



UNIVERSIDADE D
COIMBRA

Carlos Leandro Ribeiro Marques

**DESENVOLVIMENTO DE UMA MÁQUINA DE
CONFORMAÇÃO DE ARAME**

**Dissertação no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica, Ramo de
Produção e Projeto, orientada pelo Professor Doutor Diogo Mariano Simões Neto e
pelo Professor Doutor José Domingos Moreira da Costa e apresentada ao
Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Ciências e Tecnologia da
Universidade de Coimbra**

Setembro de 2022

1 2



9 0

FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE
COIMBRA

Desenvolvimento de uma Máquina de Conformação de Arame

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

Development of a wire bending machine

Autor

Carlos Leandro Ribeiro Marques

Orientadores

Professor Doutor Diogo Mariano Simões Neto

Professor Doutor José Domingos Moreira da Costa

Júri

Presidente	Professor Doutor Amílcar Lopes Ramalho Professor Catedrático da Universidade de Coimbra
Orientador	Professor Doutor Diogo Mariano Simões Neto Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra
Vogal	Professor Doutor Fernando Jorge Ventura Antunes Professor Associado da Universidade de Coimbra



**Universidade de
Coimbra**



**Molag – Indústria
Técnica de Molas,
Lda.**

Coimbra, Setembro, 2022

Esta Dissertação foi realizada em Ambiente Industrial e contou com o enorme
contributo da Molag.

Aos meus Pais, à minha Namorada, à minha Família e aos meus Amigos.

Agradecimentos

Ao Sr. Alberto Godinho, à Dr.^a Carla Godinho e ao Dr. Nuno Godinho:

É em pessoas como vós que o crescimento do nosso País e Economia estão apoiados. Obrigado por me receberem sempre de braços abertos, por todos os ensinamentos e por me munirem de todas as ferramentas que tornaram este projeto possível.

Ao Professor Fernando Antunes:

Obrigado pela disponibilidade desde o primeiro momento. Viu neste projeto pernas para andar e indicou-me o caminho certo para o concretizar. Obrigado pelo acompanhamento, pelas visitas, pela curiosidade e atenção prestadas.

Ao Professor Diogo Neto:

Não podia ter tido melhor Orientador nesta Dissertação. Obrigado pelo incansável apoio, interesse e dedicação durante todo o desenvolvimento deste projeto, assim como pelos sábios conselhos e sugestões que levaram este trabalho a bom porto.

À minha Família e aos meus Amigos:

Por serem a verdadeira base da minha essência e fazerem parte daquilo que sou. Obrigado por terem remado sempre no sentido de me levar a tomar as decisões mais acertadas.

À minha Namorada, Margot:

A principal responsável pela mudança no rumo da minha vida, obrigado por todo o incentivo, apoio e dedicação, principalmente nestes últimos anos. Tem sido um percurso difícil, mas o teu amor, carinho e paciência tornaram a conclusão do meu percurso académico uma realidade.

Aos meus Pais, Carlos Marques e Assunção Marques:

Por serem o farol que sempre me indicou o caminho correto. Obrigado por todas as oportunidades que proporcionaram na minha vida, por toda a educação e dedicação que depositaram em mim e por todo o apoio e incentivo que me deram, mesmo quando já não havia motivos para o fazerem. Espero deixar-vos orgulhosos.

Resumo

Esta dissertação apresenta o projeto de reabilitação de uma máquina de conformação de arame, obsoleta e sem condições de funcionamento, para a indústria de molas e artefactos em arame. Esta máquina deverá produzir um novo componente, para o qual não estava dotada de meios para o conseguir. Para atingir esse objetivo, a máquina passará por um processo de reparação, restauro, modificação e alteração, através do conhecimento e experiência técnica nesta área específica, presente na empresa em que foi desenvolvido, e das ferramentas da engenharia mecânica para validar e melhorar as soluções idealizadas.

Primeiramente é feita a contextualização acerca do processo de conformação de arame e das várias etapas a que este é sujeito, permitindo perceber e realçar os problemas existentes com a máquina em estudo. Em segunda instância, é feita uma avaliação ao estado da máquina e são dados a conhecer os seus problemas mecânicos e de conceção, que não permitiam a realização da tarefa em vista, ou que podiam simplesmente ser melhorados. De seguida são apresentadas as soluções conceptuais idealizadas para cada um dos problemas identificados, bem como um novo design para as ferramentas de conformação desta máquina.

Posteriormente, a solução conceptual passa por um processo de verificação e dimensionamento, recorrendo à simulação numérica do processo de conformação de arame, utilizando, tanto as ferramentas originais, como as idealizadas. Aqui, o programa de elementos finitos DD3IMP foi utilizado para obter os dados relativos aos esforços sobre cada ferramenta e a geometria do arame durante a conformação, nomeadamente a curvatura na zona da dobragem. É também efetuado um estudo ao retorno elástico do arame, de modo a conseguir quantificar e compensar este fator no momento da afinação da máquina para produção. Por fim, é apresentada uma análise comparativa das simulações com os resultados experimentais, obtidos com as novas ferramentas já montadas. Como rescaldo, será também demonstrado um balanço com a estimativa de poupança que esta empresa teve ao adotar uma solução de reaproveitamento e modificação de uma máquina obsoleta, face ao que despenderia na aquisição de uma máquina nova.

Palavras-chave: Conformação de arame, Projeto de máquina, Ferramentas de conformação, Simulação numérica, Retorno elástico.

Abstract

This study presents the project of rebuilding a wire bending machine for manufacturing coil springs and other related products. The starting point was an old, obsolete and non-working wire bending machine. Indeed, this machine is not able to produce a new component due to specifications required by the customer. Therefore, the machine will go through the process of repair, restoration and modification. To achieve that goal, the redesign will take into account the technical knowledge and experience within the company, as well as the mechanical engineering tools to validate and improve the proposed solutions.

Primarily, the process of wire bending and the steps to achieve the final product will be brought into context, in order to enhance the mechanical problems of the machine. Then, the actual conditions are evaluated to find the mechanical and conception problems that preclude the desired task. Following that, the idealized conceptional solutions for the identified problems will be presented, as well as a new design for the machine's bending tools. Next, the conceptual solution will go through a procedure of verification and design, using the numerical simulation of the wire bending process, adopting both the original tools and the new design for the forming tools. Here, the data regarding loads in each tool and the wire geometry during the bending stage, in particular its curvature, will be provided by the in-house finite element code DD3IMP. Also, the springback of the wire will be studied numerically and experimentally. This can reduce the time spend in the experimental tryout of new products since the springback can be numerically predicted a priori for any geometry of bending and material. Lastly, a comparison between experimental results, obtained using the new designed tools, and the predicted simulation results will be presented.

In the aftermath, an estimated audit of the savings obtained by the company will be demonstrated, for adopting this recovery and modifying of an obsolete machine, instead of acquiring a new one.

Keywords: Wire bending, Machine design, Bending tools, Numeric Simulation, Springback.

Índice

Índice de Figuras	ix
Índice de Tabelas	xiii
Simbologia e Siglas	xv
Simbologia.....	xv
Siglas e Acrónimos.....	xvii
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Molag.....	1
1.2. Processo de conformação de arame	5
1.2.1. Desenrolamento	5
1.2.2. Linearização da matéria-prima	6
1.2.3. Conformação de arame	7
2. ESTUDO DA MÁQUINA DE CONFORMAÇÃO DE ARAME	11
2.1. Deficiências mecânicas existentes	11
2.1.1. Folga entre chaveta e escatel	11
2.1.2. Ferramentas de conformação.....	12
2.1.3. Parábola	17
2.2. Proposta de alterações à máquina	19
2.2.1. Folga entre chaveta e escatel	19
2.2.2. Geometria das ferramentas de conformação	22
2.2.3. Parábola	27
2.2.4. Sistemas de segurança	29
3. ANÁLISE NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DA ETAPA DE CONFORMAÇÃO 31	
3.1. Materiais e ferramentas de conformação	32
3.2. Modelo de elementos finitos.....	34
3.3. Ferramentas de conformação originais	36
3.3.1. Forças de dobragem.....	36
3.3.2. Curvatura da dobra	39
3.3.3. Retorno elástico	40
3.4. Novas ferramentas de conformação.....	42
3.4.1. Forças de dobragem.....	42
3.4.2. Curvatura da dobra	46
3.4.3. Retorno elástico	49
3.5. Discussão das propostas de alteração	52
4. CONCLUSÕES	57
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	59
ANEXO A	61
ANEXO B	63
APÊNDICE A: CADERNO DE DESENHOS	65

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Edifício Sede da Empresa Molag.....	1
Figura 1.2. Exemplos de artefactos produzidos em arame pela empresa Molag.....	1
Figura 1.3. Máquina de conformação de arame obsoleta e fora de uso na empresa Molag..	3
Figura 1.4. Ferramenta de conformação de arame definida por roletes de raios muito grandes.....	4
Figura 1.5. Vista global da uma máquina de conformação de arame (CMM6-800R) utilizada na empresa.	5
Figura 1.6. Bobine de arame inserida na parábola durante o processo de desenrolamento. .	6
Figura 1.7. Sistema de roletes utilizado na linearização do arame antes da operação de conformação.	7
Figura 1.8. Ferramentas de conformação e cortante (atrás).	8
Figura 1.9. Braço de conformação contendo as ferramentas de conformação.....	9
Figura 1.10. Sistema de elementos que conferem rotação ao braço em torno do arame planificado.	9
Figura 2.1. Roda dentada acoplada ao veio de transmissão de potência responsável pela rotação do braço de conformação (contém as ferramentas de conformação).	12
Figura 2.2. Braço de conformação: (a) Braço na sua posição de repouso, aparafusado a disco rotativo; (b) Representação tridimensional da versão original do braço de conformação.	13
Figura 2.3. Conjunto de ferramentas de conformação.....	14
Figura 2.4. Conjunto de ferramentas originais, utilizadas no processo de conformação de arame: (a) vista global; (b) vista pormenorizada da folga entre a extremidade da guia e a ferramenta de corte.	15
Figura 2.5. Contraste entre cortes de arame: corte limpo, fruto de boa afinação dos componentes de corte (esquerda); corte deficitário com deformação plástica e rebarba, fruto de folga excessiva entre os intervenientes no corte (direita)	16
Figura 2.6. Rolete, casquilho e parafuso (montado e desmontado).....	16
Figura 2.7. Parábola original desmantelada.....	18
Figura 2.8. Elementos originais da parábola: (a) hastes grosseiras; (b) apoio original já danificado.	18
Figura 2.9. Veio de transmissão de potência e roda dentada após modificação, com quatro escatéis e quatro chavetas.....	20
Figura 2.10. Dados relativos ao dimensionamento da chaveta: (a) dimensões da chaveta; (b)características do motor.	20

Figura 2.11. Representação tridimensional do esboço do novo conjunto de ferramentas de conformação.....	23
Figura 2.12. Representação tridimensional do esboço do subconjunto guia.	24
Figura 2.13. Representação tridimensional do esboço do subconjunto de corte.....	25
Figura 2.14. Representação tridimensional do esboço subconjunto de conformação.....	26
Figura 2.15. Representação tridimensional do elemento móvel do sistema de conformação.	26
Figura 2.16. Novo sistema de acionamento do motor da Parábola.	28
Figura 2.17. Esquema simplificado do mecanismo de acionamento.	28
Figura 2.18. Parábola alterada, em fase de restauro.	29
Figura 2.19. Sistemas de 3 sensores: (a) Sensores no movimento de translação das ferramentas de conformação (b) Sensores no movimento de rotação do braço de conformação.....	30
Figura 3.1. (a) novas ferramentas produzidas e montadas; (b) caixa de comandos manuais da máquina.	31
Figura 3.2. Evolução da tensão real com a deformação plástica prevista pela lei de Swift para cada um dos aços.....	33
Figura 3.3. Representação simplificada das ferramentas de conformação: (a) máquina original; (b) proposta de alteração.	33
Figura 3.4. Divisão do processo de conformação em 4 etapas utilizando as ferramentas originais: (a) etapa 1; (b) etapa 2; (c) etapa 3; (d) etapa 4.	35
Figura 3.5. Definição da posição angular do rolete móvel no modelo numérico.	35
Figura 3.6. Previsão numérica da evolução da força de contacto em cada rolete utilizando as ferramentas originais e arame de aço macio: (a) primeira dobragem; (b) segunda dobragem.....	36
Figura 3.7. Previsão numérica da evolução da força de contacto em cada rolete utilizando as ferramentas originais e arame de aço de alta resistência: (a) primeira dobragem; (b) segunda dobragem.	37
Figura 3.8. Identificação do esforço e do parafuso em estudo.	37
Figura 3.9. Previsão numérica da geometria final do arame após as duas operações de dobragem utilizando as ferramentas originais: (a) arame de aço macio; (b) arame de aço de alta resistência.	39
Figura 3.10. Previsão numérica da curvatura do arame em cada dobra utilizando as ferramentas originais: (a) arame de aço macio; (b) arame de aço de alta resistência.	40
Figura 3.11. Previsão numérica do ângulo de dobra antes e depois do retorno elástico, utilizando as ferramentas originais e os dois aços para o arame: (a) primeira dobragem; (b) segunda dobragem.	41

Figura 3.12. Ângulos de conformação e retorno elástico de ambas tipologias de arame, utilizando as ferramentas originais: (1) aço macio C9D; (2) aço galvanizado de alta resistência.	42
Figura 3.13. Previsão numérica da evolução da força de contacto em cada rolete utilizando as ferramentas novas e arame de aço macio: (a) primeira dobragem; (b) segunda dobragem.	43
Figura 3.14. Previsão numérica da evolução da força de contacto em cada ferramenta utilizando as ferramentas novas e arame de aço de alta resistência: (a) primeira dobragem; (b) segunda dobragem.	43
Figura 3.15. Dados do esforço em estudo nas novas ferramentas.	44
Figura 3.16. Previsão numérica da geometria final do arame após as duas operações de dobragem utilizando as novas ferramentas: (a) arame de aço macio; (b) arame de aço de alta resistência.	47
Figura 3.17. Previsão numérica da curvatura do arame em cada dobra utilizando as novas ferramentas: (a) arame de aço macio; (b) arame de aço de alta resistência.	47
Figura 3.18. Avaliação de componente em teste, fabricado pelas novas ferramentas: (a) disposição do componente na ferramenta de medição “Quick Scope” da Mitutoyo; (b) resultado gerado pela ferramenta “Quick Scope”.	48
Figura 3.19. Previsão numérica do ângulo de dobra antes e depois do retorno elástico, utilizando as novas ferramentas e os dois aços para o arame: (a) primeira dobragem; (b) segunda dobragem.	50
Figura 3.20. Ângulos de conformação e retorno elástico de ambas tipologias de arame, utilizando as novas ferramentas: (1) Aço macio C9D (2) Aço galvanizado de alta resistência.	51
Figura 3.21. Proposta de ferramentas com barreira física ao corte dos parafusos de ligação.	54
Figura 3.22. Análise das dobras e acumulação de material: (a) dobra com raio interior de 4,10mm; (b) dobra com raio interior de 13,85mm.	55
Figura 4.1. Tabela 1 da Norma EN 10270-1, correspondente à nomenclatura das matérias-primas abrangidas.....	61
Figura 4.2. Tabela 2 da Norma EN 10270-1, correspondente à composição química das matérias primas abrangidas.	61
Figura 4.3 Tabela 3 da Norma EN 10270-1, correspondente às propriedades mecânicas dos arames abrangidos.	61
Figura 4.4 Certificado de matéria prima do fornecedor.	62
Figura 4.5 Secção correspondente nomenclatura do arame C9D abrangido pela Norma EN 16120-2.....	63
Figura 4.6 Tabela 1 correspondente composição química do Arame C9D abrangido pela Norma EN 16120-2.	63
Figura 4.7 Certificado de matéria prima do fornecedor.	64

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1. Parâmetros da lei de Swift utilizados para definir o comportamento de cada um dos aços.	32
Tabela 3.2. Previsão dos ângulos de retorno elástico em cada uma das operações de dobra com as ferramentas originais, comparando os dois aços para o arame.	41
Tabela 3.3. Raios de curvatura medidos experimentalmente na zona interior e exterior para um arame de aço com 6 mm de diâmetro.	49
Tabela 3.4. Previsão dos ângulos de retorno elástico em cada uma das operações de dobra com as novas ferramentas, comparando os dois aços para o arame.	50
Tabela 3.5. Ângulos de dobra registados nas peças produzidas pelas novas ferramentas, após retorno elástico para um ângulo de conformação de 86°.	52
Tabela 3.6. Média dos ângulos de retorno elástico medidos experimentalmente para cada um dos aços em estudo.	52
Tabela 3.7. Custos da recuperação da máquina vs custos de aquisição de nova máquina. .	56

SIMBOLOGIA E SIGLAS

Simbologia

E – Módulo de Elasticidade

σ – Tensão equivalente

K – Parâmetro da lei de Swift

ε_0 – Parâmetro da lei de Swift

$\bar{\varepsilon}^p$ – Deformação plástica equivalente

n – Parâmetro da lei de Swift

η_{motor} – Velocidade de Rotação do Motor

M_{motor} – Binário à saída do Motor

$M_{pinhão}$ – Binário Transmitido pelo Pinhão

$\Phi_{pinhão}$ – Diâmetro do Pinhão

$\Phi_{roda\ dentada}$ – Diâmetro da Roda Dentada

r_{veio} – Raio do Veio

P – Potência Transmitida

$\eta_{roda\ dentada}$ – Velocidade de Rotação da Roda Dentada

$M_{t\ roda\ dentada}$ – Binário Transmitido pela Roda Dentada

$F_{Chaveta}$ – Força a atuar na chaveta

$\sigma_{Chaveta}$ – Tensão de contacto na chaveta

$\sigma_c^{chaveta}$ – Tensão de cedência da(s) chaveta(s)

$F_{p/ chaveta}$ – Força a atuar em cada chaveta

$\sigma_{p/ chaveta}$ – Tensão de contacto nas chavetas

$n_{p/ chaveta}$ – Coeficiente de segurança por chaveta

A_{corte} – Área sujeita a corte

τ – Tensão de corte

σ – Tensão equivalente

n – Coeficiente de Segurança

σ_p – Tensão de Prova

- σ_c – Tensão de cedência
 σ_R – Tensão de Ruptura
 Q – Força de Corte
 $\tau_{m\acute{a}x}$ – Tensão de Corte Maxima
 A_t – rea da Secção Transversal do Parafuso
 F_p – Força de Prova
 F_i – Força de pré-carga no parafuso
 F_a – Força de Atrito
 μ – Coeficiente de Atrito
 $(\sigma_a)_{eq}$ – Tensão Alternada Equivalente
 $\sigma_{m\acute{a}x}$ – Tensão Axial Maxima
 $(\sigma_a)_{adm}$ – Amplitude de Tensão Admissível
 σ_f – Tensão de Fadiga
 $(\sigma_a)_{eq}$ – Tensão Alternada Equivalente
 $(\sigma_m)_{eq}$ – Tensão Média Equivalente
 k_C – Fator de Carga
 k_S – Fator de Acabamento Superficial
 k_{ta} – Fator de Tamanho
 k_T – Fator de Temperatura
 k_{fb} – Fator de Fiabilidade
 σ_{f0} – Tensão Limite de Fadiga
 k_f – Fator de Concentrao de Tensões
 M_f – Momento Fletor/Torsor
 $F_{m\acute{a}x}$ – Força máxima
 F_i^I – Esforço cortante primário do parafuso i
 N – Número de Parafusos
 F_i^{II} – Esforço cortante secundário do parafuso i
 r_i – Distância do parafuso i ao centro geométrico
 $Q_{m\acute{a}x}$ – Força de Corte Máxima
 M_t – Momento Torsor
 $F_{m\acute{a}x}$ – Força máxima

$\sigma_{sup\ contacto}$ – Tensão na superfície de contacto

$A_{contacto}$ – Área da superfície de contacto

Siglas e Acrónimos

CAD – Computer Aided Design

Molag – Indústria de Molas Técnicas, Lda.

MEF – Método dos Elementos Finitos

DIN – Deutches Institut für Normung

EN – European Norm

ISO – International Organization for Standardization

1. INTRODUÇÃO

A Indústria é, sem dúvida, o motor da Economia. Neste setor, destaca-se o papel do Engenheiro para seu progresso e desenvolvimento. Nesse sentido, esta dissertação foi realizada em ambiente industrial e partiu dos conhecimentos adquiridos no curso de Engenharia Mecânica, com o intuito de os aplicar como uma mais-valia no terreno.

1.1. Molag

A empresa onde este projeto foi desenvolvido é a Molag - Indústria de Molas Técnicas, Lda. (a partir de agora referida somente como “Molag”), cuja sede está representada na Figura 1.1. É uma empresa portuguesa do setor da metalurgia e metalomecânica, inserida na indústria transformadora. Esta empresa dedica-se fundamentalmente ao fabrico de todo o tipo de molas e artefactos em arame, cujo diâmetro esteja compreendido entre 0,15 mm e 12 mm, como as representadas na Figura 1.2.



Figura 1.1. Edifício Sede da Empresa Molag.



Figura 1.2. Exemplos de artefactos produzidos em arame pela empresa Molag.

Nesta empresa, todo o processo de produção de molas é visado. Desde o desenvolvimento e conceção de molas com as características pretendidas pelo cliente, à produção das mesmas, sendo o seu controlo e certificação de qualidade garantidos. Para além da conformação de arame, esta empresa emprega também técnicas de acabamentos, como tratamento térmico, esmerilamento, tratamento superficial, dobragens, retirar de apara, entre outros. Uma grande parte das ferramentas aqui utilizadas são criadas pela mão, arte e engenho do Sr. Alberto Godinho, na Ferramentaria da empresa. Aí, idealizam-se as soluções para os problemas do quotidiano da empresa. Essas são tornadas realidade através da utilização de tecnologias mecânicas clássicas como o torneamento e fresagem manual, e o manuseamento experiente de ferramentas como serrotes, grosas, limas, machos e fêmeas de rosca, em bancadas e tornos de fixação. Tratamentos térmicos como tempera e revenido são quotidianamente utilizados de forma manual, para conferir as propriedades mecânicas necessárias aos aços das ferramentas de conformação de arame produzidas, que são altamente solicitadas e sujeitas a fenómenos de fadiga durante o processo de conformação de arame a que são sujeitas no dia a dia.

Esta empresa foi criada em 2013, mas conta com trabalhadores com décadas de experiência nesta área. Trabalha com os mais variados setores, dos quais se destacam indústria automóvel, agrícola, bélica, aeronáutica, produção de componentes para bicicletas, ferragens, fechaduras e serralharia. Aqui reina a harmonia entre a experiência de quem há muito trabalha nesta área, e as mais recentes técnicas de produção e equipamentos, levando a que, num relativo curto espaço de tempo esta empresa tenha conquistado uma posição de destaque no ramo em que se insere. Com efeito, a Molag produz componentes para empresas nacionais e internacionais, como a Yazaki Saltano, o Grupo Simoldes, a Decathlon, a Porsche, a Nespresso, entre outros.

No decorrer do período pandémico, esta empresa teve um aumento considerável no volume de encomendas, o que levou a um défice de recursos de produção. Para além disso, recentemente foi adjudicado a esta empresa um projeto para o desenvolvimento de um novo produto caracterizado por raios de conformação relativamente pequenos. No entanto, para que seja possível realizá-lo, medidas deveriam ser tomadas no sentido de responder às características técnicas, assim como de quantidade e cadência exigidas pelo cliente, já que não havia equipamento disponível para o seu fabrico. Nesse sentido, a administração teve que decidir entre adquirir um novo equipamento, ou arriscar e investir na reparação,

atualização e modificação de um equipamento obsoleto. Para que este projeto seja interessante financeiramente para a empresa, surge a necessidade de inovar, incorporando os conhecimentos especializados na renovação dos recursos já existentes e obsoletos, com recurso às ferramentas da engenharia.

Numa altura em que cada vez mais as preocupações ambientais e em que a incerteza no futuro da economia mundial estão na ordem do dia, a poupança, o reaproveitamento e a rentabilização de recursos materiais tornam-se uma necessidade para as empresas, tanto a nível ambiental como financeiro. Tendo esta filosofia como mote, este trabalho visa encontrar soluções construtivas para o reaproveitamento de uma máquina de conformação de arame obsoleta, que já estava fora de uso há alguns anos. Esta máquina, que podemos ver na Figura 1.3, construída e utilizada desde meados dos anos 90 do século passado, apresentava problemas mecânicos graves que condicionavam o seu correto funcionamento e comprometiam o rigor dimensional das peças produzidas. Para além disso, a configuração original das suas ferramentas de conformação (ver Figura 1.4), apenas permitia o fabrico de peças caracterizadas por raios de conformação relativamente grandes, impostos pelas dimensões dos roletes nelas presentes.



Figura 1.3. Máquina de conformação de arame obsoleta e fora de uso na empresa Molag.

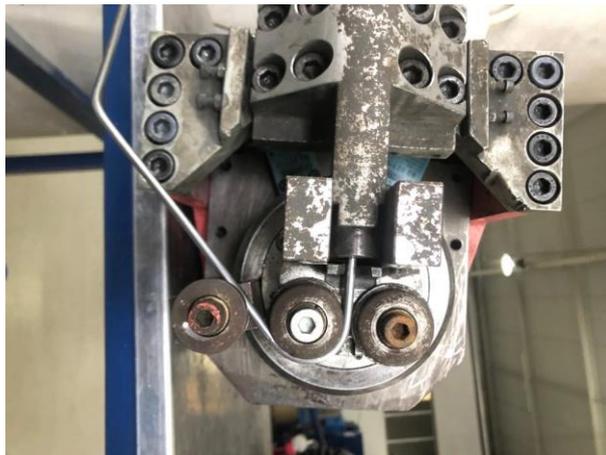


Figura 1.4. Ferramenta de conformação de arame definida por roletes de raios muito grandes.

O principal objetivo deste trabalho passa por, numa primeira fase, corrigir os problemas mecânicos presentes na máquina de conformação de arame, de forma que seja possível o seu funcionamento. Em segunda instância, deverá ser idealizada uma solução construtiva que permita alterar a configuração original das ferramentas de conformação de arame, de modo a alcançar os raios que caracterizam o novo componente a fabricar. Para isso, deverá haver lugar a debate e diálogo com o pessoal técnico, munido de experiência específica nesta área, de modo a alcançar um modelo que seja, de facto, uma solução viável para o problema. De seguida, o modelo desenvolvido deverá ser validado e testado, com recurso a simulações de elementos finitos. Este tipo de simulações já se demonstrou útil, mostrando resultados interessantes quando confrontados com os dados experimentais, envolvendo deformação plástica de arame em aço, em aplicações semelhantes [1][2][3]. As simulações deverão fornecer dados relativos às forças exercidas nas ferramentas, à posição do arame e ao respetivo retorno elástico sofrido, durante o processo de conformação de arame. Por fim, deverão produzir-se e aplicar-se na máquina as soluções validadas, atestando os modelos numéricos através da confrontação com os dados experimentais. Esse confronto servirá para criar uma ferramenta que venha a auxiliar os técnicos no momento da afinação da máquina, de forma que realizem o seu trabalho de forma mais célere e que fiquem livres para outras tarefas rapidamente, otimizando assim, o trabalho na empresa. No rescaldo destas ações, será interessante avaliar uma estimativa da poupança que estas representam, através da apresentação de um balanço quantitativo.

1.2. Processo de conformação de arame

O processo para obtenção dos artefactos produzidos nesta empresa é a conformação de arame. Neste processo, o arame é submetido a deformações plásticas de forma a obter a configuração pretendida. As cargas são aplicadas através de ferramentas específicas, com o objetivo de deformar plasticamente o material, de forma controlada e programada, para obter a geometria pretendida. Este processo engloba essencialmente 3 etapas: (i) desenrolamento do arame; (ii) linearização do arame; (iii) conformação do arame. Estas etapas são descritas de seguida de forma mais detalha, utilizando como exemplo imagens de uma máquina recente, em permanente utilização na empresa, a CMM6-800R, que pode ser vista na Figura 1.5.



Figura 1.5. Vista global da uma máquina de conformação de arame (CMM6-800R) utilizada na empresa.

1.2.1. Desenrolamento

A matéria-prima utilizada nesta empresa é arame de aço (macio e de alta resistência), com diâmetros compreendidos entre 0,15 mm e 12 mm. A matéria-prima chega à empresa enrolada em bobines. Na primeira etapa do processo de fabrico, ilustrada na Figura 1.6, essas bobines são desenroladas na parábola da máquina. A parábola é um instrumento que serve de suporte às bobines de arame. Esta é composta por um tabuleiro onde a bobine é assente e está munida de hastes na zona central, para apoiar a bobine de arame no local correto. Na zona mais periférica, existe outro conjunto de hastes que irão guiar o arame pelo percurso mais benéfico ao seu desenrolamento. Este instrumento está ainda munido de um sistema de

acionamento, composto por um motor elétrico e sensores, que indicam ao motor sempre que há necessidade de desenrolar mais arame. Todo o conjunto que compõe a parábola deve ser resistente, já que poderá de ter de suportar massas que rondam uma tonelada.



Figura 1.6. Bobine de arame inserida na parábola durante o processo de desenrolamento.

1.2.2. Linearização da matéria-prima

Dado que o arame é armazenado em rolo numa bobine, quando este é desenrolado na parábola, contém ainda a forma espiral ao longo do seu comprimento. Então, na segunda etapa, o arame é linearizado através da sua passagem num conjunto de roletes acoplados à carcaça da máquina, como se mostra na Figura 1.7. Os roletes, montados de forma sequencial e intercalada estão dispostos, tanto no plano vertical, como horizontal, para garantir a perfeita linearização do arame. Duas polias estão sincronizadas com um sistema de controlo, de forma a garantir o correto avanço do arame. Existe ainda um conjunto de polias acionadas por um motor elétrico, para puxar o arame entre as suas pistas e alimentar as ferramentas de conformação. Em suma, esta etapa tem como objetivo preparar o arame para a última etapa deste processo, de forma que este esteja o mais linear possível aquando do momento de conformação.

Esta é uma etapa muito importante do processo, pois quanto mais linear estiver o material à sua saída, maior será a precisão dimensional do componente final. Assim, para cada espessura de arame existe um jogo específico de roletes a empregar. Estes devem ser minuciosamente limpos e lubrificados antes e, eventualmente, durante a sua utilização.



Figura 1.7. Sistema de roletes utilizado na linearização do arame antes da operação de conformação.

1.2.3. Conformação de arame

A conformação de arame é a última etapa do processo de fabrico, a qual também inclui uma operação de corte. Aqui, é dada a forma pretendida ao componente e é efetuado o corte para separar o componente conformado do restante arame ainda por conformar. O arame proveniente da etapa anterior, é empurrado pelos roletes e polias, até alcançar a extremidade final da máquina, onde está o conjunto de ferramentas de conformação que irão sujeitar o arame a deformação plástica (ver Figura 1.8). Para dar a forma pretendida ao componente, estas ferramentas fazem, de forma sequencial, cada uma das dobragens necessárias ao componente, segundo raios, ângulos e distâncias definidas na afinação, conseguidas por intermédio de uma ferramenta fixa (postigos, roletes, conformadores), e uma ferramenta móvel (rolete). Por fim, o componente já conformado é separado do restante arame por intermédio de uma ferramenta de corte.

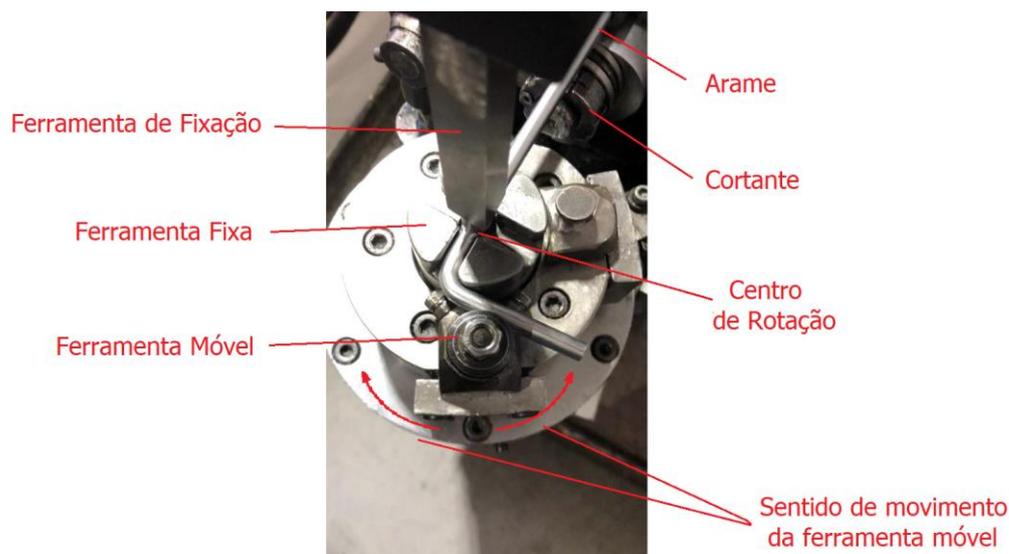


Figura 1.8. Ferramentas de conformação e cortante (atrás).

A ferramenta fixa determina os raios de curvatura das dobragens, enquanto o movimento angular da ferramenta móvel, em torno do centro de rotação, irá determinar o ângulo dessas mesmas dobragens. O processo de dobragem é auxiliado por uma ferramenta fixadora que garante que o arame não sofre desvios durante o processo. Este conjunto de ferramentas pode ainda girar solidariamente em torno do eixo do arame, de forma a posicionar-se e possibilitar dobragens em qualquer plano do arame, oferecendo uma geometria tridimensional do componente final. Este movimento de rotação é conseguido, pois todo este conjunto de ferramentas se encontra fixo a um braço, representado na Figura 1.9, que roda em torno do arame proveniente da etapa anterior. Para que aconteça este movimento de rotação, um motor elétrico fornece potência a uma roda dentada, à qual este braço se encontra acoplado, por intermédio de um veio. Cada construtor utiliza a sua estratégia para realizar a transmissão da potência do motor para roda dentada. Neste caso, a transmissão é conseguida através de uma correia dentada. O sistema está esquematizado de forma simples na Figura 1.10.

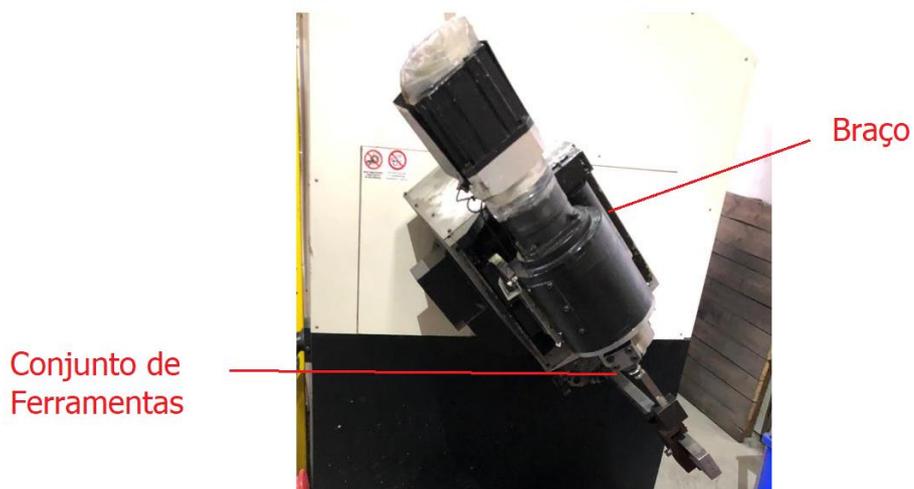


Figura 1.9. Braço de conformação contendo as ferramentas de conformação.

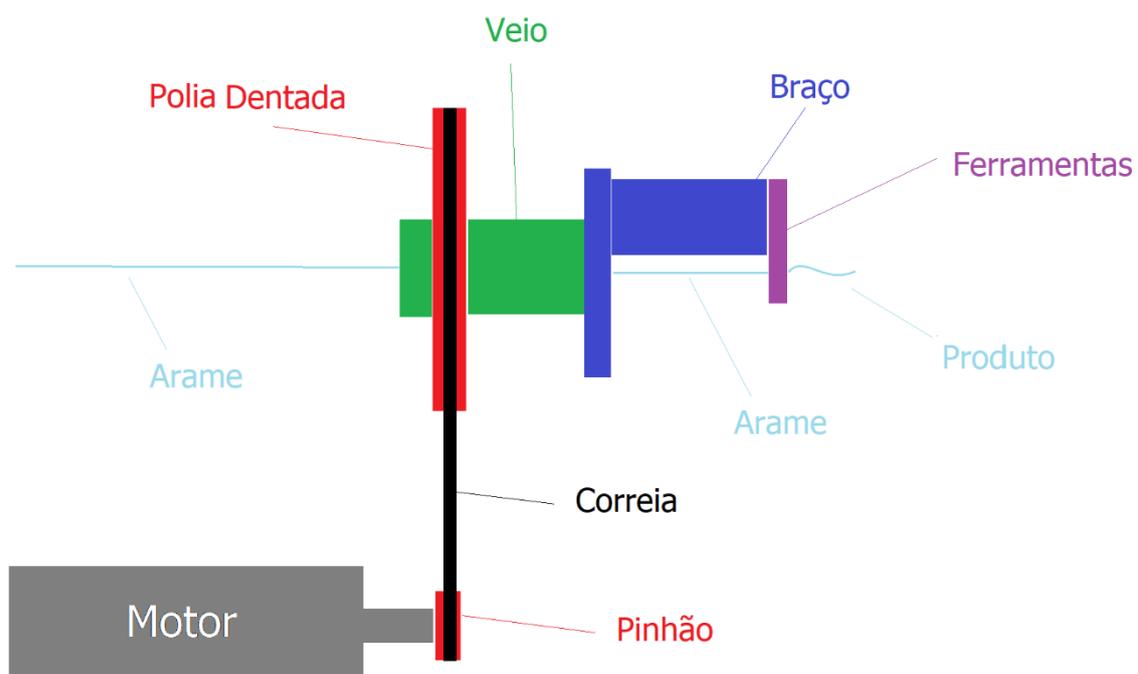


Figura 1.10. Sistema de elementos que conferem rotação ao braço em torno do arame planificado.

2. ESTUDO DA MÁQUINA DE CONFORMAÇÃO DE ARAME

2.1. Deficiências mecânicas existentes

A máquina de conformação de arame em estudo é uma Maquisis Modelo BWM.TRI-CNC/8 de fabrico português. Terá sido construída por volta de 1996 e é uma máquina bastante limitada para os padrões de hoje em dia e para as necessidades vividas pela empresa. Para além das limitações inerentes à sua conceção original, esta máquina encontrava-se com graves problemas mecânicos de base, que não lhe permitiam um correto funcionamento.

2.1.1. Folga entre chaveta e escatel

Ao contrário da máquina demonstrada anteriormente, nesta máquina a transmissão de potência para o braço de conformação é feita através de engrenagem, ou seja, um pinhão à saída do motor e uma roda dentada acoplada ao braço de conformação. Este facto torna a transmissão mais precisa, no entanto, os esforços transmitidos ao veio movido são superiores. Neste caso, a transmissão de potência entre a roda dentada e o veio era feito através de uma única chaveta. O que se veio a descobrir é que existia uma folga considerável na zona do escatel, devido ao esmagamento da chaveta. Este facto deve-se, provavelmente, a um dimensionamento incorreto deste elemento, ou simplesmente a um uso intensivo da máquina, o que tornava impossível a correta movimentação do braço e, conseqüentemente, o posicionamento das ferramentas nos ângulos pretendidos. A folga aqui gerada resultava numa imprecisão dimensional das peças produzidas e numa impossibilidade, até, de gerar produtos finais com qualquer espécie de precisão. Na Figura 2.1 pode ver-se a roda dentada associada ao veio responsável pela rotação do braço de conformação da máquina em causa. De notar que este movimento do braço de conformação não induz qualquer tipo de deformação no arame, serve apenas para o correto posicionamento das ferramentas de conformação de forma a fazer cada dobragem no plano desejado. Assim, o esforço na chaveta é consequência da inércia do braço de conformação, a qual é necessário vencer para criar um movimento de rotação oscilatório preciso.



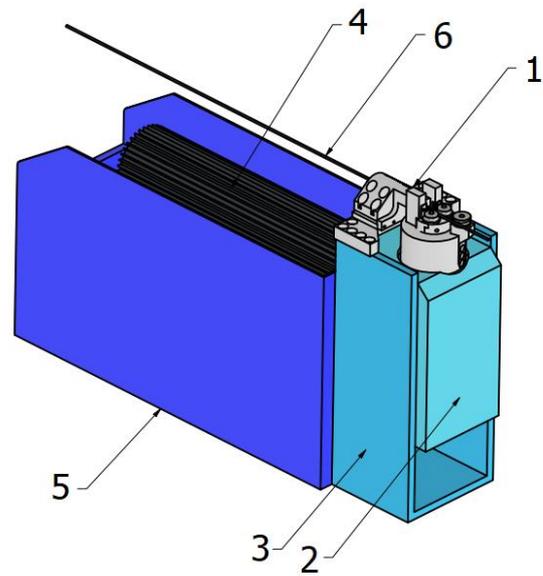
Figura 2.1. Roda dentada acoplada ao veio de transmissão de potência responsável pela rotação do braço de conformação (contém as ferramentas de conformação).

2.1.2. Ferramentas de conformação

As ferramentas de conformação, responsáveis por criar as dobragens no arame, estão acopladas rigidamente ao braço de conformação. Por sua vez, o plano onde ocorre cada uma das dobragens é ditado pelo posicionamento do braço de conformação, apresentado na Figura 2.2 (a), o qual apresenta um movimento de rotação intermitente em torno do eixo do arame. De modo a compreender melhor o processo de conformação nesta máquina em particular, é importante estudar o percurso seguido pelo arame durante essa etapa. Para isso recorreu-se ao *software Inventor*, para representar de forma simplificada o braço e as ferramentas de conformação, apresentados na Figura 2.2 (b).



(a)



(b)

Figura 2.2. Braço de conformação: (a) Braço na sua posição de repouso, aparafusado a disco rotativo; (b) Representação tridimensional da versão original do braço de conformação.

Neste momento é necessário ter conhecimento da sequência de operações que tem lugar para que se dê o processo de conformação do arame. Para contextualizar, o braço de conformação é composto por 5 elementos principais, os quais estão identificados na Figura 2.2 (b):

- Estrutura (5), que sustenta, alberga e protege os restantes componentes;
- Carcaça (3), acoplada à estrutura e onde é fixada a ferramenta guia do arame;
- Motores e redutores de engrenagens (4) que serão acoplados à base, para conferir movimento de translação e rotação às ferramentas de conformação
- Base (2), onde serão fixadas as ferramentas de conformação.
- Conjunto de Ferramentas (1), ilustrado em maior detalhe de seguida na Figura 2.3, onde se dá a conformação do arame;

Este sistema está aparafusado a um disco, ligado ao conjunto que confere movimento de rotação ao braço.

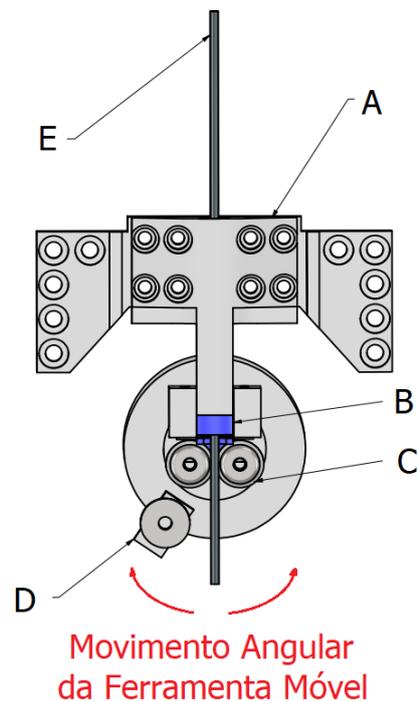


Figura 2.3. Conjunto de ferramentas de conformação.

O componente A, representado na Figura 2.3 é designado por guia e é o único componente fixo à carcaça do braço. Por outro lado, os restantes componentes presentes na Figura 2.3 estão fixados à base, que tem movimento transversal ao arame, (para a frente e para trás), de modo a cortar o arame, através de um elemento cortante presente em B. De frisar ainda que o elemento D é o único elemento com movimento de rotação. Assim sendo, o processo de conformação começa com o arame (E) a atravessar o componente A através do seu orifício e a deslocar-se entre as ferramentas fixas (roletes presentes em C). Depois de avançar a distância definida, é dobrado pela ferramenta móvel (rolete presente em D), através de um movimento de rotação, conferindo-lhe a forma desejada. Essa forma depende dos movimentos do braço em torno do eixo (definindo o plano de dobra), do raio de curvatura dos roletes em C e do ângulo de rotação de D. Por fim, a base desloca-se para a frente e o cortante presente em B irá cortar o arame, separando o componente conformado do restante arame linearizado, para que se possa iniciar novo ciclo de conformação. Podemos ver um exemplo de conformação de um arame na Figura 2.4 (a).

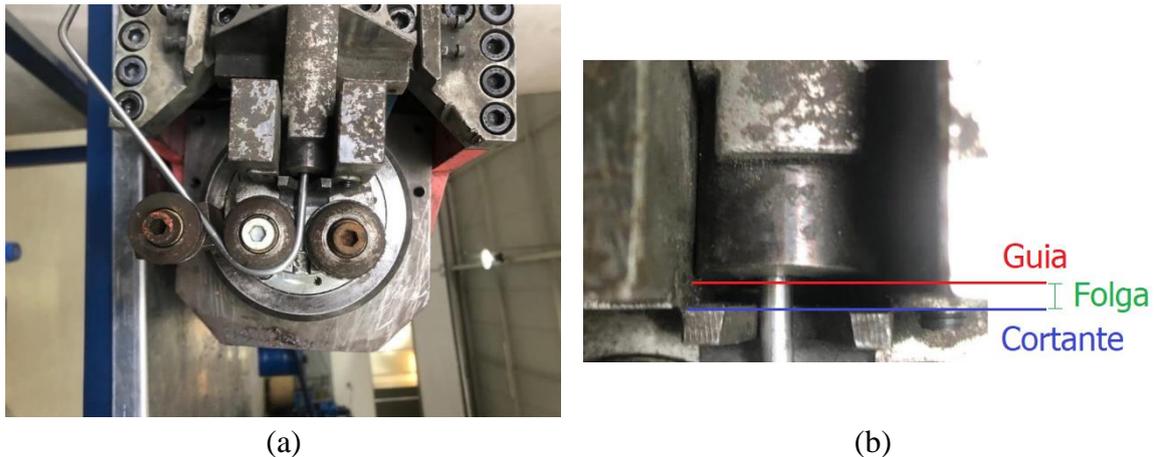


Figura 2.4. Conjunto de ferramentas originais, utilizadas no processo de conformação de arame: (a) vista global; (b) vista pormenorizada da folga entre a extremidade da guia e a ferramenta de corte.

Analisando de forma mais pormenorizada a Figura 2.4 (b), constata-se que existe, no conjunto de ferramentas original, uma folga considerável entre o tirante do guia e a ferramenta de corte. Isto resulta do desgaste criado pelo atrito entre os dois componentes, assim como pelas solicitações inerentes ao corte. Esta folga conduz a um corte imperfeito, como se mostra na Figura 2.5, que apresenta rebarba e deformações plásticas e que não garante a precisão dimensional necessária aos componentes fabricados. O arame sofre demasiada flexão devido às distâncias entre as áreas de contacto no momento em que se dá o corte. Esta situação poderia ser evitada, caso existisse possibilidade de afinação dos componentes no sentido de eliminar a folga.



Figura 2.5. Contraste entre cortes de arame: corte limpo, fruto de boa afinação dos componentes de corte (esquerda); corte deficitário com deformação plástica e rebarba, fruto de folga excessiva entre os intervenientes no corte (direita)

O segundo entrave à utilização destas ferramentas de conformação é o facto de utilizarem roletes para dar a forma aos componentes. Estes conjuntos de roletes tinham raios da superfície de contacto relativamente grandes, compreendidos entre os 10 e 15 mm, que não vão ao encontro do necessário para produzir o componente em vista. Para além disso, cada rolete é fixo por apenas um parafuso, como se verifica na Figura 2.6.



Figura 2.6. Rolete, casquilho e parafuso (montado e desmontado).

O terceiro problema identificado nas ferramentas de conformação foi a falta de adaptabilidade do equipamento. Para além de roletes com raios relativamente grandes, os cortantes não tinham afinação e obrigavam à substituição quando o desgaste era elevado. A folga entre o tirante e o cortante deve ser mínima, pelo que o atrito gerado pelo escorregamento entre estes dois componentes gerava desgaste e, conseqüentemente, aumento da folga. Isto leva a situações de falta de precisão dimensional, já que ocorriam deformações mais elevadas na zona de corte e rotura inesperada dos componentes inerentes à realização desta tarefa.

2.1.3. Parábola

Como referido na Introdução, a Parábola é o elemento principal da etapa do desenrolamento. Como tal, ela é composta por uma base, estática no solo, na qual se encontra disposto um tabuleiro, que tem um movimento rotativo durante a tarefa de desenrolamento do arame. Para que esse movimento aconteça, um sistema de acionamento deverá dar sinal ao motor para que transmita potência a um veio associado ao tabuleiro. Para tornar esta tarefa possível, este sistema conta ainda com a ação de elementos como polias, rolamentos e sensores, por exemplo.

Este elemento original, patente na Figura 2.7, tem de base uma configuração pouco usual, pouco prática e desatualizada para a tarefa em causa, se compararmos, por exemplo, com a parábola exposta na Figura 1.6. A configuração dos seus elementos é descontextualizada, está munida de hastes grosseiras (ver Figura 2.8) e pesadas, apoios desadequados e não dispõe de nenhuma estrutura que facilite ao operador a sua rotação, enquanto prepara o arame para alimentar a máquina. Para além destes problemas, o sistema de acionamento não se encontrava operacional e os elementos ainda aí presentes eram insuficientes para recuperar ou, sequer, compreender o seu mecanismo de funcionamento.



Figura 2.7. Parábola original desmantelada.



(a)



(b)

Figura 2.8. Elementos originais da parábola: (a) hastes grosseiras; (b) apoio original já danificado.

2.2. Proposta de alterações à máquina

O recondicionamento desta máquina tem como principal objetivo a produção de um novo componente, sendo a matéria-prima utilizada na produção do mesmo um arame de aço macio (C9D) com diâmetro de 6mm. Além disso, a geometria do componente exige raios de dobragem muito reduzidos (<5 mm), próximos de uma quinagem. Esta mesma máquina poderá ter de vir a conformar pontualmente arame de aço de alta resistência com diâmetro até 6 mm.

O objetivo do recondicionamento passa então por encontrar e validar soluções construtivas para alterações a implementar na máquina e ferramentas de conformação, de forma a resolver os problemas mencionados anteriormente. Torna-se imperativo eliminar toda e qualquer folga presente no sistema, desenhar e dimensionar novas ferramentas, mais robustas, versáteis e passíveis de ajustes, não só para o projeto em questão, mas também para projetos futuros que possam vir a ser adjudicados. Para isso, serão consultados os técnicos intervenientes no processo, para aconselhamento através da sua experiência e será utilizado o *software CAD Inventor*, para projetar as novas ferramentas. Para validar as soluções propostas, será utilizado o software de elementos finitos DD3IMP.

Neste capítulo serão abordadas as soluções idealizadas e desenhadas para os problemas apresentados, de forma que, posteriormente, possam ser validadas e aplicadas na máquina. Será feito um estudo ao comportamento dos componentes com a solução original e um estudo aos componentes idealizados, de forma a melhor dimensionar[4] os novos componentes e obter uma solução viável para o futuro funcionamento desta máquina.

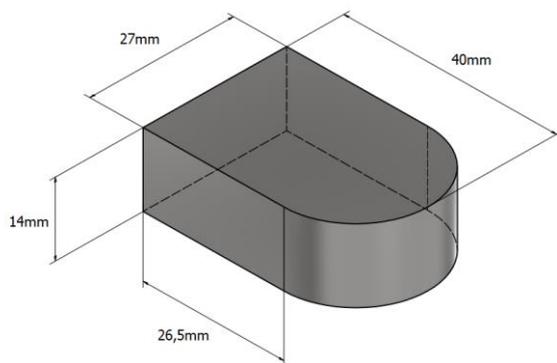
2.2.1. Folga entre chaveta e escatel

Como descrito anteriormente, no decorrer do funcionamento da máquina de conformação de arame, ocorreu esmagamento de chaveta responsável pela transmissão de potência ao veio que aciona o braço de conformação. Para resolver o problema, tomou-se como decisão abrir mais 3 escatéis, como está patente na Figura 2.9, colocando um total de 4 chavetas nesta transmissão de potência, para evitar problemas de esmagamento. Assim, a potência que pode ser transmitida ao veio aumentou em relação à solução inicial.

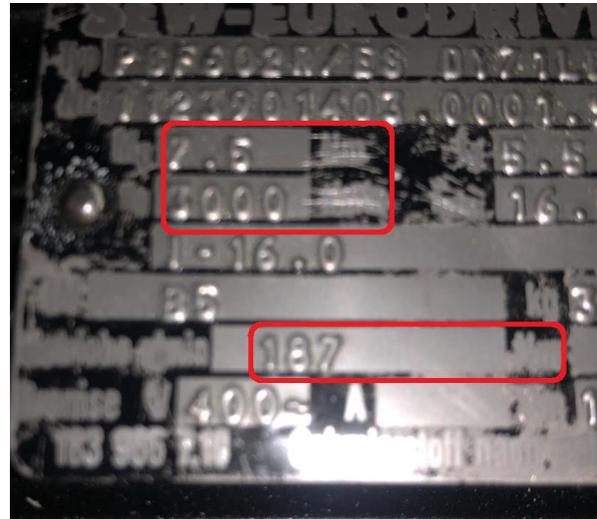


Figura 2.9. Veio de transmissão de potência e roda dentada após modificação, com quatro escatéis e quatro chavetas.

Para a verificação da solução adotada, importa saber as dimensões da chaveta e as características da transmissão da potência em causa, ambas enumeradas na Figura 2.10



(a)



(b)

Figura 2.10. Dados relativos ao dimensionamento da chaveta: (a) dimensões da chaveta; (b) características do motor.

As características do veio, roda dentada, pinhão e motor são as seguintes:

$$\eta_{motor} = 3000 \text{ rpm} = 314,16 \text{ rad/s};$$

$$M_{motor} = 7,5 \text{ N.m};$$

$$M_{pinhão} = 187 \text{ N.m};$$

$$\Phi_{pinhão} = 50 \text{ mm},$$

$$\Phi_{roda\ dentada} = 540 \text{ mm};$$

$$r_{veio} = 65 \text{ mm}.$$

Assim, determinou-se a potência transmitida:

$$P = \eta_{motor} \times M_{motor} = 314,16 \times 7,5 \cong 2356 \text{ W}, \quad (2.1)$$

Assim, a velocidade de rotação do pinhão será:

$$\eta_{pinhão} = \frac{P}{M_{pinhão}} = 12,6 \text{ rad/s} \quad (2.2)$$

Com estes dados determinou-se a velocidade de rotação da roda dentada:

$$\eta_{roda\ dentada} = \frac{\Phi_{pinhão}}{\Phi_{roda\ dentada}} \times \eta_{pinhão} = 1,17 \text{ rad/s} \quad (2.3)$$

O Binário transmitido pela roda dentada será:

$$M_{t\ roda\ dentada} = \frac{P}{\Phi} \cong 2019 \text{ N.m} \quad (2.4)$$

Este binário irá transmitir à chaveta, posicionada em torno do veio, uma força, por uma área de contacto, correspondente ao comprimento da chaveta na zona linear e metade da sua altura, que resultará numa tensão de contacto:

$$F_{Chaveta} = \frac{M_{t\ roda\ dentada}}{r_{veio}} \cong 31 \text{ kN} \quad (2.5)$$

$$\sigma_{Chaveta} = \frac{F_{Chaveta}}{A_{contacto}} = \frac{31\ 000}{26,5 \times \frac{14}{2}} = 168 \text{ MPa} \quad (2.6)$$

Esta era a tensão de contacto transmitida a apenas uma chaveta, na disposição original. Apenas com intuito meramente académico, avalie-se o dimensionamento desta chaveta, tendo em conta $\sigma_c^{chaveta} = 200 \text{ MPa}$, que representa um valor adequado ao efeito:

$$n = \frac{\sigma_c^{chaveta}}{\sigma_{Chaveta}} \approx 1,20. \quad (2.7)$$

De facto, este coeficiente de segurança não é o mais adequado, não atingindo sequer o valor de 1,5. Se pensarmos que este não é um veio a rodar constantemente, mas sim um veio com movimento oscilatório e rápido entre várias posições angulares por peça produzida, a

inércia daqui resultante causa um esforço enorme sobre este elemento. É natural que tenha sofrido esmagamento.

Continuando a avaliação à solução adotada, temos agora que dividir esta tensão pelo número de chavetas implementado. No entanto, esta divisão não pode ser linear, já que existe um fator de redução a aplicar[5], devido a desvios inevitáveis nos rasgos dos escatéis para as chavetas. Inevitavelmente devido a esses desvios, há chavetas que estarão mais solicitadas que outras. A solução com 4 chavetas não é usual, no entanto, considera-se que para duas chavetas, se deverá ter em conta $n_{redução} = 1,5$. Então ir-se-á considerar $n_{redução} = 3$ para as 4 chavetas deste caso:

$$F_{p/chaveta} = \frac{F_{chaveta}}{n_{redução}} = \frac{31\,000}{3} \cong 10,3\text{ kN} \quad (2.8)$$

$$\sigma_{p/chaveta} = \frac{F_{por\ Chaveta}}{A_{contacto}} \cong 55,5\text{ MPa.} \quad (2.9)$$

$$n_{p/chaveta} = \frac{\sigma_c^{chaveta}}{\sigma_{por\ Chaveta}} \approx 3,6. \quad (2.10)$$

Assim sendo, o coeficiente de segurança desta nova solução adotada é bastante aceitável.

Para concluir, verifique-se também ao corte:

$$A_{corte} = 27 \times \left(40 - \frac{27}{2}\right) + \left(\frac{\pi \times 13,5^2}{2}\right) \cong 1002\text{ mm}^2 \quad (2.11)$$

$$\tau = \frac{F_{p/haveta}}{A_{corte}} \leq \frac{\sigma_c}{2n} \leftrightarrow n = \frac{\sigma_c \times A_{corte}}{2 \times F_{p/chaveta}} = \frac{200 \times 1002}{2 \times 10300} \cong 9,7 \quad (2.12)$$

Pelos cálculos apresentados, o corte nas chavetas não deverá constituir problema.

2.2.2. Geometria das ferramentas de conformação

No setor industrial produtivo torna-se útil que as máquinas sejam o mais versáteis possível, particularmente numa pequena/média empresa que produz um leque muito diversificado de componentes. Talvez a maior limitação da conceção original desta máquina

se prenda exatamente nesta temática. As ferramentas originais de conformação e corte deste equipamento apresentavam falhas de dimensionamento graves e limitações que estreitavam o leque de utilização desta máquina. Essencialmente este conjunto de componentes, onde é dada a forma ao produto final, é o principal componente a alterar.

Observando maquinaria e ferramentas mais modernas e mais precisas, partindo da sabedoria e experiência do Sr. Alberto Godinho, responsável pela Ferramentaria da empresa, com décadas de trabalho nesta área, chegou-se a um esboço do que poderá ser uma boa solução para configuração do novo conjunto de ferramentas. Foi então desenhado um novo conjunto de ferramentas, representado na Figura 2.11.

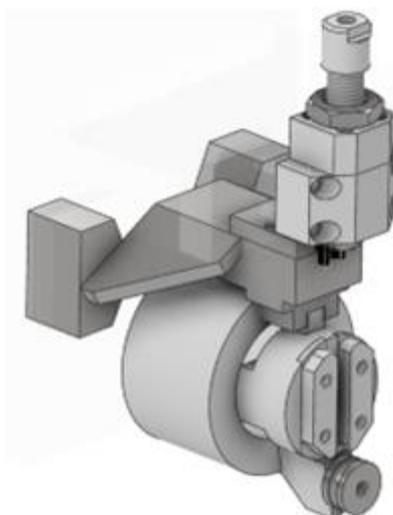


Figura 2.11. Representação tridimensional do esboço do novo conjunto de ferramentas de conformação.

A conceção desta nova configuração teve como mote a simplicidade, a robustez e a versatilidade. O primeiro problema a resolver foi a falta de afinação entre a extremidade do guia e o elemento cortante. Na solução original, à medida que os elementos inerentes ao corte (guia e ferramenta de corte) se iam desgastando, a folga entre eles ia aumentando. Como não eram passíveis de afinação, iam progressivamente cortando o arame de forma cada vez mais deficitária, até que a deformação causada no momento do corte impedisse o mínimo do rigor dimensional nos produtos finais. Nesse sentido, foi criado um sistema de corte composto por um subconjunto guia e um subconjunto de corte, ambos passíveis de afinação.

O subconjunto de guia, representado na Figura 2.12, é composto por um elemento de base (uma parte roscada e outra sem rosca), um parafuso, uma porca e um guia. O guia será introduzido na parte inferior da base e fixado por um parafuso na lateral. Por sua vez, na

zona superior da base, funcionará um parafuso como batente para o guia, com orifício a todo o comprimento, que dará passagem do arame. Esse parafuso é passível de afinação para, mediante o desgaste, poder reposicionar o guia (avancando essa ferramenta), que estará também fixo à base por um parafuso lateral, de modo a não desencaijar da base. Quando o guia estiver suficientemente desgastado, pode ser facilmente substituído, mantendo a integridade de todo o restante sistema. Esta solução contrasta com a anterior que não permitia afinações para compensar o desgaste dos componentes.

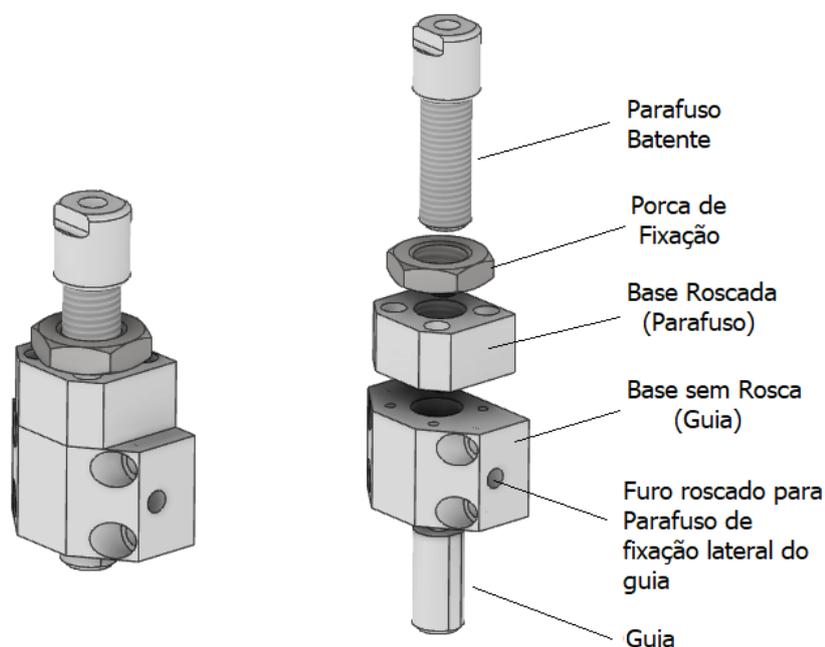


Figura 2.12. Representação tridimensional do esboço do subconjunto guia.

O subconjunto de corte, ilustrado na Figura 2.13, é composto por uma base de corte, um elemento cortante e uma tampa. A base de corte contém um rasgo para o elemento de corte. Este elemento consiste numa barra afiada e ajustada à dimensão do(s) arame(s) a utilizar e foi desenhado com comprimento suficiente para ir sendo afiada e afinada, para a frente e para trás dentro do rasgo inerente. A tampa irá fixar o elemento cortante à base cortante. Esta nova configuração para as ferramentas de corte proporcionará um corte limpo e que respeitará o rigor dimensional desejado.

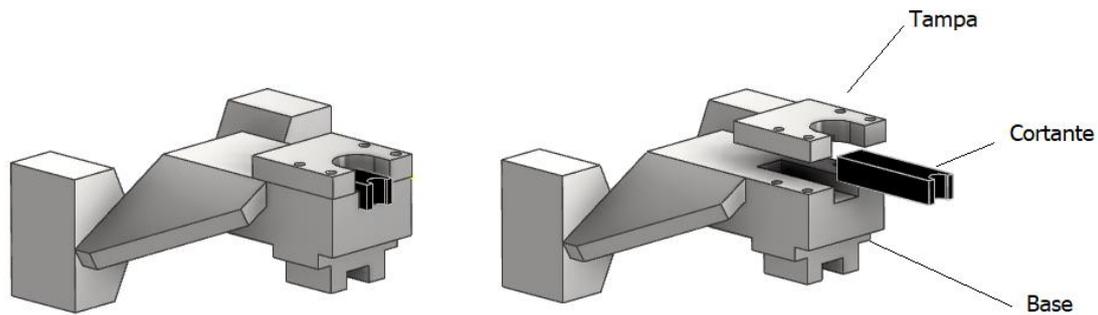


Figura 2.13. Representação tridimensional do esboço do subconjunto de corte.

O outro problema a resolver relaciona-se com os raios de curvatura que se pretende atingir na operação de dobragem. Esses raios eram originalmente impostos pela dimensão dos roletes, os quais eram relativamente grandes, principalmente se tivermos em conta que o novo projeto vislumbra a produção de peças com dobragens segundo raios muito pequenos. Outro problema aí patente é o facto de que cada rolete estar fixo à estrutura por apenas um parafuso (classe 8.8) e casquilho. Assim sendo, esses parafusos poderiam estar sujeitos a um elevado esforço de corte resultante dos esforços provenientes da operação de dobragem.

Para colmatar os problemas supracitados, abandonaram-se os roletes por completo. Optou-se por uma configuração para o conjunto de conformação contendo uma base circular semelhante à original, mas com duas pistas simétricas e equidistantes, onde se irão aparafusar posições com a forma geométrica apropriada para alcançar os raios pretendidos, como mostra na Figura 2.14. Cada par de posições terá dois raios de dobragens diferentes e poderá ser facilmente invertido na posição ou substituído. Outra vantagem deste sistema é o facto de parte do esforço inerente ao processo de dobragem do arame passar a ser absorvido pelo contacto entre os posições e as pistas da base, aliviando o esforço sobre os parafusos de ligação.

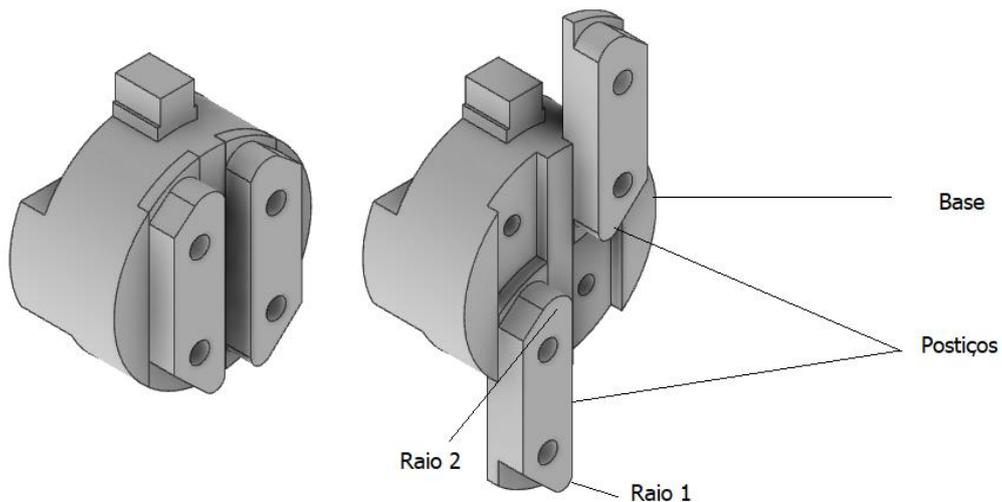


Figura 2.14. Representação tridimensional do esboço subconjunto de conformação.

Por último, o elemento móvel do sistema de conformação foi idealizado com uma configuração bastante semelhante à original, que pode ser vista na Figura 2.15. Este conjunto é composto por uma base onde se irá aparafusar um rolete. No entanto, a base contém dois furos para ajustar a posição do rolete. A colocação do rolete mais próximo do eixo de rotação permite obter peças com dobragens mais próximas entre si e também mais próximas das extremidades da peça. Por outro lado, o rolete mais distante permite que a ferramenta de dobragem não tenha de exercer tanto esforço para atingir o binário necessário. Assim, haverá ainda mais uma afinação possível para este sistema.

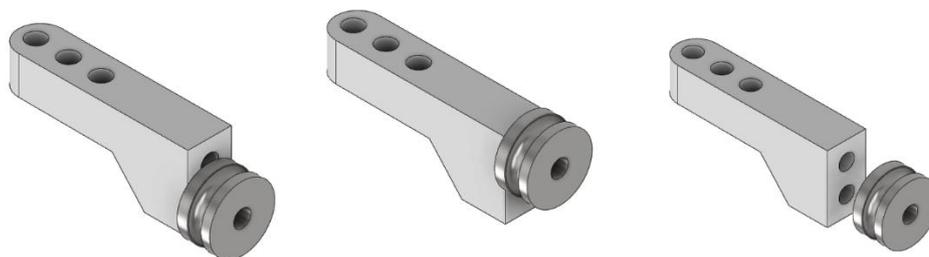


Figura 2.15. Representação tridimensional do elemento móvel do sistema de conformação.

Adicionar-se-á também mais um movimento e componente para garantir a fixação do arame à zona fixa do equipamento, tal como o demonstrado na Figura 1.8. Este componente irá garantir que a matéria-prima se mantém na mesma posição, enquanto desliza e é

conformada. Isso acontecerá, pois esta ferramenta estará posicionada no centro geométrico da base de conformação, entre os dois postigos e obrigará o arame a manter-se na posição correta para a sua conformação.

2.2.3. Parábola

Para que seja funcional, a parábola deverá ter uma base resistente para sustentar a massa inerente ao arame, hastes para o manter no local designado, para além de uma disposição harmoniosa e favorável ao desenrolamento e preparação do arame. Para além disso, deverá ter um sistema eficaz de acionamento do motor para rotação do seu tabuleiro, de modo que o motor das polias não seja sobrecarregado enquanto estes planificam o arame. Deve também existir uma estrutura circular em volta da parábola, para facilitar a sua rotação quando o arame está a ser colocado na máquina e os motores ainda se encontram inativos. Esta estrutura poderá também amparar algum desenrolamento súbito de arame sob tensão, que poderá eventualmente comprometer a integridade física dos trabalhadores nas proximidades, trazendo também um acréscimo de segurança.

Assim sendo, para melhorar a parábola original fizeram-se algumas alterações, com o propósito de reduzir a massa, aumentar a eficiência, aumentar a segurança e a praticidade do conjunto original. Foram eliminadas as hastes grosseiras e os apoios desadequados. Na sua vez, foram posicionados tubos pelos locais por onde o arame irá passar durante o processo de desenrolamento. Foi criada uma gaiola em aço à volta da parábola que irá auxiliar a movimentação da parábola enquanto se prepara uma nova bobine de arame, assim como amparar e resguardar desenrolamentos inesperados do arame.

Foi também redesenhado o sistema de acionamento da rotação da parábola, cuja estrutura se encontra patente na Figura 2.16. Em suma, uma das hastes que guia o arame não é fixa e foi criado um mecanismo, esquematizado na Figura 2.17, que lhe confere um movimento oscilatório tipo alavanca, estando a sua extremidade inferior ligada à base, por intermédio de molas e na extremidade superior dá-se a passagem de arame. Existe também um par de sensores, estrategicamente colocados para trabalhar com o movimento oscilatório da haste. Assim, enquanto os roletes planificam o arame, exercem tração sobre o mesmo. Quando houver tração suficiente, a haste móvel irá oscilar, até ao ponto em que toca no sensor que aciona o motor elétrico, que fará o tabuleiro rodar e desenrolar o arame. Quando atingem um determinado ponto, ativam o outro sensor que desliga o motor.



Figura 2.16. Novo sistema de acionamento do motor da Parábola.

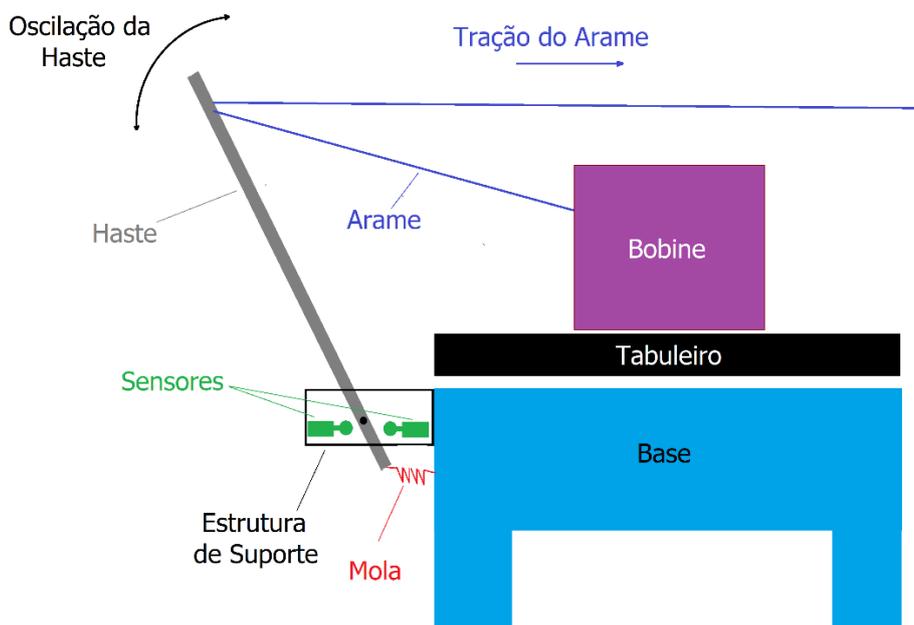


Figura 2.17. Esquema simplificado do mecanismo de acionamento.

Por fim, quando as alterações estiverem devidamente concluídas, tanto a parábola como a carcaça da máquina, serão pintadas com esmalte apropriado à proteção contra os agentes que poderão danificar a superfície dos componentes, no ambiente industrial em que a máquina está inserida.



Figura 2.18. Parábola alterada, em fase de restauro.

2.2.4. Sistemas de segurança

No sentido de dotar a máquina de maior segurança, introduziram-se novos elementos. Um dos mais importantes neste aspeto são os sensores de posição/interruptores. Estes elementos eletromecânicos, detetam a posição de certos elementos e dão sinal à máquina para agir de determinada forma. Normalmente, estes sensores funcionam em pares, um no início e outro no final de dado percurso.

No entanto, há que compreender que, por muito robusta que seja a construção destes componentes, existe sempre possibilidade de falha, principalmente quando estamos em ambiente industrial, em que estes componentes ficam suscetíveis a impactos, pó de esmeril, que interfere com componentes eletrónicos, e a qualquer outra circunstância que possa levar a uma situação de falha do componente. Nesse sentido, adicionou-se um sensor de segurança para que os elementos que ficam em risco de rotura grave e de comprometer o funcionamento da máquina sejam salvaguardados. Este sensor será apenas ativo caso os sensores principais falhem por algum motivo, de forma inesperada e tem como objetivo prevenir prejuízos avultados. Estes poderão ser consequência da rotura de componentes de grande dimensão e

importância para o processo, ou até de custos que a paragem da própria máquina irá representar para a empresa, decorrentes de falhas de entrega ou acumulação de volumes desnecessários e inesperados de trabalho. Exemplos desses conjuntos podem ser analisados na Figura 2.19.



(a)



(b)

Figura 2.19. Sistemas de 3 sensores: (a) Sensores no movimento de translação das ferramentas de conformação (b) Sensores no movimento de rotação do braço de conformação.

3. ANÁLISE NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DA ETAPA DE CONFORMAÇÃO

A simulação numérica da etapa de conformação de arame tem como principal objetivo conhecer os esforços a que cada uma das ferramentas está sujeita durante o processo de dobragem do arame. Desta forma, é possível ter uma estimativa das forças necessárias para fazer o correto dimensionamento dos elementos estruturais. A análise numérica foi realizada com o programa académico de elementos finitos DD3IMP, especialmente desenvolvido para estudar processos de fabrico envolvendo deformação plástica e contacto com ferramentas rígidas. Tanto o pré-processamento como a visualização dos resultados foram feitos com recurso ao programa comercial GiD 9.0.6.

Posteriormente, todos os componentes mecânicos foram devidamente produzidos, receberam o devido tratamento térmico e foram montados no respetivo lugar (ver Figura 3.1(a)). Os componentes elétricos e motores estão também funcionais e devidamente assembled. No entanto, devido à falta de componentes eletrónicos oriundos da China, não houve oportunidade para instalar um novo CPU adequado aos novos componentes e características da ferramenta, impedindo assim a automatização do processo produtivo, através da programação dos movimentos da máquina. No entanto, para que se pudesse fazer um estudo ao retorno elástico, foi criada uma caixa de comandos manuais. A finalidade desta ferramenta, que podemos ver na Figura 3.1 (b), é meramente académica, dado que deixará de ser usada, depois de instalado o novo sistema eletrónico e informático.



(a)



(b)

Figura 3.1. (a) novas ferramentas produzidas e montadas; (b) caixa de comandos manuais da máquina.

3.1. Materiais e ferramentas de conformação

Relativamente ao material do arame, foram utilizados nas simulações dois aços distintos, nomeadamente o aço macio C9D e um aço galvanizado de alta resistência. Ambos os arames apresentam 6 mm de diâmetro, sendo que o comprimento considerado na simulação foi de 150 mm. O modelo adotado na simulação numérica assume um comportamento elastoplástico isotrópico para o arame, sendo as ferramentas de conformação assumidas rígidas.

O comportamento elástico do arame é ditado pela lei de Hooke, definido pelo módulo de Young e pelo coeficiente de Poisson. Para ambos os aços estudados, consideraram-se valores padrão do aço, ou seja, $E=210$ GPa e $\nu=0,3$. O comportamento plástico foi definido pela lei de encruamento de Swift, cuja relação tensão real-deformação plástica é dada por:

$$\sigma = K(\varepsilon_0 + \bar{\varepsilon}^p)^n \quad (3.1)$$

onde K , ε_0 e n são os parâmetros da lei de Swift. Estes parâmetros foram calibrados para cada um dos aços utilizando as propriedades mecânicas disponibilizadas pelos fornecedores, nomeadamente a tensão de cedência, a tensão de rotura e o alongamento na rotura.

Tabela 3.1. Parâmetros da lei de Swift utilizados para definir o comportamento de cada um dos aços.

Material	K [MPa]	ε_0	n
Aço macio C9D	835	0,008804	0,077
Aço galvanizado de alta resistência	2250	0,000577	0,090

Os parâmetros da lei de Swift utilizados na simulação para definir o encruamento do material estão listados na Tabela 3.1 para cada um dos aços. A evolução da tensão real com a deformação plástica definida pela lei de Swift é apresentada na Figura 3.2, comparando os dois aços estudados. A resistência mecânica do aço galvanizado de alta resistência é muito superior à resistência do aço macio C9D. De acordo com a norma DIN EN 10270-1[6], desenvolvida para regulamentar o arame de aço para molas mecânicas, os aços de molas podem ser categorizados em três grupos de acordo com a resistência mecânica do material. O Anexo A apresenta a gama de valores de resistência à tração admissíveis para cada uma das categorias. Por sua vez, o aço macio C9D utilizado no presente trabalho apresenta uma gama de resistência mecânica inferior e está regulamentado pela norma ISO 16120-2[7], também presente no Anexo A.

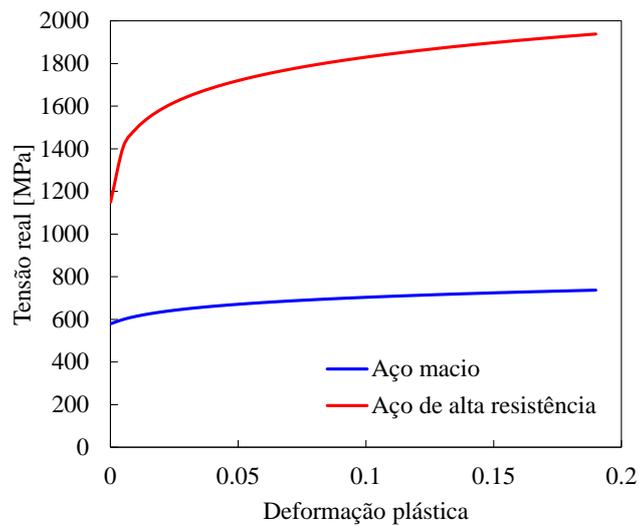


Figura 3.2. Evolução da tensão real com a deformação plástica prevista pela lei de Swift para cada um dos aços.

Para além da geometria e propriedades do arame, o modelo de elementos finitos também requer a definição geométrica de cada uma das ferramentas envolvidas no processo de conformação de arame. De forma a quantificar o efeito das propostas de alteração da geometria das ferramentas de conformação, será feita a análise numérica tanto do conjunto de ferramentas originais como da proposta de alteração da geometria. A representação dos modelos simplificados das ferramentas originais e idealizadas é feita na Figura 3.3. De notar que é uma representação simplificada contendo apenas os elementos essenciais às dobragens.

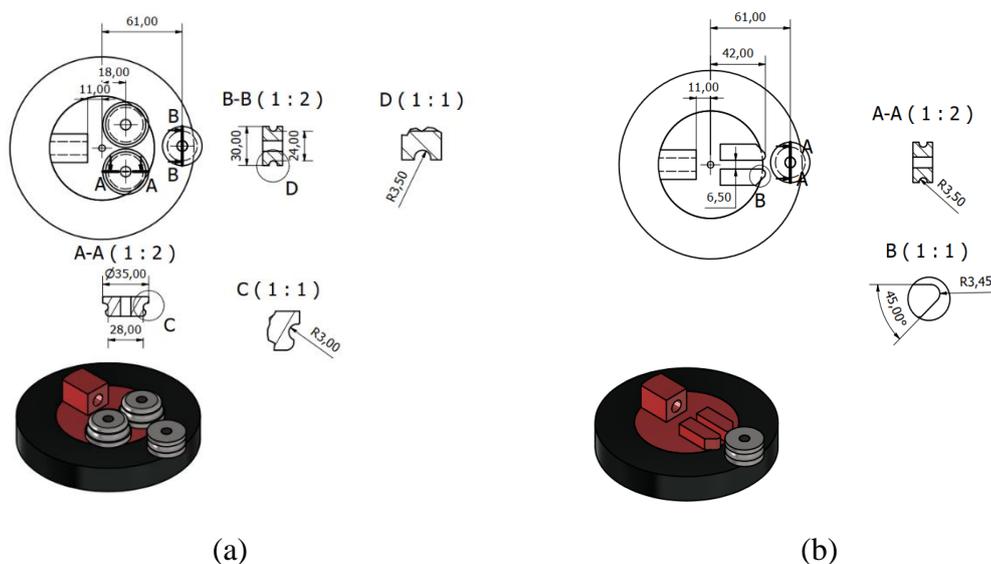


Figura 3.3. Representação simplificada das ferramentas de conformação: (a) máquina original; (b) proposta de alteração.

O processo de dobragem simulado consiste na realização de duas dobragens no mesmo plano, mas com orientações opostas, criando um componente final em forma de “S”. Tanto na versão original como na proposta de alteração, existem ferramentas fixas e uma ferramenta móvel (com um movimento de rotação). O movimento de rotação do rolete móvel é aplicado de forma incremental, permitindo avaliar as forças de reação em cada ferramenta e em cada instante do processo de conformação, com o objetivo de perceber os problemas que a máquina apresentava com a solução original e de validar o modelo criado.

3.2. Modelo de elementos finitos

Devido às condições de simetria, apenas é modelada meia largura do arame[8], permitindo reduzir o custo computacional da simulação. O arame foi discretizado com um total 10800 elementos finitos hexaédricos lineares, apresentando 200 elementos na direção do comprimento e 6 elementos na direção radial do arame. A superfície exterior das ferramentas que podem estabelecer contacto com o arame foi modelada tendo em conta a geometria apresentada na Figura 3.3. Foram consideradas condições de contacto sem atrito entre as ferramentas e o arame.

De forma simplificada, podemos dividir este processo de conformação em 4 etapas essenciais, retratadas na Figura 3.4. Na primeira etapa dá-se o início do processo com a aproximação do arame guiado às ferramentas, ou seja, movimento linear do arame para a posição onde irá ocorrer a primeira dobra, imposto através de deslocamento prescrito na extremidade esquerda do arame (Figura 3.4 (a)). De seguida, na segunda etapa dá-se a primeira dobragem do arame através do movimento de rotação (no sentido horário) do rolete móvel (Figura 3.4 (b)). Na terceira etapa, o rolete móvel afasta-se, libertando o arame (retorno elástico) para que este avance para a posição onde se irá realizar a segunda dobragem (Figura 3.4 (c)). Por último, na quarta etapa dá-se a segunda dobragem do arame através do movimento de rotação (no sentido anti-horário) do rolete móvel (Figura 3.4 (d)). Os valores dos ângulos de rotação impostos ao rolete móvel foram selecionados de forma obter dobragens de aproximadamente 90° em ambas as dobragens. A posição angular do rolete móvel definida no modelo numérico está exemplificada na Figura 3.5, sendo o ângulo positivo no primeiro quadrante e negativo no quarto quadrante. Apesar de a Figura 3.4 apresentar a divisão do processo de conformação para as ferramentas originais, um

procedimento idêntico foi realizado para o caso da proposta de alteração da geometria das ferramentas.

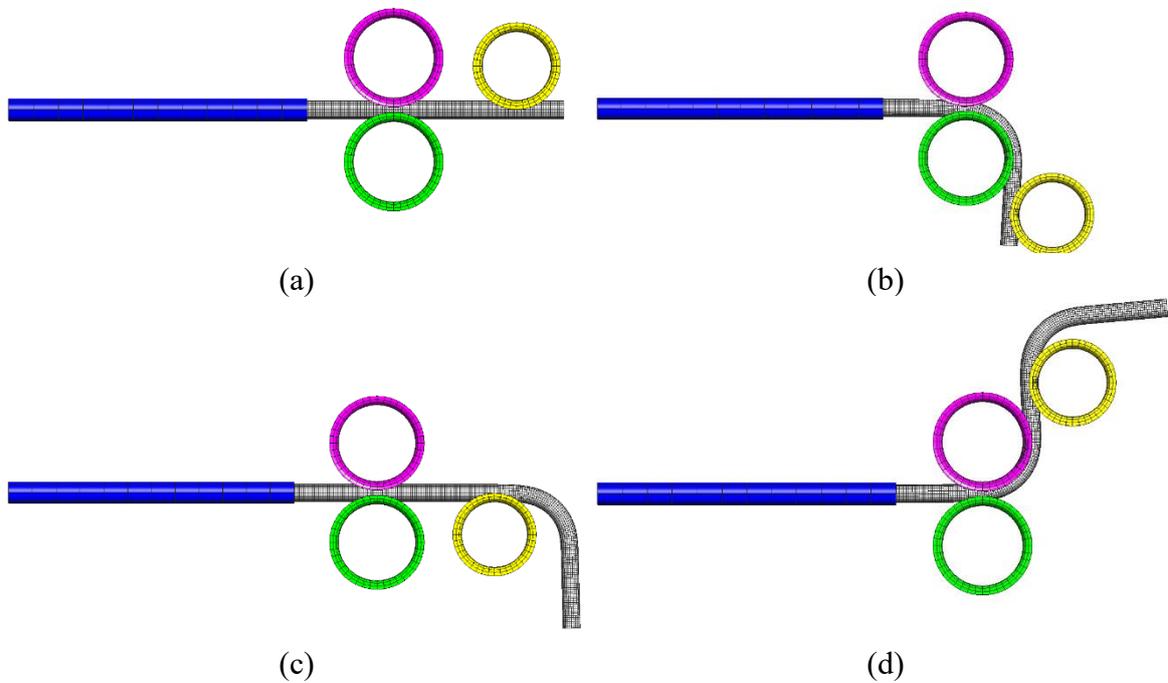


Figura 3.4. Divisão do processo de conformação em 4 etapas utilizando as ferramentas originais: (a) etapa 1; (b) etapa 2; (c) etapa 3; (d) etapa 4.

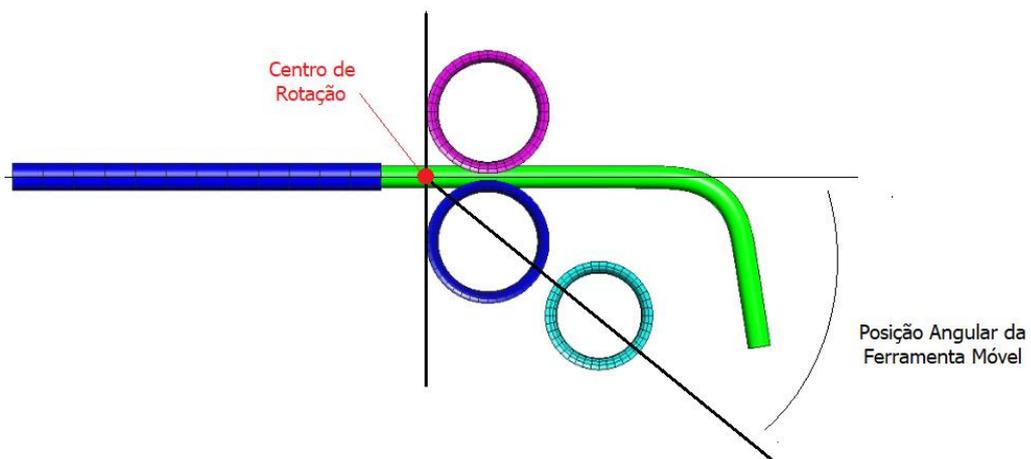


Figura 3.5. Definição da posição angular do rolete móvel no modelo numérico.

3.3. Ferramentas de conformação originais

3.3.1. Forças de dobragem

Durante o processo de conformação de arame, as ferramentas de conformação ficam sujeitas a esforços que, por sua vez, são transmitidos (totalmente ou parcialmente) aos elementos de ligação (parafusos). Tendo em consideração o arame de aço macio com 6 mm de diâmetro, a evolução da força de contacto prevista numericamente para cada rolete em função da posição angular do rolete móvel é apresentada na Figura 3.6, utilizando as ferramentas de conformação originais. A força a que os roletes fixos estão sujeitos é superior à força exercida sobre o rolete móvel. Os esforços envolvidos em cada uma das duas dobragens são semelhantes, estando o rolete fixo inferior ativo na primeira dobragem (Figura 3.6 (a)) e o rolete fixo superior ativo na segunda dobragem (Figura 3.6 (b)). O valor máximo da força de contacto nos roletes fixos é de aproximadamente 2,1 kN quando se realiza a dobragem do arame de aço macio. Utilizando o arame de aço de alta resistência, os esforços envolvidos aumentam de intensidade, como se mostra na Figura 3.7. As evoluções das forças de contacto em cada um dos roletes são idênticas às obtidas anteriormente para o arame de aço macio, mas agora a força máxima tem cerca de 4,6 kN de intensidade.

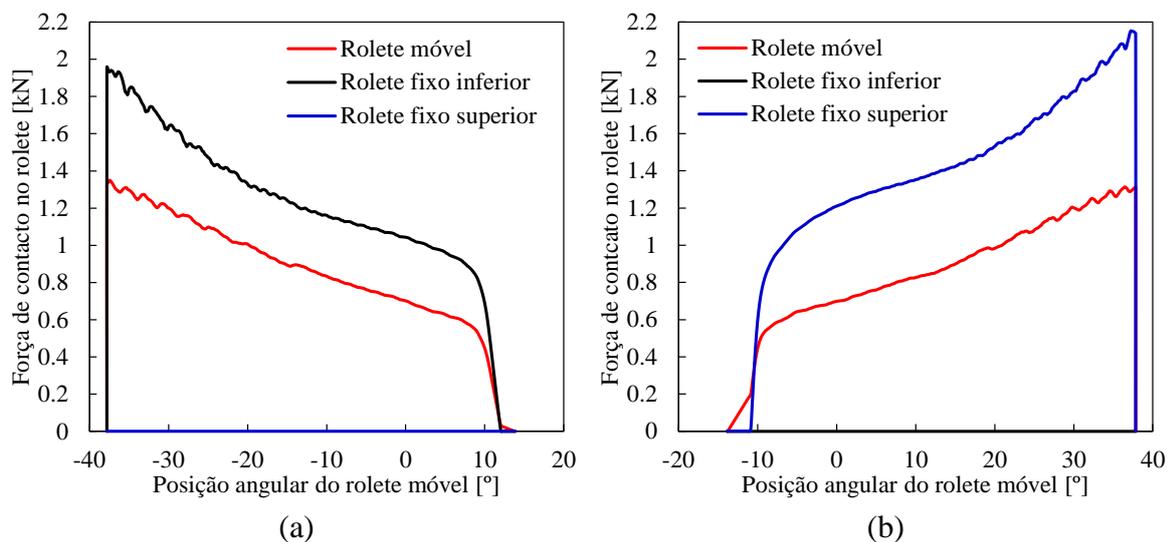


Figura 3.6. Previsão numérica da evolução da força de contacto em cada rolete utilizando as ferramentas originais e arame de aço macio: (a) primeira dobragem; (b) segunda dobragem.

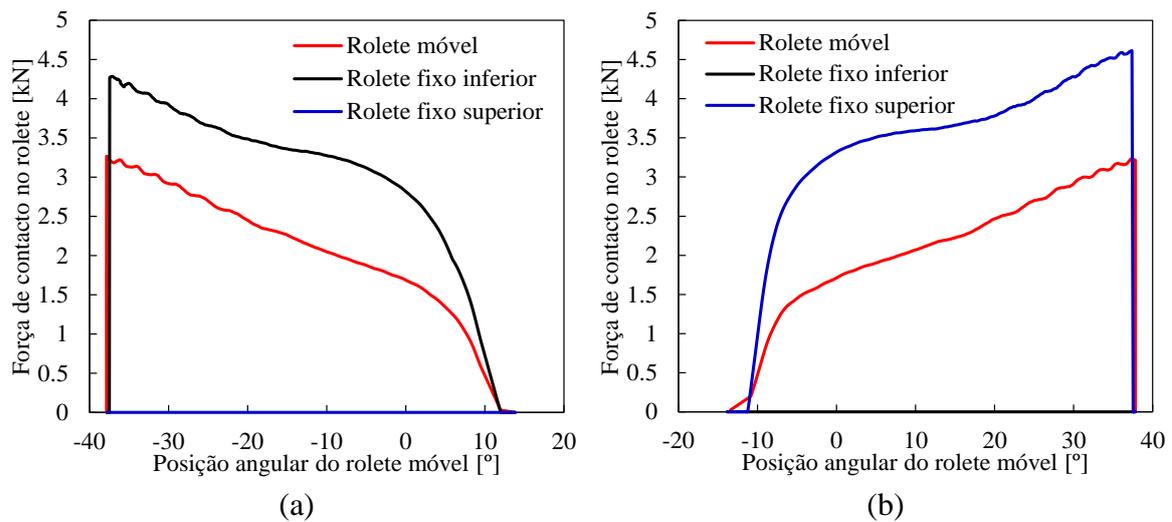


Figura 3.7. Previsão numérica da evolução da força de contacto em cada rolete utilizando as ferramentas originais e arame de aço de alta resistência: (a) primeira dobragem; (b) segunda dobragem.

As forças a que os roletes estão sujeitos podem ser transmitidas aos parafusos de ligação. Assim, estas forças devem ser utilizadas na verificação do dimensionamento dos parafusos. A indicação que havia era que esta máquina fabricava componentes em arame de aço de alta resistência e arame macio C9D. Havia evidências de parafusos partidos em conjuntos de ferramentas originais danificados. Como o arame de alta resistência é o que causa maior esforço na ferramenta, vamos verificar o dimensionamento dos parafusos nessa situação. Eram parafusos M8, classe 8.8, com de 20 mm de comprimento e área da secção transversal de $36,6 \text{ mm}^2$. A Figura 3.8 esquematiza a situação em causa.

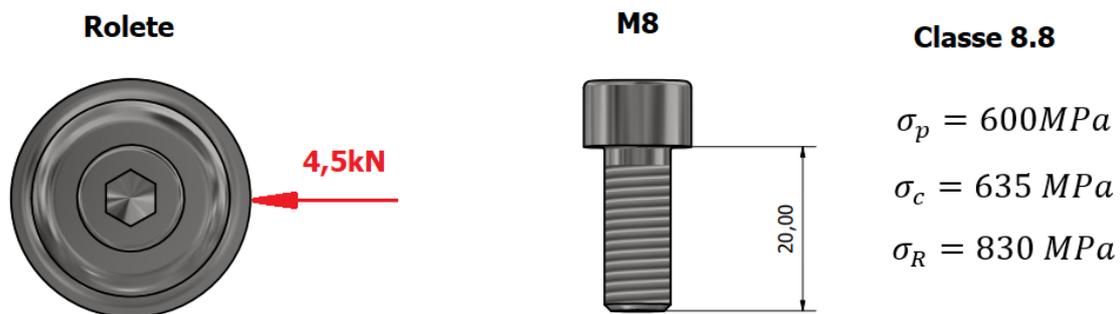


Figura 3.8. Identificação do esforço e do parafuso em estudo.

Esta verificação vai partir do pressuposto que a pré-carga representa 85% da força de prova e que o coeficiente de atrito entre o rolete e a base (superfícies em contacto) é de 0,20[9].

A força de prova é dada por:

$$F_p = \sigma_p \times A_t = 600 \times 36,6 \cong 22 \text{ kN}, \quad (3.2)$$

onde σ_p é a tensão de prova para a classe de resistência 8.8. Assumindo que a força de aperto são 85% da força de prova, teremos então:

$$F_i = 0,85 \times F_p \cong 18,7 \text{ kN}. \quad (3.3)$$

Como não existe nenhuma força de separação do rolete em relação à base, a força normal de contacto (compressão) entre o rolete e a base é igual força de aperto. O que resulta numa força de atrito máxima gerada entre o rolete e base de conformação dada por:

$$F_a = \mu \times F_i = 0,20 \times 18,7 \text{ kN} \cong 3,7 \text{ kN} < Q = 4,5 \text{ kN}, \quad (3.4)$$

A força de atrito é insuficiente para anular a força externa a que o parafuso fica sujeito durante a operação de dobragem do arame ($Q = 4,5 \text{ kN}$). Assim, vai existir deslizamento na interface de contacto entre o rolete e a base, e, portanto, o parafuso vai estar sujeito a tensões de corte dadas por:

$$\tau_{m\acute{a}x} = \frac{Q}{A_t} = \frac{4500}{36,6} = 123 \text{ MPa} \quad (3.5)$$

Sabendo a tensão de cedência do material do parafuso (classe 8.8), é possível calcular o coeficiente de segurança em relação a uma falha associada a um carregamento estático:

$$\tau_{m\acute{a}x} \leq \frac{\sigma_c}{2n} \leftrightarrow n = \frac{\sigma_c}{2 \times \tau_{m\acute{a}x}} = \frac{635}{2 \times 123} = 2,6 \quad (3.6)$$

Ao nível estático, a condição é respeitada, já que $n > 1,5$, que representa um mínimo nas boas práticas de dimensionamento para suportar algumas eventuais sobrecargas. No entanto, o parafuso vai estar sujeito a um carregamento pulsante durante o funcionamento da máquina, implicando uma análise à fadiga. Devido à pré-carga, o parafuso está sujeito a um esforço axial de tração (constante) e um esforço de corte (pulsante) na interface com o rolete devido à carga externa pulsante. A complexidade do estado de tensões na zona crítica do parafuso dificulta a análise precisa à fadiga. No entanto, é espectável uma redução significativa do coeficiente de segurança relativamente a uma falha por fadiga, principalmente se se assumir uma vida infinita.

3.3.2. Curvatura da dobra

O raio de curvatura do arame na zona da operação de dobragem é essencialmente ditado pela geometria dos roletes, nomeadamente o raio das pistas dos roletes fixos. Neste estudo numérico, as pistas dos roletes fixos tinham um raio de 13,5 mm (ver Figura 3.3). A Figura 3.9 apresenta previsão numérica da geometria final do arame após as duas operações de dobragem, comparando a situação do arame de aço macio com o arame de aço de alta resistência.

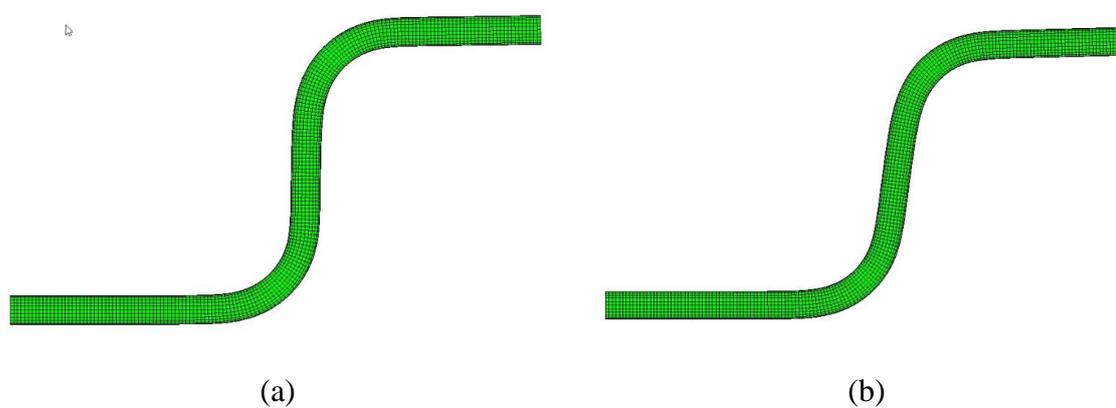


Figura 3.9. Previsão numérica da geometria final do arame após as duas operações de dobragem utilizando as ferramentas originais: (a) arame de aço macio; (b) arame de aço de alta resistência.

Após as duas operações de dobragem, a previsão numérica da distribuição da curvatura do arame ao longo do seu comprimento é apresentada na Figura 3.10, avaliada no lado inferior e superior do arame. De notar que a curvatura é definida como o inverso do raio de curvatura, ou seja, a curvatura é zero quando o arame está linear. A curvatura é sempre maior na zona interior da dobra, sendo o seu valor nas zonas de dobragem aproximadamente igual ao inverso do raio de curvatura das pistas dos roletes fixos ($1/13,5 \text{ mm}=0,075 \text{ mm}^{-1}$), como se mostra na Figura 3.17. O efeito da resistência mecânica do aço sobre o valor da curvatura na zona das dobragens é desprezável, como se mostra através da comparação dos resultados para o aço macio (Figura 3.17 (a)) e para o aço de alta resistência (Figura 3.17 (b)).

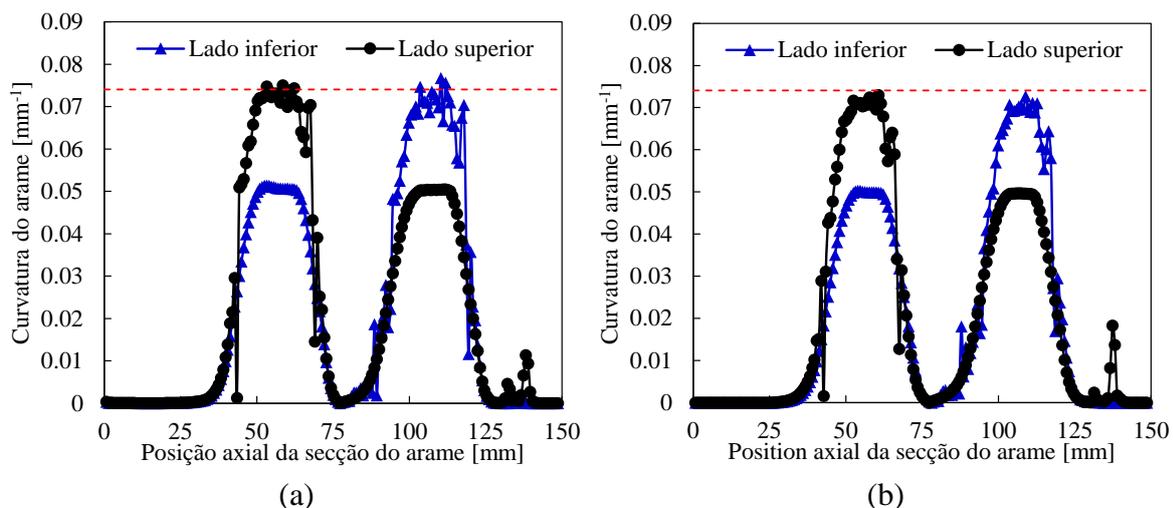


Figura 3.10. Previsão numérica da curvatura do arame em cada dobra utilizando as ferramentas originais: (a) arame de aço macio; (b) arame de aço de alta resistência.

3.3.3. Retorno elástico

O conhecimento do retorno elástico após cada uma das operações de dobragem é particularmente importante no momento de afinação da máquina para a obtenção de um produto dentro das tolerâncias dimensionais exigidas pelo cliente. É importante conhecer o valor do ângulo com vista a tornar o seu processo de afinação mais célere por parte dos técnicos. De realçar que estes ângulos devem ser ajustados a cada afinação mediante mudança de lote, ferramentas e etc, visto que, até a mesma bobine de arame, tem variações na estrutura interna do material e, conseqüentemente, comportamentos mecânicos diferentes.

A simulação numérica permite obter a configuração do arame imediatamente antes do fim da operação de dobragem e depois de remover o contacto dos roletes. Desta forma é possível fazer uma previsão numérica do ângulo de dobra antes e depois do retorno elástico, como se mostra na Figura 3.19, para ambos os aços e para cada operação de dobragem. As diferenças entre a primeira e a segunda dobra não são significativas, sendo as diferenças inferiores a 1°. Antes do retorno elástico, o ângulo da dobra do arame é semelhante para ambos os aços (macio e de alta resistência), sendo este essencialmente definido pela posição do rolete móvel. Por outro lado, após o retorno elástico, o efeito da resistência mecânica do material do arame é significativo.

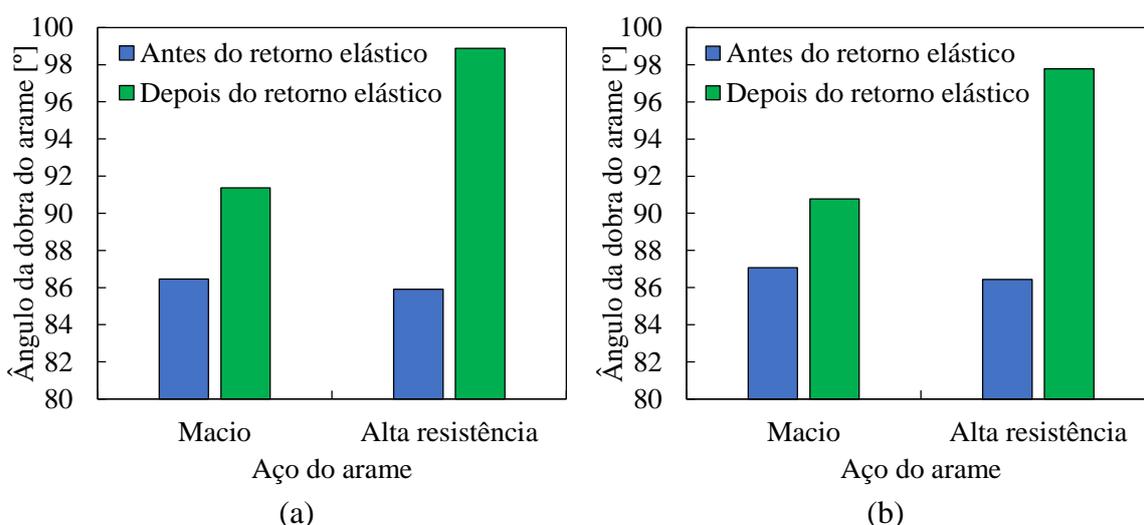


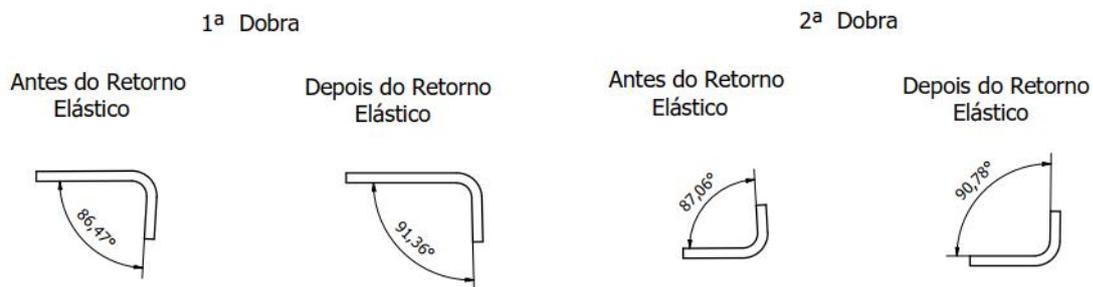
Figura 3.11. Previsão numérica do ângulo de dobra antes e depois do retorno elástico, utilizando as ferramentas originais e os dois aços para o arame: (a) primeira dobragem; (b) segunda dobragem.

Tabela 3.2. Previsão dos ângulos de retorno elástico em cada uma das operações de dobragem com as ferramentas originais, comparando os dois aços para o arame.

Material	Ângulo de retorno elástico na primeira dobragem [°]	Ângulo de retorno elástico na segunda dobragem [°]
Aço macio C9D	4,9	3,7
Aço galvanizado de alta resistência	12,9	11,4

Os ângulos de retorno elástico avaliados numericamente em cada uma das operações de dobragem estão listados na Tabela 3.2 e representados na Figura 3.12, comparando as duas tipologias de arame em estudo. O aumento da resistência mecânica do arame conduz a um aumento do ângulo de retorno elástico. No entanto, a diferença de retorno elástico entre a primeira e a segunda dobra é reduzida, particularmente no aço de alta resistência. O facto de o retorno elástico ser mais reduzido na segunda dobragem é consequência do ligeiro aumento da deformação plástica localizada, resultante de a extremidade esquerda do arame (fixa na simulação) estar mais próxima da zona de dobragem. Isto também faz aumentar ligeiramente as forças de conformação, como se pode verificar na Figura 3.6 e Figura 3.7.

(1)



(2)

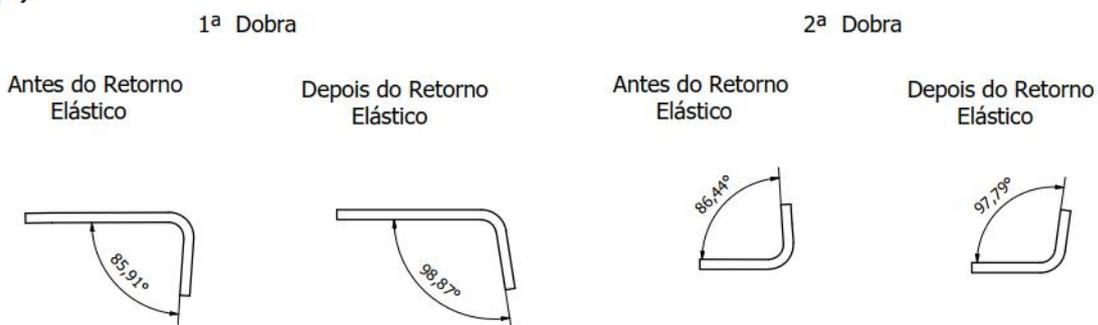


Figura 3.12. Ângulos de conformação e retorno elástico de ambas tipologias de arame, utilizando as ferramentas originais: (1) aço macio C9D; (2) aço galvanizado de alta resistência.

3.4. Novas ferramentas de conformação

3.4.1. Forças de dobragem

À semelhança do exposto para as ferramentas originais, de forma a conseguir escrutinar os esforços que atuam nos elementos de ligação das novas ferramentas projetadas, previu-se numericamente a evolução das forças de contacto entre o arame e as novas ferramentas, durante o processo de conformação do arame, em função da posição angular da ferramenta móvel. Mais uma vez, como referência, foram usados o aço macio C9D e o aço galvanizado de alta resistência, ambos de 6 mm de diâmetro. A evolução das forças de contacto na nova solução construtiva tem uma configuração semelhante às das ferramentas originais, no entanto a magnitude dos esforços previstos é consideravelmente maior, como se pode verificar na Figura 3.13 e Figura 3.14. Isto deve-se à, também considerável, redução de raio sobre o qual é efetuada a conformação nas novas ferramentas, em relação às

ferramentas originais. Desta feita, o maior valor registado no aço macio C9D é de cerca de 6,9 kN, enquanto no aço galvanizado de alta resistência é de cerca de 15,6 kN.

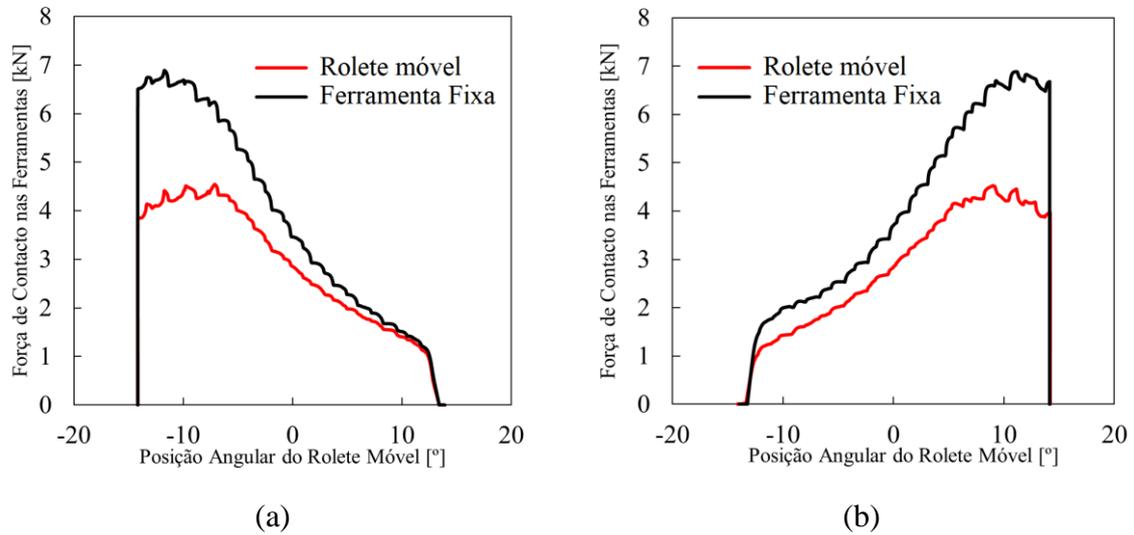


Figura 3.13. Previsão numérica da evolução da força de contacto em cada rolete utilizando as ferramentas novas e arame de aço macio: (a) primeira dobragem; (b) segunda dobragem.

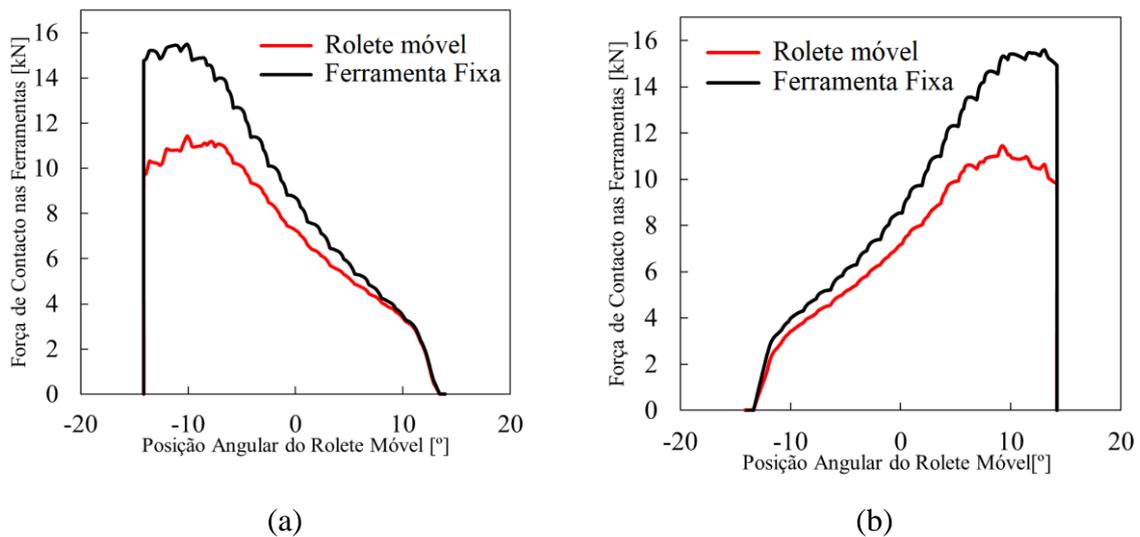


Figura 3.14. Previsão numérica da evolução da força de contacto em cada ferramenta utilizando as ferramentas novas e arame de aço de alta resistência: (a) primeira dobragem; (b) segunda dobragem.

É importante realçar que, nesta simulação, optou-se por considerar que os dois postigos foram definidos por uma única ferramenta. Apesar de existirem dois componentes diferentes, geralmente estes nunca estão sujeitos a esforços em simultâneo. Daí que, ainda

que o modelo represente apenas uma ferramenta, consegue distinguir-se a qual delas correspondem as forças extraídas desta simulação, mediante a dobra em estudo.

Esta máquina está a ser construída tendo em vista o fabrico de um componente em arame de aço macio C9D. O esforço máximo da ferramenta fixa de conformação nesse caso é de $F_{m\acute{a}x} \approx 6,9 \text{ kN}$, no instante em que a direção da força é paralela à direção em que se desloca o arame, com sentido contrário, como ilustrado na Figura 3.15. Assim sendo, o esforço deixa de coincidir com o centro geométrico, gerando um momento torsor em torno deste, o que resulta num carregamento excêntrico. Com efeito, nos parafusos atuará um esforço cortante primário, resultante da força de corte e um esforço cortante secundário, resultante do momento torsor gerado.

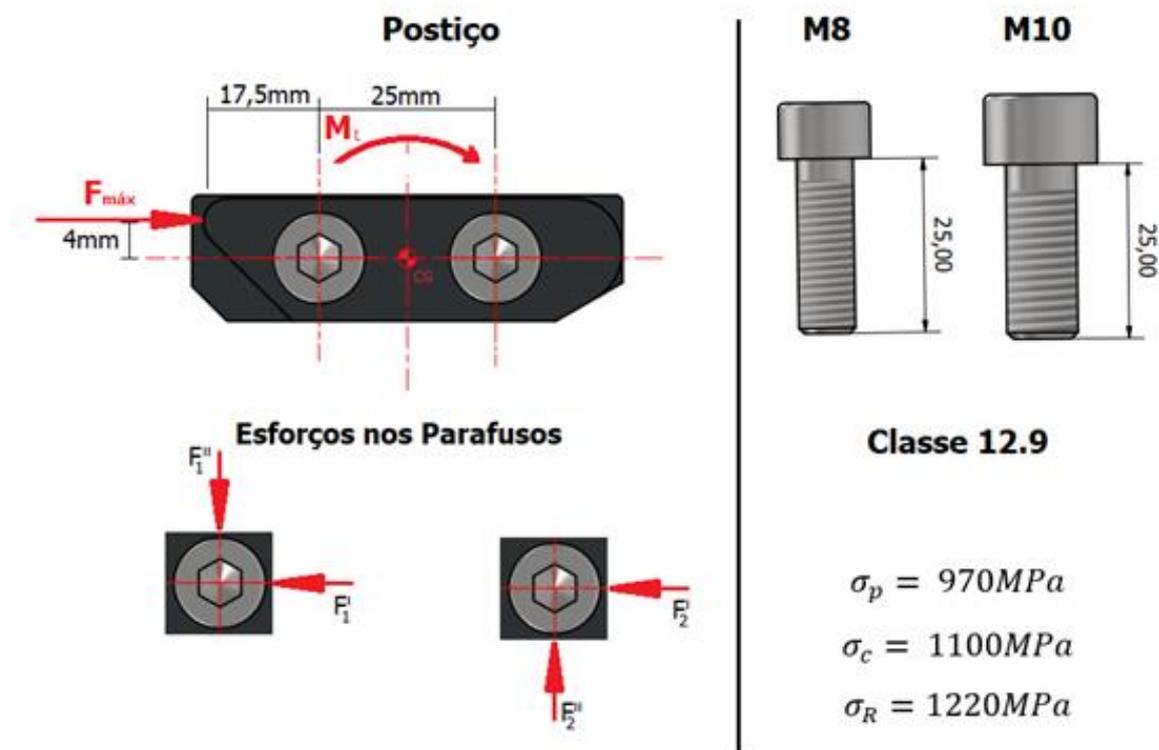


Figura 3.15. Dados do esforço em estudo nas novas ferramentas.

Esta verificação será feita para os parafusos M8 e vai pressupor que a pré-carga representa 85% da força de prova e que o coeficiente de atrito entre o postiço e a pista da base é de 0,20.

Como tal:

$$\begin{cases} F_{m\acute{a}x} = 6,9 \text{ kN}, \\ M_t = 6900 \times 0,004 = 27,6 \text{ N.m} \end{cases} \quad (3.7)$$

Sabendo que existem 2 parafusos em cada posio, o esforço cortante primário em cada parafuso   dado por:

$$F_1^I = F_2^I = \frac{F_{m\acute{a}x}}{N} \cong 3,5 \text{ kN} \quad (3.8)$$

Por sua vez, o esforço cortante secundário gerado pelo momento torsor será dado por:

$$F_1^{II} = F_2^{II} = \frac{M_t \times r_i}{\sum r_i^2} = \frac{27,6 \times 0,0125}{2 \times (0,0125)^2} \cong 1,1 \text{ kN} \quad (3.9)$$

Assim, o esforço cortante resultante por parafuso será:

$$Q_{m\acute{a}x} = \sqrt{3500^2 + 1100^2} \cong 3,7 \text{ kN} \quad (3.10)$$

Considerando a utilizao de parafusos M8 com classe de resistência 12.9, a tensão de corte máxima no parafuso   então:

$$\tau_{m\acute{a}x} = \frac{Q_{m\acute{a}x}}{A_t} = \frac{3700}{36,6} = 101 \text{ MPa} \quad (3.11)$$

O valor do coeficiente de segurança relativamente ao dimensionamento esttico   dado por:

$$\tau_{m\acute{a}x} \leq \frac{\sigma_c}{2n} \leftrightarrow n = \frac{\sigma_c}{2 \times \tau_{m\acute{a}x}} = \frac{1100}{2 \times 101} \approx 11 \quad (3.12)$$

Uma vez que $n > 1,5$, o parafuso respeita as condioes de esttica impostas pelo carregamento gerado pela conformao do arame C9D. No entanto, a aplicao da pré-carga no parafuso gera forças de atrito que podem anular o esforço cortante externo. Assim, a força de prova será:

$$F_p = \sigma_p \times A_t = 970 \times 36,6 \cong 35 \text{ kN}, \quad (3.13)$$

Assumindo que a força de aperto representa 85% da força de prova, teremos então:

$$F_i = 0,85 \times F_p \cong 30 \text{ kN}, \quad (3.14)$$

Considerando um coeficiente de atrito de 0,2, esta força de aperto resulta numa força de atrito entre o posio e a pista da base (interface de contacto) que dada por:

$$F_a = \mu \times F_i = 0,20 \times 30 \cong 6 \text{ kN} > Q_{m\acute{a}x} = 3,7 \text{ kN}, \quad (3.15)$$

Como a força de atrito resultante da pré-carga no parafuso   superior   força de corte máxima desenvolvida durante a conformao do C9D, não se d deslizamento entre as

superfícies a ligar e o esforço de corte no parafuso é nulo. Consequentemente, os parafusos não estarão sujeitos a fadiga e são adequados à tarefa em causa.

No entanto, poderá vir a ser necessário conformar arame de aço de alta resistência, que gera esforços bastante superiores na ferramenta. Assim, repetindo os cálculos com os esforços gerados pela conformação de Arame de Aço Galvanizado, este resultado já não se verifica ($F_a = 6 \text{ kN} < Q_{m\acute{a}x} = 8,4 \text{ kN}$). Como tal, existirá escorregamento.

Não obstante, foram realizados novamente os cálculos para o parafuso M10, caracterizado por uma área de secção transversal $A_t \cong 58 \text{ mm}^2$. Aqui foram obtidos os seguintes resultados:

$$Q_{m\acute{a}x} = 8,4 \text{ kN};$$

$$\tau_{m\acute{a}x} = 145 \text{ MPa};$$

$$n_{est\acute{a}tica} = 3,8;$$

$$F_p = 56 \text{ kN},$$

$$F_i = 48 \text{ kN};$$

$$F_a = 9,6 \text{ kN} > Q_{m\acute{a}x}.$$

Neste caso, caso os pressupostos adotados se verifiquem, o parafuso M10 não sofreria fadiga e seria suficiente para suportar o esforço para a conformação do arame de aço de alta resistência.

3.4.2. Curvatura da dobra

O raio de curvatura do arame é ditado maioritariamente pela geometria das ferramentas fixas. Na nova solução em estudo, estes componentes (postiços) têm uma forma arredondada na extremidade em que se dá a conformação, caracterizada por um raio de 3,45 mm e foram assim caracterizados no estudo numérico efetuado (ver Figura 3.3 (b)). A comparação da geometria final da situação do arame macio e do arame de alta resistência pode ser feita através da análise da Figura 3.16.

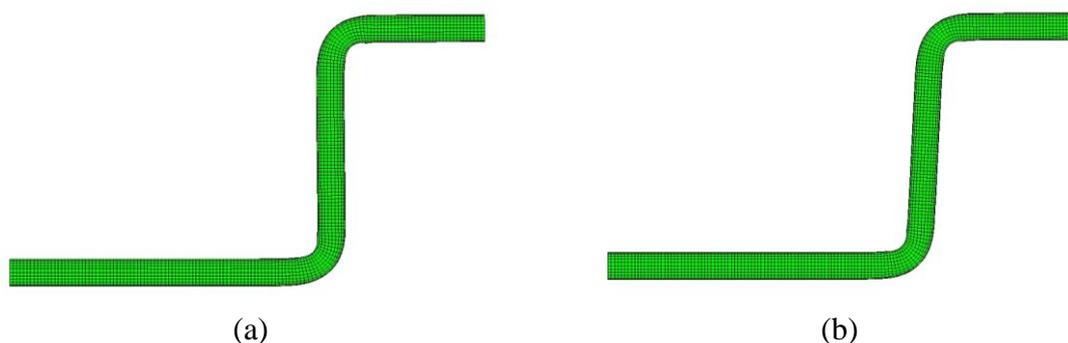


Figura 3.16. Previsão numérica da geometria final do arame após as duas operações de dobragem utilizando as novas ferramentas: (a) arame de aço macio; (b) arame de aço de alta resistência.

Após as duas operações de dobragem, a previsão numérica da distribuição da curvatura do arame ao longo do seu comprimento é apresentada na Figura 3.17, avaliada no lado inferior e superior do arame. A curvatura é sempre maior na zona interior da dobra, sendo, aqui também, o seu valor nas zonas de dobragem aproximadamente igual ao inverso do raio de curvatura das pistas dos roletes fixos ($1/3,45 \text{ mm} = 0,29 \text{ mm}^{-1}$), como se mostra na Figura 3.17. Comparando o aço macio (Figura 3.17 (a)) e o aço de alta resistência (Figura 3.17 (b)) nesta nova solução de ferramentas, voltamos a perceber que o efeito da resistência mecânica do aço sobre o valor da curvatura na zona das dobragens é desprezável.

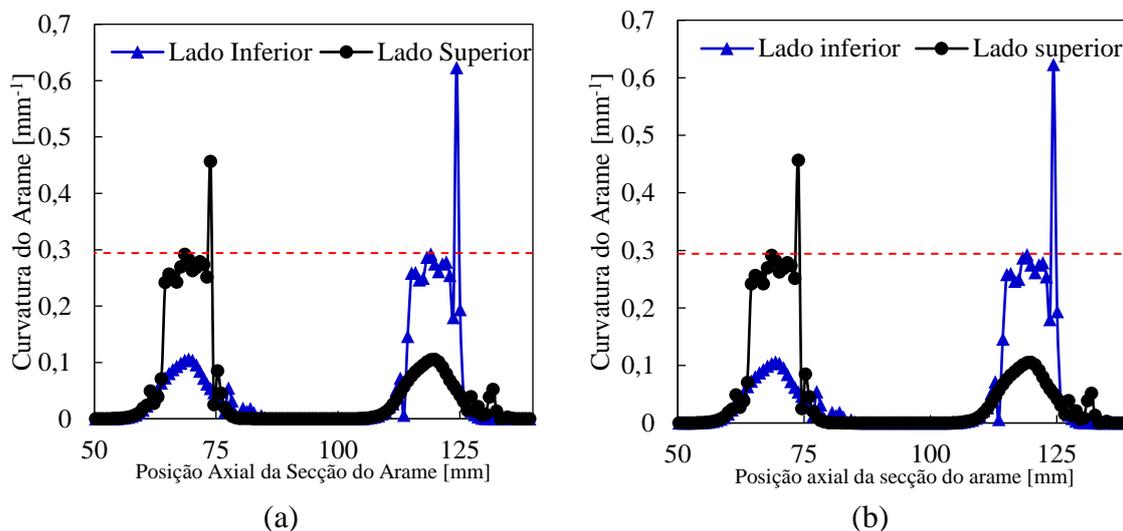


Figura 3.17. Previsão numérica da curvatura do arame em cada dobra utilizando as novas ferramentas: (a) arame de aço macio; (b) arame de aço de alta resistência.

Com as ferramentas devidamente montadas na máquina de conformação, reúnem-se as condições para testar as operações de dobragem de forma a criar raios de conformação

que se pretendiam que fossem menores do que 5 mm, medidos pelo interior da dobra. Foram realizadas duas operações de dobragem de arame para cada material em estudo, aço macio C9D e aço galvanizado de alta resistência. O ângulo de dobra foi de aproximadamente 90° em ambos os casos. Nesse sentido, para cada teste foram medidos os raios de curvatura internos e externos recorrendo à ferramenta *Quick Scope* da *Mitutoyo*, que permite realizar medições rigorosas, tanto a nível angular, como radial ou de distâncias lineares (ver Figura 3.18).

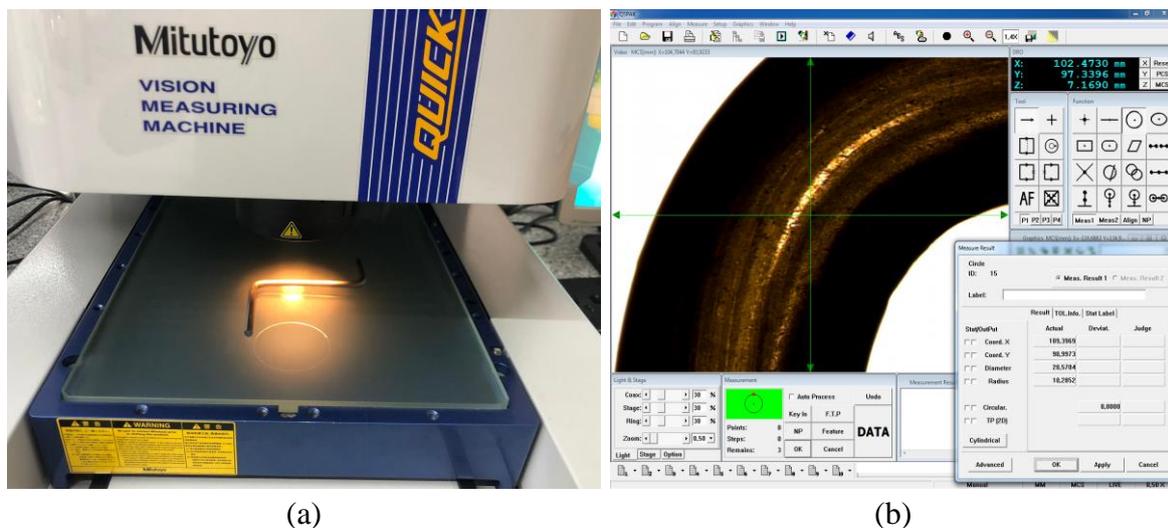


Figura 3.18. Avaliação de componente em teste, fabricado pelas novas ferramentas: (a) disposição do componente na ferramenta de medição “Quick Scope” da Mitutoyo; (b) resultado gerado pela ferramenta “Quick Scope”.

A Tabela 3.3 resume os resultados obtidos experimentalmente, em cada um dos ensaios de dobragem, para os raios de curvatura na zona interior e exterior do arame de aço com 6 mm de diâmetro. Existe uma boa reprodutibilidade dos testes de dobragem uma vez que a diferença nas medições do raio de curvatura entre ensaios idêntico é inferior a 0,5 mm. Tal como previamente verificado numericamente, o efeito da resistência mecânica do material não é um fator dominante no raio de curvatura alcançado. No entanto, existe uma ligeira tendência ao aumento do raio de curvatura com o aumento da resistência mecânica do aço. Para ambos os aços, a curvatura na zona interior da curva varia entre 0,22 e 0,24 mm^{-1} , enquanto a curvatura na zona exterior da curva varia entre 0,09 e 0,1 mm^{-1} . Estes valores estão em concordância com as previsões numéricas apresentadas na Figura 3.17.

Tabela 3.3. Raios de curvatura medidos experimentalmente na zona interior e exterior para um arame de aço com 6 mm de diâmetro.

	Aço macio	Aço de alta resistência
zona interior [mm]	4,10	4,62
	4,18	4,12
zona exterior [mm]	10,17	11,09
	10,28	11,11

3.4.3. Retorno elástico

Na nova solução construtiva, o estudo deste fenómeno torna-se imperativo. Estas serão as novas ferramentas da máquina de conformar arame e todo o auxílio que possa tornar o seu processo de afinação mais célere é bem-vindo. Os técnicos de afinação despendem de horas em processos iterativos de minuciosos avanços e recuos de ferramentas no sentido de as posicionar corretamente de modo que as forças de contacto sejam exercidas nos pontos corretos, para atingir o rigor dimensional exigido pelos clientes.

Ainda que a matéria-prima apresente um comportamento mecânico muitas vezes imprevisível, devido às variações na sua estrutura interna, a previsão angular do retorno elástico, mesmo que aproximada, tem como objetivo aproximar a primeira iteração ao pretendido, no momento da afinação. O efeito desta previsão será ainda amplificado, tendo em conta que se trata de uma nova ferramenta, com a qual os técnicos ainda não tiveram qualquer contacto.

Com a simulação numérica, conseguimos agora prever o retorno elástico sofrido pelas duas tipologias de arame em causa, com as novas ferramentas projetadas. A Figura 3.19 esquematiza os resultados obtidos pela simulação das duas dobragens em estudo. Como era de esperar, o ângulo das dobras é essencialmente ditado pela posição da ferramenta móvel. Antes do retorno elástico, o ângulo da dobra do arame é semelhante para ambos os aços e as diferenças entre a primeira e a segunda dobra rondam 1°. No entanto, conclui-se mais uma vez que o efeito das diferentes resistências mecânicas é notório após o retorno elástico.

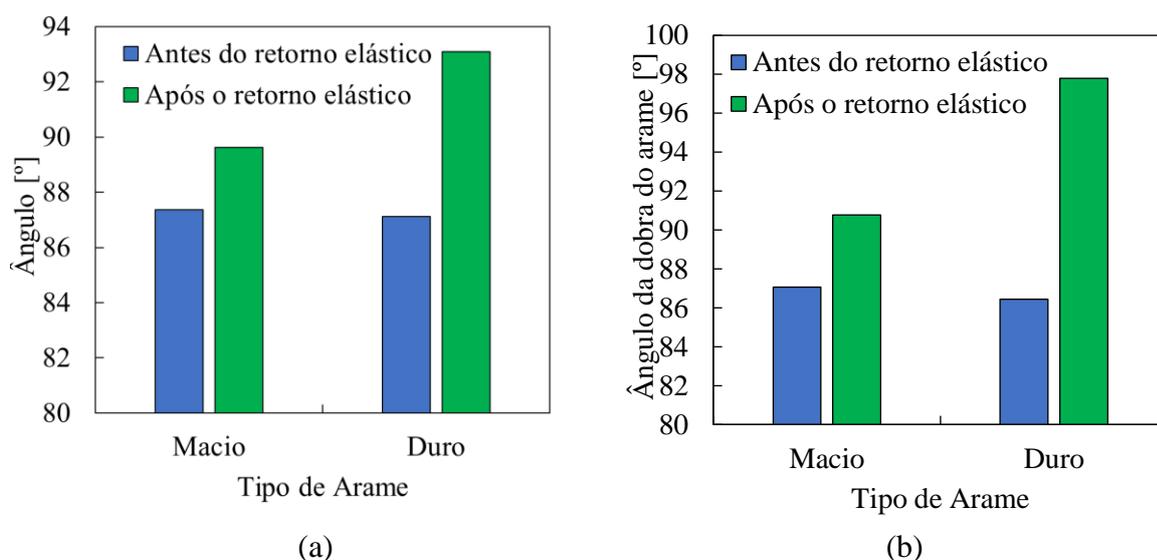


Figura 3.19. Previsão numérica do ângulo de dobra antes e depois do retorno elástico, utilizando as novas ferramentas e os dois aços para o arame: (a) primeira dobragem; (b) segunda dobragem.

Tabela 3.4. Previsão dos ângulos de retorno elástico em cada uma das operações de dobragem com as novas ferramentas, comparando os dois aços para o arame.

Material	Ângulo de retorno elástico na primeira dobragem [°]	Ângulo de retorno elástico na segunda dobragem [°]
Aço macio C9D	2,28°	2,20°
Aço galvanizado de alta resistência	5,97°	6,07°

Verifica-se então, pela Tabela 3.4, que o aumento da resistência mecânica do arame é proporcional ao aumento do ângulo de retorno elástico. Verifica-se também que o retorno elástico é mais reduzido na segunda dobragem do Arame Macio, no entanto, o mesmo já não acontece no Aço de Alta Resistência, que aí regista um ligeiro aumento do retorno elástico. Apesar disso, as forças de conformação mantêm-se as maiores na segunda dobragem para ambos os casos, como aconteceu anteriormente. As várias etapas das dobragens estão representadas por tipos de arame na Figura 3.20.

(1)



(2)

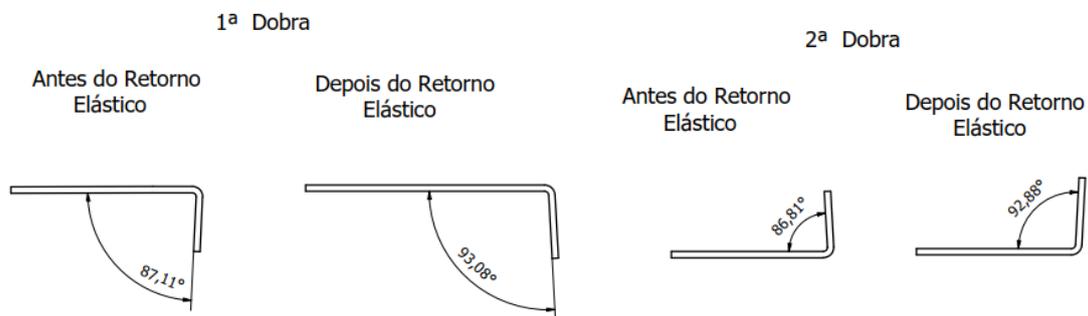


Figura 3.20. Ângulos de conformação e retorno elástico de ambas tipologias de arame, utilizando as novas ferramentas: (1) Aço macio C9D (2) Aço galvanizado de alta resistência.

De forma a efetuar uma avaliação experimental do retorno elástico após a dobragem do arame, foram realizadas 5 dobras em condições idênticas para cada um dos aços estudados. A operação de dobragem foi controlada com recurso à caixa de comandos manuais para posicionar o rolete móvel no ângulo pretendido, com auxílio de uma suta. De forma a poder fazer a comparação entre resultados numéricos e experimentais, foram realizadas dobragens sobre um ângulo de conformação de 86° . Os ângulos de dobra medidos experimentalmente após retorno elástico estão apresentados na Tabela 3.5. para o mesmo aço, a dispersão entre ensaios é bastante reduzida. Por outro lado, o ângulo após retorno elástico é superior no aço de alta resistência em comparação com o aço macio.

Tabela 3.5. Ângulos de dobra registados nas peças produzidas pelas novas ferramentas, após retorno elástico para um ângulo de conformação de 86°.

Ensaio	Aço macio C9D	Aço galvanizado de alta resistência
1 ^a	88,71°	94,22°
2 ^a	88,98°	94,24°
3 ^a	89,72°	93,46°
4 ^a	88,69°	92,64°
5 ^a	87,65°	93,46°
Valor médio	88,75°	93,60°

A média dos ângulos de retorno elástico medidos experimentalmente para cada um dos aços em estudo é apresentada na Tabela 3.6. O retorno elástico do aço de alta resistência é aproximadamente 3 vezes superior ao valor medido no aço macio. Isto é consequência de a resistência mecânica do aço de alta resistência ser aproximadamente 3 vezes superior em comparação com o aço macio. A comparação com os resultados numéricos (Tabela 3.4) mostra que para ambos os aços as previsões numéricas estão cerca de 20% abaixo das medições experimentais.

Tabela 3.6. Média dos ângulos de retorno elástico medidos experimentalmente para cada um dos aços em estudo.

Material	Ângulo de retorno elástico [°]
Aço macio C9D	2,75°
Aço galvanizado de alta resistência	7,60°

3.5. Discussão das propostas de alteração

Depois de analisadas e aplicadas as soluções estudadas, importa agora fazer um rescaldo. De uma forma geral, prevê-se que as soluções adotadas sejam adequadas ao propósito a que se destinam. Por um lado, os problemas mecânicos apresentados pela máquina foram resolvidos. O que mais se destacava era, sem dúvida, a folga entre o veio e a roda dentada que transmite potência ao braço de conformação. A solução adotada, de utilizar quatro chavetas em vez de uma, é pouco usual, mas solução deverá garantir o correto funcionamento dos elementos mecânicos envolvidos nesta transmissão de potência. Uma solução mais sólida poderia ser, de base, a ligação por estriados. No entanto, as chavetas são

sempre uma boa solução por funcionarem como fusíveis mecânicos que, em situação de sobrecarga, entram em rotura antes dos componentes que estão a unir, evitando custos maiores.

No que à parábola concerne, as modificações efetuadas mostram-se bem mais práticas que as originais. A sua constituição ficou mais sólida e, ao mesmo tempo, mais leve do que a original. Também se tornou mais funcional, devido ao incremento de uma estrutura que permite rodar a parte móvel deste elemento e auxiliar os operadores nas operações de preparação do arame para a conformação.

Por fim, as ferramentas de conformação. A solução obtida é de facto um sucesso naquele que é o seu objetivo primordial. Conseguiu-se uma ferramenta sólida, que atinge as geometrias requeridas para o componente que criou esta necessidade. Atinge os raios reduzidos (<5 mm) e poderá ir ainda mais além. Uma quase infindável gama de posições das mais variadas medidas e formatos pode ser fabricada, o que torna o cerne desta ferramenta extremamente versátil e será sem dúvida, uma mais-valia para esta empresa.

As ferramentas de corte possibilitam afinação consoante o seu desgaste, de forma a anulá-lo e a proporcionar cortes limpos e que respeitem o rigor dimensional exigido, durante todo o processo produtivo. Já a ferramenta móvel, pode ser mais aproximada das ferramentas de conformação, por forma a realizar dobragens mais próximas da extremidade da peça a produzir, ou ficar mais afastada, de modo que o esforço a que está sujeita na conformação seja minorado.

Ainda em relação às ferramentas de conformação, para conformar arame de alta resistência, com 6 mm de diâmetro, deverá considerar-se outra solução construtiva. Para esse efeito, a utilização de parafusos M10 demonstra-se mais pertinente. Ainda assim, uma solução construtiva que inclua nos posições uma barreira física, como as pistas onde estes são posicionados, mas no sentido do esforço externo seria interessante para estas ferramentas (ver Figura 3.21).

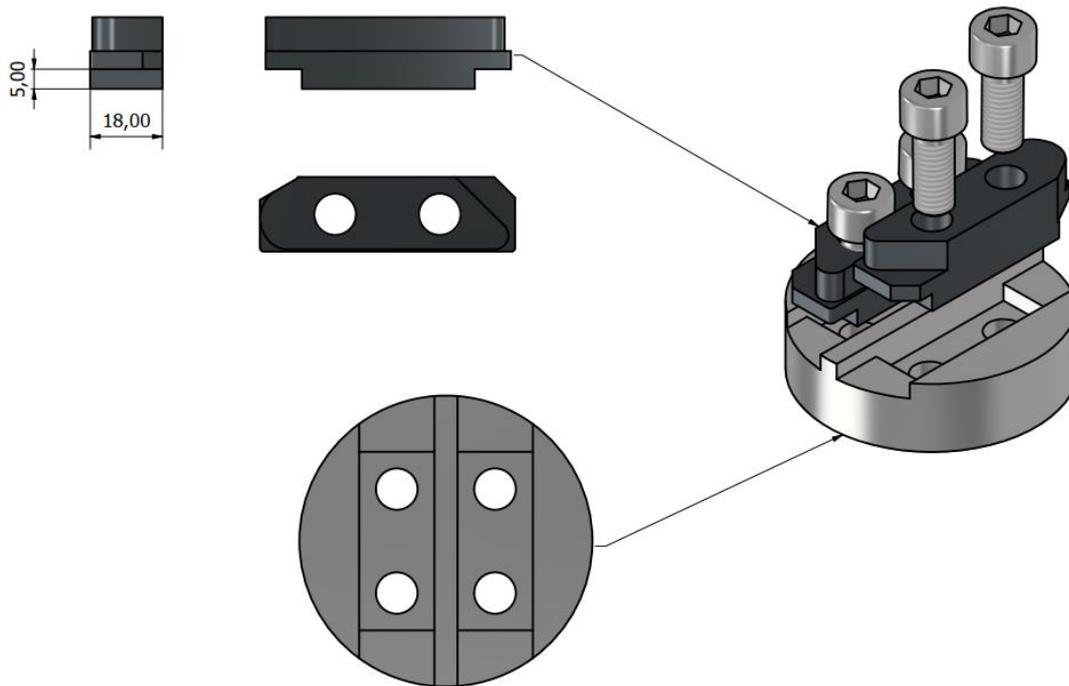


Figura 3.21. Proposta de ferramentas com barreira física ao corte dos parafusos de ligação.

Assuma-se uma tensão de cedência para o aço utilizado na construção (Aço BCW) $\sigma_c = 430 \text{ MPa}$ e recorde-se que o esforço máximo gerado nas ferramentas pela conformação de aço galvanizado de alta resistência na direção de corte é de $F_{m\acute{a}x} = 15,6 \text{ kN}$. Assim, para verificar esta solução ao esmagamento:

$$\sigma_{sup\ contacto} = \frac{F_{m\acute{a}x}}{A_{contacto}} = \frac{15600}{5 \times 18} = 178 \text{ MPa} \quad (3.16)$$

$$n = \frac{\sigma_c^{a\acute{c}o}}{\sigma_{sup\ contacto}} = \frac{430}{178} \approx 2,40. \quad (3.17)$$

Uma solução deste tipo, com uma área de contacto de 5 mm por 18 mm, por exemplo, verifica ao esmagamento e seria suficiente para assegurar que não existiriam problemas de corte nos parafusos.

No que à curvatura concerne, de realçar que os picos presentes nas Figura 3.10 e Figura 3.17 são resultado de acumulação de material devido às dobras efetuadas. Este fenómeno

nem sempre é notório a olho nu, mas constatou-se que, quanto menor é o raio de conformação, mais acumulação é gerada, como se ilustra a Figura 3.22, através de análise detalhada, recorrendo ao *Quick Scope*.

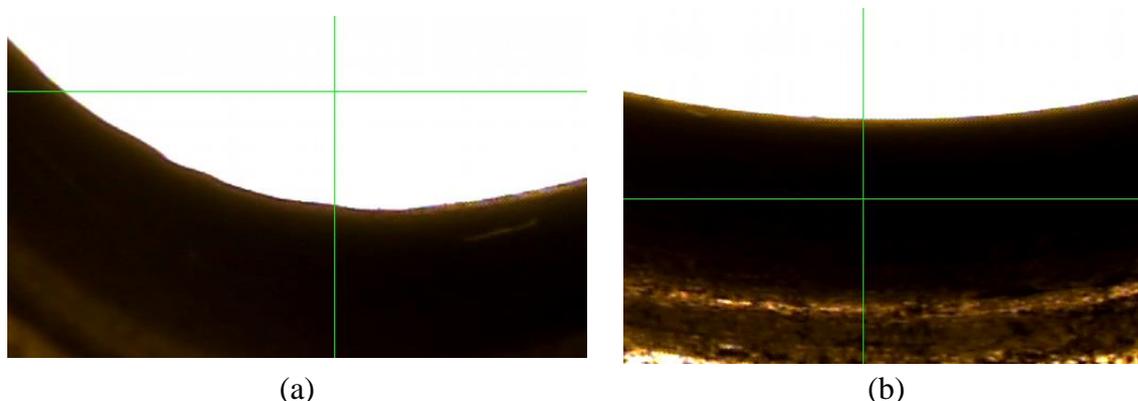


Figura 3.22. Análise das dobras e acumulação de material: (a) dobra com raio interior de 4,10mm; (b) dobra com raio interior de 13,85mm.

Por outro lado, pode também constatar-se que o objetivo neste sentido foi cumprido. As ferramentas originais não conseguiam ir além dos 10 mm de raio de curvatura, para as suas dobragens interiores. Por sua vez, experimentalmente, atingiram-se raios de curvatura que rondam valores entre os 4,10 mm e os 4,62 mm, para as novas ferramentas.

No que ao retorno elástico concerne, podemos concluir pelas simulações que, quanto maiores forem os raios de conformação, maiores serão os valores são registados para este parâmetro. Este facto já foi constatado experimentalmente em estudos anteriores[10]. Por outro lado, de facto, os maiores valores de retorno são registados para os arames que apresentam maior resistência mecânica, como seria expectável. A simulação já apontava nesse sentido e as medições experimentais comprovam-no. Apesar de ainda não ser possível produzir amostragem suficiente através de movimentos automatizados, para validar ou não os resultados obtidos, é interessante comparar os resultados experimentais com as simulações. Há que ter em conta, mais uma vez que o arame de aço no geral é uma matéria-prima difícil de trabalhar e prever, pois o seu comportamento varia ao longo do seu comprimento e de lote para lote de material. No entanto, as amostras recolhidas apresentam valores próximos com variação a rondar 1° e não são muito discrepantes dos resultados obtidos pelas simulações, o que leva a concluir que esta é, de facto, uma ferramenta merecedora de investimento e atenção no futuro. Aprofundar o estudo neste sentido, torna-se particularmente interessante, quando já se estuda a automatização da programação da

sequência de dobragens através de inteligência artificial, para obter os produtos por conformação de arame[11].

Para completar o rescaldo, cumpre quantificar, ainda que de forma estimada, os gastos envolvidos neste projeto e compará-los com a alternativa de adquirir um novo equipamento. Em diálogo com a Gerência e agentes envolvidos neste processo, que se deslocaram recentemente à feira *Tube and Wire - Messa Düsseldorf*, na Alemanha, em prospeção de equipamento para a Molag, foi-me dada uma noção de valores praticados pelos fabricantes para máquinas com características aproximadas à máquina que deu tema a esta Dissertação. Podemos analisar esses dados na Tabela 3.7. Alguns dos valores apresentados são estimados, mas estarão próximos da realidade. Pelo exposto, podemos verificar que a solução levada a cabo foi muito vantajosa para empresa e pode ter resultado numa poupança financeira de perto de 100 000€. Para além disso, mostra-se uma solução ecológica, porque se pouparam recursos materiais pela utilização de materiais que, de outra forma, estariam inutilizados.

Tabela 3.7. Custos da recuperação da máquina vs custos de aquisição de nova máquina.

	Recuperação de Máquina Obsoleta	Aquisição de nova Máquina
Custo do equipamento	8 000€	120 000€
Transporte	500€	3 000€
Montagem	Não Aplicável	1 500€
Software e Hardware Eletrónico e Informático	10 000€	Incluído
Matéria-Prima e mão de obra	10 000€	Incluído
Total	28 500€	124 500€

Por executar, ficou a construção e implementação de uma ferramenta de fixação do arame durante o processo de conformação. Do ponto de vista prático, não é uma ferramenta que irá consumir muitos recursos financeiros ou de projeto a conceber e, em contrapartida será um incremento interessante à precisão dos componentes produzidos, já que não permitirá imprecisões resultantes de desvios sofridos pelo arame, causados pelas forças resultantes da sua conformação. É, por isso, recomendável que a inclusão desta ferramenta seja levada a cabo.

4. CONCLUSÕES

Por ter sido desenvolvida em ambiente industrial, esta Dissertação teve, inevitavelmente, uma componente prática de enorme relevância. Contactar com as ferramentas e métodos de produção da Indústria, demonstrou-se uma experiência enriquecedora e ilustrativa relativamente ao que deverá ser papel do Engenheiro nos problemas práticos do dia-a-dia. Acompanhar e participar num projeto desde a sua idealização à sua conceção, traz uma perspectiva abrangente da complexidade, morosidade e obstáculos inerentes ao processo produtivo que, muitas vezes, se julgam ser rápidos e simples.

Neste cenário, compreende-se também a importância das ferramentas da Engenharia no Projeto. Estas demonstram-se fundamentais para a correta conceção dos componentes mecânicos idealizados, assim como na antecipação de problemas, que nem sempre são perceptíveis de outra forma. Entre a ideia que surge e a solução que se implementa, a análise numérica demonstrou-se um auxílio valioso para compreender, tanto os esforços que ocorrem nas ferramentas, como se os objetivos delineados para a solução construtiva idealizada serão ou não atingidos. O conhecimento destes dados auxilia o correto dimensionamento dos componentes. Esta análise demonstrou-se também particularmente interessante para antecipar os fenómenos de retorno elástico inerentes ao processo de conformação. Poderá demonstrar-se uma ferramenta interessante e inovadora no aumento do rendimento de tarefas iterativas de afinação, que, ao dia de hoje, contam apenas com a experiência de quem as realiza.

No que às soluções idealizadas concerne, de uma forma geral pode afirmar-se que os objetivos foram atingidos. Os problemas mecânicos da máquina foram resolvidos e a nova solução demonstra-se capaz de produzir o componente em vista. Para além disso, esta solução poupou perto de 100 000€, face à aquisição de um novo equipamento.

A solução adotada para a transmissão de potência ao veio, verifica e tem uma margem de segurança considerável, ao contrário da solução adotada originalmente.

No que às ferramentas de conformação concerne, a solução construtiva desenvolvida alcança os raios de conformação requeridos e poderá ainda ir mais além do perspetivado. Para além disso, tanto o sistema de corte como o da ferramenta móvel, possibilitam afinações

dentro do que já está construído. Dado que a produção para a qual o conjunto de ferramentas foi concebido utiliza o arame macio C9D, os parafusos que asseguram a ligação entre os postigos e a base onde se encontram afixados, não estarão sujeitos a fadiga, se for respeitada a condição de aperto inicial definida. Por outro lado, caso se pretenda conformar arame em Aço de alta resistência de forma que ultrapasse a frequência pontual, será aconselhável utilizar os parafusos M10, ou uma solução construtiva que contenha barreiras físicas no sentido de anular o esforço cortante.

Relativamente ao retorno elástico, para tirar conclusões mais concretas, seria necessário que a máquina estivesse já dotada da plenitude do seu funcionamento projetado. No entanto, as experiências realizadas, perspectivam que as simulações apresentadas sejam de facto representativas deste fenómeno e, de futuro, será sem dúvida um caso a estudar e implementar na fase de conceção do produto, de forma a munir os técnicos de afinação com informação que rentabilize mais as suas horas de trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Z. Gu, X. Hou, and J. Ye, “Advanced static and dynamic analysis method for helical springs of non-linear geometries,” *J Sound Vib*, vol. 513, p. 116414, Nov. 2021, doi: 10.1016/J.JSV.2021.116414.
- [2] G. Cimolai, I. Dayyani, and Q. Qin, “Multi-objective shape optimization of large strain 3D helical structures for mechanical metamaterials,” *Mater Des*, vol. 215, p. 110444, Mar. 2022, doi: 10.1016/J.MATDES.2022.110444.
- [3] S. Kushwah, S. Parekh, and M. Mangrola, “Optimization of coil spring by finite element analysis method of automobile suspension system using different materials,” *Mater Today Proc*, vol. 42, pp. 827–831, Jan. 2021, doi: 10.1016/J.MATPR.2020.11.415.
- [4] R. Budynas and J. Nisbett, *SHIGLEY’S MECHANICAL ENGINEERING DESIGN*, 10th ed., vol. SI Version. 2015.
- [5] “MITcalc - Coupling of shafts using a key, grooving.” <https://www.mitcalc.com/doc/shaftcon/help/en/shaftcon.htm> (accessed Sep. 13, 2022).
- [6] DIN Deutsches Institut für Normung and CEN European Committee for Standardization, “Steel wire for mechanical springs,” vol. I. 2001.
- [7] ISO Internation Organization for Standardization, “Non-alloy steel wire rod for conversion to wire,” vol. II, no. Specific requirements for general purpose wire rod. 2017.
- [8] W. G. Jiang and J. L. Henshall, “A novel finite element model for helical springs,” *Finite Elements in Analysis and Design*, vol. 35, no. 4, pp. 363–377, Jul. 2000, doi: 10.1016/S0168-874X(99)00076-1.
- [9] “Preload Requirement Charts.” <https://www.boltscience.com/pages/preloadrequirementcharts.htm> (accessed Sep. 13, 2022).
- [10] J. B. Kruger and A. N. Palazotto, “An Investigation of Springback in Wire Products,” *Journal of Engineering for Industry*, vol. 94, no. 1, pp. 329–334, Feb. 1972, doi: 10.1115/1.3428141.
- [11] A. Baraldo *et al.*, “Automatic computation of bending sequences for wire bending machines,” <https://doi.org/10.1080/0951192X.2022.2043563>, 2022, doi: 10.1080/0951192X.2022.2043563.

ANEXO A

Neste anexo estão presentes dados relativos a propriedades relevantes do aço galvanizado de alta resistência, presentes na norma 10270-1 e no certificado de matéria-prima do arame utilizado experimentalmente.

Table 1 — Spring wire grades

Tensile strength ^a	Static	Dynamic
Low tensile strength	SL	-
Medium tensile strength	SM	DM
High tensile strength	SH	DH

^a For specific applications another tensile strength may be agreed.

Figura 4.1. Tabela 1 da Norma EN 10270-1, correspondente à nomenclatura das matérias-primas abrangidas

Table 2 — Chemical composition, % by mass

Grade	C ^a	Si	Mn ^b	P max.	S max.	Cu max.
SL, SM, SH	0,35-1,00	0,10-0,30	0,50-1,20	0,035	0,035	0,20
DM, DH	0,45-1,00	0,10-0,30	0,50-1,20	0,020	0,025	0,12

^a Such a wide range is stipulated to accommodate the whole range of sizes. For individual sizes the carbon range is substantially more restricted.

^b The range of manganese content in the table is wide to cope with various processing situations and the broad size range. The actual figures per size shall be more restricted.

Figura 4.2. Tabela 2 da Norma EN 10270-1, correspondente à composição química das matérias primas abrangidas.

Table 3 — Mechanical properties ^{a b} and quality requirements for wire grades SL, SM, DM, SH and DH (continued)

1		2	3	4					5	6	7	8	9	10	11	12	13																																																																						
Wire diameter d'		Mass kg/1000 m	Tensile strength R _m ^{a, b, c} For wire grades					Minimum reduction in area after fracture Z for wire grades SL, SM, SH, DM and DH	Minimum number of twists in the torsion test for wire grades SL, SM, SH, and DH	Permissible depth of surface defects for wire grades DM, DH	Permissible decarburi- zation depth for wire grades DM, DH	Wire diameter d' (nominal size)																																																																											
Nominal size mm	permissible Deviations mm		SL MPa	SM MPa	DM MPa	SH MPa	DH ^d MPa						%	mm	mm	mm																																																																							
4,00	± 0,030	98,6	1320 to 1520	1530 to 1730	1530 to 1730	1740 to 1930	1740 to 1930	35	16	12	11	10	1 % max. of wire diameter	1,5 % max. of wire diameter	6,00																																																																								
4,25	± 0,035	111	1310 to 1500	1510 to 1700	1510 to 1700	1710 to 1900	1710 to 1900									9	9	9	11	10	1 % max. of wire diameter	1,5 % max. of wire diameter	6,30																																																																
4,50		125	1290 to 1490	1500 to 1680	1500 to 1680	1690 to 1880	1690 to 1880																	9	9	9	11	10	1 % max. of wire diameter	1,5 % max. of wire diameter	6,50																																																								
4,75		139	1270 to 1470	1480 to 1670	1480 to 1670	1680 to 1860	1680 to 1860																									9	9	9	11	10	1 % max. of wire diameter	1,5 % max. of wire diameter	6,50																																																
5,00		154	1260 to 1450	1460 to 1650	1460 to 1650	1660 to 1840	1660 to 1840																																	9	9	9	11	10	1 % max. of wire diameter	1,5 % max. of wire diameter	6,50																																								
5,30		173	1240 to 1430	1440 to 1630	1440 to 1630	1640 to 1820	1640 to 1820																																									9	9	9	11	10	1 % max. of wire diameter	1,5 % max. of wire diameter	6,50																																
5,60		193	1230 to 1420	1430 to 1610	1430 to 1610	1620 to 1800	1620 to 1800																																																	9	9	9	11	10	1 % max. of wire diameter	1,5 % max. of wire diameter	6,50																								
6,00		222	1210 to 1390	1400 to 1580	1400 to 1580	1590 to 1770	1590 to 1770																																																									9	9	9	11	10	1 % max. of wire diameter	1,5 % max. of wire diameter	6,50																
6,30		245	1190 to 1380	1390 to 1560	1390 to 1560	1570 to 1750	1570 to 1750																																																																	9	9	9	11	10	1 % max. of wire diameter	1,5 % max. of wire diameter	6,50								
6,50		260	1180 to 1370	1380 to 1550	1380 to 1550	1560 to 1740	1560 to 1740																																																																									9	9	9	11	10	1 % max. of wire diameter	1,5 % max. of wire diameter	6,50

Figura 4.3 Tabela 3 da Norma EN 10270-1, correspondente às propriedades mecânicas dos arames abrangidos.

Prodotto Product	Filo zincato Ø 6.000 mm En 10270-1 CI SH FL1250L an Kg 1000		
Norma Standard	En 10270-1 CI SH		
Diametro Diameter	6,000	Resistenza Kg/mm ² Tensile strength Kg/mm	/
Torsioni Twists	Pieghe Bendings	Zinco Zinc	Resistenza N/mm ² Tensile strength N/mm ² 1590 / 1770
			N° lotto Lot n° 202103192

PROVE / TESTS

N° ROTOLO ROLL	DIAMETRO DIAMETER	CARICO TOT. U.T.S. Kg - N	RESISTENZA TENSILE STRENGTH Kg/mm ² N/mm ²	STRESS AT 1% EXTENSION Kg/mm ² N/mm ²	ALLUNG. % ELONGATION	TORSIONI TWISTS	PIEGHE BENDINGS mm 0,00	STRIZIONE STRICTION %	COPERTURA ZINCO / ZINC COATING		
									G/m ²	MICRONS	MMERS / DIPS
202119521	5,986	46000,0	1635					53,00			
202119522	5,987	46000,0	1634								
202119523	5,990	45750,0	1624								
202119524	5,991	45750,0	1623								

Max	5,991	46000,0	1635
Min	5,986	45750,0	1623
Media	5,988	45875,0	1629

MOLAG
Industria Molis Técnicas, Lda.
A Gerência
Carla
30.06.2021

Note di collaudo Notes
Osservazioni Observations
piega a 90° ok

ANALISI CHIMICA / CHEMICAL ANALYSIS GIVEN BY THE SUPPLIER

C	0,743	Mn	0,623	Si	0,208	P	0,006	S	0,011	Cr	0,034	Ni	0,057	Cu	0,082	Al	0,002	V		N	0,0039
N° colata Cast n°	831440										Il servizio collaudi Testings department										
Questo certificato è stato redatto in ottemperanza ai requisiti delle norme Testing certificate according to standards																					
EN 10204 3.1																					
Prodotto conforme alla direttiva 2000/53/CE in data 18/09/2000 del Parlamento Europeo e del Consiglio Product in accordance with regulations 2000/53/CE dated 18/09/2000 by European Parliament																					

Figura 4.4 Certificado de matéria prima do fornecedor.

ANEXO B

Neste anexo estão informações relativos ao arame macio C9D presentes na norma 16120-2 e no certificado de matéria-prima do arame utilizado.

4 Designation

In the designation C##D, “C” means non-alloy steel (see ISO/TS 4949); ## is the indicative average content of carbon; “D” signifies that it is for wire-drawing.

If steels are ordered according to chemical composition, ## indicates the values to be inserted by the purchaser according to the steel names designated in [Table 1](#), first column.

The designations of comparable steel grades in national or regional standards are provided in [Annex A](#).

Steels can also be ordered according to tensile strength. The mid-point of the required ultimate tensile strength (UTS) range shall be indicated as a suffix to the grade designation, e.g. C##D – 1020, where the required mid-point of the UTS is 1 020 MPa. “##” means “to be left blank” since the carbon content is at the discretion of the supplying mill, and the supplying mill indicates the exact number of ## based on the grade designation until shipment. See [Table 1](#) for the grade designation.

Figura 4.5 Secção correspondente nomenclatura do arame C9D abrangido pela Norma EN 16120-2.

Table 1 — Chemical analysis (heat analysis)

Steel grade ^a	Heat analysis									
	C ^b	Si ^c	Mn ^d	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu ^e	Al ^f
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
C4D	≤0,06	≤0,30	0,30 to 0,60	0,035	0,035	0,20	0,25	0,05	0,30	0,01
C7D	0,05 to 0,09	≤0,30	0,30 to 0,60	0,035	0,035	0,20	0,25	0,05	0,30	0,01
C9D	≤0,10	≤0,30	0,30 to 0,60	0,035	0,035	0,20	0,25	0,05	0,30	0,01
C10D	0,08 to 0,13	≤0,30	0,30 to 0,60	0,035	0,035	0,20	0,25	0,05	0,30	0,01

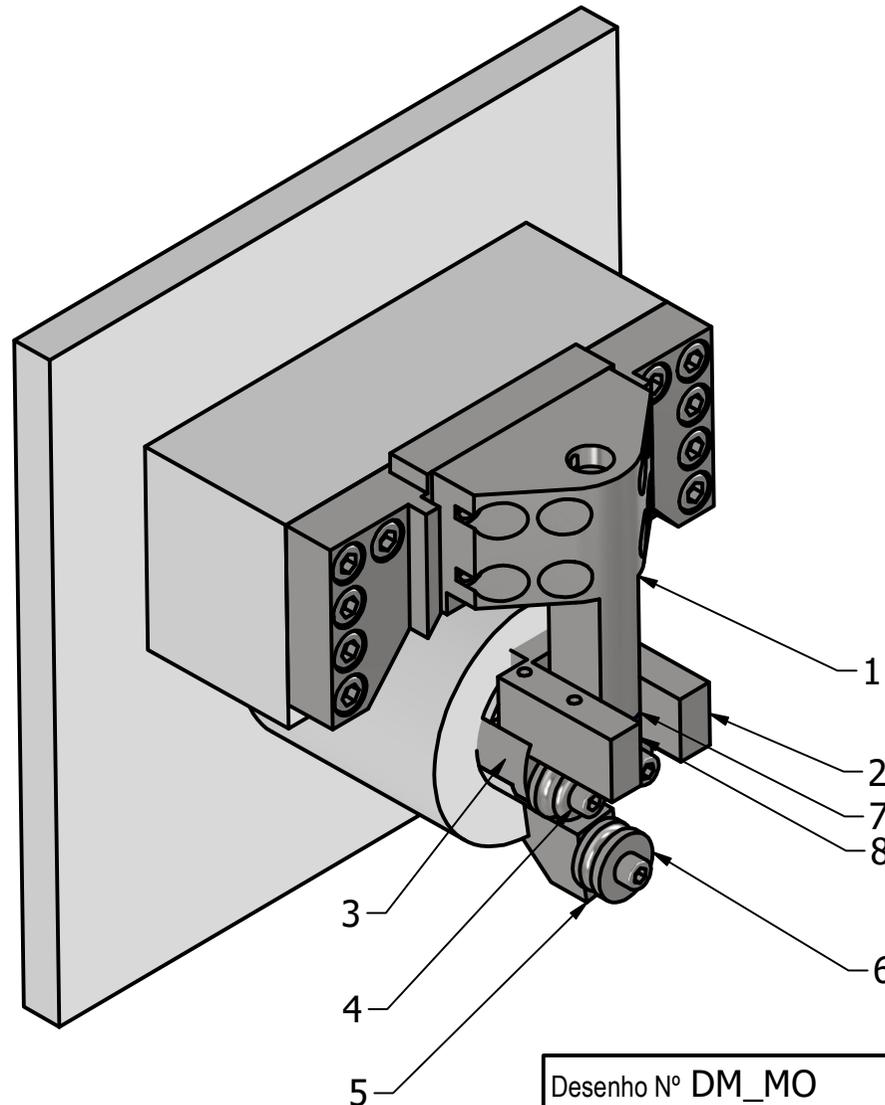
Figura 4.6 Tabela 1 correspondente composição química do Arame C9D abrangido pela Norma EN 16120-2.

Inspection certificate				 Drahtwerk St. Ingbert												
customer order number	N°22022022															
Order number	135914 / 000010			Drahtwerk St. Ingbert GmbH												
Delivery note	23733409/000010		Delivery	04.04.2022												
Quality				Article number	DWBL6664											
MOLAG Industria de Molas Técnicas, LDA. Zona Industrial de Pinhao S / N 3720-454 PINDELO PORTUGAL			Customer material number													
			dimension		6,00 MM											
			Dimension min. (mm)		5,970											
			Dimension max. (mm)		6,000											
According to customers' s specification:																
Chemical test values (%)																
Chg.-Nr.	C	SI	MN	P	S											
673733	0,091	0,164	0,574	0,024	0,020											
Mechanical test values																
	Charge	diameter 1 MM	tensile strenght MPA													
	673733	5,981	641													
	673733	5,982	634													

Figura 4.7 Certificado de matéria prima do fornecedor.

APÊNDICE A: CADERNO DE DESENHOS

FERRAMETNAS ORIGINALIS



COMPONENTES MONTAGEM ORIGINAL

Item nº	Nome	Quantidade
1	Guia	1
2	Apoio Base	1
3	Base	1
4	Rolete Fixo	2
5	Base Rolete	1
6	Rolete Móvel	1
7	Tirante do Guia	1
8	Pastilha de corte	1

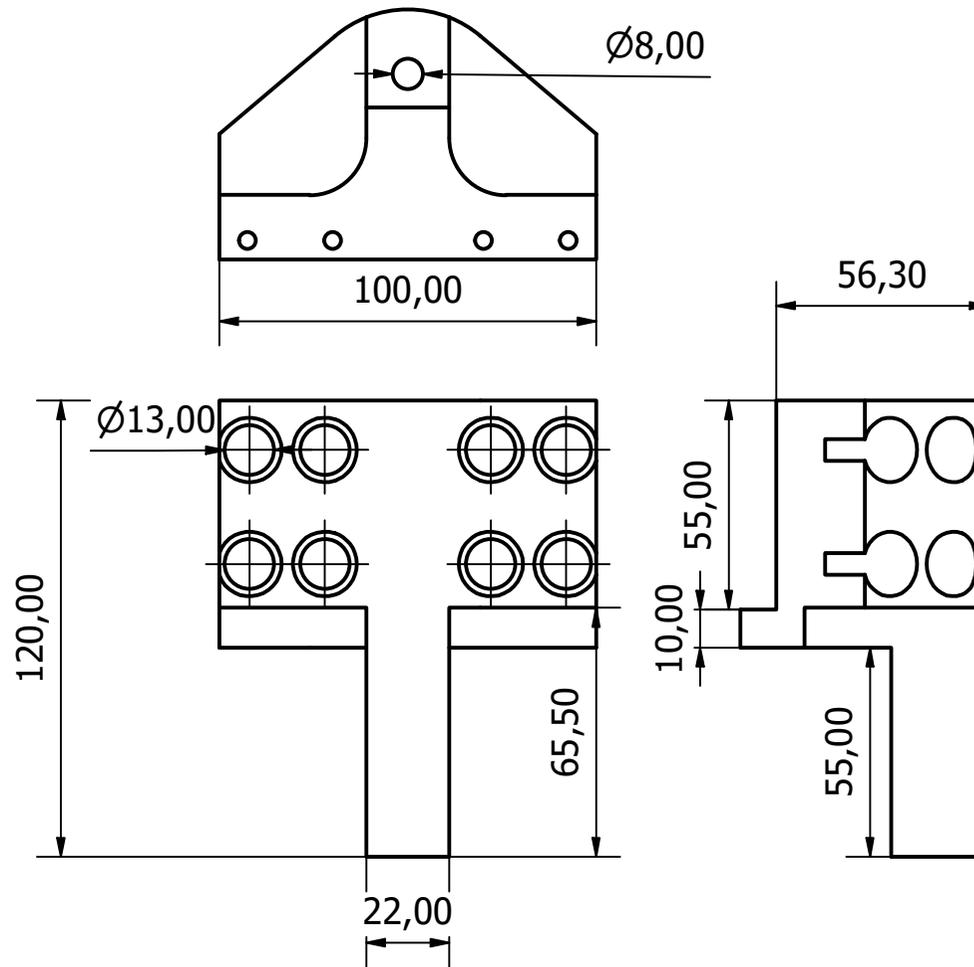
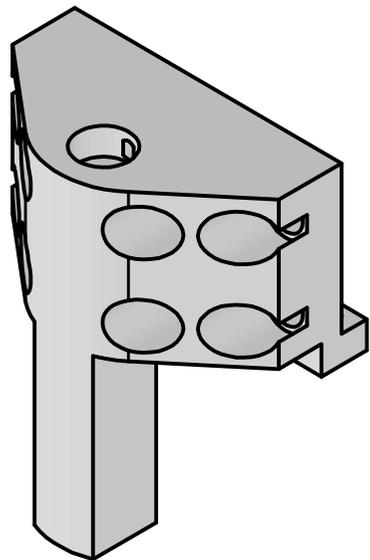
HISTÓRIA DE REVISÕES:
REV Nº:
APROVADO:
VERIFICADO:
DATA:
AUTOR: Leandro Marques
TAMANHO:

Desenho Nº DM_MO	STK Nº:		FOLHA 1 DE 1
------------------	---------	--	--------------

Descrição: **MONTAGEM FERRAMENTAS ORIGINAIS**

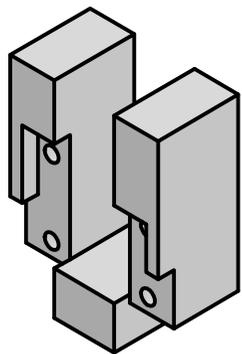
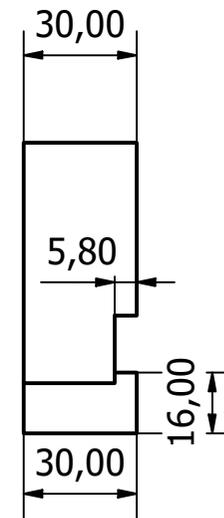
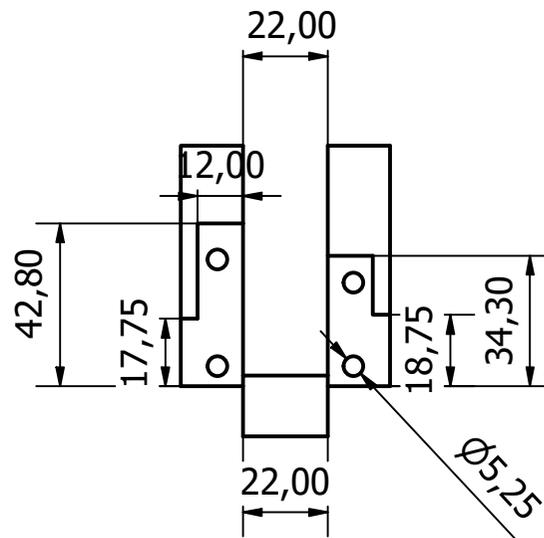
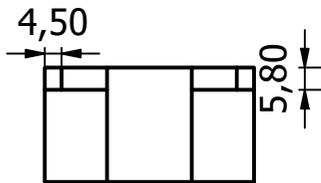
Material:

	DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA DA FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE COIMBRA	
--	--	--



HISTÓRIA DE REVISÕES:
REV N°:
APROVADO:
VERIFICADO:
DATA:
AUTOR: Leandro Marques
TAMANHO:

Desenho N° DM_MO_C01	STK N°:		FOLHA 1 DE 1
Descrição: GUIA			
Material:			
	DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA DA FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE COIMBRA		

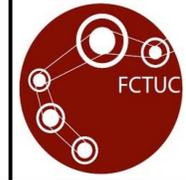


HISTÓRIA DE REVISÕES:
REV Nº:
APROVADO:
VERIFICADO:
DATA:
AUTOR: Leandro Marques
TAMANHO:

Desenho Nº DM_MO_C02	STK Nº:		FOLHA 1 DE 1
----------------------	---------	--	--------------

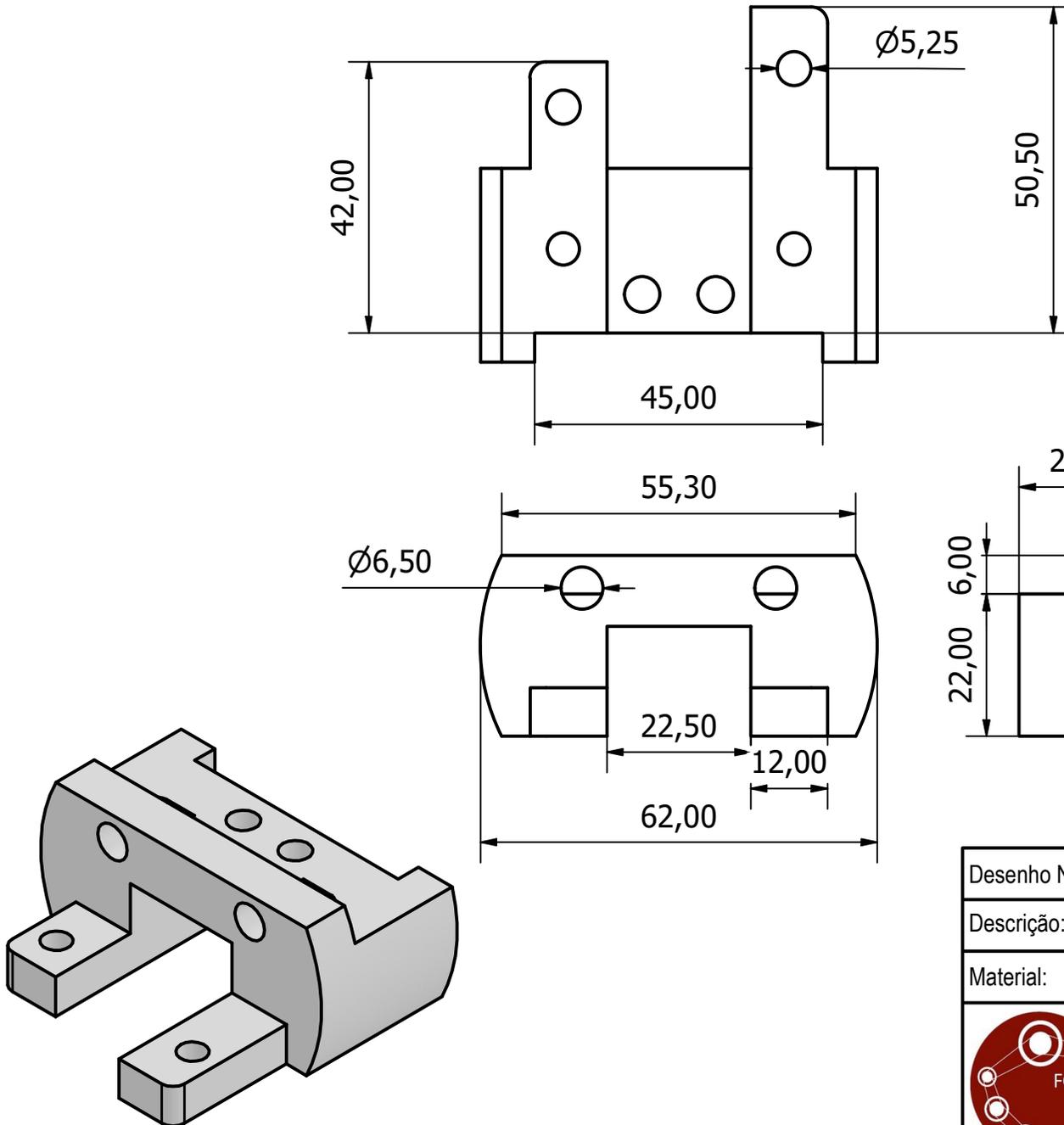
Descrição: APOIO BASE

Material: Generic



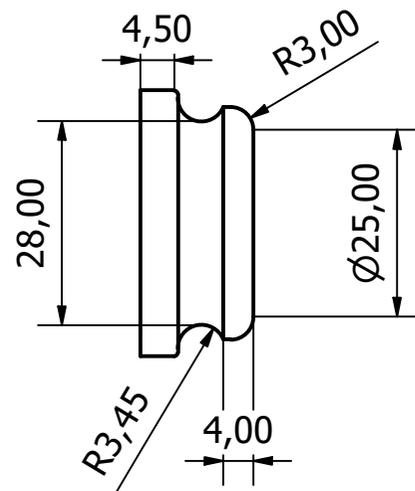
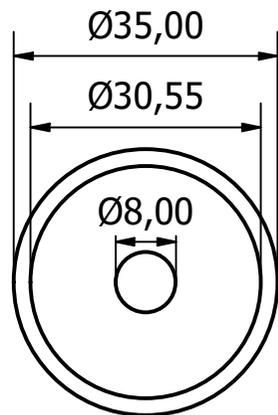
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA DA
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA DA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA





HISTÓRIA DE REVISÕES:
REV Nº:
APROVADO:
VERIFICADO:
DATA:
AUTOR: Leandro Marques
TAMANHO:

Desenho Nº DM_MO_C03	STK Nº:		FOLHA 1 DE 1
Descrição: APOIO FIXO DE FERRAMENTAS			
Material: Generic			
	DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA DA FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE COIMBRA		



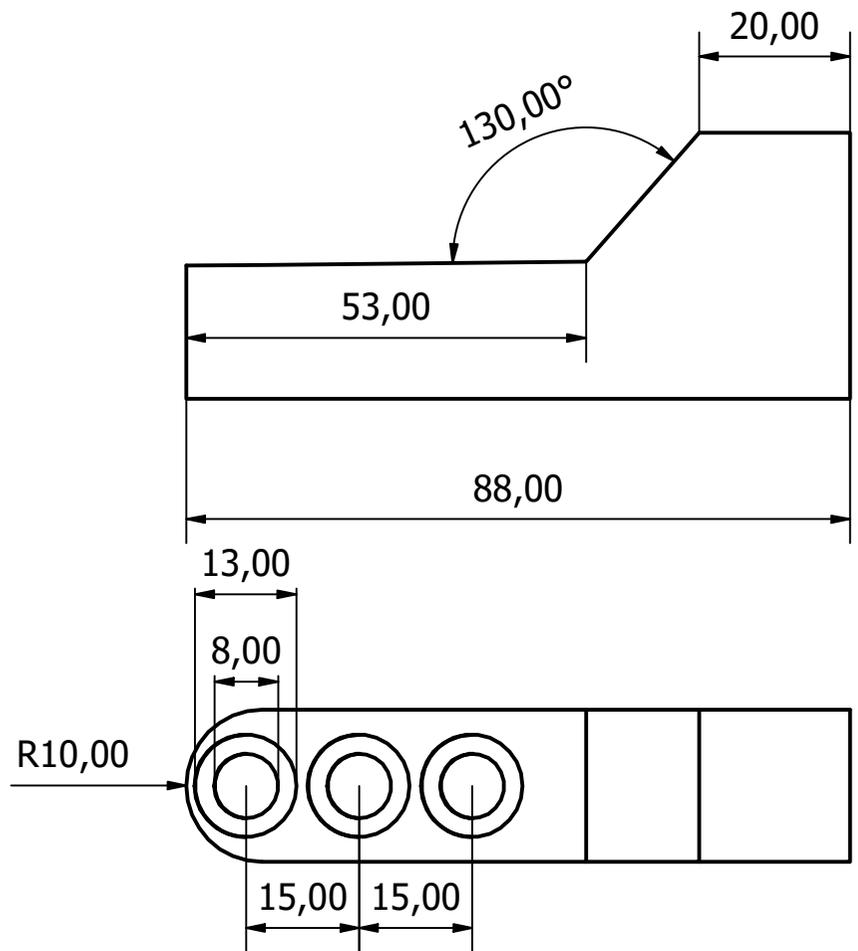
HISTÓRIA DE REVISÕES:
REV N°:
APROVADO:
VERIFICADO:
DATA:
AUTOR: Leandro Marques
TAMANHO:

Desenho N° DM_MO_C04	STK N°:		FOLHA 1 DE 1
----------------------	---------	--	--------------

Descrição: ROLETE FIXO

Material:

	<p>DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA DA FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE COIMBRA</p>	
--	---	--

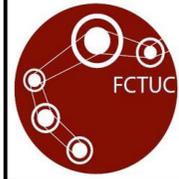


HISTÓRIA DE REVISÕES:
REV Nº:
APROVADO:
VERIFICADO:
DATA:
AUTOR: Leandro Marques
TAMANHO:

Desenho Nº DM_MO_C05	STK Nº:		FOLHA 1 DE 1
----------------------	---------	--	--------------

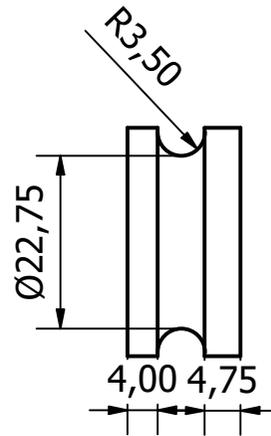
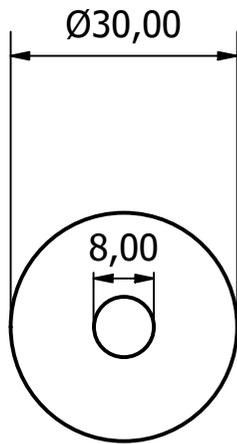
Descrição: **BASE ROLETE MÓVEL**

Material:



DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA DA
 FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA DA
 UNIVERSIDADE DE COIMBRA





HISTÓRIA DE REVISÕES:

REV Nº:

APROVADO:

VERIFICADO:

DATA:

AUTOR: Leandro Marques

TAMANHO:

Desenho Nº DM_MO_C06

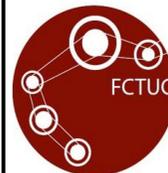
STK Nº:



FOLHA 1 DE 1

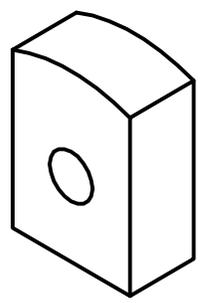
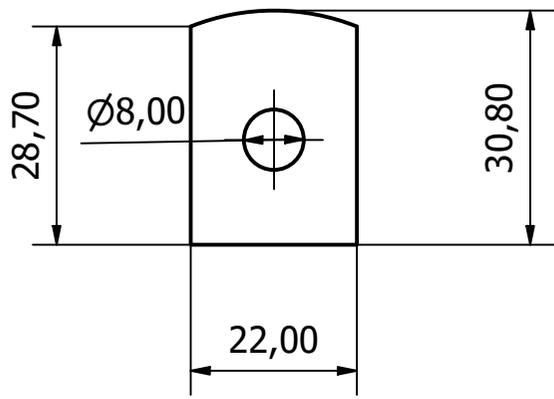
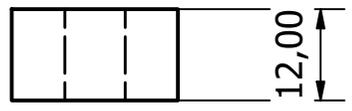
Descrição: ROLETE CONFORMADOR

Material:



DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA DA
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA DA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA





HISTÓRIA DE REVISÕES:
REV Nº:
APROVADO:
VERIFICADO:
DATA:
AUTOR: Leandro Marques
TAMANHO:

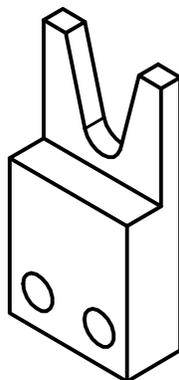
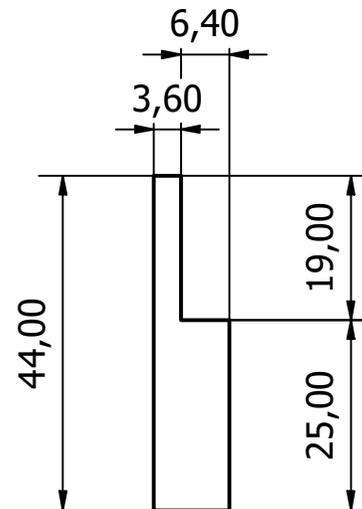
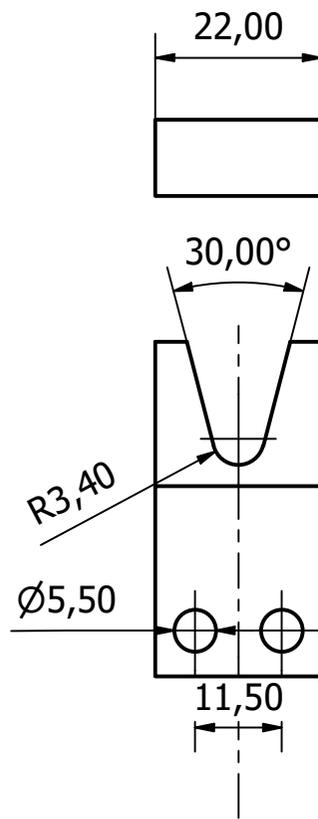
Desenho Nº DM_MO_C07	STK Nº:		FOLHA 1 DE 1
----------------------	---------	--	--------------

Descrição: TIRANTE DO GUIA

Material:

	<p>DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA DA FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE COIMBRA</p>	
--	---	--





HISTÓRIA DE REVISÕES:

REV N°:

APROVADO:

VERIFICADO:

DATA:

AUTOR: Leandro Marques

TAMANHO:

Desenho N° DM_MO_C08

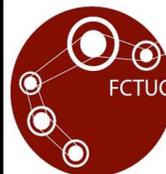
STK N°:



FOLHA 1 DE 1

Descrição: CORTANTE

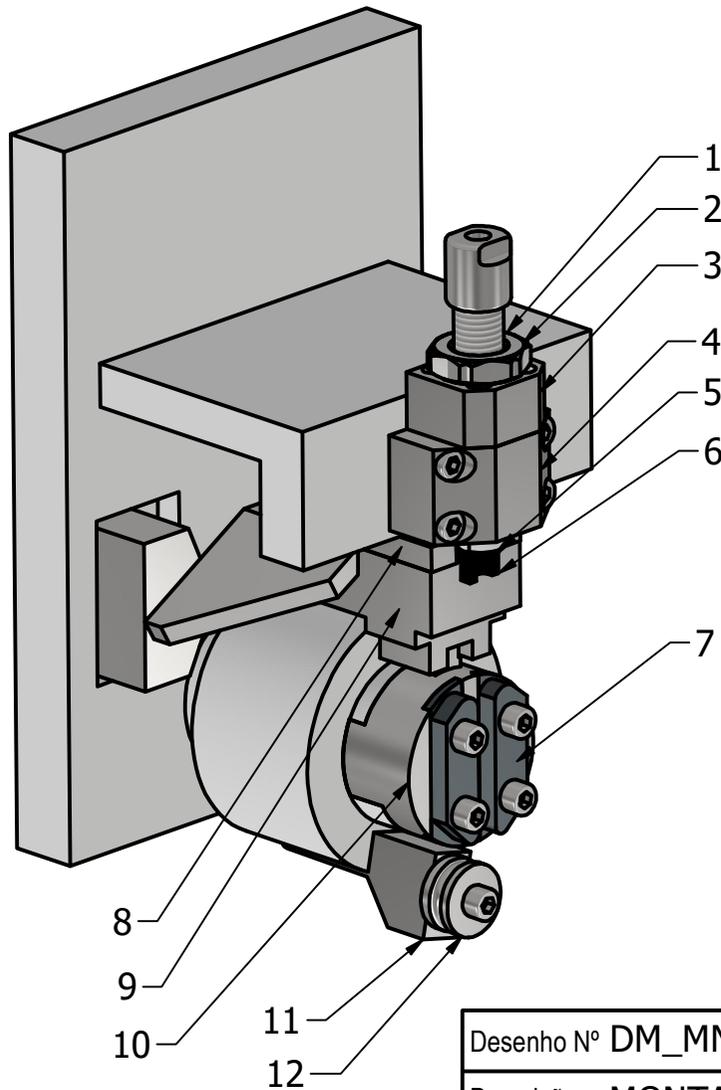
Material:



DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA DA
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA DA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA



NOVAS FERRAMENTAS



COMPONENTES MONTAGEM ORIGINAL

Item nº	Nome	Quantidade
1	Parafuso Batente	1
2	Porca Retenção	1
3	Base Batente	1
4	Base Guia	2
5	Guia	1
6	Cortante	1
7	Postiço	2 (simétricos)
8	Tampa Base Cortante	1
9	Base Cortante	1
10	Base Conformação	1
11	Base Rolete	1
12	Rolete Conformador	1

HISTÓRIA DE REVISÕES:

REV Nº:

APROVADO:

VERIFICADO:

DATA:

AUTOR: Leandro Marques

TAMANHO:

Desenho Nº DM_MNF

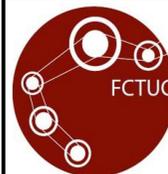
STK Nº:



FOLHA 1 DE 1

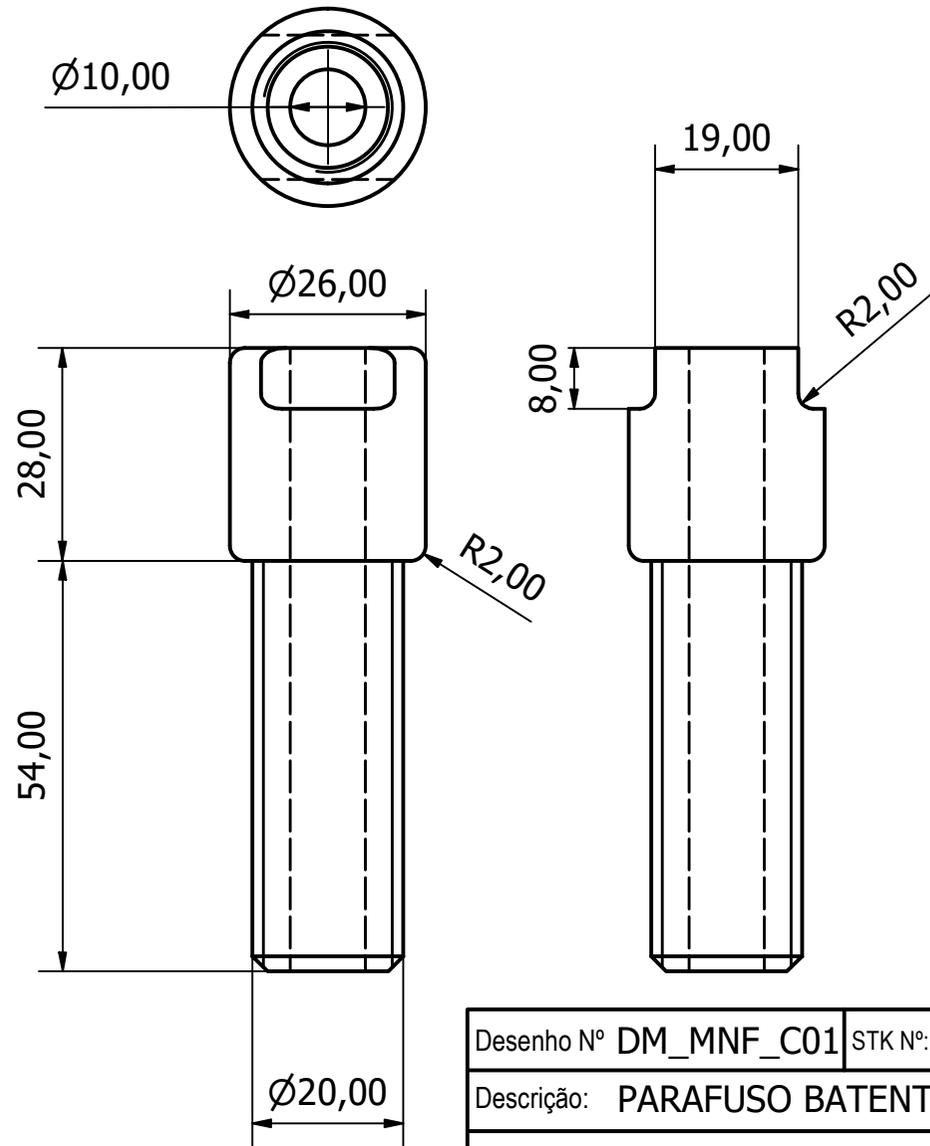
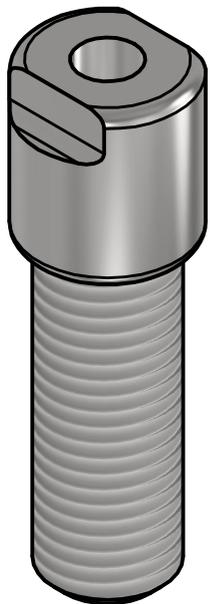
Descrição: MONTAGEM NOVAS FERRAMENTAS

Material:



DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA DA
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA DA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA





HISTÓRIA DE REVISÕES:

REV N°:

APROVADO:

VERIFICADO:

DATA:

AUTOR: Leandro Marques

TAMANHO:

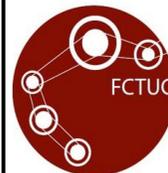
Desenho N° DM_MNF_C01 | STK N°:



FOLHA 1 DE 1

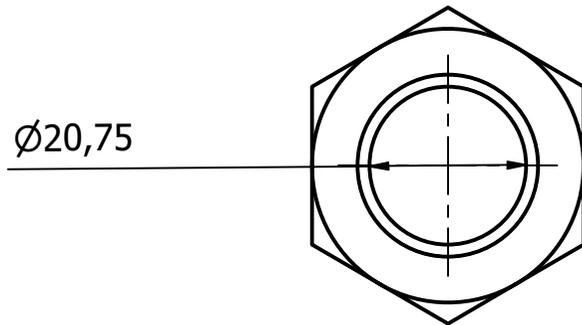
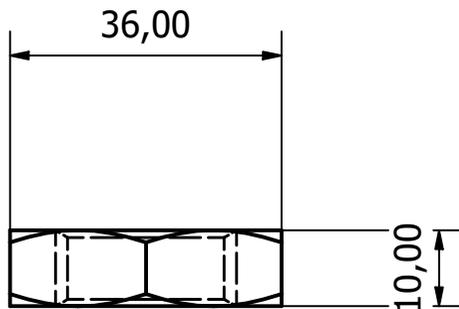
Descrição: PARAFUSO BATENTE

Material:



DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA DA
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA DA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA



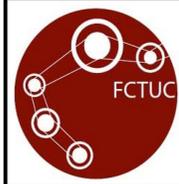


HISTÓRIA DE REVISÕES:
REV N°:
APROVADO:
VERIFICADO:
DATA:
TAMANHO:

Desenho N° DM_MNF_C02	STK N°:		FOLHA 1 DE 1
-----------------------	---------	--	--------------

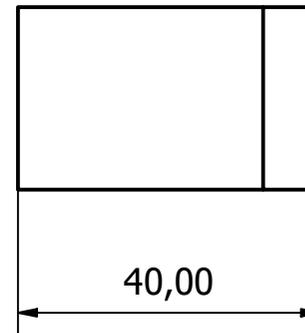
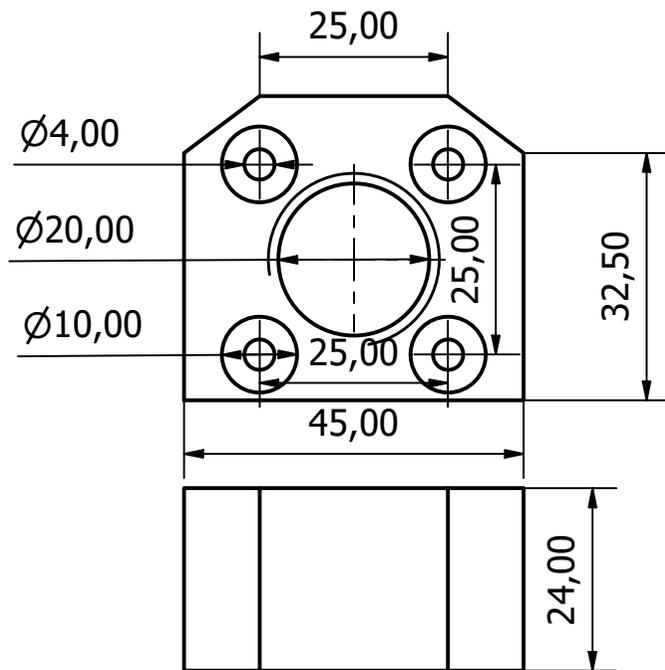
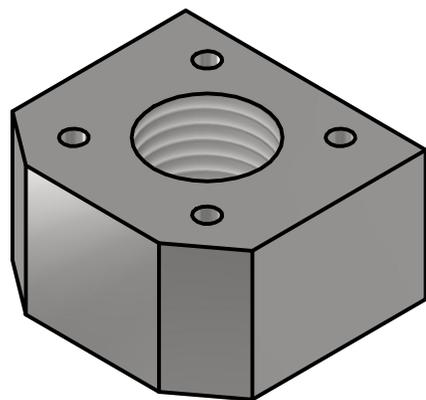
Descrição: **PORCA RETENÇÃO**

Material:



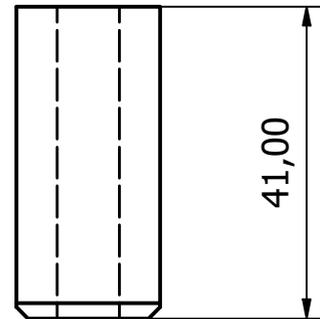
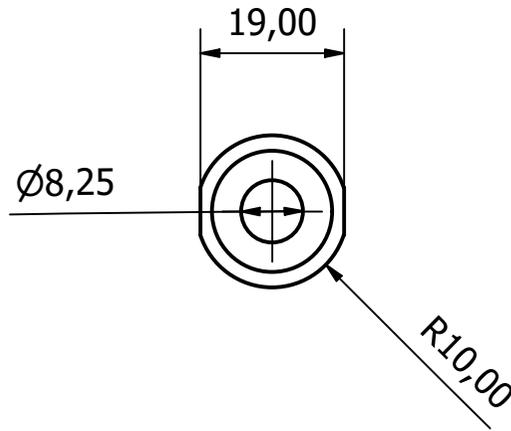
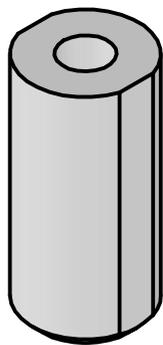
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA DA
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA DA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA





HISTÓRIA DE REVISÕES:
REV N°:
APROVADO:
VERIFICADO:
DATA:
AUTOR: Leandro Marques
TAMANHO:

Desenho N° DM_MNF_C03	STK N°:		FOLHA 1 DE 1
Descrição: BASE BATENTE			
Material:			
	DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA DA FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE COIMBRA		



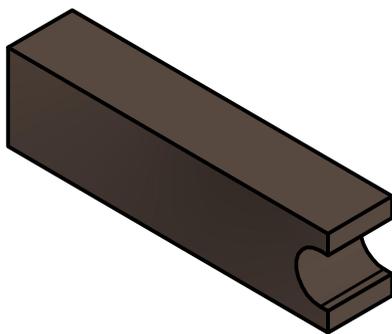
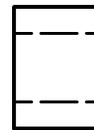
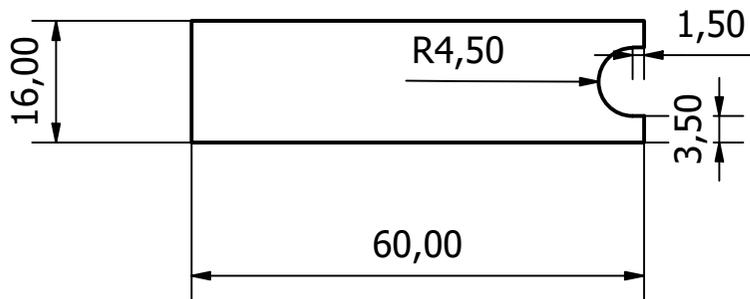
HISTÓRIA DE REVISÕES:
REV Nº:
APROVADO:
VERIFICADO:
DATA:
AUTOR: Leandro Marques
TAMANHO:

Desenho Nº DM_MNF_C05	STK Nº:		FOLHA 1 DE 1
-----------------------	---------	--	--------------

Descrição: GUIA

Material:

	DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA DA FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE COIMBRA	
--	--	--



HISTÓRIA DE REVISÕES:

REV Nº:

APROVADO:

VERIFICADO:

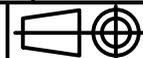
DATA:

AUTOR: Leandro Marques

TAMANHO:

Desenho Nº DM_MNF_C06

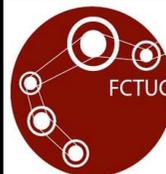
STK Nº:



FOLHA 1 DE 1

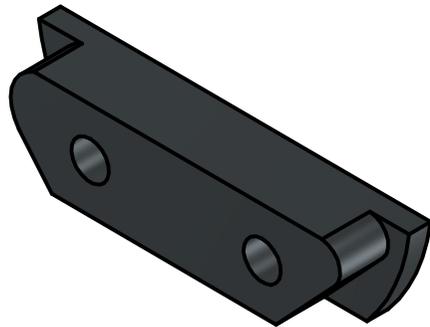
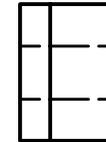
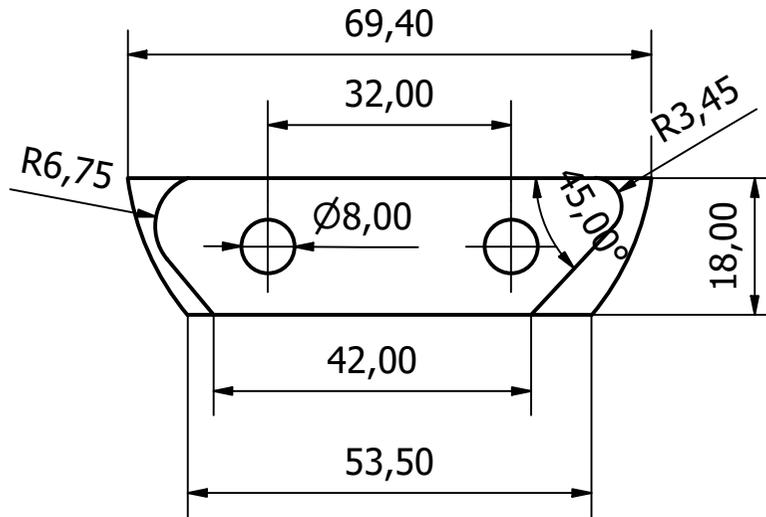
Descrição: CORTANTE

Material:



DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA DA
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA DA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA





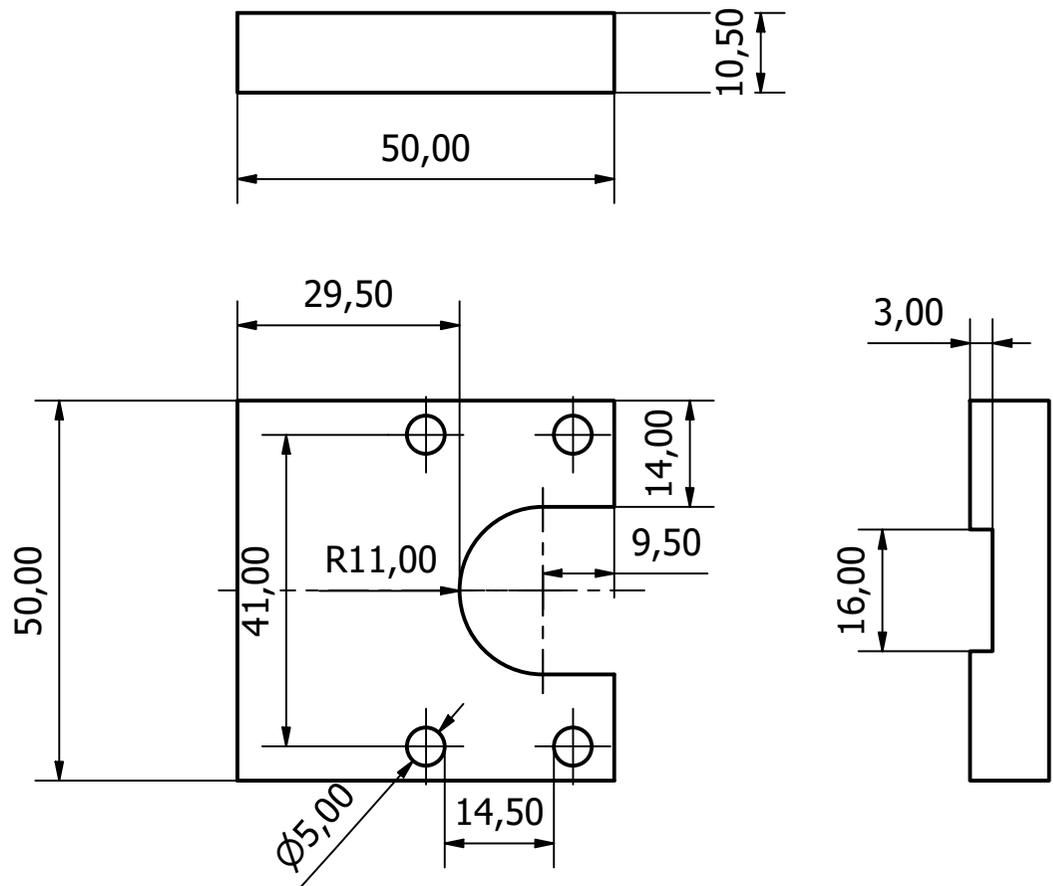
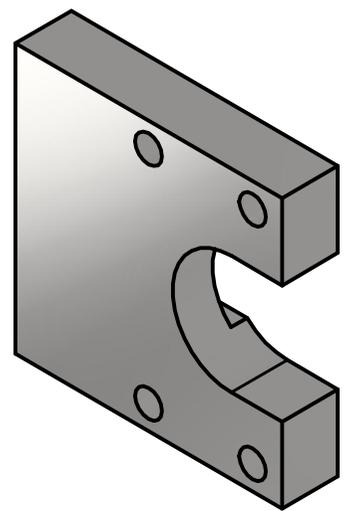
HISTÓRIA DE REVISÕES:
REV N°:
APROVADO:
VERIFICADO:
DATA:
AUTOR: Leandro Marques
TAMANHO:

Desenho N° DM_MNF_C07	STK N°:		FOLHA 1 DE 1
-----------------------	---------	--	--------------

Descrição: POSTIÇO

Material:

	DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA DA FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE COIMBRA	
--	--	--

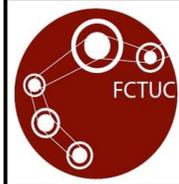


HISTÓRIA DE REVISÕES:
REV N°:
APROVADO:
VERIFICADO:
DATA:
AUTOR: Leandro Marques
TAMANHO:

Desenho N° DM_MNF_C08	STK N°:		FOLHA 1 DE 1
-----------------------	---------	--	--------------

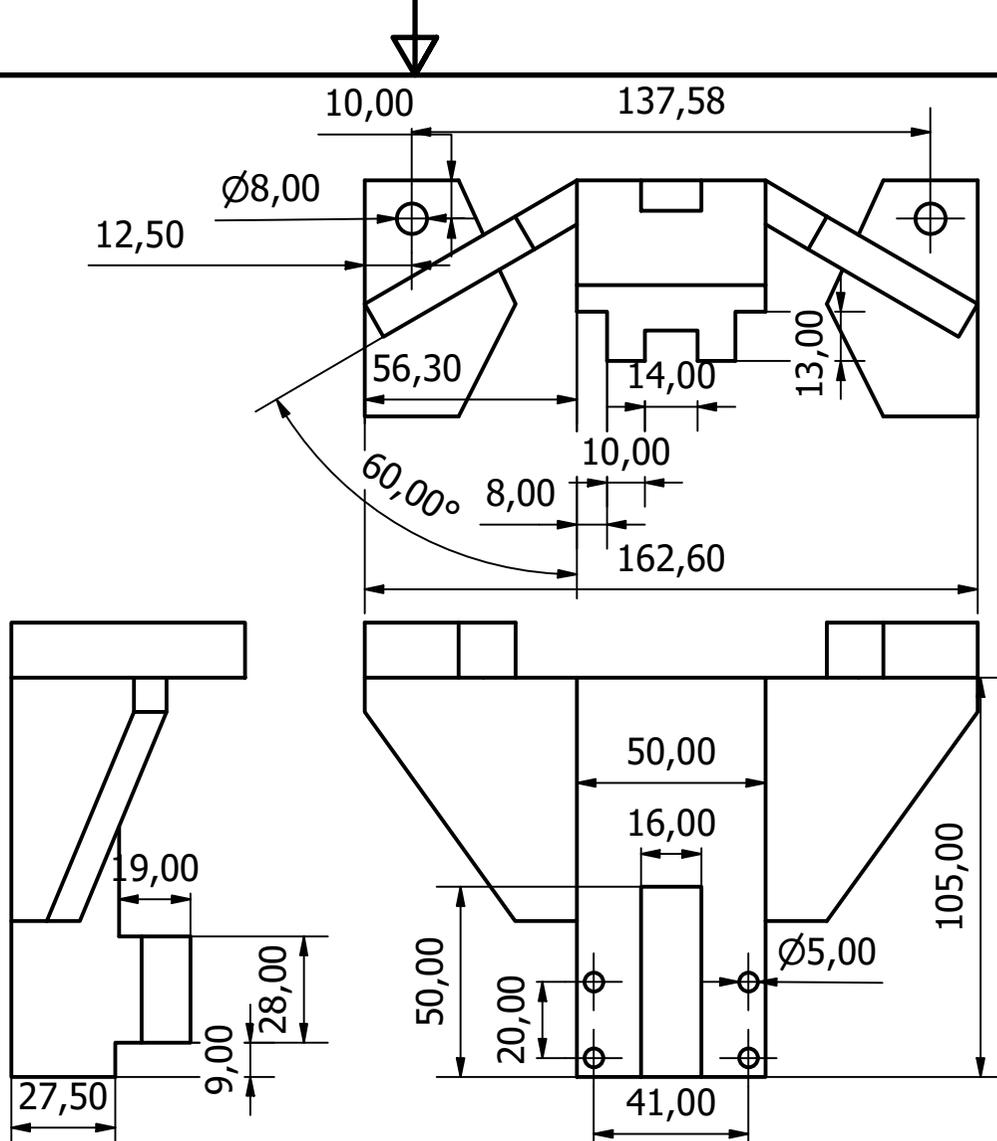
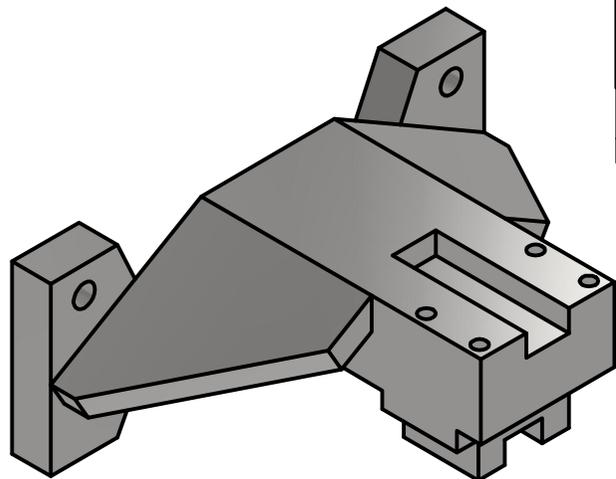
Descrição: TAMPA BASE CORTANTE

Material:



DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA DA
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA DA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA



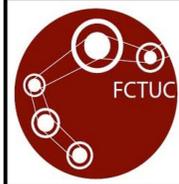


HISTÓRIA DE REVISÕES:
REV N°:
APROVADO:
VERIFICADO:
DATA:
AUTOR: Leandro Marques
TAMANHO:

Desenho N° DM_MNF_C09 STK N°:  FOLHA 1 DE 1

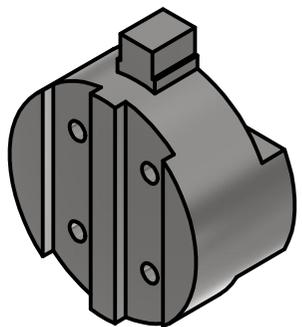
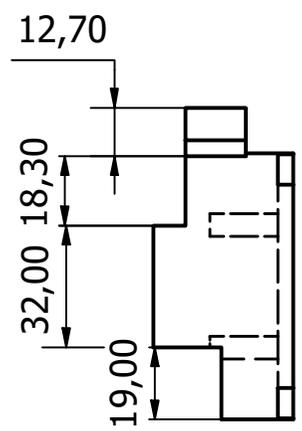
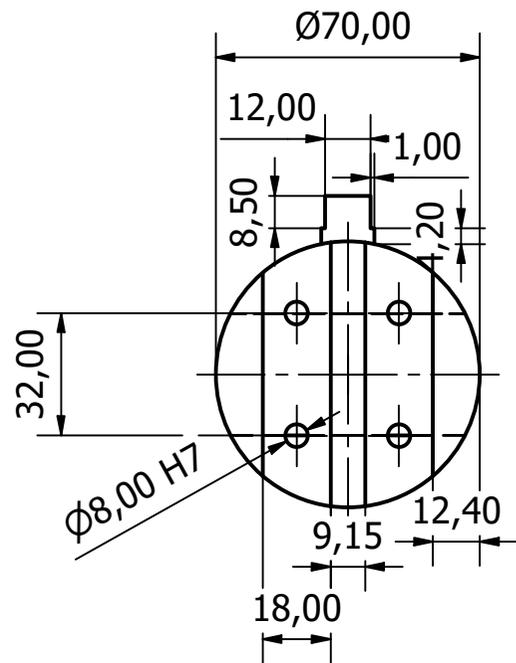
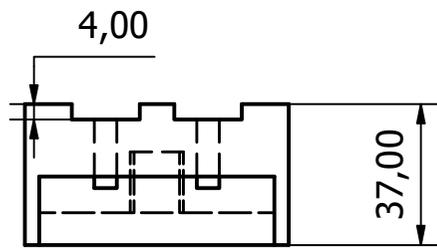
Descrição: **BASE CORTANTE**

Material:



DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA DA
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA DA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA



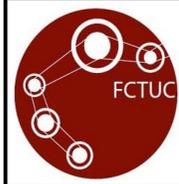


HISTÓRIA DE REVISÕES:
REV N°:
APROVADO:
VERIFICADO:
DATA:
AUTOR: Leandro Marques
TAMANHO:

Desenho N° DM_MNF_C10 STK N°:  FOLHA 1 DE 1

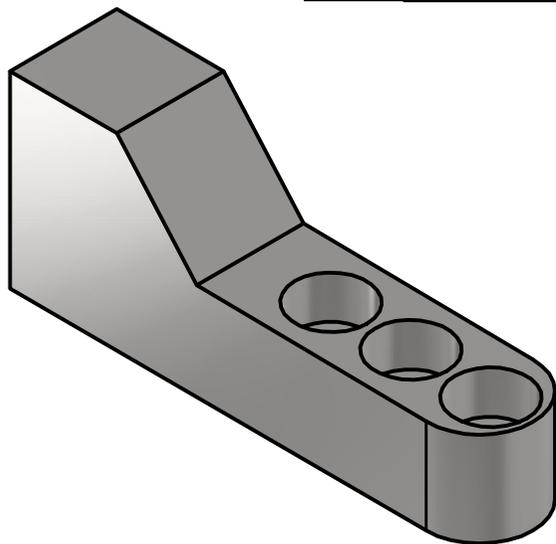
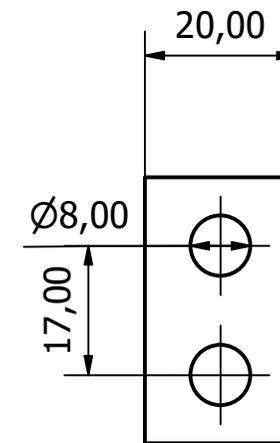
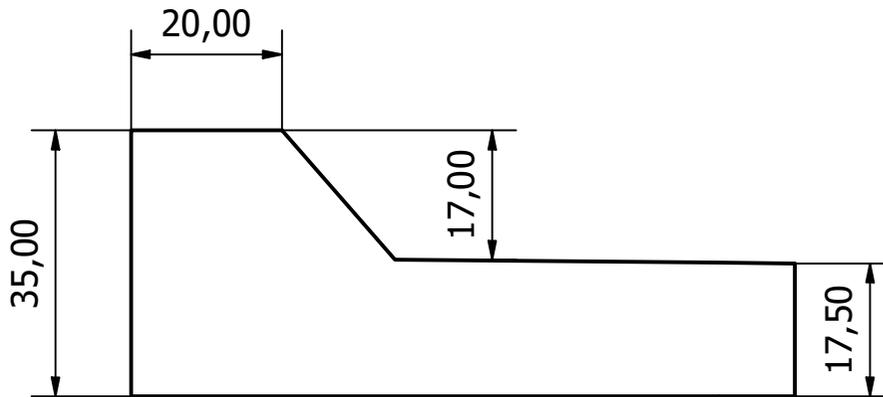
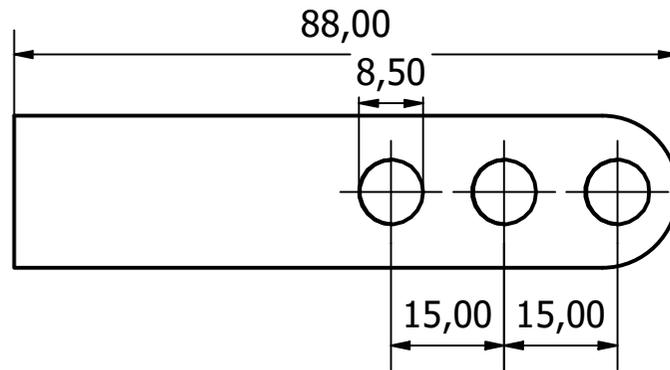
Descrição: **BASE conformação**

Material:



DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA DA
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA DA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA





HISTÓRIA DE REVISÕES:

REV N°:

APROVADO:

VERIFICADO:

DATA:

AUTOR: Leandro Marques

TAMANHO:

Desenho N° DM_MNF_C11

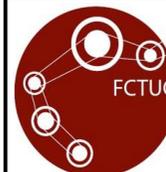
STK N°:



FOLHA 1 DE 1

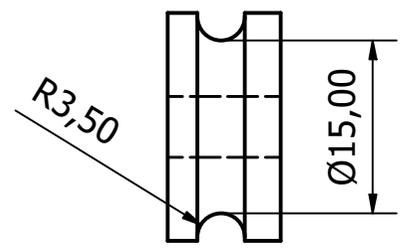
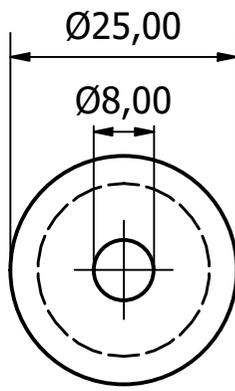
Descrição: BASE ROLETE

Material:



DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA DA
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA DA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA





HISTÓRIA DE REVISÕES:
REV Nº:
APROVADO:
VERIFICADO:
DATA:
AUTOR: Leandro Marques
TAMANHO:

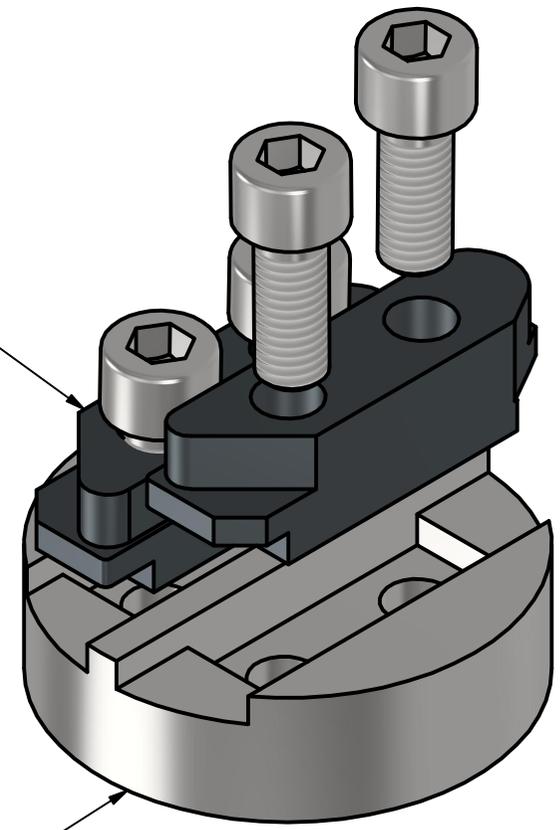
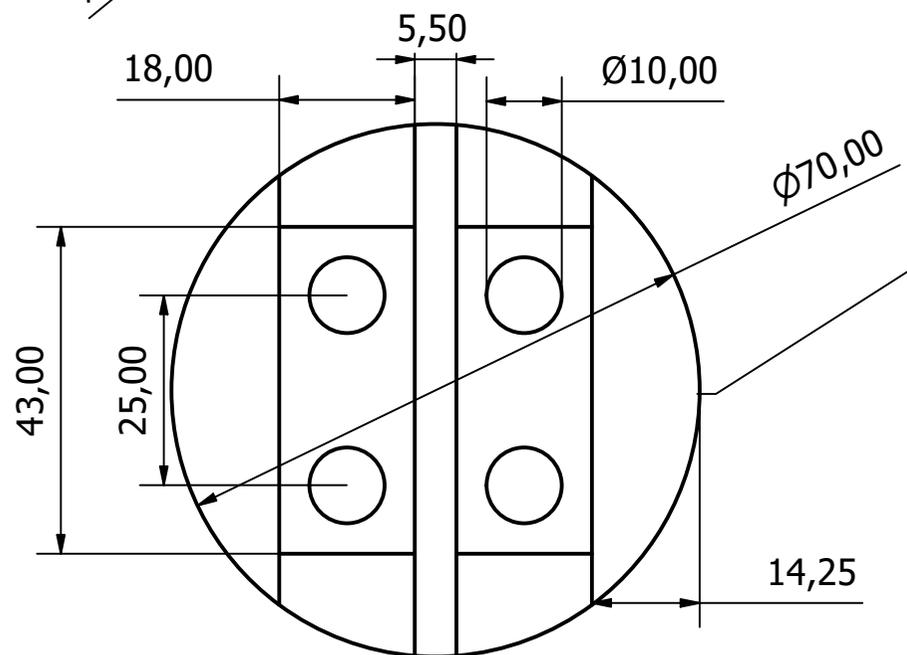
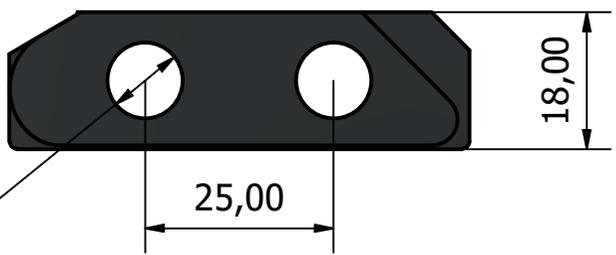
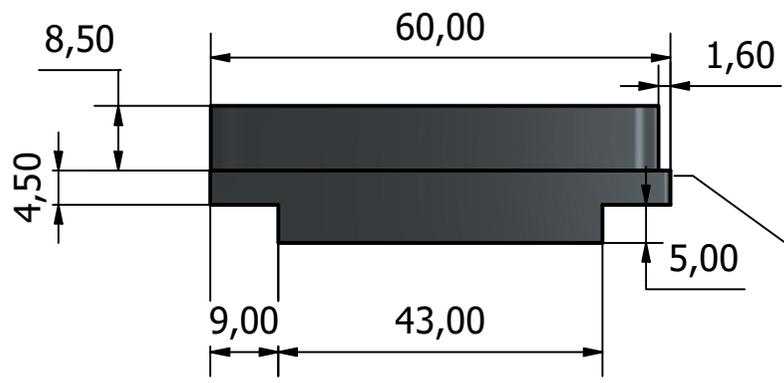
Desenho Nº DM_MNF_C12	STK Nº:		FOLHA 1 DE 1
-----------------------	---------	--	--------------

Descrição: ROLETE

Material:

	<p>DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA DA FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE COIMBRA</p>	
--	---	--

SOLUÇÃO ALTERNATIVA



HISTÓRIA DE REVISÕES:
REV N°:
APROVADO:
VERIFICADO:
DATA:
AUTOR: Leandro Marques
TAMANHO:

Desenho N°	STK N°:		FOLHA 1 DE 1
Descrição:			
Material:			
	DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA DA FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE COIMBRA		