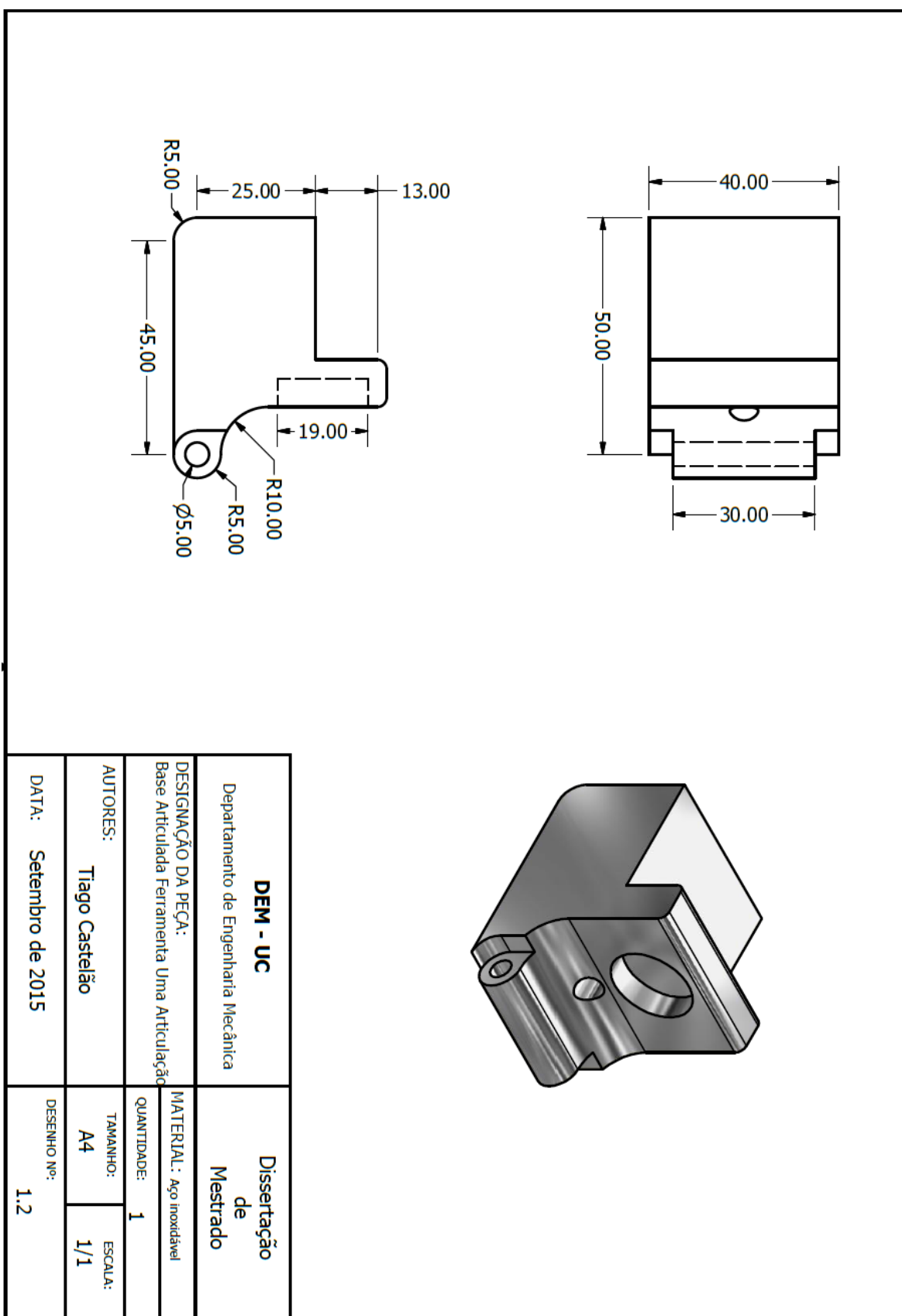




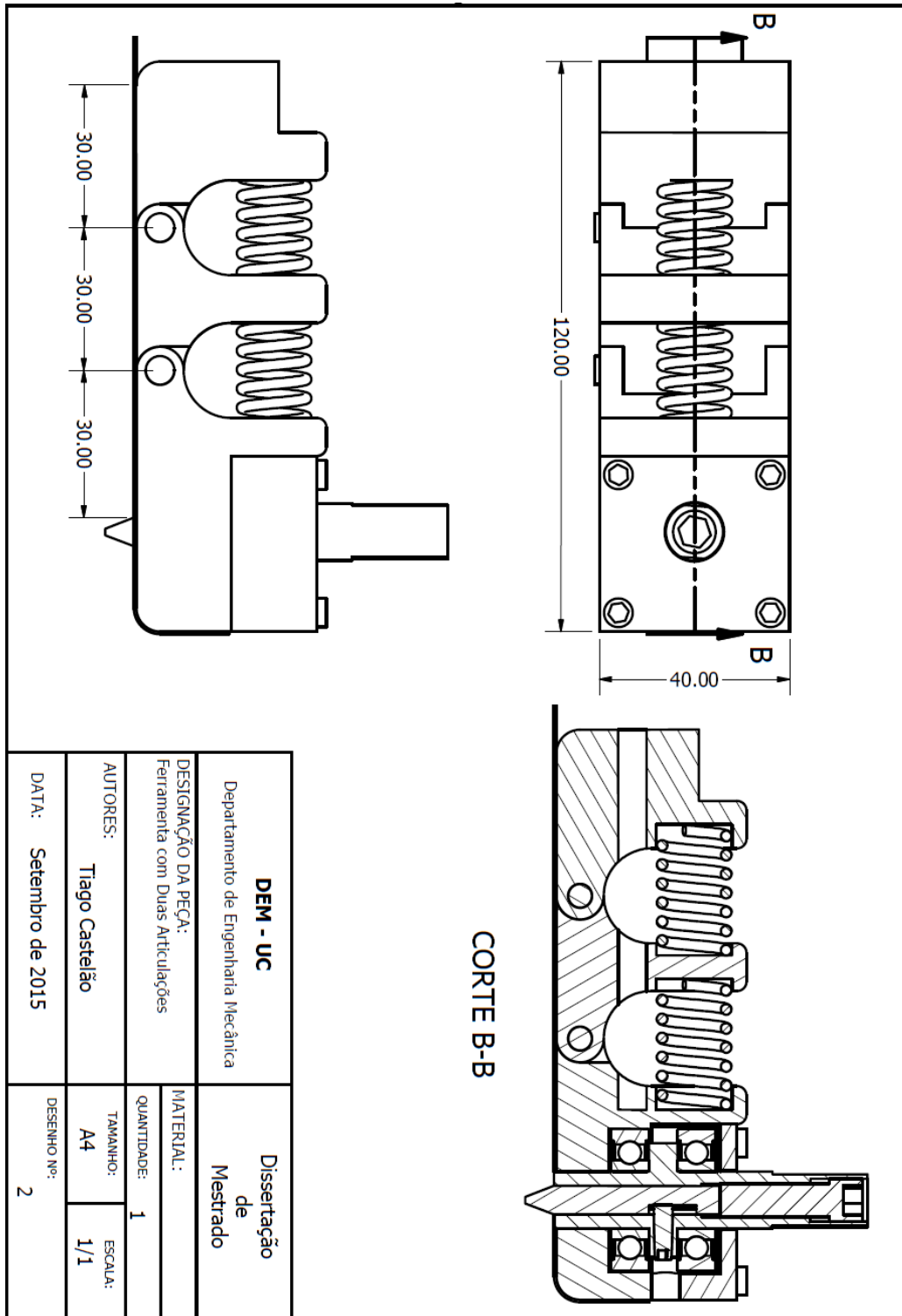
#### A4. Desenhos técnicos da ferramenta com uma articulação

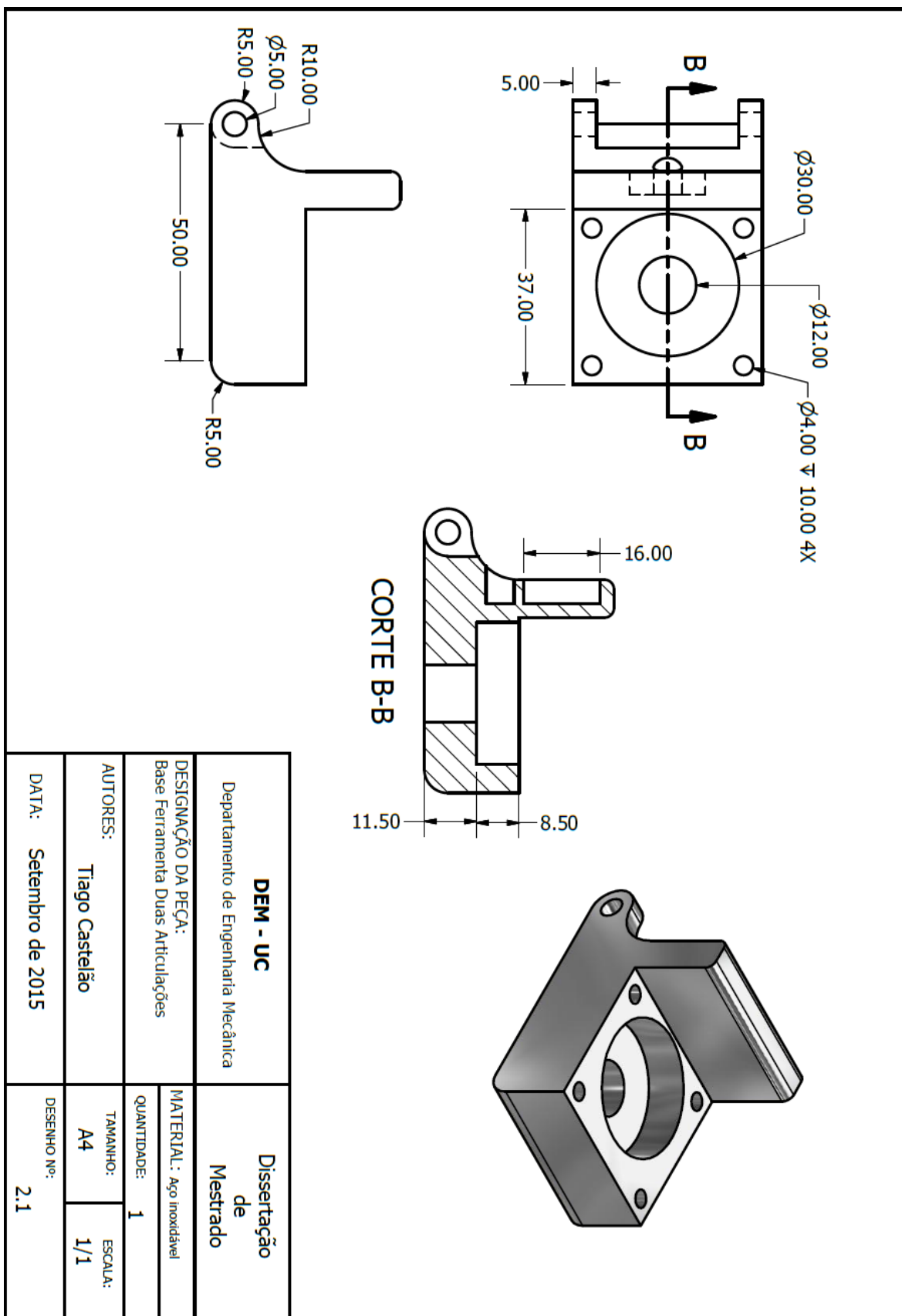


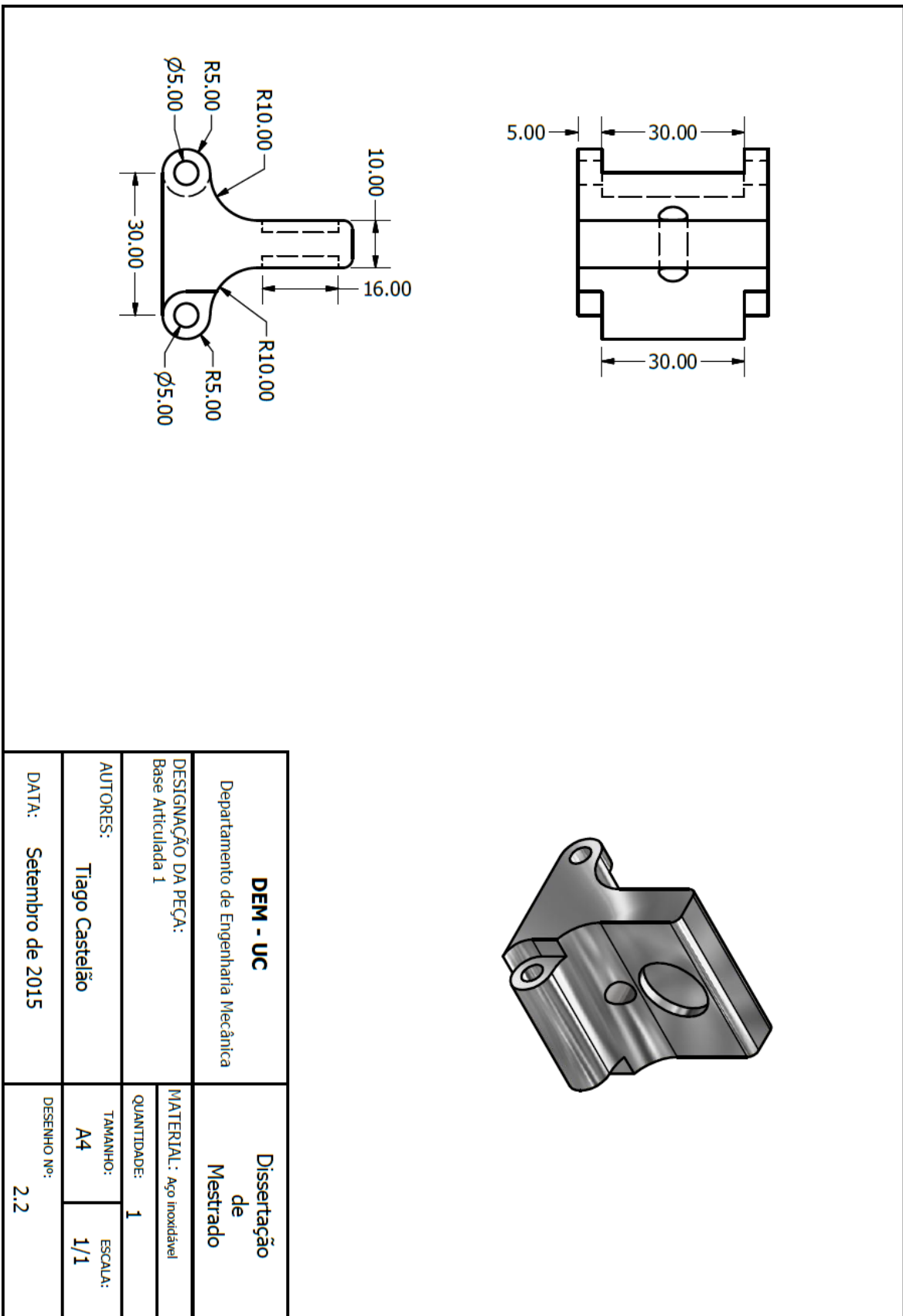


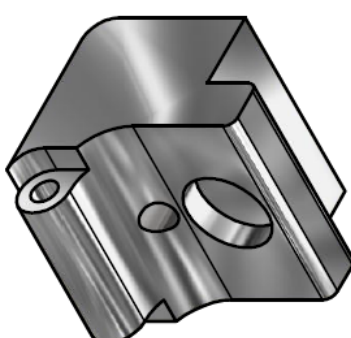


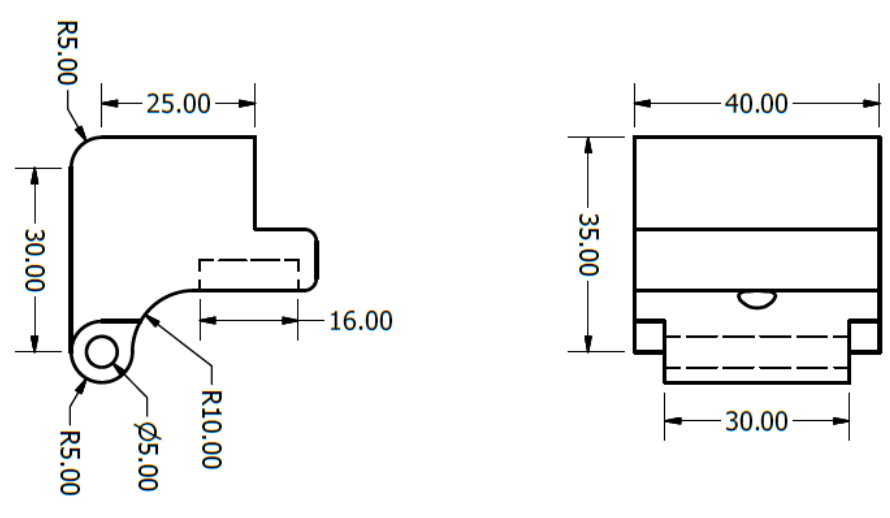
### A5. Desenhos técnicos da ferramenta com duas articulações









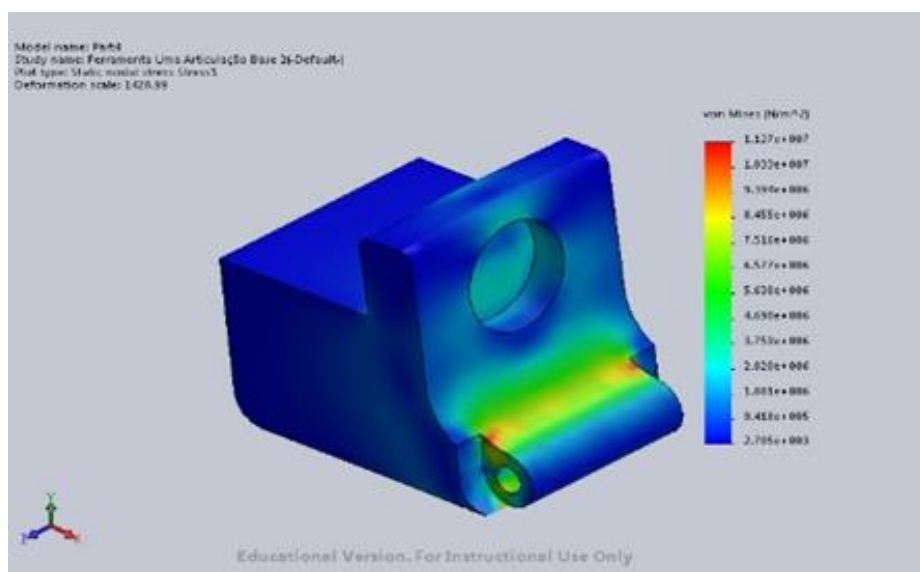
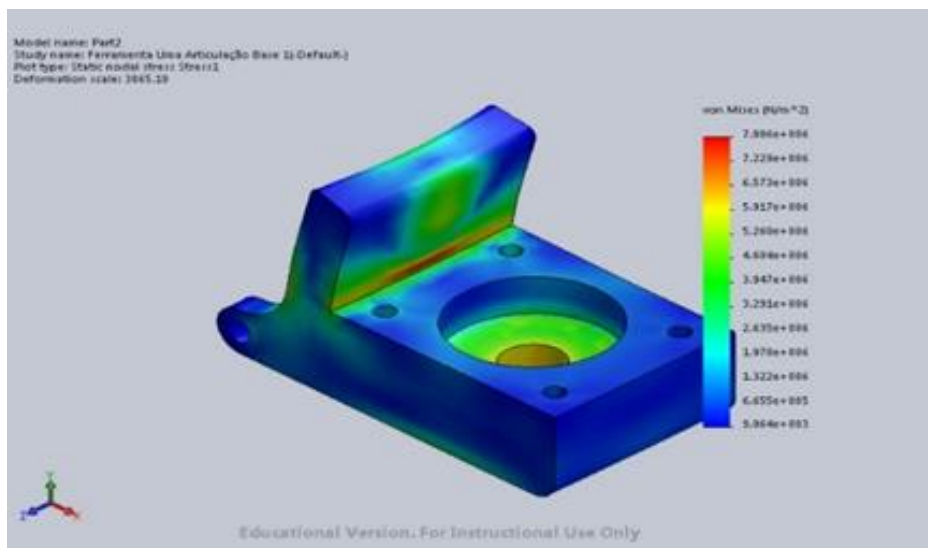


<b>DEM - UC</b>		Dissertação de Mestrado	
Departamento de Engenharia Mecânica		MATERIAL: Aço Inoxidável	
DESIGNAÇÃO DA PEÇA: Base Articulada 2		QUANTIDADE: 1	
AUTORES: Tiago Castelão		TAMANHO: A4	ESCALA: 1/1
DATA: Setembro de 2015		DESENHO Nº: 2.3	

## A6. Análise estática da ferramenta com uma articulação na base

Com o auxílio do *SolidWorks*, fez-se um estudo da análise estática a cada elemento da base da ferramenta. O resultado desta análise depende diretamente dos constrangimentos e carregamentos. O material usado nos elementos da base da ferramenta foi o aço inoxidável AISI 316, cuja tensão de cedência é de 200 MPa.

Para a base que incorpora o pino, a tensão estimada, conforme a análise estática do *SolidWorks* é 7,8 MPa. Para a base articulada a tensão de cedência é 11,7 MPa. Conclui-se que comparando estas tensões com a tensão de cedência do material, ambos os elementos da base da ferramenta com uma articulação não oferecem perigo de deformação plástica para a gama de utilização pretendida.





## A7. Análise estática da Ferramenta com duas articulações na base

A base que incorpora o pino apresenta uma tensão estimada máxima de  $9,974 \text{ MPa}$ , a base articulada 1, apresenta uma tensão de  $10,56 \text{ MPa}$  e a base articulada 2 apresenta uma tensão de  $8,988 \text{ MPa}$ . Estas tensões quando comparadas com a tensão de cedência do material, permite concluir que estas não oferecem perigo de deformação plástica para a gama de utilização pretendida.

