



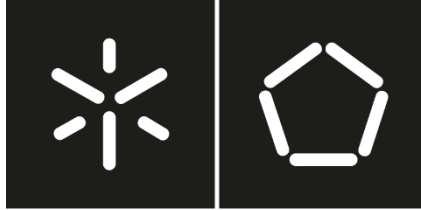
Universidade do Minho

Escola de Engenharia

Guilherme Barbosa Brochado

**Organização de um setor de
retificação de uma empresa
metalomecânica**

outubro de 2025



Universidade do Minho

Escola de Engenharia

Guilherme Barbosa Brochado

**Organização de um setor de
retificação de uma empresa
metalomecânica**

Dissertação de Mestrado

Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Trabalho efetuado sob a orientação do:

Professor Doutor João Pedro Mendonça

Assunção Silva

Professor Doutor Hélder Jesus Fernandes

Puga

Outubro de 2025

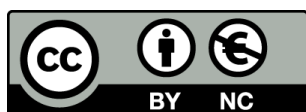
DIREITOS DE AUTOR E CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO TRABALHO POR TERCEIROS

Este é um trabalho académico que pode ser utilizado por terceiros desde que respeitadas as regras e boas práticas internacionalmente aceites, no que concerne aos direitos de autor e direitos conexos.

Assim, o presente trabalho pode ser utilizado nos termos previstos na licença abaixo indicada.

Caso o utilizador necessite de permissão para poder fazer um uso do trabalho em condições não previstas no licenciamento indicado, deverá contactar o autor, através do RepositóriUM da Universidade do Minho.

Licença concedida aos utilizadores deste trabalho



Atribuição-NãoComercial
CC BY-NC

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/deed.en>

Agradecimentos

Em primeiro lugar, gostaria de expressar o meu sincero agradecimento ao meu orientador, Professor Doutor João Pedro Mendonça Assunção Silva, e ao meu coorientador, Professor Doutor Hélder Jesus Fernandes Puga, pela orientação científica, disponibilidade e acompanhamento ao longo do desenvolvimento desta tese. A sua dedicação, rigor académico e valiosos contributos foram determinantes para a qualidade deste trabalho e constituíram uma fonte de motivação e inspiração ao longo de todo o processo.

Agradeço de forma muito especial à minha família, aos meus pais e ao meu irmão, por todo o apoio incondicional, paciência e compreensão demonstrados não apenas durante a realização desta tese, mas ao longo de toda a minha vida académica e pessoal. O incentivo e confiança transmitidas foram fundamentais para ultrapassar os desafios deste percurso e alcançar este importante marco.

Estendo também o meu profundo reconhecimento ao meu orientador na empresa, Diogo Lopes, pela orientação, disponibilidade e valiosos ensinamentos transmitidos ao longo do estágio. A sua orientação prática e o seu entusiasmo pelo trabalho foram uma fonte de motivação constante, contribuindo de forma significativa para o meu crescimento técnico e profissional.

Não poderia deixar de manifestar igualmente o meu sincero agradecimento à restante equipa do departamento, Hugo Rocha, João Coelho e Emanuel Lima, pelo acolhimento, pelo espírito de entreajuda e pela colaboração diária. O seu apoio, partilha de conhecimento e bom ambiente de trabalho tornaram esta experiência não apenas enriquecedora, mas também verdadeiramente gratificante.

A todos aqueles que, de forma direta ou indireta, contribuíram para a concretização deste trabalho, deixo uma palavra de profundo reconhecimento e gratidão.

Declaração de integridade

Declaro ter atuado com integridade na elaboração do presente trabalho académico e confirmo que não recorri à prática de plágio nem a qualquer forma de utilização indevida ou falsificação de informações ou resultados em nenhuma das etapas conducente à sua elaboração.

Mais declaro que conheço e que respeitei o Código de Conduta Ética da Universidade do Minho.

Resumo

O presente trabalho insere-se no âmbito da engenharia mecânica aplicada à indústria metalomecânica, tendo como principal objetivo a análise e otimização de um processo de fabrico associado à operação de retificação de componentes metálicos. Esta etapa do processo produtivo, frequentemente posicionada nas fases finais da manufatura, assume particular importância por influenciar diretamente a precisão dimensional e a qualidade superficial das peças.

O estudo desenvolvido teve como ponto de partida a observação de algumas limitações associadas ao processo de retificação existente, as quais comprometiam a eficiência e a repetibilidade dos resultados. Com base nesta constatação, foi conduzida uma análise sistemática que visou compreender as causas subjacentes a essas não conformidades e, posteriormente, propor uma solução técnica capaz de garantir maior estabilidade e controlo sobre as operações de acabamento. No âmbito do projeto, foi desenvolvido e implementado um sistema de fixação e apoio das peças de trabalho, concebido de forma a permitir um posicionamento mais preciso e uniforme durante a retificação. Esta solução foi pensada para responder às exigências de alinhamento e planicidade das superfícies, assegurando simultaneamente maior flexibilidade e segurança no processo produtivo. Após a integração do novo sistema, foram comparados os resultados obtidos com os parâmetros anteriormente praticados, avaliando-se o impacto das alterações na eficiência e na qualidade dimensional das peças produzidas. Esta análise permitiu verificar uma melhoria global na consistência do processo, reforçando a importância de uma abordagem metódica e orientada para a otimização contínua das operações industriais.

Em síntese, o trabalho desenvolvido demonstra como a aplicação de princípios de engenharia, aliados a uma compreensão detalhada das necessidades produtivas, pode resultar em ganhos significativos de desempenho, fiabilidade e qualidade. A abordagem seguida reforça ainda a relevância da investigação aplicada no contexto industrial, contribuindo para o aperfeiçoamento dos processos e para a competitividade das empresas do setor metalomecânico.

Palavras-chave: Retificação, projeto, sistema, eficiência

Abstract

This dissertation is framed within the field of mechanical engineering applied to the metalworking industry, with the main objective of analysing and optimising a manufacturing process associated with the grinding of metallic components. This stage of production, typically carried out in the final phases of manufacturing, plays a crucial role in ensuring the dimensional precision and surface quality of the parts produced.

The study began with the identification of certain limitations in the existing grinding process, which were compromising both efficiency and repeatability. Based on this observation, a systematic analysis was conducted to understand the underlying causes of these nonconformities and subsequently propose a technical solution capable of improving process stability and control during finishing operations.

As part of the project, a new workpiece clamping and support system was designed and implemented to ensure more accurate and consistent positioning during grinding. This solution was developed to address the alignment and flatness requirements of the parts, while simultaneously enhancing flexibility, reliability, and safety within the production process.

Following the integration of the new system, the results were compared with the parameters previously employed, allowing for an assessment of the impact of the implemented improvements on process efficiency and dimensional quality. This analysis revealed a global enhancement in process consistency, highlighting the importance of a systematic and methodical approach to continuous optimization in industrial operations.

In summary, the work carried out demonstrates how the application of sound engineering principles, combined with a thorough understanding of production requirements, can lead to significant improvements in performance, reliability, and quality. The approach adopted reinforces the relevance of applied research within the industrial context, contributing to the advancement of manufacturing processes and to the competitiveness of companies in the metalworking sector.

Keywords: Grinding, Project, System, Efficiency

Índice de figuras

Figura 1 - Logo da J.António da Silva, Lda	3
Figura 2 - Tipos de tecnologias de manufatura	5
Figura 3 - Gráfico da influência do tamanho do grão.....	13
Figura 4 - Retificação plana	16
Figura 5 - Retificação cilíndrica reta	18
Figura 6 - Retificação cilíndrica cónica	19
Figura 7 - Retificação cilíndrica de forma	19
Figura 8 - Retificação cilíndrica angular.....	20
Figura 9 - Retificação sem centro	21
Figura 10 - Retificação interna reta	23
Figura 11 - Retificação interna cónica	23
Figura 12 - Retificação interna de forma.....	23
Figura 13 - Retificação interna da face de uma extremidade	24
Figura 14 - Retificação com alimentação por fluência	25
Figura 15 - Retificação de ferramentas	26
Figura 16 - Retificação de roscas	28
Figura 17 - Exemplos de métodos de medição direta.....	37
Figura 18 - - Exemplos de métodos de medição por comparação	38
Figura 19 - Valor da massa.....	39
Figura 20 - Máquina de medição por coordenadas	45
Figura 21 -Máquina de medição por visão (ViciVision)	46
Figura 22 - Desenho de biela com cabeças de alturas diferentes.....	51
Figura 23 - Faces retificadas da biela.....	51
Figura 24 - Mesa magnética da máquina de retificação plana	52
Figura 25 - Ilustração da disposição das bielas na mesa de retificação	53
Figura 26 - Disposição das bielas com faces não coplanares	54
Figura 27 - Mós escalonadas da Nissei H-5RS	58
Figura 28 - Mordente.....	61
Figura 29 - Estrutura com guia	62
Figura 30 - (1) - Componente guia; (2) - Componente guia montado no sistema	63

Figura 31 - Vista em corte do mecanismo de aperto do mordente	64
Figura 32 - Batente para os mordentes.....	65
Figura 33 - Fixação dos batentes	66
Figura 34 - Furos nos calços e mordente para fixação do eixo	66
Figura 35 - Cavilha para rotação do mordente	67
Figura 36 - Sistema pneumático	68
Figura 37 - Acessório de montagem (Rear Clevis Bracket)	75
Figura 38 - Pivot type.....	75
Figura 39 - Sistema pneumático atualizado	76
Figura 40 - Fixação da rótula à base da ferramenta.....	77
Figura 41 - Sistema pneumático montado	78
Figura 42 - Geometria atualizada do mordente para implementação das chapas.....	79
Figura 43 - Sistema com chapas niveladoras.....	80
Figura 45 - Componente móvel do sistema montada	81
Figura 44 - Componente para chapa móvel	81
Figura 46 - Ferramenta de fixação sem bases	82
Figura 47 - Ferramenta de fixação finalizada	83
Figura 48 - Base retificada	91
Figura 49 - Bases montadas antes da retificação final	92
Figura 50 - Retificação final da base na retificadora plana	92
Figura 51 - Rótulas esféricas montadas.....	93
Figura 52 - Eixo do sistema pneumático montado.....	94
Figura 53 - Suporte do cilindro pneumático montado.....	94
Figura 54 - Cilindros pneumáticos montados.....	95
Figura 55 - Sistema do mordente móvel montado	96
Figura 56 - Ferramenta com mordentes fixos montados.....	97
Figura 57 - Circuito pneumático montado na ferramenta	102
Figura 58 - Ferramenta finalizada montada na retificadora	103

Índice de tabelas

Tabela 1 - Tipos de processos abrasivos	7
Tabela 2 - Classificação dos grãos relativamente ao seu tamanho.....	11
Tabela 3 - Peças por hora de diversos modelos de bielas com faces coplanares.....	56
Tabela 4 - Peças por hora de diversos modelos de bielas com faces não coplanares.	57
Tabela 5 - Componentes do mecanismo auxiliar ao sistema pneumático	69
Tabela 6 - Cálculos de área útil para cilindros pneumáticos com êmbolos diferentes	73
Tabela 7 - Lista de matéria-prima para cada um dos componentes.....	85
Tabela 8 - Processos de fabrico dos componentes	87
Tabela 9 - Lista com as instruções fornecidas para o serrote	89

1. Introdução

A crescente competitividade dos mercados industriais tem impulsionado as empresas a investir na melhoria contínua dos seus processos produtivos, procurando simultaneamente otimizar recursos, aumentar a produtividade e garantir elevados padrões de qualidade. Neste cenário, a indústria metalomecânica assume um papel de destaque, uma vez que está na base de inúmeros setores de atividade, fornecendo componentes essenciais para as indústrias automóvel, aeronáutica, energética e de equipamentos industriais. O sucesso e a sustentabilidade destas empresas dependem, cada vez mais, da sua capacidade para inovar, automatizar e aperfeiçoar os seus métodos de fabrico.

Os avanços tecnológicos verificados nas últimas décadas têm conduzido a uma transformação profunda na forma como as operações industriais são planeadas e executadas. A introdução de sistemas automatizados, a integração de conceitos de manufatura avançada e o recurso a técnicas de controlo rigoroso da qualidade permitiram atingir níveis de precisão e eficiência outrora inatingíveis. Contudo, apesar destes progressos, continuam a existir desafios significativos associados à gestão dos processos produtivos, nomeadamente na otimização das operações de maquinagem e acabamento, que representam etapas determinantes na obtenção de produtos conformes e competitivos.

Entre os diversos processos utilizados na indústria metalomecânica, a retificação destaca-se por ser uma operação de acabamento de elevada precisão, essencial para garantir o rigor dimensional e a qualidade superficial das peças. Dada a sua natureza, este processo requer um planeamento meticuloso, uma escolha adequada de parâmetros e uma gestão eficiente dos sistemas de fixação e medição. A inexistência de controlo nestes aspetos pode comprometer a funcionalidade das peças e afetar negativamente a produtividade global. Assim, a análise e reorganização de processos de retificação constituem um campo de estudo particularmente relevante, permitindo identificar limitações, propor melhorias e implementar soluções técnicas que otimizem o desempenho global da produção.

1.1 Enquadramento

No domínio da engenharia mecânica, a gestão e melhoria dos processos de fabrico assumem um papel determinante. Cada etapa do ciclo produtivo, desde a seleção das matérias-primas até às operações de acabamento, contribui para o desempenho e fiabilidade do produto final. A complexidade inerente a estas etapas exige um planeamento rigoroso, apoiado em metodologias de análise técnica e ferramentas de controlo de qualidade que assegurem a precisão dimensional e a repetibilidade dos resultados.

Particularmente na indústria metalomecânica de precisão, a procura por tolerâncias cada vez mais apertadas e acabamentos superficiais de elevada qualidade reforça a importância dos processos de maquinagem e, em especial, da retificação. Estes processos, tradicionalmente associados às fases finais da produção, são essenciais para garantir que as peças cumpram as especificações exigidas e apresentem o desempenho esperado nas suas aplicações. No entanto, a sua eficiência depende fortemente da estabilidade das condições de trabalho, da adequação dos sistemas de fixação e da correta definição dos parâmetros de operação.

O presente trabalho insere-se neste quadro de exigência e modernização, procurando compreender e otimizar um processo produtivo associado à retificação de componentes metálicos. Através da análise das condições existentes e da implementação de soluções de melhoria, pretende-se promover a eficiência do processo e assegurar o cumprimento rigoroso dos requisitos técnicos.

Desta forma, o presente trabalho contextualiza o estudo no âmbito da engenharia mecânica aplicada à indústria metalomecânica, evidenciando a relevância de uma abordagem sistemática e científica à otimização de processos. Assim, a investigação desenvolvida reflete a importância de alinhar a prática industrial com os princípios da melhoria contínua, contribuindo para o aumento da competitividade e da sustentabilidade das organizações no contexto industrial contemporâneo.

1.2 Apresentação da JASIL

A J. António da Silva, Lda também conhecida como JASIL é uma empresa de metalomecânica de precisão com mais de 70 anos de história, tendo sido fundada em 1948.



Figura 1 - Logo da J. António da Silva, Lda

De facto, tem inúmeras áreas de negócio, nomeadamente, automóvel, bicicletas, Lazer&Desporto, indústria e motas. No entanto, o seu principal foco reside na produção de peças e acessórios para motas e scooters.

Efetivamente, apesar de contar com mais de 70 anos de existência, a empresa mantém-se altamente moderna e competitiva, fruto do seu compromisso contínuo com a inovação. Este posicionamento deve-se ao seu permanente investimento em novas tecnologias, que lhe permite otimizar processos, aumentar a eficiência produtiva e garantir elevados padrões de qualidade. Desta forma, em 2017, o Kaizen Institute reconheceu a qualidade da empresa, atribuindo-lhe o prémio “Excellence in Productivity” em reconhecimento da sua excelência e compromisso com a melhoria contínua da produtividade. Para além disso, a JASIL marcou a sua presença em inúmeros eventos internacionais de renome, tais como: EICMA (2001 e 2022), MXGP (2019), EUROBIKE (2023), entre outros. [6]

Assim, graças à sua longa experiência, diversificação de áreas de negócio e aposta contínua na inovação, a JASIL afirma-se como uma referência no setor da metalomecânica de precisão. O reconhecimento da sua qualidade, aliado à participação em eventos internacionais de prestígio, demonstra a sua capacidade de adaptação e competitividade num mercado em constante evolução. Desta forma, a empresa continua a consolidar a sua posição, mantendo-se na vanguarda da indústria e preparada para enfrentar os desafios do futuro.

1.3 Objetivo do projeto

O presente projeto tem como objetivo a análise e reorganização do processo de retificação, uma fase crítica no ciclo de fabrico da indústria metalomecânica, particularmente na produção de componentes destinados ao setor automóvel. Entre esses componentes destacam-se as bielas, peças de elevada importância funcional, cuja precisão dimensional influencia diretamente o desempenho e a fiabilidade dos motores.

A retificação, sendo uma operação de acabamento, surge geralmente nas fases finais do fabrico e tem como finalidade assegurar que as superfícies das peças atingem elevados níveis de qualidade, tanto no que respeita ao acabamento superficial como ao rigor dimensional. Para alcançar tais objetivos, é essencial que este processo esteja devidamente planeado e controlado. Assim, a reorganização proposta neste trabalho assenta num planeamento metódico das operações de retificação, envolvendo a definição sequencial das etapas do processo, a programação adequada das máquinas-ferramentas envolvidas, bem como a gestão eficaz dos recursos humanos e materiais. Este planeamento será sustentado em procedimentos normalizados, que visam garantir a reprodutibilidade dos resultados e a conformidade das peças com os requisitos técnicos estabelecidos.

Neste contexto, o projeto foca-se numa anomalia dimensional detetada especificamente no processo de retificação de bielas onde existe uma discrepância na altura das cabeças, comprometendo a correta fixação das bielas na mesa de trabalho para a retificação. Assim, de forma a resolver esta não conformidade, pretende-se desenvolver e implementar um novo sistema de fixação adaptativo, que permita regular individualmente a altura de cada cabeça, promovendo o seu correto alinhamento durante a operação de retificação.

Assim, após a aplicação da nova solução, será conduzido um estudo detalhado de carácter dimensional, que permitirá avaliar o impacto da intervenção proposta na qualidade final das peças. Este estudo incidirá sobre a verificação do cumprimento das tolerâncias geométricas e dimensionais exigidas, sendo crucial para garantir que as peças retificadas se mantêm funcionais, fiáveis e aptas à sua aplicação em sistemas automóveis de elevada exigência técnica.

2. Revisão bibliográfica

2.1 Manufatura

A manufatura é o processo de transformação de matérias-primas em produtos acabados através de diferentes técnicas e tecnologias. De facto, como se pode observar na Figura 2, é um conceito que engloba uma ampla variedade de métodos produtivos e tecnologias, que podem ser categorizados em quatro principais tipos: manufatura aditiva, subtrativa, conformação e de união. Cada um destes métodos apresenta características específicas que influenciam diretamente a escolha do processo ideal para determinada aplicação industrial.

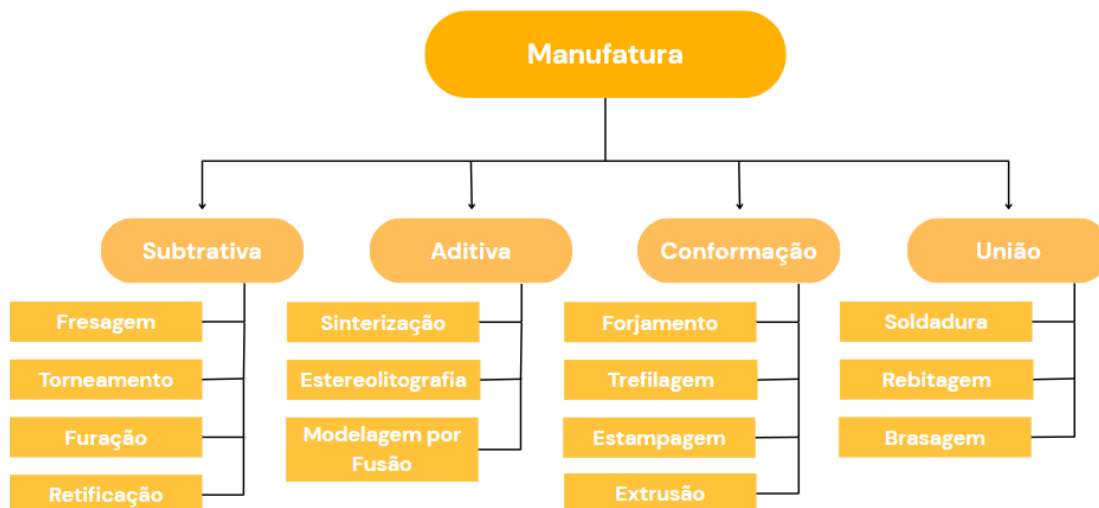


Figura 2 - Tipos de tecnologias de manufatura

No que diz respeito à manufatura aditiva consiste na adição progressiva de camadas de material até a obtenção da forma desejada. Assim, este processo tem como principal tecnologia a impressão 3D, que permite a criação de peças complexas com alta precisão e reduzido desperdício de material. Desta forma, tem vindo a apresentar uma crescente adoção na indústria aeroespacial, médica e automotiva devido o seu potencial para a produção de componentes personalizados e otimizados estruturalmente.

Em contraste, a manufatura subtrativa baseia-se na remoção de material para obter a peça final. Associadas esta tecnologia temos diversos processos, tais como: torneamento,

fresagem e retificação. Embora gere mais resíduos do que a manufatura aditiva, continua a ser essencial para a produção de peças metálicas e plásticas de alta precisão.

Paralelamente, a conformação distingue-se pela deformação do material sem adicionar ou remover substâncias. Desta forma, processos como o forjamento, trefilagem e extrusão são utilizados para modificar a forma ou estrutura interna da matéria-prima através da aplicação de calor e pressão.

Finalmente, complementando estes métodos, temos também a manufatura de união que se refere à combinação de diferentes componentes para formar um único produto. Processos como a soldadura e brasagem desempenham um papel crucial na criação de estruturas complexas e resistentes. Desta forma, esta abordagem é amplamente adotada na indústria automotiva, naval e eletrônica, onde a montagem eficiente de peças individuais é fundamental para garantir a funcionalidade e durabilidade dos produtos finais.

Para concluir, a interligação entre os diferentes tipos de manufatura permite que indústrias combinem técnicas para otimizar a produção, garantindo maior eficiência e qualidade. No entanto, é importante notar que a evolução tecnológica tem impulsionado a automação e a digitalização destes processos, promovendo a sustentabilidade e inovação no setor industrial. Assim, a escolha adequada do processo influencia diretamente a competitividade e a eficiência produtiva, sendo um fator determinante no desenvolvimento de novos produtos e soluções industriais.

2.2 Maquinagem com abrasivos

A maquinagem abrasiva é um processo de remoção de material altamente versátil e eficaz, essencial nas indústrias metalomecânicas, onde a precisão e a eficiência desempenham um papel crucial.

A maquinagem com abrasivos é um processo de fabrico subtrativo que se baseia no abrasão controlado da superfície de uma peça de trabalho. Este processo é realizado através da aplicação estratégica de partículas duras e abrasivas, que são friccionadas contra o material, removendo gradualmente camadas microscópicas de material de forma a alcançar a forma, tamanho ou acabamento de superfície desejados. Desta forma, através da utilização

de ferramentas abrasivas, como mós, é possível ajustar e refinar peças de trabalho conforme pretendido.

De facto, ao contrário dos métodos de maquinagem convencionais, que utilizam ferramentas de corte, a maquinagem abrasiva tira partido da ação coletiva de múltiplos grãos abrasivos, sendo cada um deles uma aresta de corte microscópica. Assim, esta abordagem permite a remoção precisa de material, mesmo em geometrias complexas ou áreas de difícil acesso, tornando a maquinagem abrasiva um processo indispensável e vital em diversas indústrias. [9]

Tabela 1 - Tipos de processos abrasivos

Processo	Fixação dos abrasivos	Características
Retificação	Aglomerante	Utiliza mós, boa precisão e acabamento superficial
Brunimento	Aglomerante	Pedras com abrasivos finos; utilizado para acabamento de furos;
Lapidação	Livres	Partículas finas incorporadas num metal macio; utilizado para acabamentos de superfície
Jateamento	Livres	Jato de abrasivos num gás inerte a altas velocidades
Ultrasónico	Livres no líquido	Ferramenta vibratória que colide com abrasivos a grandes velocidades
Jato de água	Livres no jato	Jatos de água a grandes velocidades que contêm partículas abrasivas

2.3 Retificação

A retificação é um processo de maquinagem que utiliza partículas abrasivas como meio de corte, destacando-se pela sua elevada precisão e qualidade no acabamento superficial. Este processo desempenha um papel fundamental na indústria, sendo amplamente utilizado na fabricação de componentes que exigem tolerâncias dimensionais rigorosas. [1]

Devido à sua capacidade de remover material de forma controlada e eficiente, a retificação é essencial na produção de uma vasta gama de produtos e equipamentos. Assim,

sem este processo, seria inviável fabricar ferramentas de corte para torneamento, fresagem e furação, bem como componentes críticos, como rolamentos ou peças de alta precisão para dispositivos eletrónicos. Desta forma, a retificação é, na maioria dos casos, considerada a etapa final do processo de maquinagem, visto que garante um acabamento de elevada qualidade e atende às especificações exigidas.

Para além do seu papel no acabamento, importa realçar a versatilidade da retificação. Apesar de ser frequentemente associada a operações de precisão, este processo pode também ser utilizado para desbaste, recorrendo a mós com partículas mais abrasivas, concebidas para remover grandes volumes de material num curto espaço de tempo.

Para concluir, a retificação é essencial na indústria moderna, garantindo precisão, qualidade e versatilidade na maquinagem de componentes. Assim, seja em operações de acabamento ou de desbaste, este processo destaca-se pela sua capacidade de cumprir rigorosos requisitos dimensionais e funcionais. Desta forma, a sua importância é incontestável, sendo um método indispensável na produção de peças e equipamentos de alta exigência tecnológica.

2.3.1 Evolução histórica

O processo de retificação tem as suas origens na antiguidade, quando os primeiros seres humanos descobriram que poderiam afiar ferramentas de pedra ao friccioná-las contra superfícies abrasivas naturais. Com o avanço da metalurgia, surgiram as primeiras formas rudimentares de rodas abrasivas para modelar metais, marcando um progresso significativo na manufatura.

Durante a Idade Média, o uso de pedras abrasivas tornou-se comum na afiação de armas e ferramentas. No entanto, foi apenas com a Revolução Industrial que a retificação passou por um desenvolvimento substancial. A mecanização permitiu a criação das primeiras máquinas de retificação modernas, com engrenagens de alta precisão e acionamento a vapor.

No final do século XIX e início do século XX, a introdução de abrasivos sintéticos, como o carboneto de silício e o óxido de alumínio, revolucionou a retificação ao proporcionar materiais mais duros e duradouros. Desta forma, permitiu o processamento de materiais mais

resistentes, como aços endurecidos e ligas metálicas avançadas, ampliando a aplicação da retificação na indústria de precisão.

Com o avanço da tecnologia no século XX, foram desenvolvidas técnicas como a retificação *creep-feed*, a retificação com superabrasivos (diamante e nitreto cúbico de boro) e o uso de fluidos de corte para controlo térmico. Assim, estes avanços elevaram a retificação a um processo essencial na indústria aeroespacial, automóvel e de microeletrônica, garantindo alta precisão e superfícies de excelente qualidade.

Atualmente, a retificação continua a evoluir com a automação e a inteligência artificial, permitindo processos mais eficientes e sustentáveis. O desenvolvimento de máquinas CNC e sistemas de monitorização em tempo real aumentou significativamente a precisão e a reprodutibilidade, consolidando a retificação como um pilar da indústria moderna.

2.3.2 Mós

As mós são ferramentas essenciais no processo de retificação, sendo utilizadas para remover material por meio de ação abrasiva, proporcionando um acabamento preciso e elevada qualidade superficial às peças trabalhadas. De facto, estas ferramentas apresentam diferentes perfis e são compostas por grãos abrasivos de alta dureza, responsáveis pelo corte, que são fixados através de uma matriz ligante.

No que diz respeito ao desempenho e às propriedades destas ferramentas, estas dependem de diversos fatores, tais como:

- Material do grão abrasivo;
- Tamanho do grão;
- Matriz ligante;
- Porosidade.

A correta seleção destes parâmetros é essencial para garantir a eficiência do processo de retificação, equilibrando fatores como durabilidade da mó, qualidade do acabamento e taxa de remoção de material.

Materiais

Os materiais dos grãos das mós são essenciais para a eficiência, precisão e durabilidade dos processos de maquinagem. Efetivamente, para um desempenho otimizado, estes materiais devem apresentar propriedades como elevada dureza, resistência ao desgaste e estabilidade térmica, garantindo uma remoção controlada de material e a obtenção de acabamentos de alta qualidade.

A escolha adequada do material é um fator essencial, influenciando diretamente a eficácia do processo, a vida útil das ferramentas e a qualidade final das superfícies trabalhadas. Desta forma, dada a diversidade de aplicações industriais, é fundamental selecionar materiais que melhor se adaptem às exigências específicas de cada operação.

Neste contexto, apresentam-se a seguir os materiais mais utilizados nas mós, destacando as suas principais características e aplicações:

- **Óxido de Alumínio (Al_2O_3):** Amplamente utilizados devido à sua elevada dureza e à possibilidade de ser produzido em diversas granulometrias. Este material destaca-se pela sua resistência ao desgaste, à temperatura e pela sua elevada tenacidade, tornando-o adequado para a maquinagem de uma ampla gama de materiais, incluindo aço inoxidável e outros metais de elevada dureza.
- **Carboneto de silício:** Amplamente utilizado para a maquinagem de materiais que podem ser tanto mais macios como mais duros do que aqueles tradicionalmente trabalhados com óxido de alumínio. Devido à sua elevada dureza e fragilidade, é especialmente eficaz na retificação de ferro fundido, metais não ferrosos, vidro, pedra e cerâmica.
- **Diamante:** Material natural mais duro conhecido e é amplamente utilizado na maquinagem e corte de materiais extremamente duros, como carbonetos, vidro e cerâmica. Devido à sua dureza excecional e elevada resistência ao desgaste, é um abrasivo essencial em aplicações que requerem precisão extrema e acabamentos de elevada qualidade.
- **Nitreto cúbico de boro:** Segundo material mais duro conhecido e é frequentemente utilizado como alternativa ao diamante na retificação de metais ferrosos e de materiais que poderiam desgastar ou danificar o

diamante rapidamente. A sua elevada resistência térmica e ao desgaste torna-o ideal para operações de maquinagem exigentes, onde a precisão e a qualidade do acabamento superficial são essenciais.

Para concluir, a escolha do material da mó desempenha um papel determinante na eficiência e qualidade dos processos de retificação, influenciando diretamente a durabilidade da ferramenta e o desempenho da operação. Desta forma, tendo em conta a ampla variedade de materiais disponíveis, cada um com características específicas, a seleção deve considerar as exigências do processo e as propriedades do material que irá ser trabalhado. Assim, a otimização da retificação depende do equilíbrio entre resistência, dureza e estabilidade térmica, garantindo alta precisão e um acabamento adequado às necessidades industriais.

Tamanhos

A eficiência da mó não depende apenas do material dos grãos que a compõem, mas também do tamanho das suas partículas. De facto, o tamanho das partículas abrasivas, frequentemente denominada “granulometria”, é um fator crucial que influencia diretamente a taxa de remoção de material, o acabamento superficial obtido e a precisão do processo de maquinagem. Assim, torna-se importante compreender e analisar os diferentes tamanhos dos grãos (Tabela 2) e a sua influência nos processos de maquinagem, destacando a importância de uma seleção adequada para cada tipo de operação. [2]

Tabela 2 - Classificação dos grãos relativamente ao seu tamanho

Grão	Tipo de grão	Descrição
P36	Grossoiro	Indicado para remoção rápida de material (desbaste de madeira e metal) e eliminação de ferrugem.
P40		
P60		
P80		
P100	Médio	Ideal para lixagem, remover marcas provocadas por grãos mais grosseiro e para a preparação da superfície para acabamentos mais finos.
P120		
P150		
P180	Fino	

P220		Utilizado para lixagem fina, sendo ideal para a preparação da superfície para acabamentos como pintura ou envernizamento.
P240		
P280		
P320		
P360	Muito fino	Utilizado para trabalhos de acabamento e preparação para polimento, garantindo uma superfície lisa antes da aplicação do revestimento final.
P400		
P500		
P600		
P800	Extra fino	Utilizado para acabamento fino, polimento e obtenção de superfícies altamente lisas, sendo comum na metalomecânica.
P1000		
P1500		
P2000		
P3000		
P4000		

Efetivamente, tal como é possível analisar na Tabela 2, um número de grão mais elevado corresponde a partículas abrasivas de menor dimensão, resultando em abrasivos mais finos. A progressão da granulometria segue, geralmente, uma abordagem sequencial, iniciando-se com grãos mais grossos para uma remoção rápida de material, seguidos de grãos progressivamente mais finos para refinar a superfície e alcançar o acabamento desejado. No que diz respeito aos abrasivos de granulometria mais fina, estes são utilizados principalmente em processos de acabamento, nos quais se pretende obter superfícies lisas ou polidas com elevada qualidade.

A relação entre estes parâmetros pode ser analisada no gráfico da Figura 3, onde se observa a influência do tamanho dos grãos abrasivos na taxa de remoção de material e na qualidade do acabamento superficial.

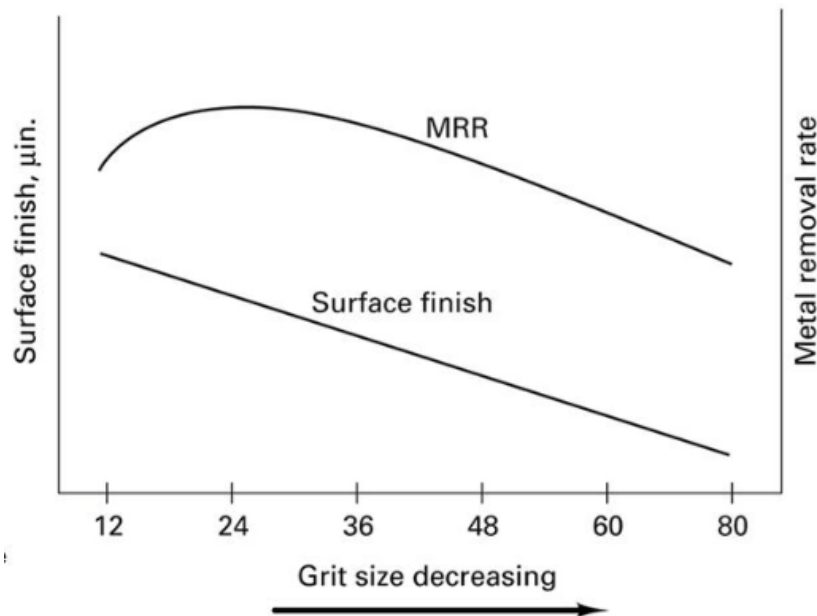


Figura 3 - Gráfico da influência do tamanho do grão

Como é possível analisar pelo gráfico da Figura 3, o comportamento do Material Removal Rate (MRR) no gráfico não é linear porque a interação entre o tamanho do grão abrasivo, a força de corte e a eficiência da remoção de material varia ao longo do processo. Inicialmente, à medida que o tamanho do grão diminui, o MRR aumenta, pois há mais arestas de corte ativas em contato com a peça, tornando a remoção de material mais eficiente. No entanto, esse aumento não é infinito, atingindo um pico em que há um equilíbrio ideal entre a profundidade de corte dos grãos e a taxa de remoção de material. A partir desse ponto, conforme os grãos se tornam ainda menores, a profundidade de penetração de cada grão reduz-se, tornando os cortes menos agressivos. Para além disso, a menor distância entre os grãos pode dificultar a evacuação de limalha, aumentando o risco de obstrução da superfície da mó e reduzindo a eficiência da remoção de material. Outro fator relevante é que grãos muito finos tendem a gerar mais atrito do que corte efetivo, o que também contribui para a diminuição do MRR. No que diz respeito ao acabamento superficial, este melhora progressivamente com a redução do tamanho dos grãos, reforçando a necessidade de uma seleção criteriosa da granulometria consoante os objetivos do processo.

Matriz ligante

A matriz ligante é essencial para as mós, visto que é responsável por fixar os grãos e controla a sua liberação durante a retificação, influenciando diretamente o desempenho da ferramenta. Desta forma, a escolha do material depende de fatores como a dureza da peça, a precisão exigida e as condições operacionais. Assim, torna-se relevante analisar as principais matrizes ligantes que são utilizadas nas mós, sendo elas:

- **Ligante vitrificado:** Este é o tipo de ligante mais comum em discos de retificação. É composto por uma mistura de materiais cerâmicos e é projetado para manter os grãos abrasivos unidos sob alta pressão. As ligas vitrificadas são extremamente fortes e rígidas, o que as torna ideais para a retificação de materiais duros.
- **Ligante de resina:** Composto por uma mistura de resina e materiais de enchimento. São ligantes flexíveis, o que as torna adequadas tanto para processos de retificação a seco quanto a húmido. Para além disso, também são resistentes ao calor, tornando-as ideais para a retificação de materiais mais suaves.
- **Ligante metálico:** Ligante projetado e fabricado a partir de uma mistura de pós metálicos, sendo que os grãos abrasivos são mantidos unidos por um processo de sinterização. De facto, as mós com ligante metálico são extremamente fortes e duráveis, o que as torna ideais para a retificação de materiais duros. Assim, devido à sua resistência e estabilidade, estas mós são frequentemente utilizadas em aplicações exigentes, como a retificação de ligas duras, materiais cerâmicos e outros compostos de alta dureza.
- **Ligantes eletrodepositados:** Neste tipo de ligante, os grãos abrasivos são fixados a um substrato metálico por meio de um processo de galvanoplastia. As mós com este tipo de ligante são extremamente precisas e são ideais para a retificação de formas delicadas e complexas. Para além disso, oferece uma boa dissipação de calor e uma durabilidade razoável em aplicações específicas.
- **Ligante híbrido:** Combina as propriedades dos ligantes vitrificados e de resina. Foi projetado para ser tão forte e rígido quanto um ligante vitrificado, mas também flexível como a de resina. Desta forma, a principal vantagem das

ligações híbridas é que elas oferecem uma combinação equilibrada de rigidez e flexibilidade, permitindo que sejam utilizadas numa ampla variedade de materiais, desde os mais duros até os mais suaves.

Porosidade

A porosidade das mós é um fator crucial que afeta diretamente o desempenho no processo de retificação, visto que se refere ao grau de espaços vazios (poros) entre os grãos abrasivos que compõem a estrutura. A quantidade e o tamanho desses espaços vazios têm um impacto significativo na capacidade de a mó remover material, no controlo do calor gerado durante o processo e na durabilidade da ferramenta.

Existem dois tipos principais de porosidade nas mós: porosidade aberta e porosidade fechada. A porosidade aberta caracteriza-se por uma maior quantidade de espaços vazios entre os grãos abrasivos, o que facilita a remoção das limalhas e a dissipação do calor, sendo estes fatores particularmente vantajosos em processos onde a remoção rápida de material é necessária, como na retificação de materiais mais duros. Para além disso, este tipo de porosidade apresenta uma maior capacidade de dissipar o calor, evitando o sobreaquecimento da peça de trabalho e da própria ferramenta, garantindo uma maior eficiência no processo. Contudo, visto que os grãos abrasivos expostos podem deixar marcas na peça, o acabamento superficial da peça trabalhada não irá ser bom. Para além disso, a exposição mais intensa dos grãos abrasivos acelera o desgaste da mó, o que pode comprometer a sua vida útil.

Por outro lado, a porosidade fechada apresenta uma estrutura mais compacta, com espaços menores entre os grãos abrasivos, o que resulta numa maior resistência ao desgaste e durabilidade da ferramenta. No que diz respeito à remoção de material, esta é mais lenta, uma vez que a maior compactação dos grãos reduz a capacidade de corte, resultando numa taxa de remoção de material mais baixa em comparação com a porosidade aberta. Desta forma, mós com porosidade fechadas são ideais para processos de acabamento fino, onde a estabilidade e a longevidade da ferramenta são fundamentais.

Para concluir, a escolha entre mós com porosidade aberta ou fechada depende das necessidades específicas do processo. De facto, mós de porosidade aberta são mais eficazes em remoção rápida de material e para materiais mais duros, enquanto mós de porosidade

fechada são mais indicadas para processos que exigem acabamento preciso e durabilidade prolongada. Assim, a compreensão das características e efeitos de cada tipo de porosidade permite otimizar os processos de retificação, equilibrando a eficiência e a qualidade do acabamento conforme a aplicação desejada.

2.3.3 Processos

Os processos de retificação, tal como mencionado anteriormente, são fundamentais para garantir um acabamento superficial e dimensões exatas em diversos componentes. De facto, cada um dos seus diversos processos apresenta características próprias que influenciam a sua aplicação em diferentes projetos de maquinagem. Desta forma, a seleção do processo mais adequado deve ter em conta fatores como a geometria e o tamanho da peça, os requisitos de acabamento e a produtividade desejada, assegurando um equilíbrio entre qualidade e eficiência na produção.

Retificação plana

A retificação plana é um processo amplamente utilizado para alcançar acabamentos superficiais muito suaves e para garantir a planicidade de peças metálicas. Neste processo, uma mó em rotação é utilizada para remover material da superfície da peça de trabalho, criando uma superfície plana e com tolerâncias dimensionais precisas. De facto, a operação é realizada numa máquina de retificação plana, onde a peça é fixada a uma mesa, normalmente magnética, que se move horizontalmente sob a roda abrasiva, permitindo um movimento controlado e uniforme, tal como é possível observar na figura apresentada abaixo.

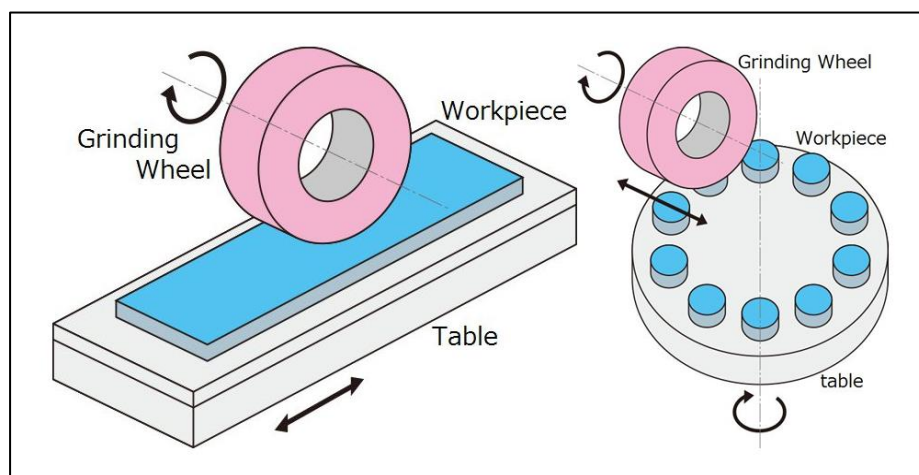


Figura 4 - Retificação plana

Efetivamente, a retificação plana é caracterizada por diversos fatores, tais como:

1. **Precisão e acabamento superficial:** Tal como dito anteriormente, a retificação plana é capaz de atingir tolerâncias dimensionais muito precisas, bem como acabamentos superficiais de alta qualidade. Desta forma, torna-se ideal para aplicações onde a uniformidade e o acabamento superficial são cruciais.
2. **Materiais trabalhados:** Embora o processo seja predominantemente utilizado em metais, também pode ser aplicado em cerâmicas e outros materiais duros. As mós, que variam conforme o tipo de material a ser trabalhado, permitem a remoção eficiente de material e garantem acabamentos uniformes.
3. **Tipos de máquinas:** As máquinas de retificação plana variam em termos de configuração e complexidade. As mais simples têm uma mesa manual que é movida manualmente, enquanto as mais avançadas apresentam controlos numéricos computadorizados (CNC) que permitem um controlo mais preciso do movimento da mesa e da rotação da mó, aumentando assim a eficiência e a repetibilidade do processo.

Aplicações Típicas:

1. **Acabamento de superfícies planas:** Ideal para a criação de superfícies muito lisas e uniformes, usadas, por exemplo, em peças de máquinas, componentes eletrónicos e instrumentos de precisão.
2. **Controlo de planicidade:** Para componentes que exigem precisão no que diz respeito à sua planicidade, como bases de máquinas, a retificação plana assegura que as superfícies sejam perfeitamente planas e com a menor deformação possível.

Para concluir, a retificação plana é uma técnica vital em muitas indústrias, proporcionando alta precisão e acabamentos superficiais de alta qualidade, essenciais para garantir o desempenho e a durabilidade das peças.

Retificação cilíndrica

A retificação cilíndrica é um processo utilizado para a maquinagem de superfícies cilíndricas, onde a peça de trabalho gira em conjunto com a mó, permitindo obter acabamentos cilíndricos de alta precisão.

De facto, este processo é caracterizado por diversos fatores, tais como:

1. **Alta precisão e acabamento superficial:** A retificação cilíndrica é ideal para obter acabamentos superficiais de alta qualidade em peças cilíndricas, com tolerâncias dimensionais muito apertadas. Esse processo permite obter superfícies lisas e uniformes, essenciais em várias indústrias que requerem precisão em componentes cilíndricos.
2. **Funcionamento:** A peça de trabalho é fixada numa máquina de retificação cilíndrica, onde gira ao redor do seu próprio eixo. A mó, em rotação, remove material da superfície cilíndrica da peça. Dependendo da configuração da máquina, o trabalho pode ser feito com a peça ou a mó a moverem-se ao longo do eixo ou de forma simultânea, de modo a proporcionar um corte uniforme e preciso.
3. **Métodos de retificação:** A retificação cilíndrica pode ser dividida em diferentes métodos, conforme a geometria e os requisitos da peça de trabalho:
 - Retificação cilíndrica reta: Focada em superfícies cilíndricas com diâmetros constantes ao longo de toda a sua extensão. Neste tipo de retificação, a direção do avanço da mó é paralela ao eixo central da peça, tal como é possível observar na figura abaixo apresentada.

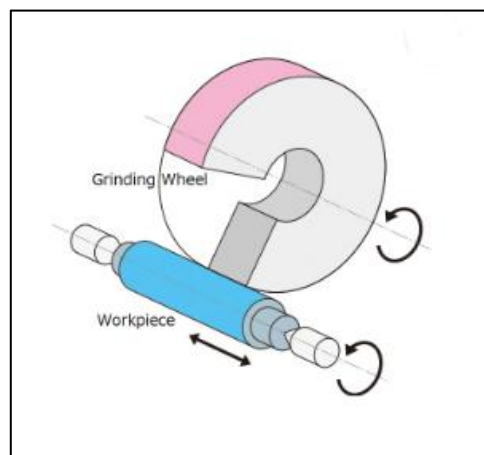


Figura 5 - Retificação cilíndrica reta

- Retificação cilíndrica cônica: Utilizada para peças que apresentam uma variação no diâmetro, como cones ou eixos cônicos. Neste caso, ao contrário do que acontece na retificação cilíndrica reta, a direção do avanço já vai ter um ângulo relativamente ao eixo central da peça. Desta forma, a direção do avanço da ferramenta vai ser igual ao ângulo de inclinação do cone.

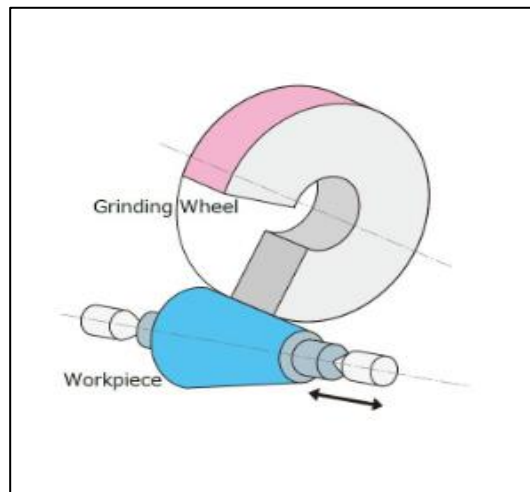


Figura 6 - Retificação cilíndrica cônica

- Retificação de forma: Aplicada quando é necessário dar forma complexa à peça, permitindo alcançar perfis geométricos específicos. Neste processo, a mó já vai ter o perfil, forma e dimensões da peça que vai retificar, tal como é possível observar na Figura 7.

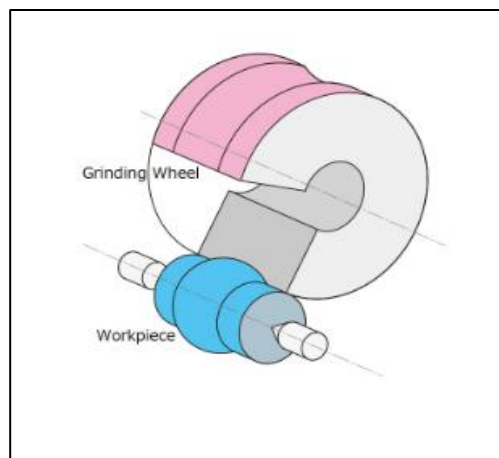


Figura 7 - Retificação cilíndrica de forma

- Retificação angular: Focada no acabamento das extremidades das peças cilíndricas, como eixos e barras. É possível observar na figura abaixo apresentada que a mó encontra-se inclinada de forma a apenas retificar o diâmetro do cilindro mais pequeno sem tocar na parede perpendicular à superfície. É importante notar que a mó já possui um perfil com o ângulo da inclinação que irá realizar de forma encostar totalmente na superfície e retificar numa passagem.

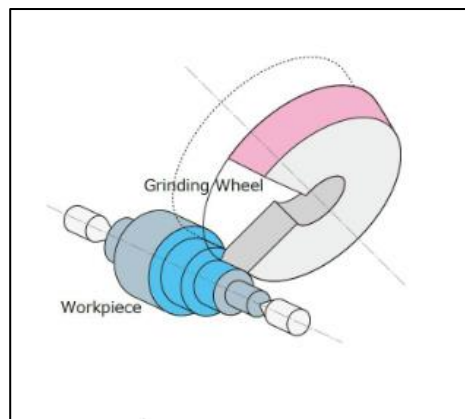


Figura 8 - Retificação cilíndrica angular

Aplicações típicas:

1. **Acabamento de barras e eixos metálicos:** A retificação cilíndrica é amplamente utilizada para dar acabamento a barras e eixos metálicos, que frequentemente necessitam de superfícies lisas e precisas para o seu funcionamento em diversas aplicações, como em motores e sistemas mecânicos.
2. **Retificação de peças com tolerâncias apertadas:** Em indústrias que exigem precisão extrema, como a aeroespacial, automotiva e de ferramentas, a retificação cilíndrica é utilizada para garantir que as peças cilíndricas atendam a tolerâncias muito estreitas.

Concluindo, este processo de retificação é crucial em muitas indústrias, nomeadamente no que diz respeito à fabricação de peças com geometria cilíndrica e com elevada qualidade superficial. Assim, a sua capacidade de manter a precisão e produzir acabamentos com tolerâncias exigentes torna-o indispensável para aplicações mais exigentes.

Retificação sem centro

A retificação sem centro é um processo utilizado para produzir peças cilíndricas com alta precisão e acabamento superficial. Diferente da retificação convencional, este método não utiliza um cabeçote fixo para prender a peça. De facto, a peça é sustentada entre a roda de retificação e uma roda de arrasto que controla sua rotação e avanço.

Efetivamente, este processo é caracterizado por inúmeros fatores, sendo alguns deles:

1. **Apoio e rotação da peça:** Diferente dos métodos convencionais de retificação, onde a peça é fixada entre os centros ou suportes, na retificação sem centro a peça é mantida em posição apenas por uma lâmina de trabalho (Figura 9), enquanto uma roda ajustável (adjust wheel), com movimento rotacional controlado, é responsável por girar a peça e guiar o processo.

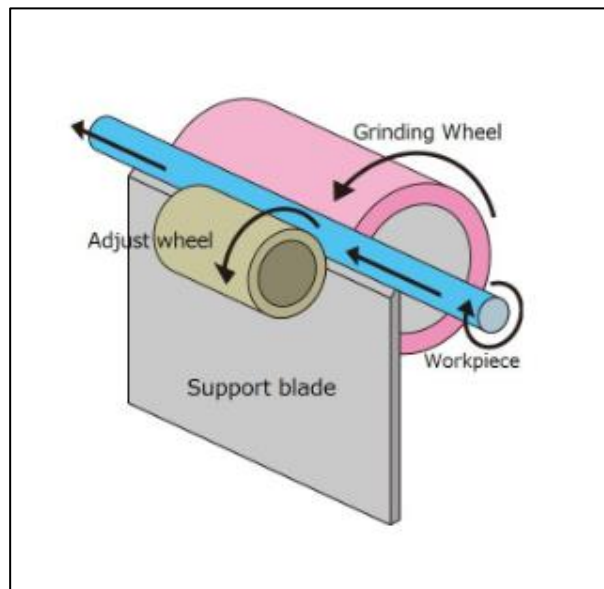


Figura 9 - Retificação sem centro

2. **Eficiência em produção em massa:** Este processo é particularmente vantajoso para a produção em grande escala de componentes cilíndricos, pois não requer a fixação da peça entre centros ou em dispositivos de fixação, o que reduz significativamente o tempo de setup e a intervenção do operador e aumenta a eficiência na produção em massa.
3. **Controlo de precisão:** Embora a peça não seja fixada, a combinação da lâmina de trabalho e da roda ajustável garante que a peça rode com precisão durante

o processo, permitindo obter acabamentos superficiais consistentes e tolerâncias apertadas, mesmo em produções de alto volume.

Aplicações típicas:

1. **Retificação de peças cilíndricas sem centros ou dispositivos de fixação:**
Este processo é ideal para peças cilíndricas que não exigem centros ou fixação adicional, como pinos, eixos e outros componentes cilíndricos simples.
2. **Produção de componentes cilíndricos em grande volume:** A retificação sem centro é amplamente utilizada para a produção em massa de peças cilíndricas, como componentes automotivos, rolamentos e outras peças que exigem alta precisão e acabamentos consistentes.

Assim, a retificação sem centro mostra ser uma técnica altamente eficiente e precisa para a produção de peças cilíndricas, especialmente em ambientes de alta produção. A sua capacidade de reduzir o tempo de setup e a intervenção do operador, mantendo alta precisão, torna este processo a escolha ideal para muitas indústrias que exigem produção em grande escala de componentes cilíndricos de alta qualidade.

Retificação interna

A retificação interna é um processo utilizado para o acabamento de superfícies internas de componentes, sendo essencial para garantir alta precisão em furos e cavidades cilíndricas ou cónicas. De facto, este método emprega uma pequena mó que opera a altas velocidades para remover material do interior das peças, assegurando geometrias internas rigorosas e acabamentos de elevada qualidade.

De facto, a retificação interna é distinguida dos outros processos de retificação, tendo em conta as suas características, tais como:

1. **Alta precisão em superfícies internas:** A retificação interna permite a maquinagem de furos e cilindros internos com tolerâncias extremamente apertadas, sendo fundamental para componentes que exigem encaixes perfeitos e superfícies lisas.

2. **Rotação em alta velocidade:** Devido ao pequeno diâmetro da roda abrasiva, é necessário operar a altas rotações para garantir eficiência na remoção de material e evitar vibrações excessivas que possam comprometer a precisão.
3. **Diferentes métodos de retificação:** Assim como na retificação cilíndrica, a retificação interna pode ser realizada por diferentes métodos, dependendo do formato e das especificações da peça:
 - Retificação interna reta: Indicada para furos cilíndricos retos, garantindo diâmetros internos uniformes.

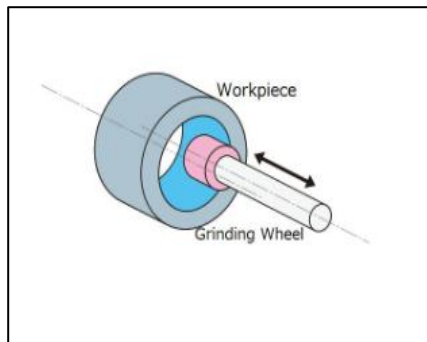


Figura 10 - Retificação interna reta

- Retificação interna cônica: Aplicada quando há variação no diâmetro interno, como em cones internos.

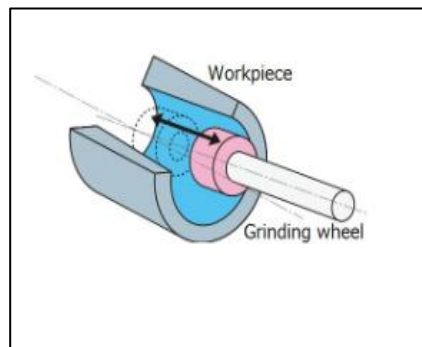


Figura 11 - Retificação interna cônica

- Retificação interna de forma: Utilizada para gerar geometrias internas complexas e contornos específicos.

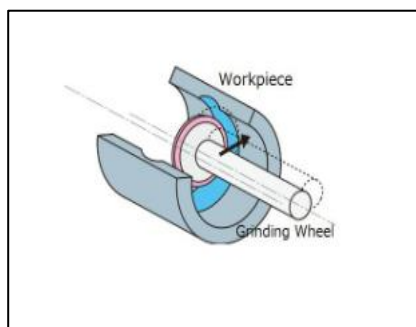


Figura 12 - Retificação interna de forma

- Retificação interna da face de uma extremidade: Focada no acabamento das extremidades internas dos furos ou cavidades.

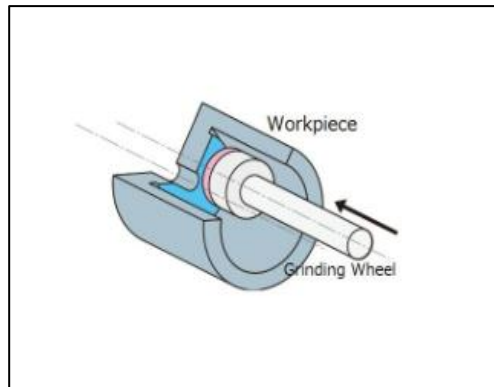


Figura 13 - Retificação interna da face de uma extremidade

Aplicações típicas:

1. **Fabricação de peças metálicas com geometrias internas complexas:** Essencial para produzir peças com cavidades de alta precisão, como engrenagens, buchas e componentes hidráulicos.
2. **Acabamento de tubos e cilindros internos:** Indispensável na indústria automotiva, aeroespacial e de equipamentos industriais, onde é necessário garantir o ajuste perfeito de peças móveis e minimizar atritos.
3. **Componentes para motores e sistemas hidráulicos:** Peças como anéis internos de rolamentos, camisas de cilindros e válvulas hidráulicas passam por retificação interna para assegurar funcionamento eficiente e durabilidade.

Desta forma, é possível concluir que a retificação interna é um processo essencial na manufatura de peças de alta precisão, permitindo alcançar padrões rigorosos de qualidade e desempenho em aplicações industriais exigentes.

Retificação com alimentação por fluência

Processo de retificação no qual a mó retira grandes quantidades de material numa única passagem. De facto, isto é possível tendo em conta que neste tipo de processo a mó irá ter o mesmo perfil que a peça a retificar, tal como apresentado na Figura 14, possibilitando assim a remoção do material numa só passagem e em diferentes zonas da peça.

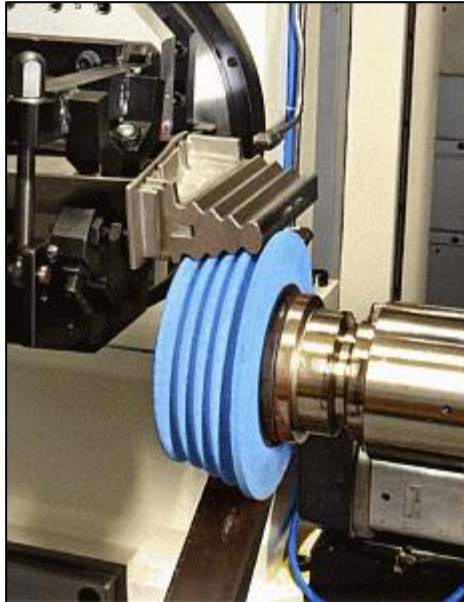


Figura 14 - Retificação com alimentação por fluência

Este processo pode ser caracterizado por diversos fatores, tais como:

1. **Corte profundo e taxa de avanço lenta:** Em contraste com a retificação convencional, onde múltiplas passagens removem pequenas quantidades de material, este processo remove grandes quantidades de material numa única passagem, exigindo uma roda abrasiva de alta resistência térmica e mecânica.
2. **Redução do tempo de produção:** Como permite a retificação de geometrias complexas numa única operação, este método reduz significativamente o tempo de processamento.
3. **Capacidade de trabalhar materiais de alta resistência:** Amplamente utilizada para retificar ligas metálicas de alta resistência, materiais cerâmicos e peças endurecidas.
4. **Semelhança com processos de fresagem:** Devido ao corte profundo e contínuo, este método compartilha características com a fresagem, mas oferece maior precisão e acabamento superficial superior.

Aplicações típicas:

1. **Retificação de ligas aeroespaciais e materiais de alta dureza:** Essencial para a fabricação de componentes estruturais aeroespaciais, onde a precisão e a resistência dos materiais são fundamentais.
2. **Produção de geometrias complexas numa única operação:** Utilizada para fabricar peças com perfis detalhados, como lâminas de turbinas, matrizes e ferramentas de corte avançadas.
3. **Redução de etapas no processo de fabricação:** Ao eliminar a necessidade de múltiplas passagens e processos adicionais, este tipo de retificação otimiza a produção, reduzindo custos operacionais.

Para concluir, este tipo de retificação é uma solução avançada para o fabrico de peças de alta complexidade, visto que combina a remoção eficiente de material com precisão. De facto, a capacidade de retificar materiais resistentes e reduzir etapas produtivas torna este processo indispensável para indústrias que exigem alta performance e eficiência.

Retificação de ferramentas

Processo que se foca na afiação, recondicionamento e fabricação de ferramentas de corte, como fresas, brocas, pastilhas de corte e outros componentes utilizados na maquinagem, tal como é possível observar na Figura 15. De facto, este processo exige um nível muito alto de precisão e controlo de forma a garantir que as ferramentas mantenham sua geometria correta e propriedades de corte ideais.



Figura 15 - Retificação de ferramentas

A retificação de ferramentas é um processo caracterizado por:

1. **Afiação e condicionamento:** Permite restaurar o fio de corte de ferramentas desgastadas, prolongando sua vida útil.
2. **Fabrico de ferramentas especiais:** Além da afiação, esse processo possibilita a criação de ferramentas personalizadas para aplicações específicas, otimizando o desempenho em operações que exigem perfis de corte únicos.
3. **Alta precisão e controle geométrico:** A retificação garante que os ângulos de corte, raios e superfícies das ferramentas sejam mantidos dentro de tolerâncias extremamente apertadas, essenciais para processos de maquinagem de alta precisão.

Aplicações típicas:

1. **Indústria metalomecânica e fabricação de moldes:** Empregada para manter a qualidade das ferramentas utilizadas na fabricação de peças metálicas e moldes de precisão.
2. **Setor aeroespacial e automotivo:** Essencial para garantir que ferramentas utilizadas na usinagem de materiais de alta resistência mantenham sua eficiência e precisão ao longo do tempo.

Assim, a retificação de ferramentas demonstra ser um processo fundamental para a manutenção e fabricação de ferramentas de corte, garantindo que a indústria metalomecânica opere com máxima eficiência, precisão e qualidade.

Retificação de roscas

A retificação de roscas é um processo utilizado em roscas de parafusos, porcas e outros elementos de fixação. Efetivamente, este método destaca-se pela capacidade de produzir roscas com elevada precisão, garantindo uniformidade, acabamento superior e tolerâncias extremamente apertadas.

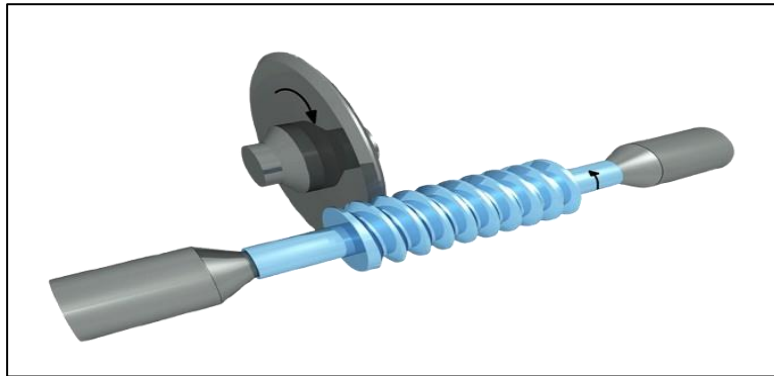


Figura 16 - Retificação de roscas

De facto, este processo é caracterizado por alguns fatores, tais como:

1. **Alta precisão e uniformidade:** Permite o fabrico de roscas com tolerâncias rigorosas e excelente acabamento superficial, garantindo encaixes perfeitos e funcionamento eficiente.
2. **Método ideal para materiais endurecidos:** Ao contrário dos processos convencionais de roscagem, como o torneamento, a retificação de roscas é especialmente eficaz para trabalhar materiais endurecidos, como aços tratados termicamente.
3. **Adequado para produção de peças complexas:** Esse processo é utilizado para fabricar roscas de alta complexidade, incluindo roscas múltiplas, roscas de perfil especial e componentes que exigem encaixes de extrema precisão.

Aplicações típicas:

1. **Produção de fusos de avanço e componentes para máquinas CNC:** Utilizada na fabricação de fusos de esferas e fusos trapezoidais, que exigem alta precisão para garantir movimentos lineares suaves e sem folga.

2. **Roscas de alta resistência para sistemas hidráulicos e de transmissão:** A retificação é usada para criar roscas que suportam grandes esforços mecânicos, garantindo maior durabilidade e desempenho.

Desta forma, é possível concluir que a retificação de roscas é um processo essencial para a fabricação de elementos de fixação e componentes mecânicos de alta precisão, visto que assegura qualidade, resistência e confiabilidade em diversas aplicações industriais.

Em jeito de conclusão, a retificação é um processo de maquinagem essencial para o fabrico e acabamento de peças com alta precisão, desempenhando um papel fundamental em diversas indústrias. De facto, os processos supramencionados, representam as técnicas mais amplamente utilizadas, cada uma com suas particularidades e vantagens conforme a necessidade da peça e do material. No entanto, é importante notar que para além desses processos, existem técnicas ainda mais especializadas e adaptadas a casos específicos, como por exemplo a retificação de engrenagens, fundamental para garantir engrenagens com perfis precisos e funcionamento suave, a retificação de perfis, utilizada para gerar formas complexas em peças industriais, entre outros.

2.4 Metrologia dimensional

A metrologia dimensional é um conceito essencial dentro do campo da engenharia e da produção industrial, sendo responsável pela medição precisa de dimensões e formas dos produtos. No contexto da indústria metalomecânica, desempenha um papel fundamental na garantia da qualidade das peças fabricados, assegurando que estas cumpram rigorosamente as especificações projetadas.

A crescente exigência por produtos de alta precisão, aliada à necessidade de otimizar os processos produtivos, tornou a metrologia dimensional uma área de destaque. De facto, com a evolução tecnológica, os métodos de medição tornaram-se cada vez mais sofisticados, incorporando técnicas avançadas, como a utilização de máquinas de medição por coordenadas (CMM) e sistemas de medição óticos, contribuindo não só para o aumento da precisão das medições, mas também para a redução dos tempos de inspeção e erros humanos.

2.4.1 Conceitos Fundamentais da Metrologia Dimensional

A metrologia pode ser definida como a ciência da medição, onde compreende todos os aspectos teóricos e práticos relacionados com a obtenção de medições fiáveis. No que diz respeito à metrologia dimensional, especificamente, esta concentra-se na medição de comprimentos, ângulos e estados de superfície.

- **Comprimento:** Distância entre dois pontos, ou seja, a dimensão linear de um objeto.
- **Ângulo:** Espaço compreendido entre duas semirretas (os lados) que partilham um ponto de origem comum (vértice).
- **Estado de superfície:** Configuração tridimensional de uma superfície resultante de variações sistemáticas ou aleatórias em relação à sua geometria ideal. Este conceito abrange características como a rugosidade, planeza, circularidade e cilindricidade.

No que diz respeito à fiabilidade dos processos de medição, este fator depende da rastreabilidade metrológica, que assegura que cada medição pode ser relacionada a um padrão de referência através de uma cadeia documentada de calibrações. Esta rastreabilidade permite que os instrumentos utilizados em medições industriais mantenham um nível de exatidão consistente e verificável.

2.4.2 Padrões Metrológicos

A metrologia dimensional assenta numa hierarquia de padrões que garantem a exatidão e a uniformidade das medições. De facto, um padrão metrológico é um instrumento de medição materializado destinado a reproduzir uma unidade de medição para servir como referência. Um padrão cujo valor é estabelecido pela comparação direta com o padrão primário é chamado Padrão Secundário, e assim sucessivamente, criando uma cadeia de padrões onde um padrão de maior qualidade metrológica é usado como referência para o de menor qualidade metrológica. Pode-se, por exemplo, a partir de um Padrão de Trabalho, percorrer toda a cadeia de rastreabilidade desse padrão, chegando ao Padrão Primário.

- **Padrões primários:** Caracterizado por ter alta qualidade metrológica e cujo valor é aceite sem referência a outro padrão.

- **Padrões secundários:** Valor estabelecido pela comparação direta com o padrão primário, sendo utilizados em laboratórios de calibração para manter a rastreabilidade e assegurar a precisão dos instrumentos de medição.
- **Padrões terciários (ou de trabalho):** Instrumentos utilizados nas indústrias para medições rotineiras e calibração de equipamentos, garantindo a conformidade dos produtos fabricados.

A adoção rigorosa destes padrões é essencial para assegurar a qualidade e fiabilidade das medições, permitindo a produção de peças e componentes dentro das tolerâncias exigidas. Desta forma, se não existir um controlo dimensional de alta qualidade e normalizado, a qualidade dos produtos pode vir a ser comprometida, resultando em falhas funcionais e aumento dos custos de produção.

2.4.3 Termos Fundamentais e Gerais da Metrologia

Tal como dito anteriormente, a metrologia enquanto ciência da medição desempenha um papel essencial em diversas áreas do conhecimento e da indústria, garantindo precisão, confiabilidade e comparabilidade nas medições. Para que esse campo seja devidamente compreendido e aplicado é fundamental conhecer os conceitos e terminologias que regem suas práticas. Desta forma, o Vocabulário Internacional de Metrologia (VIM), publicado pela Organização Internacional de Normalização (ISO), estabelece definições padronizadas que permitem a uniformização da linguagem metrológica a nível global. Assim, neste capítulo, apresentam-se alguns dos principais termos fundamentais e gerais da metrologia, abordando as grandezas e unidades, o processo de medição, os dispositivos de medição e as suas propriedades. [7]

Grandezas e unidades

Antes de qualquer medição, é essencial compreender o conceito de grandeza e a forma como ela é quantificada. Em metrologia, uma grandeza refere-se a qualquer propriedade mensurável de um fenómeno, corpo ou substância, sendo expressa numericamente em relação a uma unidade de referência.

- **Grandeza (“quantity”, VIM 1.1):** Propriedade de um fenômeno, corpo ou substância que pode ser expressa quantitativamente por um número e uma referência.
- **Dimensão de uma grandeza (“quantity dimension”, VIM 1.7):** Expressão matemática da dependência de uma grandeza em relação às grandezas base de um sistema de unidades.
- **Unidade de medida (“measurement unit”, VIM 1.9):** Grandeza escalar real, definida e adotada por convenção, utilizada para comparar outras grandezas da mesma natureza.

Medição

A medição é um processo central na metrologia e consiste na atribuição de valores quantitativos a uma grandeza específica. Para que uma medição seja válida, é necessário definir corretamente a mensuranda e garantir a rastreabilidade dos resultados.

- **Medição (“measurement”, VIM 2.1):** Processo experimental para obtenção de valores atribuídos a uma grandeza.
- **Mensuranda (“measurand”, VIM 2.3):** Grandeza que se deseja medir.
- **Resultado de medição (“measurement result”, VIM 2.9):** Conjunto de valores atribuídos a uma mensuranda, incluindo informações adicionais pertinentes.
- **Valor verdadeiro de uma grandeza (“true quantity value”, VIM 2.11):** Valor da grandeza compatível com sua definição. Na prática, é impossível conhecê-lo com exatidão.
- **Valor convencional de uma grandeza (“conventional quantity value”, VIM, 2.12):** Valor atribuído a uma grandeza por um acordo, para um dado propósito.
- **Exatidão de medição (“measurement accuracy”, VIM, 2.13):** Grau de concordância entre um valor aferido e o valor real de uma grandeza medida.
- **Justeza de medição (“measurement trueness”, VIM, 2.14):** Grau de consistência entre a média de um número infinito de medições e um valor de comparação.
- **Precisão de medição (“measurement precision”, VIM, 2.15):** Grau de concordância entre as indicações ou os valores medidos, obtidos por medições

repetidas, no mesmo objeto ou em objetos semelhantes, sob condições definidas.

- **Erro de medição (“measurement error”, VIM, 2.16):** Divergência entre o valor apurado de uma grandeza e um valor de comparação.
- **Repetibilidade de medição (“measurement repeatability”, VIM, 2.21):** Fidelidade ou exatidão da medição em certas circunstâncias de repetibilidade (condição de medição em determinadas condições, que incluem o mesmo procedimento, os mesmos operadores, o mesmo sistema de medição, as mesmas condições de operação e o mesmo local, assim como medições repetidas no mesmo objeto ou em objetos semelhantes durante um curto período de tempo).
- **Desvio-padrão experimental:** parâmetros que caracterizam a dispersão dos resultados obtidos numa série de n medições da mesma mensuranda, dado pela fórmula:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

- **Incerteza de medição (“measurement uncertainty”, VIM, 2.26):** Parâmetro não negativo que descreve a propagação os valores atribuídos a uma grandeza medida, com base nas informações disponíveis.
- **Calibração (“calibration”, VIM, 2.39):** Operação que estabelece, sob condições definidas, numa primeira etapa, uma relação entre os valores e as incertezas de medição fornecidas por padrões e as leituras correspondentes com as incertezas associadas. Numa segunda etapa, utiliza esta informação para estabelecer uma relação visando a obtenção de um resultado de medição a partir de uma leitura.
- **Correção (“correction”, VIM, 2.53):** Correção de um efeito sistemático calculado. A correção pode ter várias formas, como a adição de um valor ou a multiplicação por um fator, ou pode ser obtida a partir de uma tabela.
- **Dispersão da medição:** Probabilidade da saída em cada amplitude, dado um determinado valor na entrada (esta distribuição, em geral, é definida pelo valor médio e pelo desvio padrão).

Instrumentos de medição

Para que a medição seja realizada com precisão e confiabilidade, utilizam-se diversos instrumentos de medição. Estes podem variar desde simples réguas até equipamentos altamente sofisticados, dependendo do nível de precisão necessário e do tipo de grandeza a ser medida.

- **Instrumento de medição (“measuring instrument”, VIM 3.1):** Dispositivo utilizado para realizar medições, podendo ser isolado ou composto por outros dispositivos.
- **Instrumento de medição indicador (“indicating measuring instrument”, VIM 3.3):** Instrumento que fornece um sinal de saída com o valor da grandeza medida (ex.: voltímetro, termômetro, micrómetro).
- **Instrumento de medição afixador (“displaying measuring instrument”, VIM 3.4):** Tipo de instrumento indicador que apresenta os valores de saída visualmente.

Propriedades dos instrumentos de medição

Os instrumentos de medição possuem características específicas que influenciam diretamente a precisão e confiabilidade das medições. Assim, para garantir resultados adequados, é fundamental compreender as principais propriedades desses dispositivos.

- **Indicação (“indication”, VIM 4.1):** Valor fornecido por um instrumento ou sistema de medição.
- **Intervalo de indicações (“indication interval”, VIM 4.3):** Conjunto de valores entre os limites extremos de um instrumento.
- **Amplitude de medição (“range of a nominal indication interval”, VIM 4.5):** Diferença entre os valores máximos e mínimos de um intervalo nominal de indicações.
- **Intervalo de medição (“measuring interval; working interval”, VIM 4.7):** Conjunto de valores que pode ser medido por um instrumento com incerteza especificada.

2.4.4 Grandezas e Unidades em Metrologia Dimensional

A metrologia dimensional assenta na necessidade de quantificar dimensões físicas com precisão e rigor. Para tal, é essencial compreender o conceito de grandeza, entendido como qualquer propriedade de um fenómeno, corpo ou substância que possa ser expressa quantitativamente. Em metrologia, estas grandezas são geralmente associadas a medições lineares, angulares ou de forma, sendo indispensável estabelecer unidades de medida padronizadas para garantir a comparabilidade e coerência dos resultados. Desta forma as grandezas dividem-se, de forma geral, em dois grupos:

- **Grandezas fundamentais:** definidas de forma independente, como o comprimento, o tempo e a massa
- **Grandezas derivadas:** resultam de combinações matemáticas das fundamentais. Um exemplo típico em metrologia dimensional é a área (derivada do comprimento ao quadrado) ou o volume (comprimento ao cubo).

Assim, para expressar essas grandezas, utiliza-se o Sistema Internacional de Unidades (SI), o qual estabelece um conjunto coerente de unidades base e unidades derivadas, aceites internacionalmente. No contexto da metrologia dimensional, a unidade mais relevante é o metro (m), definido atualmente com base na velocidade da luz no vácuo. Esta definição, de elevada estabilidade e universalidade, permite medições extremamente precisas em qualquer parte do mundo. Para além disto, a utilização de múltiplos e submúltiplos do metro, como o milímetro (mm) ou o micrómetro (μm), é frequente, sobretudo em contextos industriais ou laboratoriais onde se exige um elevado nível de detalhe. No que diz respeito à escolha da unidade mais apropriada, este fator depende da tolerância dimensional admissível na medição em causa.

Importa ainda referir que o conceito de traçabilidade metrológica está intrinsecamente ligado à utilização de unidades normalizadas. Traçabilidade significa que o resultado de uma medição pode ser relacionado, através de uma cadeia contínua e documentada de calibrações, com um padrão nacional ou internacionalmente reconhecido, sendo este princípio essencial para garantir a confiança nos resultados e a sua aceitação em contextos técnicos, científicos ou legais.

Por fim, a padronização das unidades e das grandezas utilizadas em metrologia dimensional facilita a interoperabilidade entre sistemas de medição, fomenta a qualidade dos processos produtivos e contribui para a inovação tecnológica, ao assegurar que todos os intervenientes falam a mesma "língua metrológica".

2.5 Métodos de medição

A medição desempenha um papel central na garantia da qualidade e conformidade dos produtos com as especificações técnicas, especialmente em contextos industriais e laboratoriais. Desta forma, para responder às exigências de precisão, repetibilidade e fiabilidade, foram desenvolvidos diferentes métodos de medição, adaptados às diversas naturezas das grandezas e das condições em que estas são determinadas.

Efetivamente, a escolha do método de medição adequado depende de múltiplos fatores, como o tipo de grandeza a medir, o nível de precisão requerido, as características do objeto ou sistema em análise, bem como as condições ambientais e operacionais. Assim, compreender as diferenças entre os métodos disponíveis, bem como as suas vantagens e limitações, é essencial para assegurar a validade dos resultados e a eficiência do processo metrológico.

2.5.1 Método de medição direta

O método de medição direto consiste na determinação de uma grandeza através da leitura imediata do valor num dispositivo de medição, sem necessidade de cálculos adicionais ou transformações. É, por isso, considerado o método mais simples e intuitivo, sendo amplamente utilizado sempre que se pretende obter resultados de forma rápida e com uma margem de erro aceitável. Um exemplo de medição direta é a utilização de uma régua ou de um paquímetro para medir o comprimento de um objeto. Nestes casos, o valor da

mensuranda é obtido diretamente a partir da escala do instrumento, desde que este se encontre devidamente calibrado e adequado à aplicação em causa.

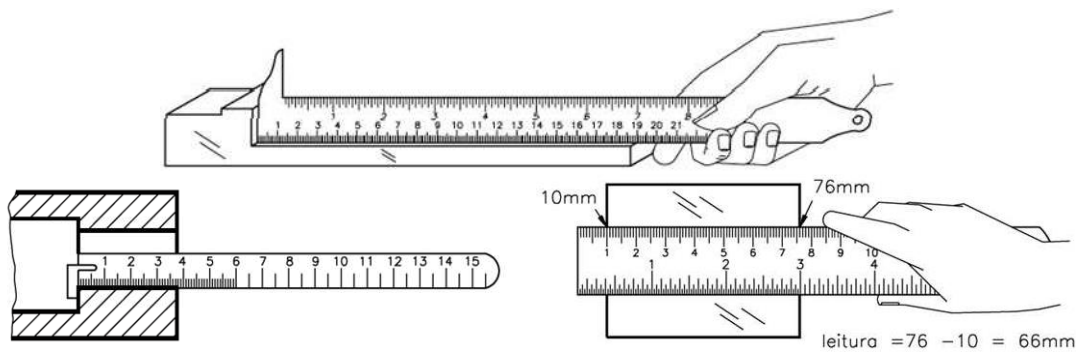


Figura 17 - Exemplos de métodos de medição direta

Entre as principais vantagens deste método, destaca-se a sua rapidez, facilidade de utilização e menor propensão a erros de cálculo, uma vez que não exige o recurso a fórmulas matemáticas ou a medições auxiliares. No entanto, a exatidão e a resolução da medição dependem fortemente da qualidade do instrumento e da competência do operador, bem como das condições em que a medição é realizada.

Apesar das suas limitações em contextos que exigem níveis muito elevados de precisão, o método direto continua a ser amplamente utilizado em medições de rotina, inspeções dimensionais simples e aplicações onde a rapidez e a praticidade são fatores determinantes.

2.5.2 Método de medição indireto

O método de medição indireto baseia-se na determinação de uma grandeza através da medição de outras grandezas relacionadas, recorrendo a relações matemáticas ou físicas previamente estabelecidas. Ao contrário da medição direta, neste caso não se obtém o valor da mensuranda de forma imediata, sendo necessário aplicar fórmulas ou modelos para calcular o resultado final.

Este método é particularmente útil quando a grandeza a medir não pode ser determinada diretamente, seja por limitações técnicas, pela natureza do objeto em análise ou pelo contexto da medição. Por exemplo, a medição da densidade de um material pode ser feita indiretamente através da medição da sua massa e do seu volume, aplicando a fórmula

$$\rho = \frac{m}{v}.$$

Desta forma, a medição indireta requer um conhecimento rigoroso das relações entre as grandezas envolvidas, bem como da forma como as incertezas se propagam no cálculo, sendo fundamental que os instrumentos utilizados para medir as grandezas auxiliares sejam precisos e estejam devidamente calibrados, de modo a garantir a fiabilidade do valor final.

No que diz respeito às vantagens deste método, destaca-se a possibilidade de medir grandezas de difícil acesso ou que não podem ser determinadas por meios diretos. Contudo, esta abordagem exige maior cuidado na análise dos resultados, uma vez que os erros e incertezas de cada medição individual influenciam diretamente a precisão da mensuranda final.

2.5.3 Método de medição por comparação

O método de medição por comparação assenta na análise da diferença entre uma grandeza desconhecida e uma grandeza de referência conhecida, geralmente utilizando um instrumento que permita detetar e quantificar essa diferença. Ao invés de medir diretamente o valor absoluto da mensuranda, este método foca-se na avaliação do desvio em relação a um padrão previamente definido. Este tipo de medição é comum em contextos que exigem elevada precisão, uma vez que permite minimizar erros sistemáticos associados à leitura direta.

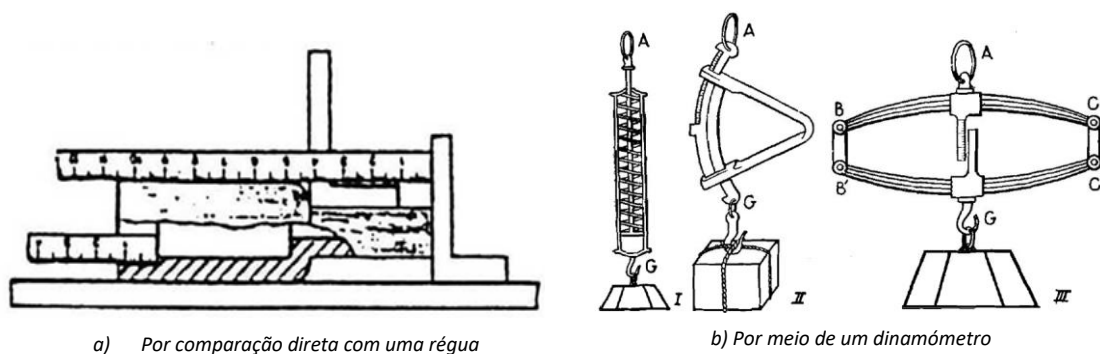


Figura 18 - Exemplos de métodos de medição por comparação

Para que a medição por comparação seja eficaz, é fundamental que o padrão de referência seja fiável, esteja calibrado e seja metrologicamente rastreável. A precisão do método depende não só da qualidade do instrumento de comparação, mas também da estabilidade das condições de medição e da habilidade do operador.

Entre as principais vantagens deste método, destaca-se a sua elevada sensibilidade e a capacidade de detetar pequenas variações dimensionais que, de outro modo, poderiam

passar despercebidas, sendo por isso amplamente utilizado em processos de controlo dimensional, calibração e inspeção de componentes mecânicos. Contudo, este método não fornece diretamente o valor absoluto da grandeza medida, exigindo, por vezes, medições complementares para se obter esse dado. Ainda assim, a sua eficácia em contextos de alta precisão torna-o indispensável na metrologia dimensional moderna.

2.5.4 Método de medição por substituição

O método de medição por substituição assenta na comparação da mensuranda com um padrão ou referência, sendo este alternado com o objeto a medir, utilizando o mesmo sistema de medição. Esta abordagem permite minimizar o impacto de fatores sistemáticos, como variações ambientais ou imperfeições do instrumento, uma vez que a comparação é feita nas mesmas condições para ambos os elementos

Neste processo, realiza-se primeiramente a medição de um padrão com valor conhecido, registando a leitura correspondente. De seguida, o padrão é substituído pela peça cuja grandeza se pretende determinar, utilizando o mesmo instrumento e condições. A diferença entre as duas leituras permite inferir o valor da mensuranda, reduzindo significativamente a influência de erros sistemáticos.

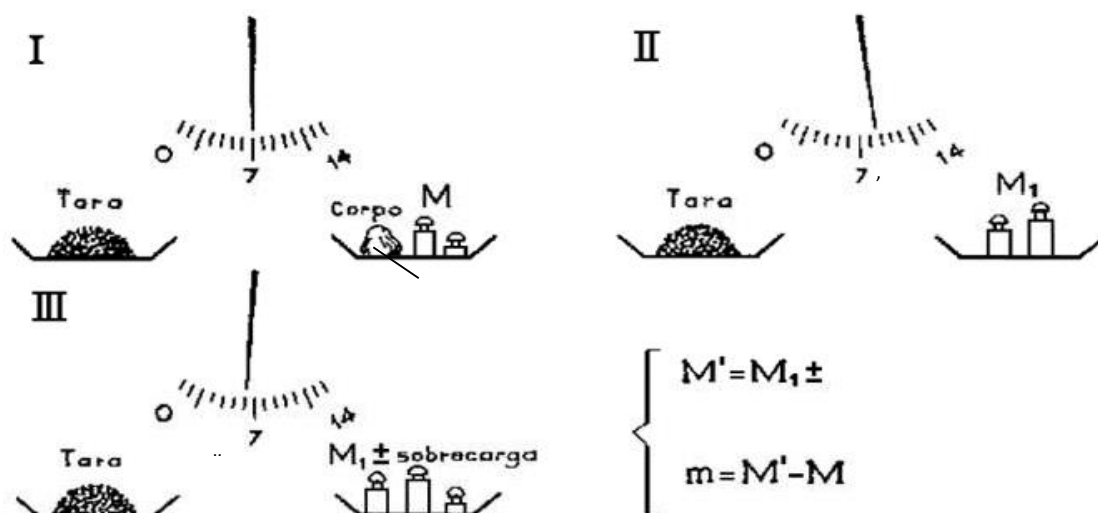


Figura 19 - Valor da massa

Este método é amplamente utilizado em medições de elevada precisão, como na calibração de instrumentos ou na verificação de peças em série, especialmente em contextos industriais onde a repetibilidade é crítica. Por exemplo, em medições com micrómetros ou

relógios comparadores, o método por substituição contribui para eliminar erros introduzidos por pequenas folgas ou desajustes nos dispositivos.

Entre as principais vantagens deste método, destaca-se a elevada fiabilidade dos resultados, devido à compensação de erros constantes. No entanto, exige o uso de padrões de referência bem definidos e calibrados, bem como um rigoroso controlo das condições de medição para garantir a validade da comparação.

2.6 Erros dimensionais

Nenhum processo de medição é absolutamente isento de imperfeições mesmo com o uso de instrumentos sofisticados e procedimentos rigorosos. De facto, existe sempre a possibilidade de ocorrência de desvios entre o valor medido e o valor verdadeiro da grandeza em causa. Estes desvios, conhecidos como erros de medição, fazem parte integrante da prática metrológica e devem ser compreendidos, analisados e, sempre que possível, minimizados.

A natureza dos erros que afetam as medições é diversa, podendo ter origens distintas e manifestar-se de formas variadas. Estes erros podem decorrer de limitações dos instrumentos, do ambiente onde a medição é realizada, do método utilizado ou, ainda, da intervenção do operador. Reconhecer estas fontes de erro é essencial para garantir a fiabilidade dos resultados obtidos e para avaliar corretamente a incerteza associada à medição.

Assim, o estudo da natureza dos erros de medição constitui um passo fundamental para a melhoria contínua dos processos de medição, contribuindo para a qualidade e rastreabilidade dos resultados em qualquer contexto técnico ou científico.

2.6.1 Aspetos Fundamentais

O objetivo último de qualquer processo de medição é a obtenção do valor mais próximo possível da verdadeira grandeza da mensuranda. No entanto, os resultados obtidos estão inevitavelmente sujeitos a diversas influências que podem comprometer a sua exatidão.

Estas influências resultam de imperfeições nos instrumentos, nos equipamentos, nos procedimentos adotados, bem como nas características do objeto a medir, nas condições

ambientais e até nos próprios operadores. Acresce ainda o facto de que estas variáveis podem sofrer alterações ao longo do tempo, contribuindo para a ocorrência de erros de medição.

As grandezas de influência derivadas das imperfeições dos instrumentos e dos procedimentos de medição, e das imperfeições do objeto medido, que contribuem para os erros de medição, podem ser classificadas em dois grandes grupos: as de natureza geométrica e as de natureza física.

As grandezas de influência geométrica referem-se, por exemplo, à má colocação dos instrumentos em relação à peça ou ainda a desvios na forma da peça, como irregularidades nas superfícies ou desalinhamentos em referências geométricas. No que diz respeito às grandezas de influência física, estas incluem fatores como o desgaste dos elementos de contacto dos instrumentos, a deformação de peças ou dos próprios equipamentos, e erros provocados pela forma como a medição é conduzida, como o erro de paralaxe.

Efetivamente, o papel do observador também não deve ser subestimado, visto que características humanas como a acuidade visual, a experiência, a atenção e a capacidade de interpretar escalas ou estimar valores podem introduzir variações ou erros não negligenciáveis. Além disso, a seleção de um método inadequado ou a negligência perante variáveis perturbadoras conhecidas contribuem igualmente para a distorção dos resultados.

Para além das diversas fontes de influência já mencionadas, é importante reconhecer que os erros que afetam as medições não se manifestam de forma única, existindo diferentes tipos de desvios que podem comprometer a fiabilidade dos resultados obtidos. Estes erros, com características distintas quanto à sua origem e comportamento, assumem particular relevância na metrologia dimensional, onde a precisão é um requisito fundamental.

A compreensão detalhada das diferentes categorias de erro é essencial para uma correta análise dos resultados e para a implementação de medidas eficazes de controlo. Nesse sentido, será abordada, de forma mais aprofundada no tópico seguinte, a classificação dos erros de medição e a sua importância no contexto metrológico.

2.6.2 Erros sistemáticos

Os erros sistemáticos representam uma categoria de desvios que, ao contrário dos aleatórios, seguem um padrão consistente ao longo de medições repetidas. Estes erros

manifestam-se de forma constante ou com uma variação previsível, o que significa que, quando presentes, afetam todas as medições de modo semelhante, conduzindo a um desvio sistemático em relação ao valor verdadeiro da grandeza mensurada.

As causas destes erros podem estar relacionadas com defeitos ou imperfeições nos instrumentos de medição, procedimentos incorretamente aplicados, calibração inadequada dos equipamentos, ou até mesmo fatores ambientais que exercem influência de forma contínua. Em muitas situações, esses desvios podem ser detetados e quantificados, permitindo a aplicação de correções para compensar os seus efeitos. No entanto, quando as causas não são claramente identificadas, os erros sistemáticos podem persistir de forma oculta, comprometendo a validade dos resultados.

Em contextos metrológicos, especialmente na medição dimensional, a identificação precoce dos erros sistemáticos é essencial para garantir a rastreabilidade dos resultados e a sua conformidade com os requisitos técnicos e normativos. O seu controlo exige uma análise cuidadosa de todo o processo de medição, desde a escolha do instrumento até à metodologia utilizada e às condições em que a medição é efetuada.

A minimização destes erros contribui não só para o aumento da exatidão, mas também para a confiança nos dados obtidos, assumindo, por isso, um papel central nas boas práticas metrológicas.

2.6.3 Erros aleatórios

Os erros aleatórios são aqueles que ocorrem de forma imprevisível, variando entre diferentes medições mesmo quando realizadas sob condições aparentemente idênticas. Este tipo de erro surge como resultado de pequenas flutuações em fatores que nem sempre são facilmente identificáveis ou controláveis, como mínimas variações ambientais, limitações do observador, ou instabilidades no próprio sistema de medição.

Ao contrário dos erros sistemáticos, que seguem um padrão constante ou previsível, os erros aleatórios não apresentam uma tendência fixa. A sua natureza incerta dificulta a sua deteção e correção direta, sendo geralmente tratados através de métodos estatísticos, como a repetição de medições e a análise da dispersão dos resultados. A variabilidade provocada por estes erros é refletida, por exemplo, no desvio padrão de um conjunto de medições.

Apesar de, em muitos casos, o seu impacto individual ser reduzido, os erros aleatórios podem comprometer significativamente a repetibilidade e a confiabilidade das medições quando não são devidamente considerados. Por isso, a sua análise é essencial em qualquer avaliação metrológica rigorosa, contribuindo para uma melhor compreensão da incerteza associada ao processo de medição.

A adoção de práticas que promovam a estabilidade das condições de medição, bem como a formação dos operadores e a utilização de instrumentos de maior sensibilidade, pode ajudar a mitigar os efeitos destes erros, ainda que nunca seja possível eliminá-los por completo.

2.7 Metrologia dimensional na indústria metalomecânica

A metrologia dimensional assume um papel estratégico na indústria metalomecânica, constituindo-se como um dos pilares fundamentais para a garantia da qualidade dos produtos e dos processos produtivos. Este ramo industrial, caracterizado por elevadas exigências técnicas e pela necessidade de precisão nas dimensões e tolerâncias das peças fabricadas, depende fortemente da fiabilidade dos processos de medição para assegurar a conformidade com especificações normativas e funcionais.

De facto, num ambiente industrial onde a competitividade e a inovação tecnológica são constantes, a aplicação rigorosa da metrologia permite detetar desvios dimensionais, evitar não conformidades e reduzir desperdícios, contribuindo assim para a eficiência global do sistema produtivo. Para além disso, a metrologia não só assegura a qualidade do produto final, como também constitui uma ferramenta de suporte à tomada de decisão em todas as fases do ciclo de produção, desde o controlo da matéria-prima até à verificação final do produto acabado.

A conformidade com normas técnicas e requisitos legais é outra vertente crítica na indústria metalomecânica, especialmente em sectores como o automóvel, a aeronáutica ou a fabricação de moldes, onde as tolerâncias são extremamente apertadas e a rastreabilidade dos resultados é imperativa. Neste contexto, a metrologia dimensional garante que os produtos respeitam as especificações estabelecidas, promovendo a fiabilidade, a segurança e a interoperabilidade dos componentes produzidos.

Assim, mais do que uma atividade de verificação, a metrologia dimensional deve ser encarada como uma função estratégica da qualidade e da produção. A sua integração eficaz nos processos industriais traduz-se num diferencial competitivo, assegurando padrões de excelência, minimizando o retrabalho e fortalecendo a confiança do cliente nos produtos e serviços fornecidos.

2.7.1 Equipamentos e Instrumentos de Medição Mais Utilizados

Na indústria metalomecânica, a escolha dos instrumentos de medição adequados é determinante para garantir a exatidão, a repetibilidade e a fiabilidade dos resultados. Estes instrumentos são selecionados com base nas características dimensionais a verificar, nas tolerâncias aplicáveis e no contexto produtivo em que a medição é realizada. De entre os diversos dispositivos utilizados, destacam-se tanto os instrumentos clássicos como as tecnologias mais avançadas, que coexistem para responder às diferentes exigências de medição.

Instrumentos de medição clássicos

Os instrumentos tradicionais continuam a desempenhar um papel relevante, especialmente nas medições manuais e nas verificações rápidas em ambiente de produção. Entre os mais utilizados encontram-se:

- **Paquímetros** – adequados para medições de comprimento, diâmetros internos e externos, com uma precisão geralmente na ordem dos décimos de milímetro.
- **Micrómetros** – utilizados para medições com maior precisão, frequentemente até centésimos de milímetro, sendo ideais para espessuras, diâmetros e pequenas dimensões.
- **Relógios comparadores** – permitem a deteção de desvios dimensionais relativamente a um padrão de referência, sendo frequentemente usados na verificação de planicidade, paralelismo ou concentricidade.
- **Calibres de encaixe e de folga** – instrumentos de medição por comparação direta com padrões, usados para verificar tolerâncias específicas de forma simples e rápida.

Equipamentos de medição avançada

Com o avanço da tecnologia e a crescente exigência por medições mais complexas e automatizadas, os sistemas de medição tridimensionais têm vindo a ganhar destaque, sendo os mais utilizados:

- **Máquinas de Medição por Coordenadas (CMM – Coordinate Measuring Machines)** – representam uma solução versátil e de alta precisão para a inspeção dimensional de peças com geometria complexa. Podem operar por contacto (com apalpadores) ou sem contacto (com sensores óticos).



Figura 20 - Máquina de medição por coordenadas

- **Sistemas de medição por visão ou laser** – permitem medições sem contacto direto com a peça, reduzindo o risco de deformações e acelerando o processo de verificação. São especialmente úteis para superfícies delicadas ou de difícil acesso.



Figura 21 -Máquina de medição por visão (ViciVision)

- **Scanners 3D** – utilizados para digitalização de formas complexas e controlo de peças através de comparação com modelos CAD, desempenham um papel cada vez mais relevante na engenharia reversa e na prototipagem.

Assim, a correta seleção e uso destes equipamentos são fundamentais para garantir a qualidade das medições. Para tal, é essencial que estejam devidamente calibrados, mantidos em boas condições e utilizados por operadores qualificados, assegurando a rastreabilidade metrológica e a fiabilidade dos resultados.

2.7.2 Técnicas e Métodos Aplicados

A eficácia da metrologia dimensional na indústria metalomecânica depende não só apenas dos instrumentos utilizados, mas também das técnicas e métodos de medição aplicados. Estes métodos devem ser selecionados em função das características das peças, das tolerâncias exigidas, das condições ambientais e das exigências de produtividade. A escolha adequada contribui para a redução de erros, a melhoria da eficiência dos processos e o aumento da fiabilidade dos resultados obtidos.

Medições em linha e fora de linha

Em ambientes de produção modernos, distinguem-se dois contextos principais: as medições em linha (in-line) e as medições fora de linha (off-line). As primeiras são realizadas diretamente no posto de fabrico, muitas vezes com o auxílio de sensores integrados e sistemas

automatizados. Desta forma, estas medições têm como vantagem a detecção imediata de desvios, permitindo a correção rápida do processo e reduzindo o risco de produzir grandes quantidades de peças não conformes.

Por outro lado, as medições fora de linha ocorrem geralmente em laboratórios de metrologia, utilizando equipamentos de maior precisão e sob condições ambientais controladas. Embora menos ágeis, estas medições oferecem resultados mais rigorosos e detalhados, sendo especialmente importantes para a validação final de produtos ou para auditorias de qualidade.

Inspeção por amostragem e controlo estatístico

Na prática industrial, é muitas vezes inviável medir a totalidade das peças produzidas. Por essa razão, recorrem-se a inspeções por amostragem, que permite obter informações representativas da qualidade de um lote com base na medição de um número reduzido de exemplares. Este método, quando associado a técnicas de controlo estatístico do processo, possibilita a monitorização contínua da produção e a identificação de tendências ou desvios sistemáticos, promovendo uma abordagem preventiva à gestão da qualidade.

Assim, a combinação destes métodos, quando aplicada de forma estratégica, permite equilibrar precisão metrológica com eficiência produtiva, otimizando recursos sem comprometer a conformidade dos produtos com os requisitos técnicos estabelecidos.

2.7.3 Integração com o Controlo da Qualidade e Produção

Na indústria metalomecânica, a metrologia dimensional desempenha um papel cada vez mais relevante, não apenas enquanto ferramenta de verificação, mas como elemento integrante e estratégico dos sistemas de controlo da qualidade e da produção. Quando devidamente integrada nestes sistemas, a metrologia contribui para uma abordagem mais preventiva, analítica e eficiente da gestão industrial, permitindo melhorar a qualidade dos produtos, reduzir desperdícios e aumentar a fiabilidade dos processos produtivos.

Tradicionalmente, a medição era encarada como uma etapa final de controlo, muitas vezes aplicada após a produção, com o objetivo de confirmar a conformidade das peças com os requisitos especificados. Contudo, esta visão tem vindo a evoluir para um paradigma mais dinâmico e interligado, em que os dados provenientes das medições são utilizados ao longo

de todo o ciclo de produção, fornecendo informações essenciais para a tomada de decisões em tempo real. Esta mudança de perspectiva é fundamental para garantir não apenas a qualidade do produto final, mas também a estabilidade e eficiência dos próprios processos.

A capacidade de recolher e analisar medições durante o processo produtivo permite detetar precocemente desvios em relação às especificações e atuar rapidamente na sua correção. Este feedback imediato contribui para evitar a produção em série de peças defeituosas, reduzindo significativamente os custos com retrabalho, rejeições e paragens não planeadas. Além disso, promove uma maior estabilidade do processo e torna possível a aplicação de práticas de controlo estatístico, fundamentais numa lógica de melhoria contínua.

Com o avanço da digitalização e a disseminação de tecnologias associadas à Indústria 4.0, a metrologia passou a estar cada vez mais interligada com os sistemas digitais de fabrico. Máquinas de medição por coordenadas, sensores inteligentes e sistemas de aquisição de dados integram-se agora em plataformas digitais capazes de analisar grandes volumes de informação em tempo real. Esta capacidade analítica não só reforça a rastreabilidade e a fiabilidade dos dados, como também facilita a implementação de estratégias baseadas em dados objetivos, aumentando a previsibilidade e o controlo do desempenho industrial.

Neste contexto, a metrologia não é apenas uma ferramenta técnica, mas um componente fundamental da estratégia de qualidade e produtividade das empresas. A sua correta integração com os sistemas de produção e controlo da qualidade potencia a competitividade industrial, ao permitir decisões mais informadas, processos mais robustos e produtos mais conformes às exigências do mercado.

2.7.4 Casos de Aplicação Prática

A aplicação da metrologia dimensional na indústria metalomecânica assume diversas formas, adaptando-se à natureza dos processos produtivos, ao tipo de peças fabricadas e às exigências dos mercados servidos. A seguir apresentam-se alguns exemplos práticos que ilustram como os princípios e ferramentas da metrologia são utilizados de forma estratégica em ambientes industriais reais.

Um caso representativo verifica-se na produção de componentes automóveis, onde a elevada exigência dimensional das peças, como eixos, pistões ou engrenagens, obriga a um

controle rigoroso das tolerâncias. Nestes ambientes, é comum a utilização de máquinas de medição por coordenadas (CMM) para verificar as dimensões críticas das peças em fases intermédias e finais da produção. Estas máquinas, operando em ambientes controlados, garantem medições de alta precisão, permitindo assegurar a intercambialidade das peças e a sua conformidade com as especificações técnicas. Em alguns casos, essas medições são integradas em sistemas de controle estatístico do processo, possibilitando ajustes automáticos nos parâmetros de fabrico.

Outro exemplo relevante encontra-se na indústria de moldes e ferramentas, onde o fabrico de cavidades e superfícies complexas requer um elevado grau de exatidão. Aqui, as tecnologias de digitalização tridimensional (como scanners a laser ou sistemas de luz estruturada) têm sido amplamente adotadas para comparar, de forma não destrutiva, a peça fabricada com o modelo digital (CAD). Este tipo de verificação permite detetar, de forma rápida, desvios de forma e de dimensão, contribuindo para reduzir os ciclos de retrabalho e acelerar o processo de validação.

Também na produção de estruturas metálicas soldadas, como chassis ou suportes, a metrologia desempenha um papel fundamental na verificação da conformidade geométrica global. Equipamentos portáteis, como braços articulados de medição ou laser trackers, são frequentemente utilizados para inspecionar peças de grandes dimensões diretamente na linha de montagem. Esta abordagem, além de reduzir a necessidade de transporte para laboratórios de metrologia, permite ajustes imediatos durante a montagem e assegura que a peça final cumpre os requisitos funcionais e de montagem.

Estes exemplos evidenciam que a metrologia dimensional, longe de ser um processo isolado ou secundário, está profundamente enraizada na cadeia de valor da indústria metalomecânica. A sua aplicação prática permite não apenas garantir a conformidade dos produtos, mas também otimizar processos, reduzir custos e reforçar a confiança entre fornecedores e clientes. Em última instância, a metrologia torna-se uma aliada indispensável para qualquer organização que pretenda manter elevados padrões de qualidade e competitividade no setor industrial.

Em jeito de conclusão, a metrologia dimensional é um elemento crucial na indústria metalomecânica, não apenas para garantir a conformidade dos produtos, mas também como

apoio fundamental à melhoria dos processos de fabrico. Desta forma, a sua integração com o controlo da qualidade e produção permite uma atuação mais preventiva e eficiente, contribuindo para a redução de erros, custos e tempos de produção.

3. Projeto

3.1 Peças em estudo e problemas

As peças em análise no âmbito deste projeto correspondem a bielas com faces não coplanares, onde “H1” é diferente de “H2”, tal como é possível observar na Figura 22. Deste modo, são introduzidos desafios acrescidos ao nível do controlo dimensional e da qualidade superficial, especialmente nas fases de maquinagem e retificação.

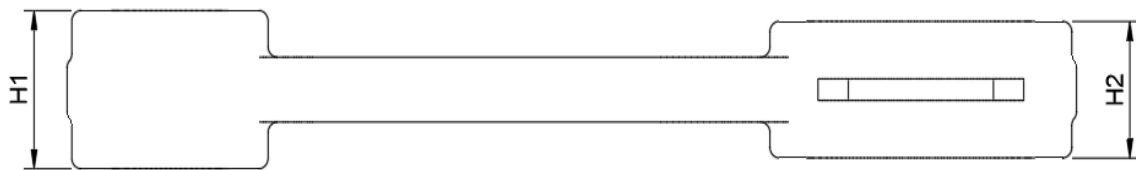


Figura 22 - Desenho de biela com cabeças de alturas diferentes

De facto, esta geometria traz desafios adicionais a diversos processos de fabrico deste tipo de bielas. Contudo, o processo mais afetado por estes modelos, internamente, é o da retificação plana, onde se pretendem retificar as faces planas das bielas, conforme ilustrado na Figura 23.



Figura 23 - Faces retificadas da biela

Com efeito, tendo em conta a geometria da mesa de retificação plana presente na empresa (Figura 24), a impossibilidade de assentar simultaneamente ambas as faces implica que as peças não se posicionem de forma estável nem paralela ao plano de trabalho. Desta forma, esta limitação compromete a perpendicularidade da operação de retificação, originando uma remoção de material desigual e, consequentemente, uma inclinação indesejada da face retificada. Tal situação conduz inevitavelmente a desvios dimensionais críticos, com impacto direto na precisão do encaixe da biela, na distribuição de cargas e, em última instância, no desempenho mecânico e fiabilidade do conjunto.

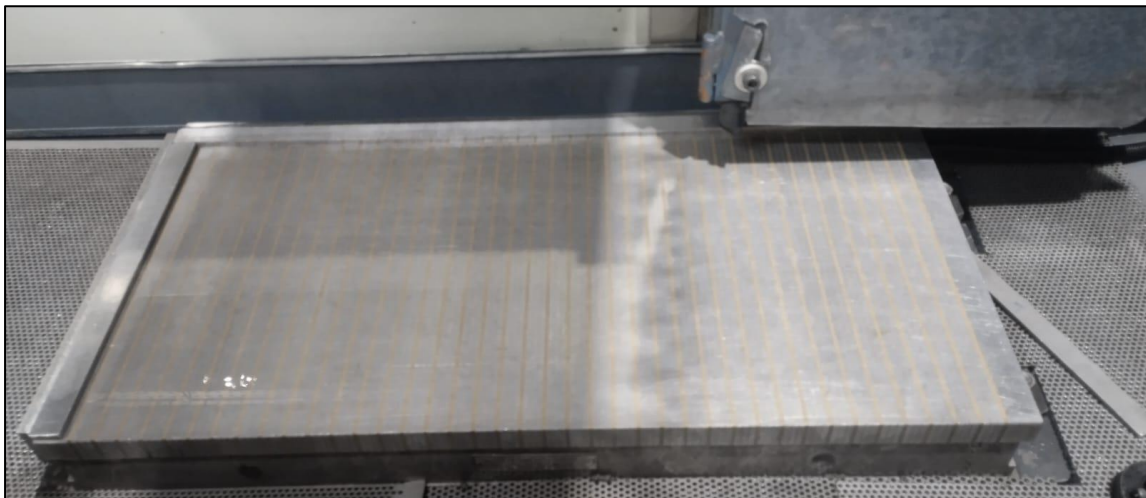


Figura 24 - Mesa magnética da máquina de retificação plana

Naturalmente, isto não se verifica no caso das bielas convencionais, onde a simetria entre as alturas das cabeças, isto é, a igualdade entre as dimensões verticais de ambas as extremidades, permite uma fixação estável e perfeitamente nivelada sobre a mesa magnética. Assim, esta uniformidade garante que, no momento da fixação, a peça assente integralmente sobre a superfície da mesa, sem inclinações nem folgas, mantendo o plano das faces das cabeças paralelo à superfície de referência da retificadora. Como resultado, o processo de retificação ocorre de forma uniforme em toda a extensão da superfície a maquinar, assegurando tanto a planeza como a perpendicularidade exigida pelas tolerâncias dimensionais e geométricas do componente. Este alinhamento correto entre a peça e o equipamento é, portanto, determinante para a obtenção de um acabamento conforme aos requisitos técnicos e funcionais, evitando retrabalhos ou rejeições no controlo de qualidade.

3.1.1 Parâmetros atuais

No que diz respeito à retificação de bielas com geometria convencional, o processo é geralmente realizado em duas etapas distintas, sendo que cada uma incide sobre um par específico de faces opostas. Esta abordagem permite que, com apenas duas passagens, sejam retificadas integralmente as quatro faces planas da cabeça da biela, garantindo simultaneamente o paralelismo e a uniformidade dimensional exigidos para o correto funcionamento do conjunto mecânico.

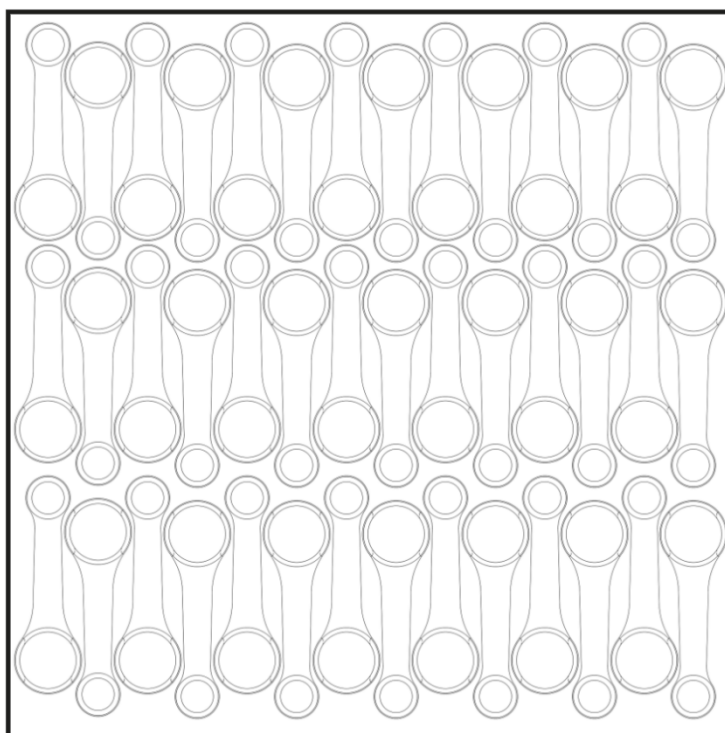


Figura 25 - Ilustração da disposição das bielas na mesa de retificação

A figura acima ilustra o modo como as bielas convencionais são, internamente, organizadas sobre a mesa magnética, cuja área útil se encontra representada pelas linhas pretas. Esta disposição estratégica das peças tem como principal vantagem a otimização do espaço disponível, permitindo a colocação simultânea de um maior número de peças. Assim, no que diz respeito ao processo em concreto, numa primeira fase, as bielas são posicionadas conforme indicado na figura, procedendo-se de seguida à passagem da mó, que retifica um dos lados das peças. Após esta operação inicial, as bielas são cuidadosamente viradas, realizando-se então uma segunda e última passagem, destinada à retificação do lado oposto. Com esta etapa final, conclui-se o processo de retificação das faces das bielas.

Contudo, conforme previamente exposto, este tipo de posicionamento revela-se inadequado no caso específico das bielas em estudo, uma vez que não assegura o nivelamento necessário das peças face à ação da mó. A ausência de um sistema devidamente concebido para garantir esse nivelamento e, por conseguinte, uma retificação precisa, levou a empresa a adotar uma solução teórica que, embora tecnicamente viável em princípio, revela-se, na prática, pouco eficiente e limitada no que diz respeito à precisão dimensional e à fiabilidade do resultado final.

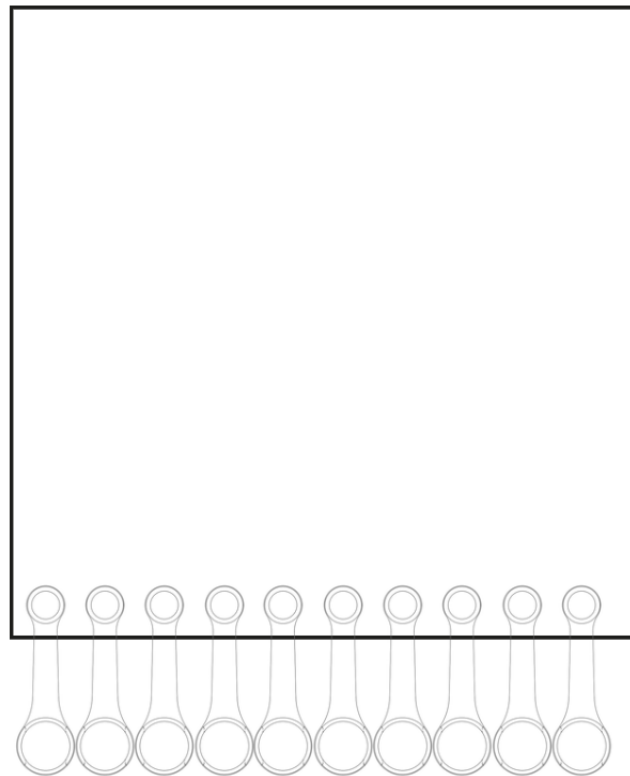


Figura 26 - Disposição das bielas com faces não coplanares

Conforme é possível observar na Figura 26, para garantir o nivelamento necessário à ação da mó, as bielas têm de ser posicionadas de forma assimétrica, ficando parcialmente suspensas fora da mesa. Neste arranjo, apenas uma das cabeças da biela permanece em contacto com a superfície magnética, servindo como único ponto de fixação e apoio durante o processo de retificação.

Apesar do esforço mecânico exercido pela mó ser relativamente baixo, uma vez que se trata de uma operação de acabamento, esta fixação parcial não assegura a estabilidade ideal da peça, uma vez que pequenas vibrações, desvios ou variações na fixação podem facilmente ocorrer, comprometendo a uniformidade do acabamento e conduzindo, por vezes,

à produção de bielas fora das tolerâncias dimensionais especificadas, representando um risco significativo, sobretudo em componentes cuja precisão dimensional é crítica para o funcionamento do conjunto mecânico em que se inserem.

Para além das limitações em termos de qualidade e repetibilidade do processo, este método acarreta também consequências relativamente à produtividade. Efetivamente, o posicionamento assimétrico impede a otimização do espaço sobre a mesa magnética, permitindo a colocação de um número bastante inferior de bielas por ciclo de retificação. Acresce ainda o facto de, devido à necessidade de retificar ambas as cabeças individualmente, cada biela exigir quatro passagens da mó, duas por cada extremidade, o que se traduz num aumento significativo do tempo de operação e no consumo adicional de recursos. Assim, para compreender de que forma as bielas em estudo influenciam a eficiência da produção, foi realizado um estudo do número de peças realizadas por hora de trabalho. Desta forma, para realizar este estudo efetuou-se, primeiramente, uma análise de diversos modelos de bielas com faces coplanares para posteriormente serem comparadas com as bielas em estudo.

De facto, foram selecionados aleatoriamente vinte modelos distintos, cada um com diferentes valores de produção, ou seja, um número variável de peças retificadas por hora. Através desta amostragem, foi possível calcular a média de produção por hora associada a cada modelo.

Relativamente à recolha dos dados, esta foi realizada diretamente no ambiente fabril, junto da retificadora plana utilizada no processo. Para tal, procedeu-se à cronometragem dos ciclos operatórios, recorrendo a um cronómetro manual, durante a execução real do processo. Após a análise de diversos ciclos consecutivos, foram determinadas médias fiáveis do número de peças produzidas por ciclo, permitindo, por extrapolação, a estimativa do número médio de peças produzidas por hora para cada um dos modelos observados.

Tabela 3 - Peças por hora de diversos modelos de bielas com faces coplanares

Nº Modelo	Peças por hora
1	186.23
2	275.00
3	287.75
4	231.34
5	253.70
6	211.23
7	181.72
8	271.79
9	241.63
10	224.98
11	202.56
12	274.72
13	267.61
14	184.70
15	210.47
16	234.97
17	226.32
18	183.89
19	195.47
20	188.60

De acordo com a análise dos dados e considerando a amostra significativa, é possível concluir que, no que se refere à produção de bielas com faces coplanares, são retificadas, em média, 244 peças por hora. Como referido anteriormente, a fim de compreender de que forma as bielas em análise influenciam a produtividade, foi realizado o mesmo estudo para diferentes modelos de bielas com faces não coplanares, sendo que os resultados obtidos encontram-se apresentados na Tabela 4. É relevante salientar que o número limitado de modelos apresentados na tabela deve-se ao facto de existirem poucos modelos atualmente em produção na empresa. Embora existam outros modelos, estes ou já não estão a ser produzidos, ou deixaram de ser fabricados há bastante tempo, o que torna difícil a recolha de dados relativos ao número de peças produzidas por hora.

Tabela 4 - Peças por hora de diversos modelos de bielas com faces não coplanares

Nº Modelo	Peças por hora
1	89.49
2	85.69
3	59.97
4	58.06
5	61.21

Como se pode constatar pelos dados apresentados, a realização de operações de retificação nos modelos de bielas analisados tem um impacto significativo na produtividade. Com efeito, verifica-se uma redução acentuada no número médio de peças produzidas por hora, que passou de 244 para apenas 71 unidades, verificando-se uma diminuição de 173 peças por hora. Desta forma, esta quebra revela-se particularmente prejudicial para a empresa, não só porque implica a ocupação prolongada das máquinas, limitando a possibilidade de processar outras bielas que aguardam a mesma fase de produção, mas também pela perda de dinheiro associada a estes fatores.

Deste modo, torna-se evidente a necessidade de implementar uma ferramenta eficaz que permita enfrentar os problemas identificados, tanto ao nível da produtividade como da qualidade. Assim, a introdução de um sistema de controlo dimensional mais preciso ou de soluções automatizadas poderá ser essencial para minimizar perdas, melhorar o desempenho das máquinas e garantir a conformidade dos produtos desde as fases iniciais da produção.

3.2 Sistemas de fixação existentes no mercado

Como primeira etapa na abordagem ao problema identificado, procedeu-se à realização de uma pesquisa com o intuito de identificar diversas soluções que já possam estar disponíveis no mercado e que possam oferecer uma solução eficaz para a questão em causa.

De facto, após uma pesquisa minuciosa, chegou-se à conclusão de que no mercado não se encontram disponíveis ferramentas ou mecanismos de conceção simples para esta finalidade. De facto, as únicas soluções encontradas correspondem a máquinas CNC sofisticadas, capazes de responder ao desafio mencionado, como é o caso da Nissei H-5RS.

A Nissei H-5RS é uma retificadora com duas mós concebida para ambientes industriais de alta precisão, particularmente adequada para a maquinagem de componentes complexos, como bielas com faces não coplanares.

De facto, funciona com uma configuração horizontal composta por duas mós, permitindo assim a maquinagem simultânea de ambas as faces da peça de trabalho. No entanto, o verdadeiro elemento diferenciador desta máquina reside no modo como as mós são configuradas e ajustadas, tanto em perfil como em comportamento dinâmico. Efetivamente, cada uma das mós é sujeita a um processo de afinação escalonada, ou seja, é possível modificar o perfil da mó de forma segmentada, criando zonas com profundidades distintas ao longo da superfície de corte (Figura 27). Desta forma, cada uma destas zonas corresponde a uma área específica da biela. Assim, mesmo quando as faces da biela encontram-se a alturas diferentes, as mós são capazes de replicar essa geometria assimétrica, permitindo uma remoção de material perfeitamente ajustada à morfologia real da peça.

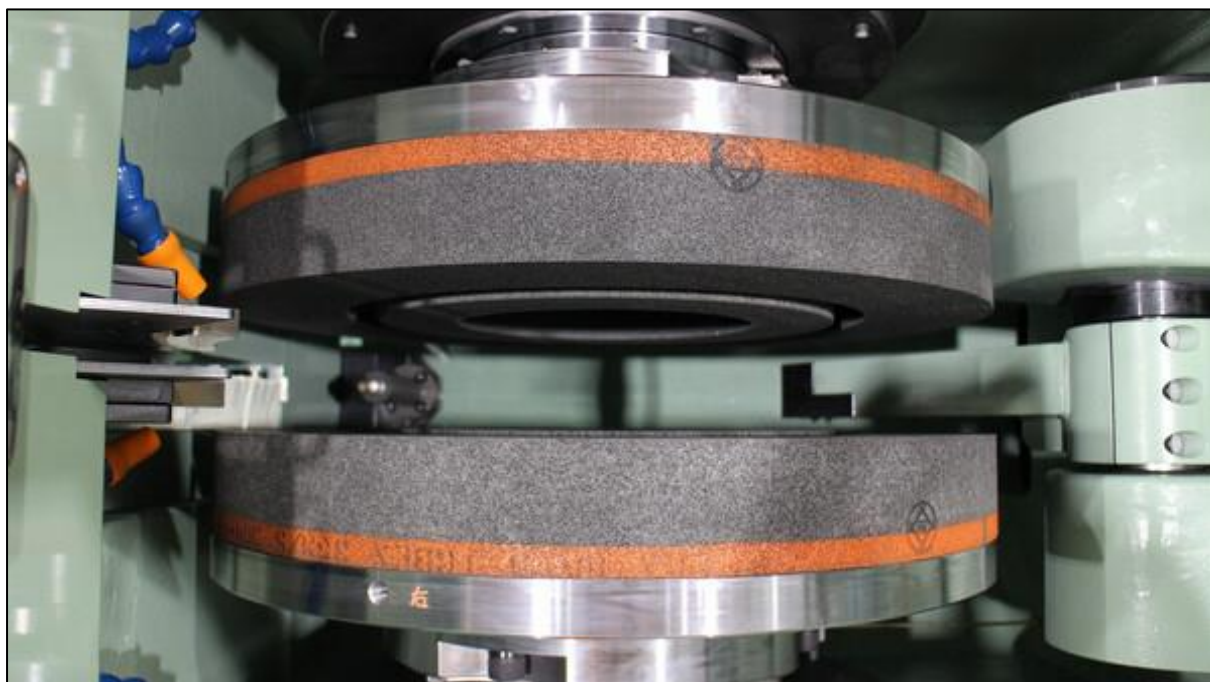


Figura 27 - Mós escalonadas da Nissei H-5RS

Para além disso, a máquina também possui um sensor acústico de afinação, que monitoriza a interação entre o afinador e a mó em tempo real, sendo assim um dos elementos mais relevantes deste sistema durante o processo de preparação do ciclo de retificação. Efetivamente, este sensor funciona através de vibrações acústicas que são criadas quando o afinador entra em contacto com a mó. Desta forma, com base nessas informações, a máquina

consegue controlar de forma milimétrica o perfil a ser criado na mó, ajustando zonas específicas para compensar as diferentes espessuras ou geometrias da peça.

Assim, a Nissei H-5RS distingue-se pela sua capacidade de retificar simultaneamente as duas faces de uma biela, mesmo quando estas apresentam alturas diferentes. Esta funcionalidade é possível devido à incorporação de um sistema de mós com perfil escalonado, ajustado por afinação segmentada e monitorização acústica em tempo real. O resultado é uma operação de elevada precisão, sem necessidade de reposicionamento ou múltiplas passagens, o que representa uma enorme vantagem em ambientes industriais de produção intensiva e controlo dimensional apertado.

Contudo, após uma análise interna cuidada, concluiu-se que não se justificaria o investimento numa nova máquina de retificação, dado não só o elevado custo associado à sua aquisição, como também as exigências de espaço físico que esta implicaria para a organização. A principal razão que sustenta esta decisão prende-se, no entanto, com a natureza da produção: embora exista um volume considerável de bielas com esta configuração a necessitar de retificação, a diversidade de modelos com estas características é relativamente reduzida. Assim, optou-se por uma abordagem mais eficiente e ajustada à realidade da empresa, apostando no desenvolvimento interno de um dispositivo de fixação específico. Esta ferramenta permitiria, através de um mecanismo simples, nivelar previamente as faces das bielas, tornando-as aptas para o processo de retificação convencional. Assim, para além de evitar um investimento dispendioso, esta solução apresenta ainda a vantagem de potenciar a produtividade, permitindo um processamento mais rápido e eficaz das peças em questão.

3.3 Desenvolvimento da solução

Tendo como base a análise e as conclusões anteriormente apresentadas, onde para além de não existirem sistemas e mecanismos de fixação simples no mercado, também se demonstrou que a aquisição de uma nova máquina de retificação não se revelaria uma solução viável, tanto do ponto de vista económico como logístico, considerando-se assim mais vantajoso optar por uma alternativa desenvolvida internamente. Desta forma, face a esta ausência de soluções comerciais simples e adaptadas ao contexto específico da empresa, e tendo em conta os recursos técnicos atualmente disponíveis, decidiu-se avançar com uma abordagem inicial centrada na conceção e desenvolvimento do mecanismo proposto em

ambiente virtual. Para tal, recorreu-se à modelação tridimensional assistida por computador, utilizando o software Autodesk Inventor, como ferramenta base para o estudo e definição do sistema de fixação ideal.

De facto, na idealização deste mecanismo foram tomados em consideração diversos fatores, tais como:

- **Eficácia:** Um dos principais objetivos consiste em assegurar que o mecanismo permita uma fixação precisa e estável da biela, independentemente das irregularidades geométricas da peça. Para além disso, também deve ser pensada de que forma se possa realizar um ajuste manual simples do desnível entre as faces de forma a garantir uma superfície final uniforme após o processo de retificação.
- **Custo:** A conceção teve igualmente em conta os custos associados à produção do mecanismo. Desta forma, procurou-se um equilíbrio entre a funcionalidade e a utilização de materiais e componentes normalizados, de forma a reduzir os encargos financeiros sem comprometer a robustez e durabilidade do sistema. Para além disso, e tal como mencionado anteriormente, o mecanismo será fabricado internamente, com os meios disponíveis na empresa, como forma de minimizar o investimento inicial.
- **Produtividade:** A solução idealizada procurou não só resolver o problema do desnível, mas também contribuir para a otimização do processo produtivo. Um sistema de fixação rápido e repetível, que reduza o tempo de preparação e troca de peças, traduz-se diretamente num aumento da produtividade global da operação de retificação.
- **Manuseabilidade:** O mecanismo foi projetado para ser intuitivo, ergonómico e leve permitindo ao operador um manuseamento simples, seguro e com reduzido risco de erro. Esta abordagem visa ainda minimizar a necessidade de formação específica, promovendo a integração rápida do novo dispositivo no processo produtivo existente.

Tendo em consideração todos os fatores anteriormente analisados, deu-se início à fase de idealização do mecanismo de fixação. Esta etapa começou com um estudo aprofundado sobre as possíveis formas de realizar a fixação eficaz das bielas durante o processo de retificação.

De facto, foi necessário ter em conta a diversidade de bielas produzidas internamente na empresa, que variam significativamente em termos de comprimento, diâmetro e altura das cabeças. Esta variabilidade impôs um desafio adicional à conceção do dispositivo, exigindo uma solução flexível e adaptável às diferentes geometrias.

Como resposta a esta exigência, foram desenvolvidos, numa fase inicial, dois mordentes (Figura 28), concebidos como os principais componentes responsáveis pela fixação direta de cada biela. Estes elementos foram desenhados com o intuito de garantir uma fixação firme e precisa, independentemente das variações dimensionais das peças, assegurando simultaneamente a repetibilidade do processo e a qualidade do acabamento superficial obtido na retificadora plana.

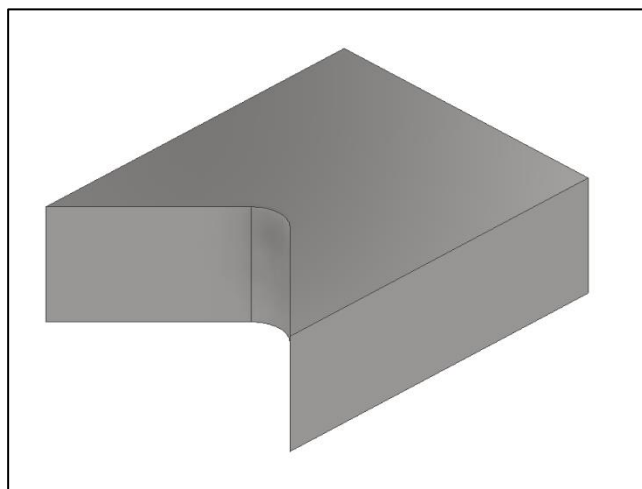


Figura 28 - Mordente

Como se pode observar na figura acima, o mordente foi projetado com uma geometria em 'V', característica que permite uma adaptação eficiente a bielas com diferentes diâmetros. Assim, esta configuração geométrica garante uma distribuição uniforme das forças de aperto sobre a superfície da peça, promovendo uma fixação segura e centrada.

Adicionalmente, a altura do mordente foi cuidadosamente dimensionada com o objetivo de deixar exposta, aquando da fixação da biela, uma margem da face superior da peça. Efetivamente, esta folga foi definida de forma a assegurar que a passagem da mó incida

sobre a zona desejada, permitindo a remoção controlada do material necessário. Simultaneamente, foi garantido que a porção da biela sujeita pelo mordente fosse suficiente para manter uma fixação firme, impedindo qualquer deslocamento da peça durante o processo. Desta forma, esta abordagem visa não só assegurar a qualidade dimensional do acabamento, mas também prevenir a ocorrência de erros ou defeitos provocados por movimentos indesejados durante a operação de retificação.

Numa fase subsequente do desenvolvimento, foi concebida a estrutura de suporte destinada à fixação dos mordentes previamente descritos. Esta estrutura assume um papel fundamental no conjunto do dispositivo, uma vez que não só assegura a correta colocação e estabilidade dos mordentes, como também permite a sua integração eficaz no sistema de fixação da retificadora plana. Para além da função de suporte aos mordentes, tornou-se igualmente necessário projetar uma base que possibilite a fixação direta do conjunto à mesa magnética da retificadora.

Desta forma, no que diz respeito às funcionalidades específicas da estrutura de suporte, esta foi projetada de modo a permitir a mobilidade de um dos mordentes ao longo do eixo principal da estrutura, possibilitando a sua adaptação a diferentes comprimentos de bielas, sendo a variação de comprimento de 180 mm. Esta característica confere ao dispositivo uma maior versatilidade, tornando-o compatível com a diversidade dimensional das peças produzidas internamente, tal como é possível observar na figura abaixo apresentada.

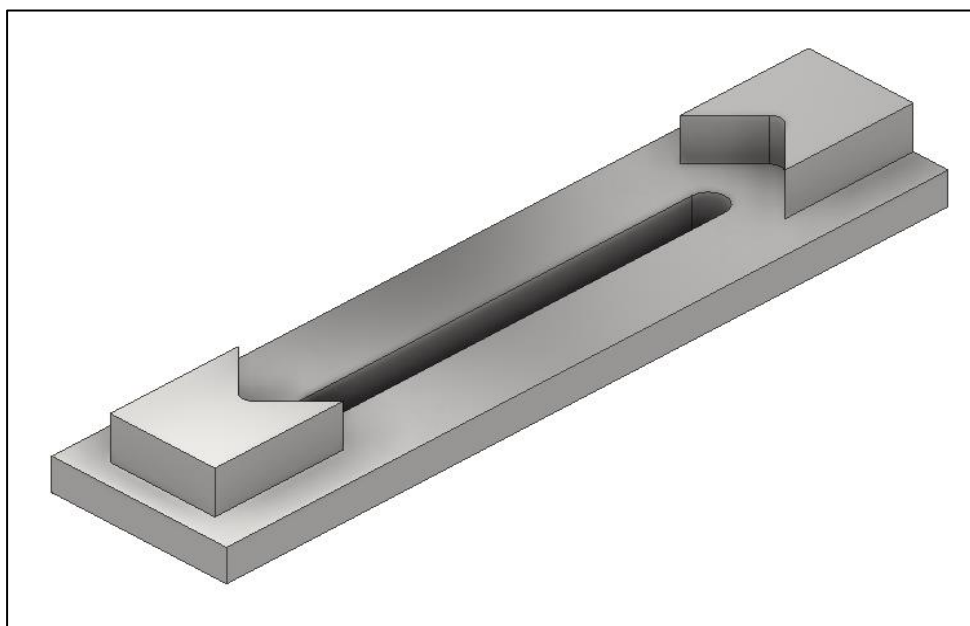


Figura 29 - Estrutura com guia

Efetivamente, para permitir esta variação de comprimento, foi também necessário proceder à atualização da geometria do mordente móvel, mediante a implementação de um novo componente (Figura 30). Este elemento adicional atua como guia, assegurando que o movimento do mordente ao longo do seu percurso decorra de forma controlada e sem interferências ou constrangimentos mecânicos.

Como se pode observar na figura apresentada acima, o novo componente apresenta uma geometria adaptada ao perfil do guia, facilitando assim o seu deslizamento ao longo do mesmo. Adicionalmente, na imagem à direita, é possível verificar o modo como este componente é integrado no sistema: a ligação é realizada por intermédio de um parafuso, que estabelece uma conexão direta entre o mordente e o novo elemento guia.

No que diz respeito ao segundo mordente, este foi concebido com uma configuração fixa, assumindo a função de realizar a fixação efetiva da biela contra a superfície de apoio do dispositivo. Esta fixação é crucial para garantir a estabilidade da peça durante o processo de retificação, assegurando a repetibilidade e precisão exigidas.

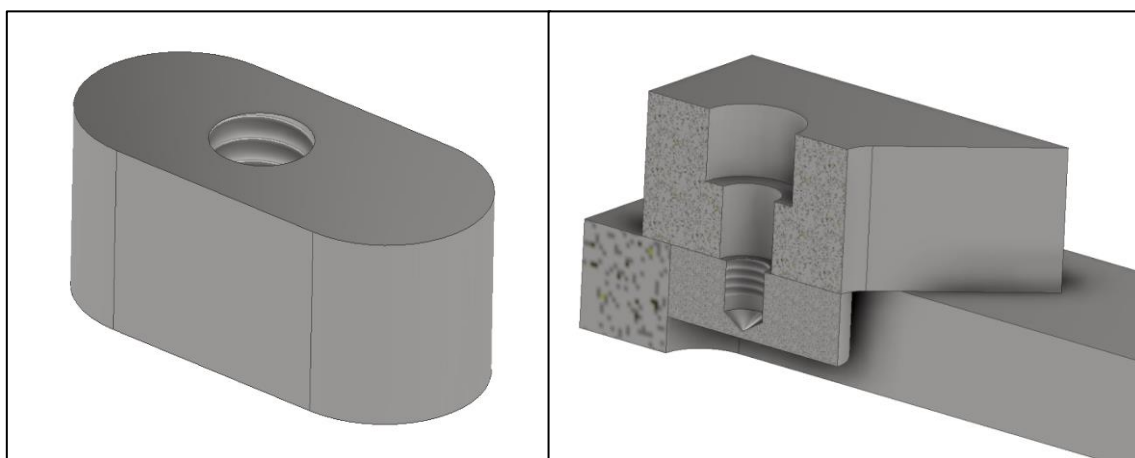


Figura 30 - (1) - Componente guia; (2) - Componente guia montado no sistema

Inicialmente, a solução proposta para concretizar esta fixação baseava-se na implementação de um mecanismo simples, mas funcional, composto pelo próprio mordente fixo, um parafuso sextavado M8 e uma mola de compressão.

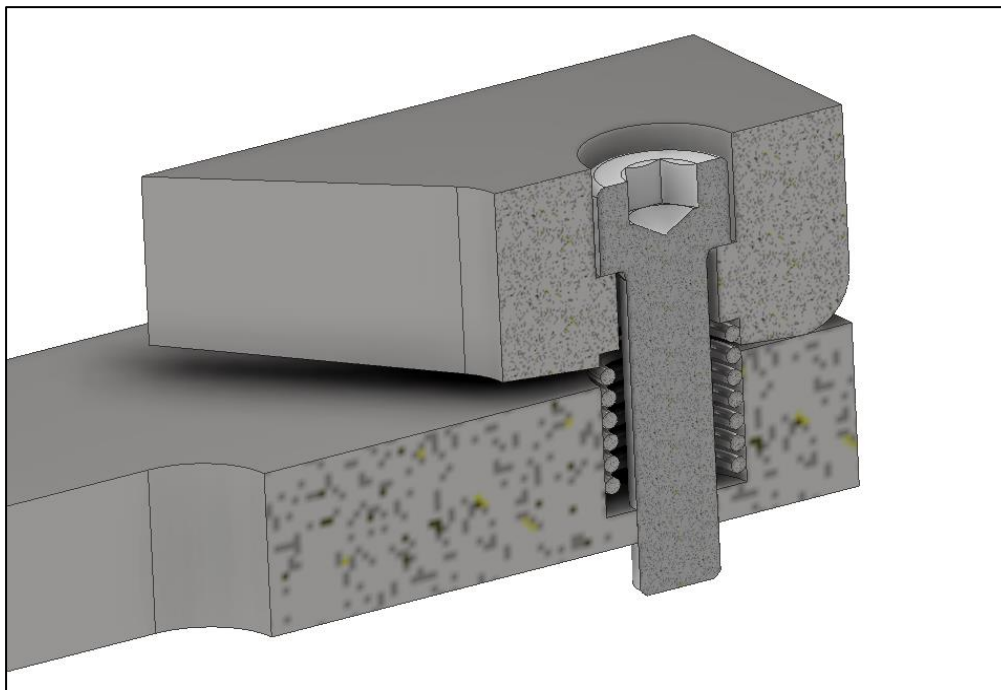


Figura 31 - Vista em corte do mecanismo de aperto do mordente

Conforme se pode observar na figura apresentada anteriormente, a viabilidade deste tipo de mecanismo exigiu uma adaptação na geometria do mordente fixo. Essa adaptação traduziu-se na introdução de uma aresta arredondada, concebida para funcionar como eixo de rotação, bem como na criação de uma superfície inclinada na parte inferior do mordente, permitindo assim o movimento descendente do mordente móvel durante o processo de aperto da peça.

Através da análise do mecanismo é possível perceber que a mola de compressão exerce uma força constante de retorno, contribuindo para a mobilidade controlada do mordente. Desta forma, o parafuso sextavado M8 permite o ajuste da pressão de aperto aplicada sobre a biela, assegurando que a peça fique devidamente imobilizada, sem que se verifiquem deformações indesejadas que possam comprometer a integridade dimensional ou funcional da biela. Paralelamente, importa também destacar o posicionamento da mola, elemento essencial para o correto funcionamento do mecanismo. Dada a limitação de espaço existente sob o mordente, tornou-se necessário criar um encaixe específico, tanto na estrutura como no próprio mordente, que permitisse a integração da mola sem comprometer

a sua funcionalidade. Esta solução construtiva possibilita que, mesmo nessa posição restrita, a mola continue a exercer uma força de retorno eficaz sobre o mordente, assegurando o seu aperto adequado em função do movimento da biela.

Sintetizando e de forma sequencial, após a colocação da biela na posição pretendida, procede-se ao aperto manual do parafuso, que é enroscado na base do suporte de fixação. Este movimento força a mola a comprimir-se, fazendo com que o mordente se desloque em torno do seu eixo e baixe até alcançar a posição de aperto, fixando assim a peça.

Contudo, verificou-se que a geometria inicialmente concebida apresentava uma limitação funcional. Mesmo com o formato proposto para o mordente, o eixo não seria capaz de cumprir adequadamente a sua função, visto que o componente não se encontrava fixo a um eixo, em vez de rodar em torno da aresta arredondada, acabaria por provocar o levantamento descontrolado de todo o mordente. Perante esta situação, tornou-se imperativa a introdução de um novo componente, bem como a subsequente atualização da geometria do mordente.

O novo componente proposto consiste na aplicação de um batente, visível na Figura 32, em ambos os lados do mordente, concebido com duas funções essenciais. Em primeiro lugar, assegurar o guiamento do mordente durante o seu movimento de elevação, evitando que este se desloque de forma desalinhada ou assimétrica. Em segundo lugar, garantir a fixação do seu eixo, permitindo que o mordente execute a rotação de forma controlada em torno do respetivo eixo durante o levantamento.

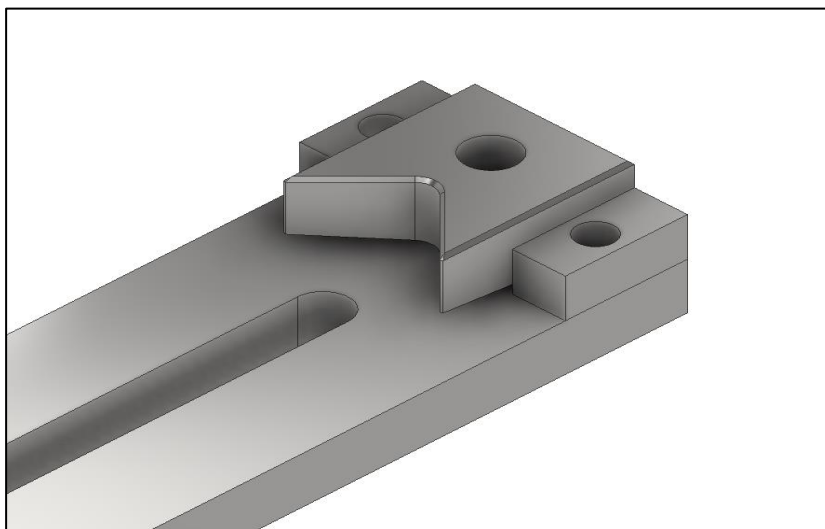


Figura 32 - Batente para os mordentes

Conforme se pode observar na figura, os batentes foram colocados em ambas as extremidades do mordente, sendo fixados ao suporte do sistema por um parafuso. No entanto, é importante notar que apesar do parafuso fixar corretamente o batente à base, este não garante que o componente esteja perfeitamente alinhado. Assim, foram efetuados furos no batente e na base (Figura 33), de forma a permitir que fossem colocadas cavilhas. Desta forma, basta apenas posteriormente colocar os batentes de acordo com as cavilhas de forma a garantir o seu correto alinhamento.

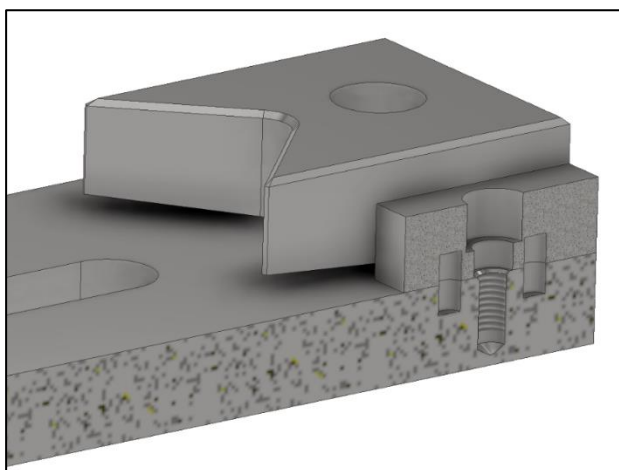


Figura 33 - Fixação dos batentes

Relativamente ao posicionamento dos batentes, este garante o guiamento do mordente, prevenindo eficazmente qualquer desvio ou torção durante o seu movimento. Relativamente à fixação do eixo, de modo a assegurar que este rode em torno do seu eixo durante o levantamento, foram realizados dois furos cegos nos batentes e um furo passante no mordente, centrado na aresta arredondada, tal como é possível observar na Figura 34.

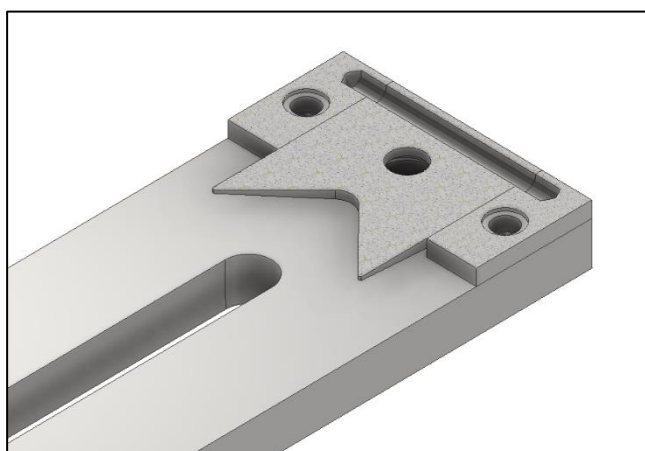


Figura 34 - Furos nos calços e mordente para fixação do eixo

Deste modo, a implementação dos furos permite a utilização de uma cavilha que atravessa o mordente, fixando-se nos batentes (Figura 35). Esta tem como função impedir qualquer deslocamento indesejado do mordente, restringindo os seus movimentos em todas as direções. Contudo, a geometria da cavilha será dimensionada de forma a permitir o deslizamento controlado do mordente sob a cavilha. Assim, a conjugação destes elementos garante que, sob a ação da força de retorno da mola ou do aperto, o mordente não se desloque de forma inadequada, sendo assim forçado a rodar em torno do seu próprio eixo, graças à ação orientada pela cavilha.

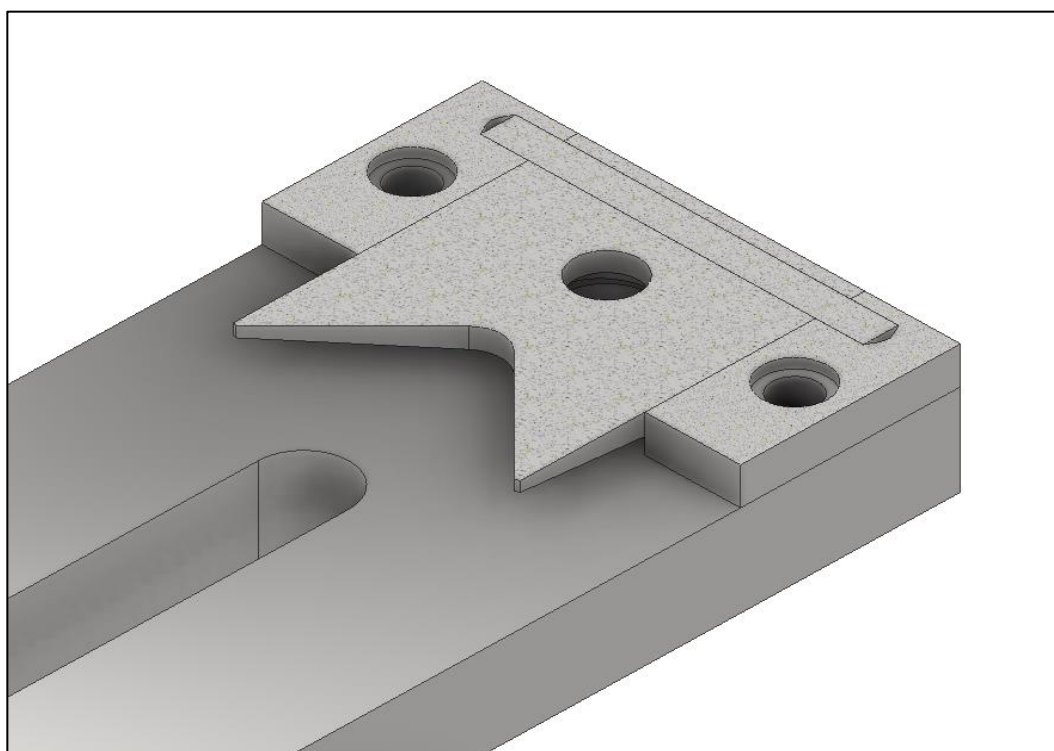


Figura 35 - Cavilha para rotação do mordente

Para além do problema e atualizações anteriormente mencionadas, após uma análise mais aprofundada do sistema de fixação inicialmente proposto, também se concluiu que a sua aplicação em cenários com um número mais elevado de bielas apresentava limitações significativas ao nível da produtividade. De facto, com a atualização do sistema para uma versão mais complexa, capaz de acomodar um maior número de bielas em simultâneo, verificou-se que, conseqüentemente, também aumentaria proporcionalmente o número de parafusos a apertar manualmente durante cada ciclo de montagem.

De facto, esta realidade implicaria um aumento considerável do tempo necessário para preparar o dispositivo para cada operação, nomeadamente nas fases de colocação e aperto

individual de cada biela. Tal situação afetaria negativamente a eficiência do processo produtivo, tornando-o menos competitivo, especialmente em ambientes onde o tempo de ciclo e a rapidez de operação são fatores críticos. Assim, tornou-se evidente a necessidade de repensar a solução de fixação, de forma a minimizar o número de intervenções manuais, otimizar o tempo de preparação e garantir a escalabilidade do sistema face ao aumento do volume de peças processadas.

Desta forma, inicialmente considerou-se a implementação de um sistema pneumático automatizado. Efetivamente, este consistia na integração de um mecanismo que, mediante o simples acionamento de um botão por parte do operador, ativasse o sistema pneumático. Este, por sua vez, atuaria sobre um mecanismo auxiliar responsável por efetuar o aperto do parafuso. Consequentemente, esse aperto garantiria a fixação eficiente dos diversos mordentes sobre as bielas. Importa referir que, com o objetivo de otimizar o espaço disponível e os recursos envolvidos, tanto o sistema pneumático como o mecanismo auxiliar foram concebidos para atuar sobre dois mordentes fixos em simultâneo, em vez de estarem dedicados exclusivamente a um único mordente.

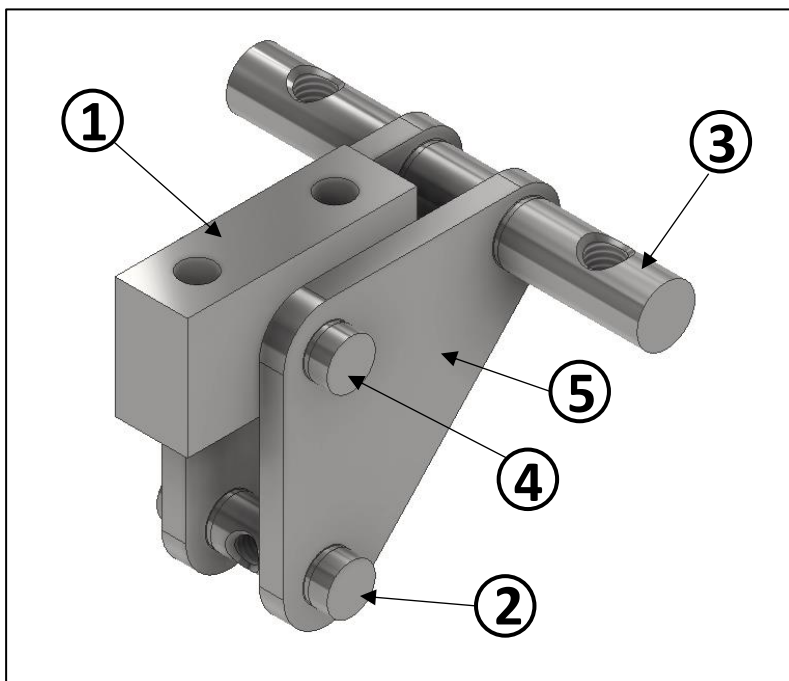
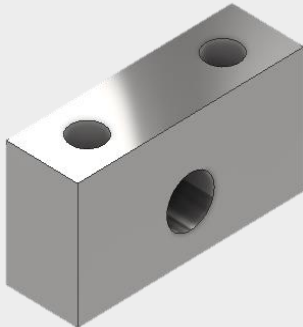
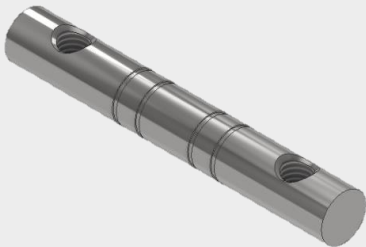
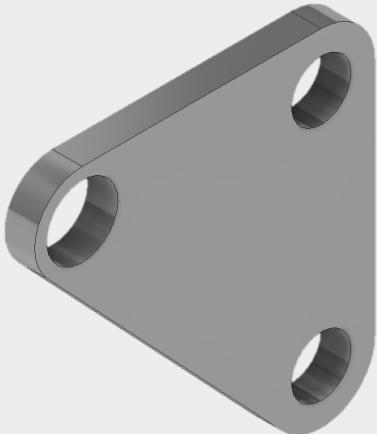


Figura 36 - Sistema pneumático

Com o intuito de facilitar a compreensão da explicação subsequente relativa ao funcionamento do mecanismo, apresenta-se de seguida uma tabela que identifica os diversos componentes que o constituem. Cada componente é acompanhado do respetivo nome e número de referência, correspondentes à legenda da figura apresentada, permitindo uma associação clara e imediata entre os elementos visuais e a sua descrição.

Tabela 5 - Componentes do mecanismo auxiliar ao sistema pneumático

Número	Nome	Funcionalidade	Imagem
1	Peça fixadora	Fixar o mecanismo auxiliar à base da ferramenta	
2	Cavilha para pneumático	Fixar a haste do cilindro pneumático ao mecanismo auxiliar	
3	Cavilha para parafusos	Conectar os parafusos dos mordentes fixos ao mecanismo auxiliar	

4	Eixo	A interação por deslizamento entre este componente e a peça fixadora permite a rotação do suporte em torno do deste, desempenhando assim a função de um eixo.	
5	Suporte	Assegurar a ligação entre os restantes componentes, de forma que o mecanismo funcione de forma integrada e coerente como um todo.	

Relativamente ao funcionamento do mecanismo, conforme referido anteriormente, este comporta-se como um eixo. Quando o cilindro pneumático é ativado, ocorre a retração da sua haste, puxando, na respetiva direção, a “cavilha para pneumático”. Esta ação, aliada à geometria do mecanismo e à disposição dos seus componentes, induz uma rotação em torno do seu eixo principal, em vez de um simples movimento linear. Como resultado, a “cavilha para parafusos” é também colocada em movimento, deslocando-se, mais significativamente, no sentido descendente relativamente à sua posição inicial. É precisamente este movimento coordenado que origina o acionamento dos parafusos dos mordentes, os quais são pressionados contra a mola. Desta forma, esta compressão, por sua vez, traduz-se no aperto eficaz do mordente sobre a biela, assegurando a fixação desejada. É importante salientar que tanto as cavilhas como o eixo apresentam rasgos em ambas as extremidades que se encontram junto do “suporte”, tendo estes como finalidade permitir a introdução de um freio, de forma a impedir deslocamentos axiais dos componentes e, consequentemente, a sua

libertação do mecanismo, garantindo assim a sua correta fixação e o funcionamento seguro. Desta forma, a etapa seguinte consiste na seleção do cilindro pneumático mais adequado ao seu funcionamento. Assim, a escolha deste componente deve assentar, fundamentalmente, em dois critérios técnicos essenciais: a força e o curso útil do cilindro.

No que diz respeito ao curso, verifica-se que este não necessita de ser particularmente elevado, uma vez que o movimento requerido pelo eixo, destinado a garantir o aperto do mordente, é relativamente reduzido, na ordem de poucos milímetros. Contudo, por uma questão de segurança operacional, optou-se por um curso de 20 mm, garantindo assim uma margem adicional que previne eventuais falhas de funcionamento ou variações não previstas no processo.

Relativamente à força necessária ao funcionamento do cilindro pneumático, esta deve ser suficiente para vencer a força exercida pela mola e, simultaneamente, assegurar um aperto eficaz durante o processo de retificação. No entanto, ao analisar a magnitude da força de retorno da mola, esta poderá ser considerada desprezável, uma vez que se trata de um elemento de construção simples, com baixa rigidez, cuja função se limita a elevar ligeiramente o mordente, num movimento de apenas alguns milímetros.

Assim, estabeleceu-se como valor de referência uma força de 40 N por cada biela. Esta escolha fundamenta-se na existência, já validada internamente, de um gabari utilizado no processo de fresagem de bielas, cujo sistema de aperto apresenta características semelhantes, nomeadamente a utilização de mordentes em “V”. Nesse contexto, as bielas são previamente apertadas com uma chave dinamométrica calibrada para aplicar precisamente 40 N, valor que tem demonstrado ser suficiente para garantir a fixação da peça sem comprometer a sua integridade geométrica.

Assim, tendo em conta que o processo de retificação em estudo apresenta exigências mecânicas inferiores às da fresagem, considera-se que a força de aperto adotada será adequada, assegurando a estabilidade da peça durante a operação, sem risco de deformação. No entanto, é importante salientar que cada cilindro pneumático será responsável pelo aperto simultâneo de duas bielas. Assim, tendo como objetivo garantir uma força de aperto de 40 N por biela, cada cilindro deve ser capaz de exercer, no mínimo, uma força total de 80 N.

De facto, um cilindro pneumático é um atuador que utiliza ar comprimido para gerar movimento linear. O seu funcionamento baseia-se na introdução de ar sob pressão numa das extremidades do cilindro, que ao atuar com o êmbolo, provoca o deslocamento do pistão no interior do tubo.

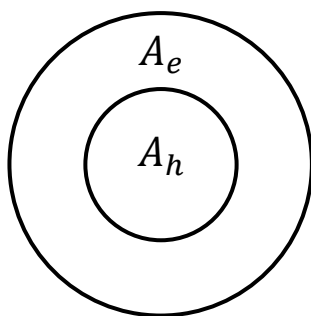
Desta forma, o princípio físico que está na base deste funcionamento é simples: a pressão do ar exerce uma força sobre a área do êmbolo, podendo ser calculada pela fórmula:

$$F = P \times A$$

onde:

- **F** é a força exercida (em Newtons);
- **P** é a pressão do ar (em bar);
- **A** é a área da superfície do êmbolo sobre a qual a pressão atua (em m²).

Assim, através desta fórmula é possível determinar o diâmetro mínimo necessário para garantir a força de aperto desejada. De facto, este sistema irá ser, posteriormente, alimentado com ar comprimido a uma pressão de 6 bar (equivalente a 600 kN). Desta forma, conhecendo-se a pressão do ar e a força final requerida, pode-se, assim, calcular o diâmetro do êmbolo que assegura o desempenho mecânico adequado ao funcionamento do sistema. Importa destacar que a força exercida pelo cilindro será aplicada durante o movimento de retração,



$$F = P \times A \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow 80 = 600.000 \times (A_e - A_h) \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow A_e - A_h = \frac{80}{600.000} \Leftrightarrow A_e - A_h = 1,33 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

ou seja, o ar comprimido entrará pelo lado do cilindro onde a área de contacto é reduzida devido à presença da haste. Esta particularidade implica que a força disponível para o aperto será determinada pela área efetiva do êmbolo descontada da área ocupada pela haste, devendo este facto ser tido em consideração no dimensionamento do cilindro para assegurar que a força requerida é efetivamente alcançada.

Assim, para que seja atingida uma força de 80 N, estima-se que a área útil atingida pelo ar comprimido seja, no mínimo, de $1,33 \times 10^{-4} \text{ m}^2$. De facto, considerando a necessidade de implementar um cilindro pneumático que forneça força suficiente, mas que, simultaneamente, apresente dimensões compactas para não ocupar excessivo espaço sob a ferramenta, optou-se pela gama Mini Cylinder da Airtac. Deste modo, com o intuito de identificar o tipo de cilindro que melhor responde aos requisitos definidos, recorreu-se à consulta do catálogo associado à norma ISO 6432, a qual diz respeito a mini cilindros pneumáticos.

Deste modo, com recurso às equações abaixo apresentadas, foram calculadas as áreas úteis ($A_e - A_h$), apresentadas na Tabela 6, correspondentes a cada um dos cilindros listados no catálogo, até se obter um valor aproximado do pretendido.

$$A_e = \pi \times r_e^2$$

$$A_h = \pi \times r_h^2$$

Tabela 6 - Cálculos de área útil para cilindros pneumáticos com êmbolos diferentes

r_e (mm)	r_h (mm)	A_e (m^2)	A_h (m^2)	$A_e - A_h$
4,0	2,0	$5,03 \times 10^{-5}$	$1,26 \times 10^{-5}$	$3,77 \times 10^{-5}$
5,0	2,0	$7,85 \times 10^{-5}$	$1,26 \times 10^{-5}$	$6,59 \times 10^{-5}$
6,0	3,0	$1,13 \times 10^{-4}$	$2,83 \times 10^{-5}$	$8,47 \times 10^{-5}$
8,0	3,0	$2,01 \times 10^{-4}$	$2,83 \times 10^{-5}$	$1,73 \times 10^{-4}$
10,0	4,0	$3,14 \times 10^{-4}$	$5,03 \times 10^{-5}$	$2,64 \times 10^{-4}$

Após a realização dos cálculos, verifica-se que os cilindros com êmbolos de raio 8 mm e 10 mm são os que apresentam um valor superior ao da área pretendida. Desta forma, procedeu-se ao cálculo da força que cada um destes é capaz de exercer.

- **Mini cilindro pneumático com êmbolo de raio 8 mm:**

$$F = P \times A \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow F = 600.000 \times (A_e - A_h) \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow F = 600.000 \times (1,73 \times 10^{-4}) \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow F = 104,4 \text{ N}$$

- **Mini cilindro pneumático com êmbolo de raio 10 mm:**

$$F = P \times A \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow F = 600.000 \times (A_e - A_h) \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow F = 600.000 \times (2,64 \times 10^{-4}) \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow F = 158,4 \text{ N}$$

Da análise dos resultados obtidos conclui-se que, embora o primeiro caso apresente uma força teoricamente suficiente, o valor calculado permanece próximo do limite previamente definido. Importa ainda salientar que o mecanismo em causa é de natureza pneumática, onde é utilizado ar comprimido, sendo este um fluido compressível e sujeito a variações de pressão durante o funcionamento, onde a força efetiva exercida pelo cilindro pode não corresponder exatamente ao valor teórico calculado. Por esse motivo, revela-se mais adequado adotar um cilindro que assegure uma margem de segurança superior, de forma a garantir a fiabilidade e a robustez do sistema em condições de funcionamento reais. De facto, tal como apresentado nos cálculos anteriores, o cilindro com êmbolo de raio 10 mm exerce, teoricamente, uma força de 158,4 N, valor que oferece uma margem de segurança bastante aceitável. Desta forma, conclui-se que o cilindro mais adequado ao caso de estudo será um mini cilindro com um êmbolo de raio 10 mm. Posto isto, definidos o raio e o curso do cilindro, importa agora analisar o modo como este será fixado ao sistema, uma vez que à aquisição destes cilindros estão associados diversos acessórios de montagem que permitem diferentes soluções de fixação.

Com efeito, existem diversos sistemas de fixação para cilindros pneumáticos, contudo, optou-se pela utilização do modelo “*Rear Clevis Bracket*”, representado na Figura 37, visto que era o acessório que melhor se adaptava ao sistema pretendido. Assim, naturalmente, como este modelo apresenta adaptações dimensionais compatíveis com diferentes diâmetros de cilindros pneumáticos, foi selecionada a versão adequada a cilindros com êmbolos de raio 10 mm.



Figura 37 - Acessório de montagem (*Rear Clevis Bracket*)

Para além disso, é importante notar que para este tipo de acessório ser utilizado o cilindro pneumático deve ter um sistema na parte de trás denominado “*pivot type*”.

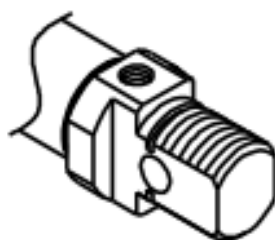


Figura 38 - *Pivot type*

Por fim, considerando os cálculos efetuados e os acessórios previamente descritos, foi selecionado um cilindro pneumático com êmbolo de 20 mm de diâmetro, do tipo pivot, complementado por um acessório de montagem do tipo “*Rear Clevis Bracket*”. Acrescente-se que, por se tratar de um componente a adquirir junto da Airtac, o mesmo corresponde à referência interna MI20x20CA.

Contudo, tal como já havia sido referido, este sistema acabou por não passar de uma proposta inicial, revelando-se posteriormente, numa análise mais aprofundada, ineficaz para a aplicação pretendida. O conceito poderia ser funcional se estivesse concebido para atuar sobre uma única biela, no entanto, tal como dito anteriormente este foi dimensionado e desenvolvido para atuar em duas bielas simultaneamente.

De facto, os mordentes têm a função de apertar e fixar as bielas pela cabeça, contudo, importa salientar que essa superfície não é maquinada, resultando diretamente do processo de forjamento. Consequentemente, surgem variações dimensionais entre bielas distintas, o que se traduz num entrave significativo: caso, num par, uma das bielas apresente dimensões superiores, esta será corretamente fixada, enquanto a outra ficará solta ou, ainda que presa, não estará submetida à pressão adequada. Assim, é possível perceber que este constrangimento deriva do próprio princípio de funcionamento do mecanismo, visto que como este é rígido e sem qualquer capacidade de ajuste individual, ao apertar a biela de maiores dimensões, o cilindro atinge o ponto de bloqueio antes de garantir o aperto efetivo da segunda biela, comprometendo assim a fiabilidade do processo.

Desta forma, perante a limitação identificada, tornou-se imperativo proceder a uma atualização do sistema, de modo a eliminar a fragilidade anteriormente descrita. Efetivamente, a solução concebida teve como princípio orientador a manutenção da simplicidade construtiva, bem como a preservação da eficiência do processo de fabrico. Nesse sentido, optou-se pela introdução de rótulas esféricas, cuja aplicação na ferramenta encontra-se representada na Figura 39.

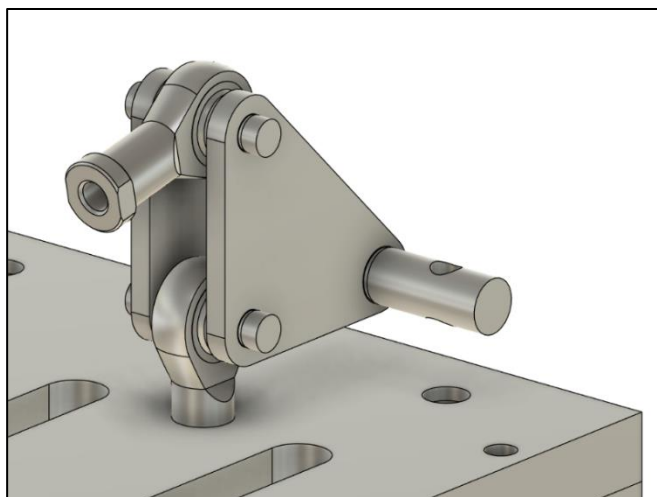


Figura 39 - Sistema pneumático atualizado

A adoção deste elemento permitiu conferir ao mecanismo a flexibilidade necessária para compensar as inevitáveis variações dimensionais entre as bielas. Com efeito, a junta esférica garante um movimento de adaptação automática, assegurando que ambas as peças fiquem devidamente fixadas, independentemente das diferenças resultantes do processo de forjamento. Desta forma, o sistema conserva a sua robustez, mas ganha simultaneamente a

capacidade de ajuste que lhe faltava, eliminando o problema crítico anteriormente identificado. Como se pode observar na figura apresentada, foram integradas duas rótulas esféricas: a primeira encontra-se aparafusada à base da ferramenta (Figura 39), enquanto a segunda está roscada à haste do cilindro pneumático. A seleção destas rótulas foi realizada em função do cilindro previamente definido, uma vez que um dos componentes necessita de ser compatível para assegurar uma montagem simples e eficiente. Neste contexto, tornou-se essencial optar por uma solução que garantisse essa correspondência, motivo pelo qual se recorreu a uma rótula com um furo roscado M8, adequado às ao cilindro escolhido que contém na extremidade das haste uma rosca M8.

Conforme ilustrado na Figura 40, a fixação da rótula à base será realizada através de um parafuso com cabeça de embeber M8 (DIN 7991). De facto, a escolha deste elemento prende-se com a necessidade de garantir que a cabeça do parafuso não interfira com a área de trabalho. Com efeito, dado que a zona de fixação coincide diretamente com a superfície funcional da ferramenta, seria inaceitável a presença de saliências que pudessem comprometer o desempenho ou a precisão do sistema. Assim, a utilização de um parafuso com estas características permite, assim, assegurar uma fixação robusta e fiável, preservando simultaneamente a integridade da área útil de operação.

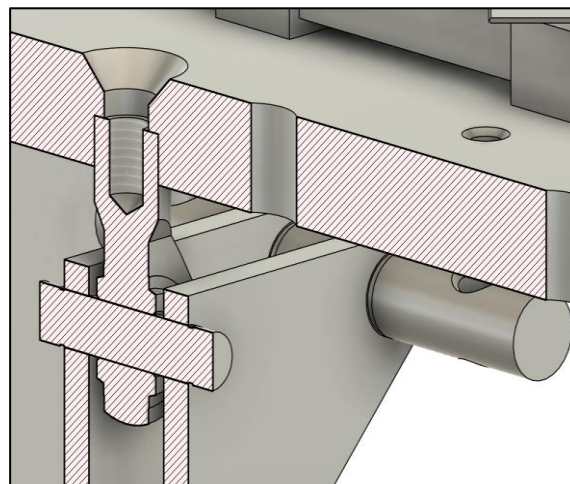


Figura 40 - Fixação da rótula à base da ferramenta

Por fim, no que diz respeito ao sistema pneumático, importa salientar algumas alterações relativamente à conceção inicialmente proposta. Efetivamente, o componente “Cavilha pneumático” manteve a sua geometria original, à exceção do furo roscado, uma vez que este componente passou a ser fixado diretamente à rótula, cuja fixação foi explicada

anteriormente. Adicionalmente, a introdução das rótulas tornou obsoleta a necessidade da “Peça fixadora”, que foi, por conseguinte, eliminada do sistema.

Assim, visto que já se encontra definido todo o sistema pneumático e os seus constituintes, é possível agora importar o cilindro e acessórios para o modelo 3D de forma a melhor perceber como estes encaixam na ferramenta final.

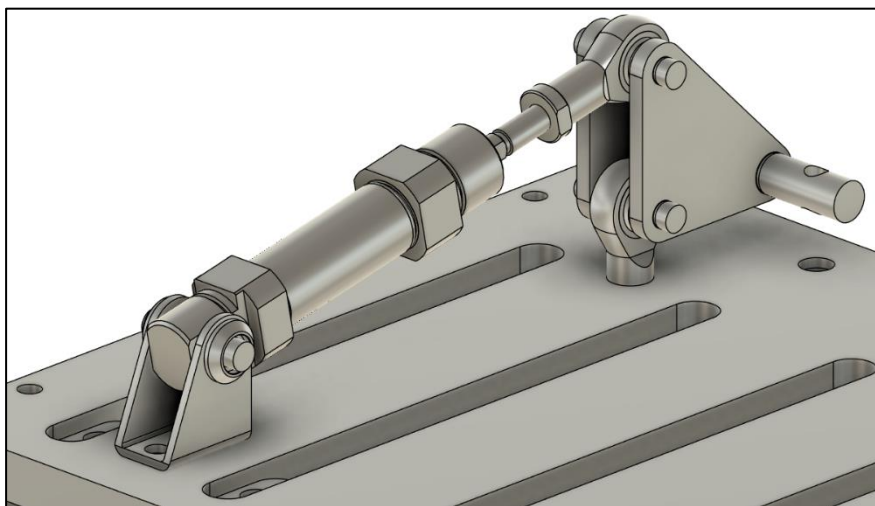


Figura 41 - Sistema pneumático montado

De facto, visto que a fixação eficaz das bielas já se encontra assegurada, o passo seguinte consiste na implementação dos componentes que irão efetivamente dar resposta ao principal objetivo deste projeto: a correção do desnível inerente às próprias bielas. Estes elementos serão responsáveis por nivelar as bielas, compensando as diferenças de altura entre as suas faces, causadas pelas assimetrias geométricas naturais da sua estrutura.

Efetivamente, tal como mencionado anteriormente, visto que a empresa trabalha com um número reduzido de modelos de bielas com variações na altura das cabeças, não se justifica a adoção de um mecanismo excessivamente complexo. Assim, optou-se por uma solução mais simples e eficiente: a implementação de chapas com diferentes espessuras, colocadas abaixo dos mordentes, servindo de apoio para as cabeças das bielas. Consequentemente, tornou-se necessário proceder à modificação da geometria dos mordentes, de modo a permitir a integração dos novos componentes. Esta adaptação pode ser observada na figura apresentada abaixo, onde se evidenciam as alterações efetuadas para garantir a compatibilidade e o correto funcionamento do sistema.

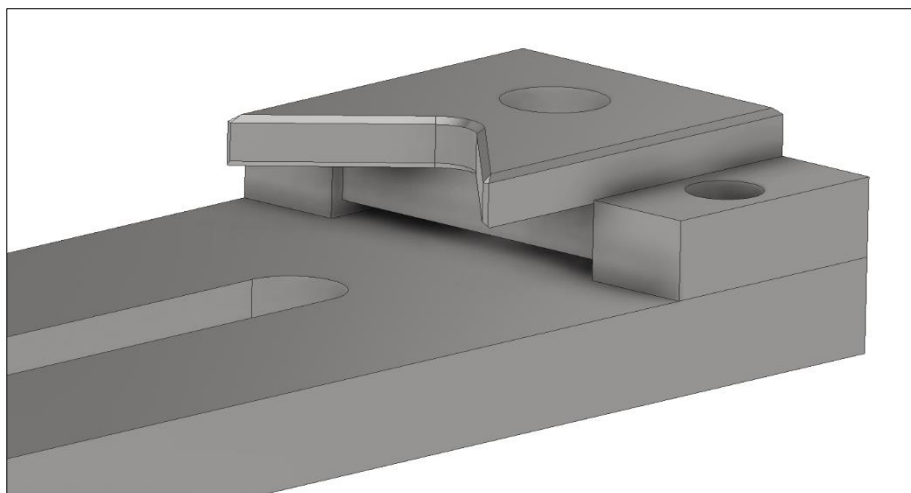


Figura 42 - Geometria atualizada do mordente para implementação das chapas

Relativamente ao funcionamento destas chapas, as mesmas serão posicionadas por baixo de ambos os mordentes e fixadas à base do suporte do sistema por meio de parafusos de embutir de forma a evitar qualquer saliência que possa interferir com o correto assentamento da biela, visto que qualquer irregularidade neste ponto poderia comprometer o processo de retificação. Desta forma, é fundamental assegurar que os parafusos estão corretamente embutidos, garantindo a estabilidade e precisão do sistema. No que diz respeito ao papel das chapas no nivelamento das bielas, considere-se o seguinte exemplo: pretende-se retificar as faces das cabeças de uma biela cujas alturas são, respetivamente, 15 mm e 12 mm, ou seja, com uma diferença de 3 mm entre si. Para compensar essa diferença e garantir o nivelamento adequado, as chapas são inicialmente furadas para permitir a sua fixação à base do sistema e, posteriormente, as suas faces são retificadas, assegurando uma superfície perfeitamente plana para o correto apoio das bielas durante o processo de retificação.

Neste cenário, por exemplo, utilizar-se-ia uma chapa com espessura final de 13.5 mm para a cabeça mais baixa e outra de 10.5 mm para a mais alta. No entanto, é importante notar que a espessura final das chapas deve respeitar dois critérios fundamentais: em primeiro lugar, garantir robustez estrutural suficiente para suportar o aperto contra a base, evitando deformações e em segundo lugar, deve ser assegurada uma altura tal que, ao posicionar a biela entre a chapa e o mordente, esta fique para fora do mordente. Esta condição é essencial

para garantir que existe material disponível para a retificação, enquanto se mantém uma fixação segura da biela por parte do mordente, assegurando a estabilidade do processo.

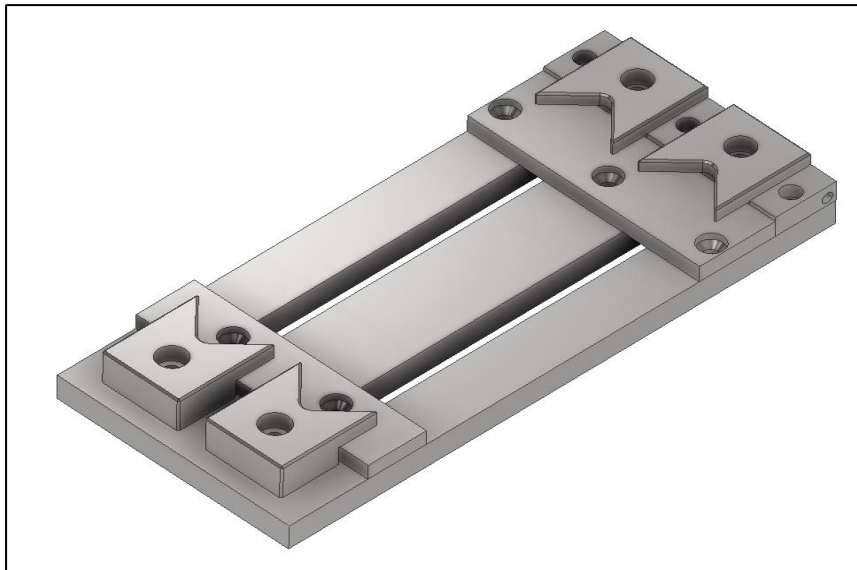


Figura 43 - Sistema com chapas niveladoras

Na figura acima, é possível observar que a chapa associada ao mordente fixo apresenta furos destinados à sua fixação direta à base do suporte. No entanto, esta configuração não se verifica na chapa correspondente ao mordente móvel, a qual não dispõe de furos para esse efeito. Esta diferença justifica-se pelo fator anteriormente mencionado relacionado com o ajuste ao comprimento da biela. Dado que os mordentes são móveis, torna-se essencial que a chapa associada ao mordente móvel se desloque em simultâneo com este, de modo a manter o correto posicionamento relativamente à biela. Inicialmente, foi considerada a hipótese de realizar múltiplos furos ao longo do comprimento da base, permitindo assim a fixação da chapa em várias posições possíveis. No entanto, esta solução revelou-se rudimentar e pouco precisa, sendo assim suscetível a erros. Como alternativa, procedeu-se ao desenvolvimento de um novo componente, especificamente concebido para se acoplar ao conjunto formado pelo mordente móvel e pelo respetivo guia, garantindo uma fixação estável e automaticamente alinhada com a posição do mordente.

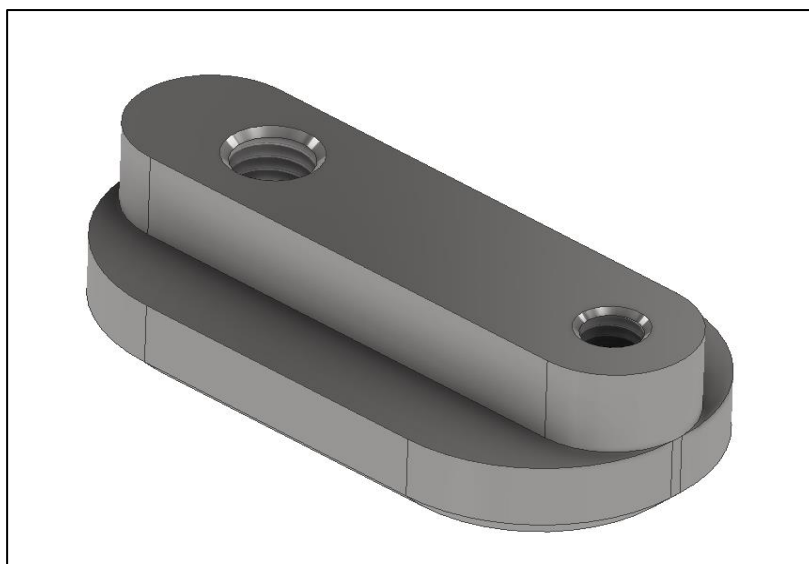


Figura 45 - Componente para chapa móvel

Relativamente ao acoplamento deste novo componente, a sua geometria integra dois furos roscados com funções distintas. O furo de maior dimensão (M8), destina-se à colocação do parafuso responsável pela fixação conjunta do mordente móvel, do componente guia e deste novo elemento, assegurando uma união sólida entre as três partes. Por sua vez, o furo de menor dimensão (M6) serve para a ligação da chapa niveladora associada ao novo componente, através de um segundo parafuso, garantindo assim que a chapa acompanha com precisão os movimentos do conjunto durante o ajustamento da posição da biela, sendo todas estas ligações visíveis na Figura 45.

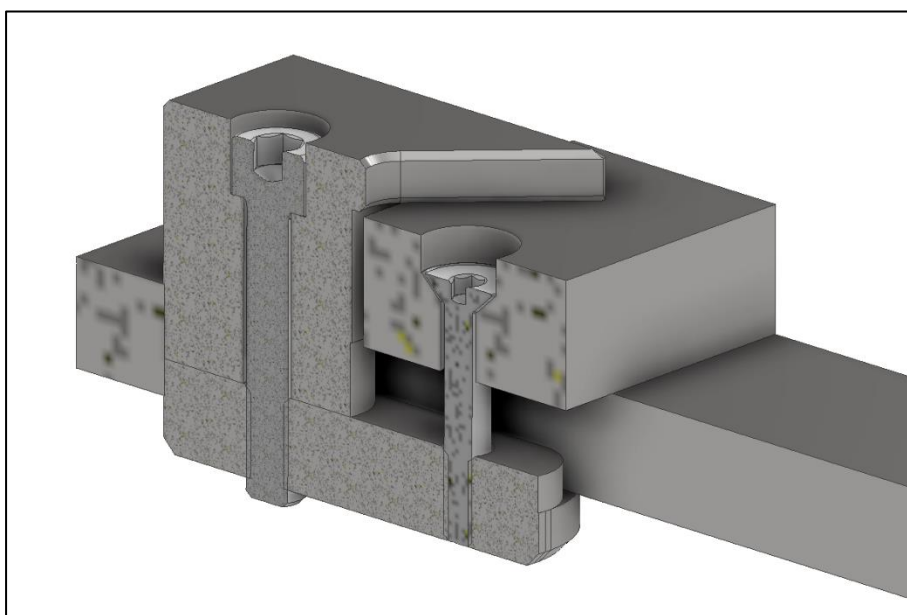


Figura 44 - Componente móvel do sistema montada

Conforme se pode observar na figura apresentada acima, o denominado “componente móvel” foi integrado no mordente móvel, com o intuito de reduzir o número total de componentes e, simultaneamente, simplificar a arquitetura do sistema. Esta solução permite não só uma diminuição da complexidade construtiva, como também favorece a eficiência do processo produtivo, ao minimizar interfaces e potenciais pontos de falha. Adicionalmente, importa referir que o “componente móvel” inclui batentes laterais integrados na sua geometria. De facto, estes batentes desempenham a função de pressionar todo o conjunto contra a base inferior do suporte. Desta forma, em conjugação com o aperto superior, esta configuração assegura que todos os elementos se mantêm firmemente fixos e devidamente alinhados, evitando deslocamentos indesejados durante o processo de retificação. Assim, caso seja necessário proceder à substituição da biela por outra de comprimento diferente, seja mais curta ou mais comprida, o processo de ajuste torna-se simples e eficiente. Para tal, basta desativar o sistema pneumático, libertando assim o mordente móvel, e desapertar ligeiramente os parafusos de fixação da respetiva chapa niveladora. Uma vez feito este procedimento, o conjunto móvel pode ser deslocado até à nova posição desejada. Desta forma, com o desenvolvimento do sistema base concluído, o passo seguinte consiste na replicação de múltiplos exemplares do mesmo e na sua integração conjunta numa única ferramenta (Figura 46).

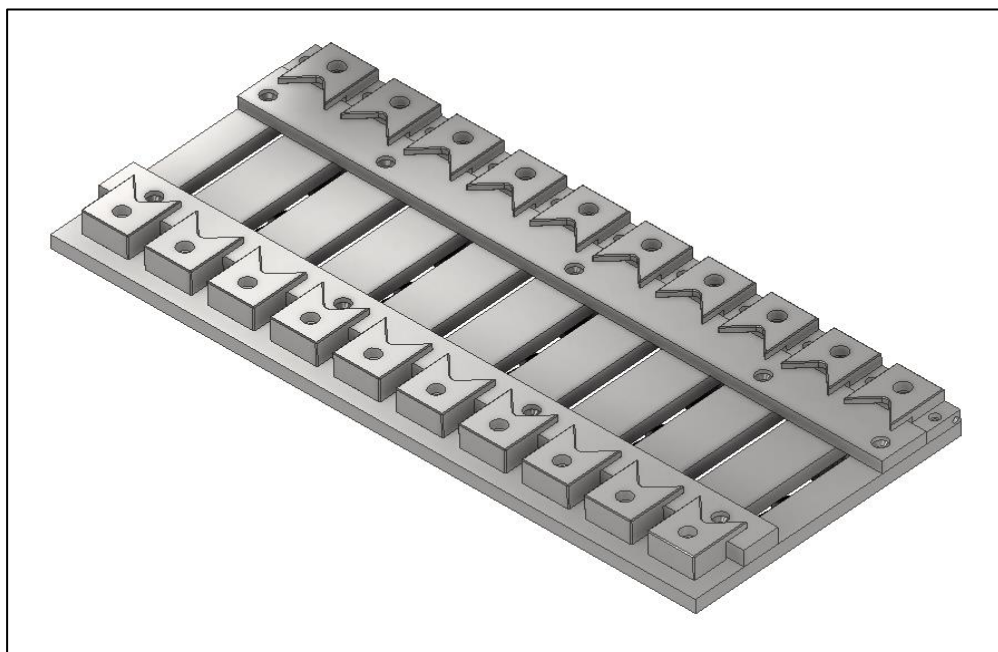


Figura 46 - Ferramenta de fixação sem bases

Como é possível observar na figura apresentada acima, o sistema desenvolvido possui a capacidade de fixar simultaneamente dez bielas, otimizando o processo de retificação. É importante salientar que este número representa o limite máximo de bielas que podem ser fixadas em simultâneo, tendo em conta as dimensões máximas da área de trabalho da retificadora de planos, que correspondem a 745×375 mm. De facto, com base nestas dimensões, foi realizado um cálculo rigoroso do número máximo de bielas possível de implementar sem comprometer a estabilidade do sistema nem a eficiência do processo. Para além disso, foi necessário considerar o espaço ocupado pelas bases de fixação do sistema (Figura 47), elementos essenciais que a fixação da ferramenta à mesa magnética da máquina.

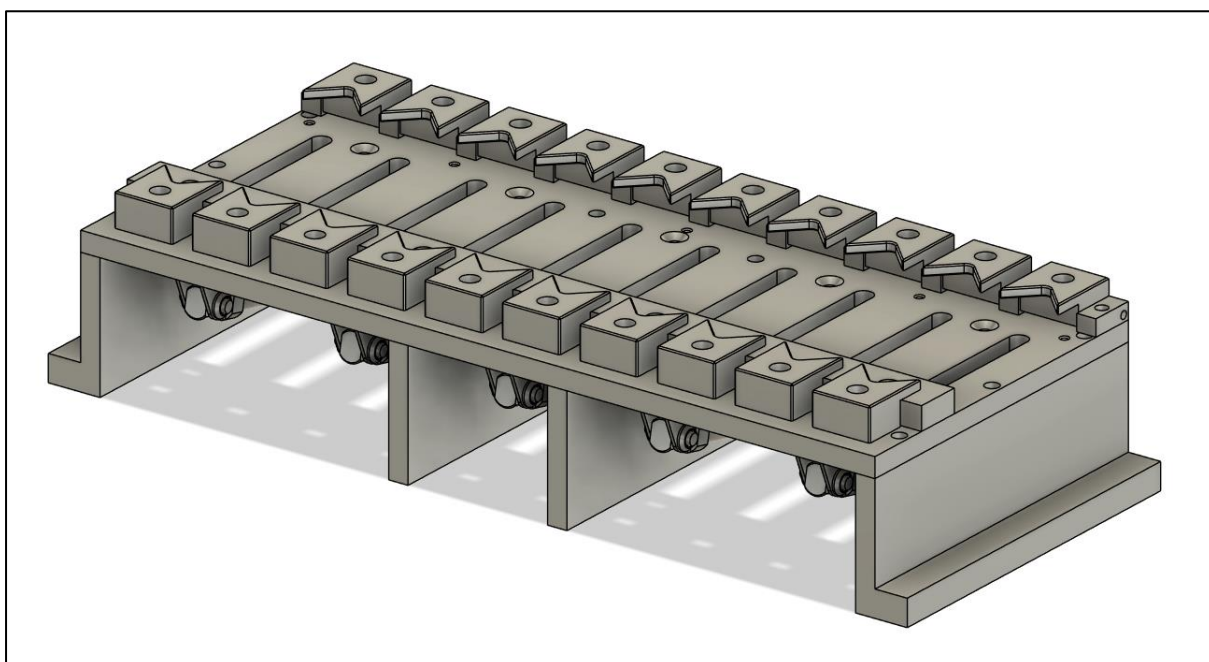


Figura 47 - Ferramenta de fixação finalizada

Na imagem acima apresenta-se o modelo CAD final da ferramenta desenvolvida, cujas dimensões são: $270 \times 135 \times 665$ mm. Desta forma, torna-se evidente que a ferramenta concebida é dimensionalmente compatível com as especificações da mesa de retificação, cujas dimensões são 375×745 mm. Assim, esta conformidade garante a viabilidade da sua utilização no equipamento existente, permitindo, portanto, a transição do projeto da fase conceptual para a sua concretização prática.

3.4 Matéria-prima e ordem de produção (OP)

Com a conclusão do desenvolvimento da ferramenta em ambiente virtual, o próximo passo consiste em concretizar o projeto no mundo físico. Para tal, é fundamental proceder a

uma análise rigorosa do modelo CAD, a fim de confirmar que a representação digital corresponde com precisão à solução que pretendemos implementar. Esta verificação reveste-se de uma importância crucial, não apenas para assegurar que o design e os detalhes foram devidamente ponderados, mas também para evitar o desperdício de recursos, garantindo uma utilização eficiente dos mesmos.

Assim, o primeiro passo prático nesta fase de transição para a produção consiste na análise da existência de matéria-prima em stock, ou, em alternativa, na identificação da necessidade de proceder à sua encomenda. Desta forma, considerando que se trata de uma ferramenta composta por vários componentes distintos, tornou-se essencial determinar as dimensões máximas de cada um desses elementos. Foram, assim, elaborados os desenhos técnicos de cada um dos componentes, apresentados nos Anexos A a M, que permitiram não só determinar as dimensões máximas de cada elemento, como também servirão, futuramente, de base para o trabalho em ambiente de produção, assegurando que os operadores compreendem as operações a executar e as tolerâncias que devem ser respeitadas.

Efetivamente, com base no conhecimento das dimensões máximas dos componentes e considerando-se um sob espessura de 5 mm em toda a sua volta procedeu-se, numa primeira fase, à definição do material a utilizar na construção da ferramenta em desenvolvimento. Desta forma, concluiu-se que o aço seria a opção mais adequada, dada a sua elevada robustez, a ampla disponibilidade em stock e, em caso de necessidade de aquisição externa, o seu baixo custo. Seguidamente, procedeu-se a uma pesquisa interna com o intuito de verificar a existência de matéria-prima disponível nas instalações da empresa. Esta verificação foi realizada através de um programa interno que disponibiliza diversas informações, nomeadamente o tipo e a quantidade de materiais em stock.

No que diz respeito ao aço utilizado na produção dos componentes, este foi definido como um material genérico, isento de requisitos específicos relativamente à dureza ou à aplicação de tratamentos térmicos. De facto, a decisão inicial privilegiava a utilização de material já existente em stock, por razões de eficiência e economia de recursos. No entanto, esta abordagem revelou-se, em determinadas situações, impraticável, visto que apesar de ser possível encontrar peças com as dimensões adequadas, estas eram frequentemente constituídas por aços especiais, concebidos para aplicações que exigem propriedades

mecânicas elevadas. Tais características excediam largamente as necessidades da presente ferramenta, cuja funcionalidade não exige resistências ou comportamentos particulares.

Uma vez validado que a utilização de aços de especificação avançada não se justificava, a escolha passou a refletir não apenas a disponibilidade em stock, mas também critérios de otimização do fabrico, com destaque para a maquinabilidade. Assim, foi dada prioridade à seleção de aços um pouco mais macios, como o C1, que oferecem excelente aptidão para operações de maquinagem. Assim, esta decisão permitiu simplificar o processo produtivo, reduzir o desgaste das ferramentas de corte e assegurar maior consistência dimensional e qualidade superficial nas peças fabricadas, contribuindo, de forma global, para a eficiência do fabrico.

Contudo, verificou-se que, para alguns componentes, a matéria-prima disponível em stock não era suficiente ou adequada à sua produção, sendo eles: mordente móvel, componente chapa móvel, base, base da ponta e base do meio, cavilha parafuso, eixo e cavilha pneumático. Assim, tornou-se necessário proceder à encomenda do material em falta. Desta forma, com base neste levantamento, foi possível elaborar uma listagem dos materiais a utilizar em cada um dos componentes, conforme apresentado na Tabela 7.

Tabela 7 - Lista de matéria-prima para cada um dos componentes

Componente	Material	Dimensões (geometria da secção) [mm]	Comprimento adquirido [m]	Disponibilidade
Base	Aço (F10)	Retangular 20×275×620	1	Compra
Mordente fixo	Aço St37.2K (C1)	Retangular 60×30	-----	Stock
Mordente móvel	Aço St37.2K (C1)	Retangular 50×40	3	Compra
Componente chapa móvel	Aço St37.2K (C1)	Retangular 30×20	-----	Stock
Suporte	Aço St37.2K (C1)	Retangular 60×30	-----	Stock

Batente	Aço St37.2K (C1)	Quadrado 20×20	3	Compra
Cavilha batente	Aço tratado	Redondo ø4	-----	Compra
Cavilha eixo	Aço tratado	Redondo ø8	-----	Compra
Eixo	Aço tratado	Redondo ø12	-----	Compra
Cavilha pneumático	Aço tratado	Redondo ø12	-----	Compra
Cavilha parafuso	Aço tratado	Redondo ø14	-----	Compra
Base ponta	Aço (F10)	20×275×100	2	Compra
Base meio	Aço St37.2K (C1)	Retangular 20×100	3	Compra

Uma vez seleccionados os materiais para cada um dos componentes, o passo seguinte consiste na sua alocação a uma ordem de produção. Para tal, foi necessário lançar uma nova ordem de produção especificamente dedicada à produção da ferramenta em estudo, de forma a formalizar e organizar o processo produtivo.

Relativamente ao lançamento da ordem de produção, foi necessário, numa fase inicial, contactar o responsável pela sua criação. Neste contexto, foi-lhe apresentada uma descrição geral da ferramenta em desenvolvimento, bem como dos diferentes componentes que a integram. Contudo, dado o elevado número de peças envolvidas no sistema, foi sugerido que a produção fosse organizada através da criação de várias ordens de produção, agrupando os componentes com processos de fabrico semelhantes.

Para tal, tornou-se necessário analisar de que forma cada componente poderia ser fabricado internamente. Esta decisão foi tomada com base numa avaliação conjunta de diversos fatores, nomeadamente a disponibilidade de máquinas e processos de fabrico existentes na empresa, o tipo de matéria-prima a utilizar e a análise detalhada dos desenhos técnicos, visto que estes, tal como mencionado anteriormente, desempenham um papel fundamental, ao permitirem compreender com maior rigor as operações necessárias e os requisitos específicos de cada componente.

Assim, com base nesta avaliação, foi possível elaborar uma listagem detalhada do processo de fabrico correspondente a cada componente, conforme apresentado na tabela abaixo.

Tabela 8 - Processos de fabrico dos componentes

Componente	Processo(s) de fabrico(s)
Base	Fresamento
Mordente fixo	Serrote + Fresagem
Mordente móvel	Serrote + Fresagem
Componente chapa móvel	Serrote + Fresagem
Suporte	Serrote + Fresagem
Batente	Serrote + Fresagem
Base ponta	Fresagem
Base meio	Serrote + Fresagem

Tal como é possível observar na Tabela 8, os componentes dividem-se em três grupos principais de processos de fabrico:

- **Fresamento** – Componentes que apenas necessitam de fresagem;
- **Serrote + Fresamento** - Componentes cuja matéria-prima necessita de ser cortada com as dimensões pretendidas e que, posteriormente, são submetidos a operações de fresagem;

Com base nesta divisão, foram criadas duas ordens de produção distintas, cada uma correspondente a um dos grupos mencionados acima. Assim, esta organização permitiu estruturar o processo produtivo de forma mais clara, eficiente e facilmente compreensível por todos os intervenientes. É importante notar que do ponto de vista estrutural no sistema, foram efetivamente criadas duas ordens de produção distintas, no entanto, todas elas encontram-se associadas a um único código atribuído à ferramenta, garantindo, assim, a rastreabilidade e a ligação entre os diferentes componentes e a ferramenta final.

Assim, com as ordens de produção já definidas, o único fator de natureza administrativa que permanecia em aberto consistia na atribuição da matéria-prima necessária a cada ordem de produção. Este procedimento exige a consideração de dois elementos

fundamentais: por um lado, a identificação precisa dos componentes que integram cada ordem de produção; por outro, a determinação da quantidade exata de material a consumir na fabricação de cada componente. Esta fase reveste-se de particular importância para assegurar uma gestão eficiente dos recursos disponíveis e garantir que o processo produtivo decorre de forma contínua, evitando interrupções ou atrasos.

Desta forma, foi elaborada uma lista de materiais, especificando o comprimento de matéria-prima a utilizar em cada caso. Estes valores resultaram das dimensões de cada componente, obtidas não só a partir dos desenhos técnicos, mas também dos modelos 3D, e já incorporavam a margem adicional de 5 mm de sob espessura anteriormente referida.

Assim, encontram-se finalmente reunidas todas as condições necessárias para se iniciar a produção dos componentes correspondentes ao sistema idealizado. Importa, neste contexto, sublinhar que a transição da informação do projeto para o chão de fábrica foi concretizada de forma presencial, em contraste com o procedimento habitual, que recorre ao sistema interno de gestão da empresa previamente mencionado.

Esta exceção justificou-se pelo facto de se tratar de uma ferramenta de utilização exclusivamente interna, cuja produção se restringe a uma única unidade. Por essa razão, não se considerou pertinente implementar toda a estrutura documental habitualmente associada aos produtos destinados a clientes externos, como por exemplo a definição formal dos processos de fabrico, a elaboração de planos de inspeção e controlo de qualidade, entre outros elementos normativos que asseguram a rastreabilidade e a conformidade em séries produtivas mais exigentes.

De facto, apesar da informalidade relativa ao processo de transição da informação, foram ainda assim assegurados os meios necessários para garantir a correta execução da produção. Para cada Ordem de Produção foram elaboradas instruções claras e de fácil compreensão, complementadas pelos respetivos desenhos técnicos e por uma explicação direta do processo ao operador responsável.

Relativamente à informação transmitida para o chão de fábrica, apenas no caso do serrote a informação fornecida foi mais extensa e detalhada, devido às especificidades inerentes ao seu processo operacional.

Assim, no que concerne à informação transmitida aos centros CNC, esta consistiu principalmente na disponibilização dos desenhos técnicos e dos ficheiros STEP, acompanhados de uma breve explicação sobre o funcionamento da ferramenta e das tolerâncias especificadas nos desenhos.

No que diz respeito ao serrote, o operador utiliza uma máquina relativamente simples, equipada apenas com um batente que permite definir o ponto “zero” da matéria-prima. A partir daí, é introduzido manualmente o comprimento a cortar. Desta forma, para facilitar a compreensão e agilizar o trabalho do operador, foi elaborada uma lista detalhada (Tabela 9), onde constam os materiais a cortar, as quantidades e os comprimentos correspondentes. Cada entrada nesta lista está associada aos componentes constituintes da Ordem de Produção designada “Serrote + Fresagem”.

Tabela 9 - Lista com as instruções fornecidas para o serrote

Componente	Material	Quantidade	Comprimento do corte [mm]
Mordente fixo	Retangular 60×30	10	50
Mordente móvel	Retangular 50×40	10	60
Componente chapa móvel	Retangular 30×20	10	70
Suporte	Retangular 60×30	1º Corte – 5 peças 2º Corte – 10 peças	1º Corte – 60 mm 2º Corte – 15 mm
Batente	Quadrado 20×20	11	40
Base Meio	Retangular 20×100	2	280

Conforme ilustrado na tabela apresentada, o corte do suporte revelou-se mais complexo devido à necessidade de aproveitar matéria-prima já existente em stock. Para obter as dimensões finais pretendidas, 60 × 15 × 60 mm (largura × altura × comprimento) foi inicialmente cortada uma barra com secção 60 × 30 mm a um comprimento de 60 mm.

Posteriormente, essa barra foi dividida longitudinalmente ao meio, obtendo-se assim as dimensões finais desejadas para o componente.

Assim, para concluir, após a definição rigorosa dos materiais a utilizar e a formalização das ordens de produção, seguiu-se a etapa de transmissão da informação técnica e operacional ao chão de fábrica. Esta comunicação incluiu desde os desenhos técnicos e ficheiros digitais para os equipamentos CNC até às instruções detalhadas e listas de corte para operações manuais, como as realizadas no serrote. Assim, foi garantido que todos os intervenientes dispusessem dos elementos necessários para executar as suas tarefas com precisão e de forma coordenada, minimizando erros e interrupções.

Com este processo estruturado e a logística de aprovisionamento devidamente organizada, resta agora aguardar a conclusão da fabrico dos componentes. Esta fase é determinante para assegurar que todas as peças estão conformes às especificações técnicas e com a qualidade requerida, permitindo avançar posteriormente para a montagem da ferramenta. Esta última fase integra e valida todo o trabalho desenvolvido até ao momento, culminando na concretização do produto final e na verificação do seu desempenho conforme os objetivos estabelecidos.

3.5 Montagem do sistema

Após a conclusão de todas as operações de fabrico correspondentes aos diferentes componentes da ferramenta, encontram-se agora disponíveis todas as peças necessárias à sua constituição. De facto, a etapa de montagem assume particular relevância, uma vez que representa a integração de todos os elementos produzidos individualmente, garantindo que o conjunto final funcione de forma precisa e eficiente. Desta forma, é nesta fase que se verifica a conformidade dimensional e funcional de cada componente, assegurando o correto alinhamento, encaixe e fixação das partes. Assim, a montagem não se limita a um simples processo de junção de peças, mas constitui uma fase crítica de verificação da qualidade global da ferramenta, permitindo validar o rigor do fabrico e confirmar a adequação do projeto às especificações definidas.

3.5.1 Sequência de montagem

Antes de proceder ao acoplamento dos diferentes componentes, foi necessário realizar operações de retificação plana em algumas peças específicas, nomeadamente na “Base”, “Base ponta” e “Base meio”. Esta etapa revelou-se essencial, uma vez que o projeto em causa corresponde ao desenvolvimento de uma ferramenta destinada precisamente a operações de retificação, nas quais a planicidade e o alinhamento do plano de trabalho assumem um papel determinante.

Desta forma, iniciou-se o processo de retificação pela base, procedendo-se primeiro à retificação de um dos lados e, em seguida, do lado oposto. Após esta operação, recorreu-se à utilização de um comparador, com o objetivo de verificar a planicidade da peça e assegurar que ambas as superfícies se encontravam perfeitamente paralelas e alinhadas.



Figura 48 - Base retificada

Posteriormente, as quatro bases (“Base ponta” e “Base meio”) foram igualmente posicionadas na retificadora, sendo submetidas a operações de retificação em ambas as superfícies. Este processo abrangeu tanto a face em contacto com a parte inferior da “Base”, como o lado destinado a assentar na mesa da máquina. Para além disso, importa salientar que estas bases foram retificadas simultaneamente, de modo a assegurar que as respetivas superfícies se encontravam rigorosamente alinhadas entre si. Assim, a realização desta etapa revelou-se indispensável, uma vez que a ferramenta deve assentar de forma perfeita e estável sobre a mesa, garantindo um plano de trabalho rigorosamente plano e uniforme. Desta forma, considerando que a ferramenta é constituída por múltiplos componentes, tornou-se essencial

retificar todas as superfícies de trabalho diretamente relacionadas com o plano funcional, de modo a assegurar a planicidade, precisão geométrica e fiabilidade do conjunto final.

Finalmente, após concluídas todas as operações de preparação e retificação dos diversos componentes, procede-se à montagem das bases e à retificação final da superfície superior da base principal. Esta superfície corresponde à zona funcional da ferramenta, onde serão apoiadas as bielas, razão pela qual exige um nível máximo de precisão e planicidade. Assim, a retificação desta área é realizada após a montagem dos componentes retificados, garantindo que qualquer desvio resultante do acoplamento das peças seja eliminado e que o plano de trabalho final se mantenha perfeitamente nivelado e uniforme. Este cuidado é fundamental para assegurar não apenas a qualidade do acabamento das peças a retificar, mas também o bom desempenho da ferramenta durante a operação, evitando vibrações, desalinhamentos ou irregularidades no contacto entre as superfícies.



Figura 49 - Bases montadas antes da retificação final



Figura 50 - Retificação final da base na retificadora plana

Após concluída a retificação da base e verificada a planicidade do plano de trabalho, procede-se à montagem dos restantes componentes da ferramenta. Nesta fase, todos os elementos previamente fabricados e verificados são cuidadosamente ajustados e acoplados, assegurando o alinhamento preciso entre as diferentes partes e a correta integração do conjunto.

De facto, a montagem iniciou-se com o acoplamento de todo o sistema pneumático da ferramenta, etapa fundamental para garantir o correto funcionamento do conjunto.

Conforme ilustrado na Figura 51, o processo começou pela montagem dos “Eixos” e das “Cavilhas pneumáticas” nas respectivas rótulas esféricas.

No que respeita ao procedimento de montagem propriamente dito, as cavilhas foram inseridas ajustadas por deslizamento no interior das rótulas, permitindo uma instalação rápida, precisa e funcional. Após este encaixe, foram inseridos os freios utilizando um alicate de freios, com o intuito de impedir o deslizamento axial das peças durante o funcionamento.



Figura 51 - Rótulas esféricas montadas

Posteriormente, procedeu-se à montagem dos “Suportes” em conjunto com as respectivas rótulas, dando continuidade à estruturação do sistema pneumático. Durante esta fase, verificou-se que as cavilhas apresentavam dimensões ligeiramente superiores às dos furos existentes nos suportes, o que exigiu um ajuste mais rigoroso durante o processo de montagem. Para garantir o encaixe adequado sem comprometer a integridade das peças, recorreu-se à utilização de um martelo de nylon, ferramenta que permite aplicar força controlada sem causar deformações, marcas ou danos superficiais nos componentes metálicos.

Por fim, para concluir a montagem do sistema que atua como eixo no circuito pneumático, foram instaladas as “Cavilhas parafuso” nos furos remanescentes dos suportes. Durante esta operação, observou-se que as cavilhas apresentavam uma ligeira folga no encaixe, permitindo a sua inserção de forma simples e controlada.

Após a colocação das cavilhas, foram também aplicados freios com o objetivo de evitar qualquer deslocamento axial durante o funcionamento da ferramenta.

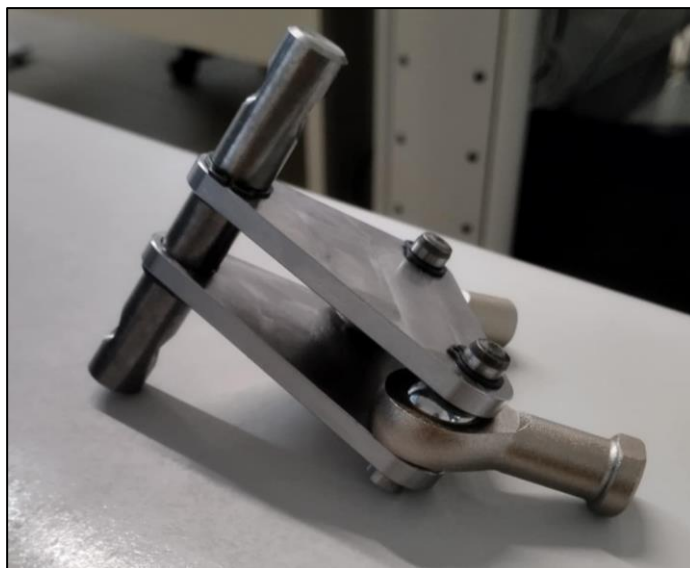


Figura 52 - Eixo do sistema pneumático montado

Assim, no que diz respeito ao sistema pneumático, resta apenas proceder à montagem do cilindro pneumático e, em seguida, à sua ligação ao eixo do sistema anteriormente montado. Para tal, procedeu-se primeiramente à montagem do suporte do cilindro pneumático, componente que já se encontrava fornecido em conjunto com o próprio cilindro.

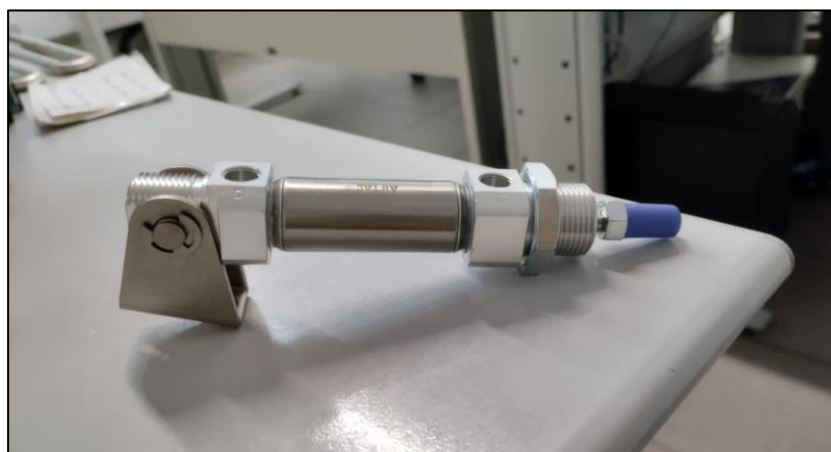


Figura 53 - Suporte do cilindro pneumático montado

Com o suporte devidamente montado no cilindro pneumático, tornou-se possível acoplar o conjunto à base da ferramenta, fixando o cilindro de forma segura e estável. Esta montagem permite que o cilindro rote em torno do eixo do suporte, conferindo-lhe a mobilidade necessária para se ajustar ao eixo do sistema pneumático. De facto, esta capacidade de rotação é fundamental, uma vez que facilita o alinhamento preciso entre o

cilindro e o eixo do sistema montado anteriormente, garantindo que o acoplamento final entre ambos possa ser realizado sem esforços excessivos ou desalinhamentos.

Assim, com ambos os componentes previamente montados, procedeu-se à ligação do cilindro pneumático ao eixo do sistema. Esta operação foi realizada através da roscagem da haste do cilindro no furo roscado da rótula esférica, conforme ilustrado na Figura 54.



Figura 54 - Cilindros pneumáticos montados

De seguida, procedeu-se à montagem dos componentes responsáveis pelo suporte e fixação das bielas, nomeadamente os mordentes e as calhas. O processo teve início com a montagem dos “Mordentes móveis”, operação que exigiu o acoplamento simultâneo de três elementos: o “Mordente móvel”, o “Componente chapa móvel” e a calha. Esta montagem conjunta teve como objetivo verificar a compatibilidade dimensional e funcional entre as peças, assegurando que o conjunto se ajustava corretamente e operava de forma fluida.

Importa salientar que, nesta fase, as calhas foram montadas apenas a título provisório, com o intuito de validar o correto dimensionamento e o alinhamento dos componentes. Este procedimento permitiu confirmar que a ligação entre as partes era mecanicamente viável e que o movimento do sistema decorria sem interferências.

Para além disso, é também fundamental referir que as calhas serão posteriormente submetidas a um processo de retificação final, ajustado à geometria específica da biela a retificar. Este ajuste garante que a cabeça da biela assente de forma perfeita na calha, assegurando o posicionamento rigoroso da peça durante o processo de retificação e, consequentemente, a precisão dimensional e o acabamento de elevada qualidade exigidos na operação.



Figura 55 - Sistema do mordente móvel montado

Por fim, resta montar o sistema dos mordentes fixos, constituído pelos componentes: “Mordente fixo”, “Cavilha batente”, “Cavilha eixo” e mola. Inicialmente, recorreram-se ao martelo de nylon para inserir as “Cavilhas batente” na base sob ligeira pressão, sendo que estas funcionam como guias, assegurando que, quando os batentes forem aparafusados à base, se posicionem de forma correta e precisa. Contudo, é importante sublinhar que os batentes não podem ser fixados primeiro, devido à presença da “Cavilha eixo”, que atravessa todo o mordente fixo e parte de ambos os batentes em cada lado. Para contornar esta limitação, o conjunto é pré-montado fora da base: a cavilha eixo é inserida atravessando o mordente fixo, seguidamente são colocados os batentes em ambos os lados e fixados à cavilha.

Após esta pré-montagem, torna-se possível acoplar o conjunto corretamente à base. Antes desta instalação final, foram previamente inseridas as molas nas respetivas cavidades

entre a base principal e o mordente fixo, garantindo que o mordente é levantado automaticamente quando o cilindro se encontra desativado, conforme referido anteriormente.



Figura 56 - Ferramenta com mordentes fixos montados

Assim, com a ferramenta agora completamente montada, torna-se possível avançar para a sua aplicação prática na máquina, permitindo avaliar diretamente o seu desempenho, fiabilidade e precisão em condições de funcionamento reais. Este processo permitirá confirmar a eficácia do projeto e a correta execução de todas as etapas de fabrico e montagem previamente realizadas.

3.5.2 Problemas durante a montagem

Durante o processo de montagem da ferramenta em estudo, surgiram alguns problemas e imprevistos que exigiram uma análise detalhada e a adoção de soluções adequadas. Estes constrangimentos, comuns em projetos que envolvem elevados requisitos de precisão e múltiplos componentes interdependentes, resultaram principalmente de ajustes dimensionais, tolerâncias apertadas e pequenas incompatibilidades entre peças. Desta forma, a identificação e resolução destas dificuldades constituíram uma etapa essencial para garantir a fiabilidade e o correto funcionamento da ferramenta, permitindo simultaneamente otimizar o processo de montagem e aperfeiçoar aspetos críticos do projeto.

Assim, serão apresentados e discutidos os principais problemas encontrados durante a montagem da ferramenta, bem como as medidas corretivas implementadas, de forma a assegurar a qualidade, precisão e funcionalidade do conjunto final.

Retificação da base

Na primeira etapa do processo de montagem da ferramenta, correspondente à retificação da base, verificaram-se alguns problemas relacionados com o ajustamento dimensional dos componentes. Durante a retificação de ambos os lados da base principal, esta foi posteriormente montada em conjunto com as restantes bases, com o objetivo de proceder à retificação final do conjunto.

Contudo, constatou-se que, apesar de todos os componentes terem sido previamente retificados individualmente, as “Bases meio” apresentavam folgas visíveis após a montagem. Para determinar com precisão a magnitude dessa discrepância, recorreu-se à utilização de um apalpa-folgas, instrumento que permite medir pequenas diferenças entre superfícies de contacto. Assim, a medição efetuada revelou a existência de uma folga de aproximadamente 0,4 mm sob as “Bases meio”, evidenciando um desvio dimensional que comprometia a planicidade do conjunto e, consequentemente, o alinhamento do plano de trabalho da ferramenta.

Para resolver o problema identificado, procedeu-se à análise individual de todas as peças constituintes da base, com o objetivo de determinar a origem exata da folga observada. Durante esta verificação, constatou-se que o desvio dimensional não se devia às “Bases meio”, mas sim à própria “Base” principal, que apresentava um empeno visível em forma de “U”.

Este empeno foi muito provavelmente originado durante o processo de maquinagem, uma vez que se trata de uma peça com comprimento elevado, espessura reduzida e elevada taxa de remoção de material. Desta forma, as forças de corte aplicadas durante o processo de maquinagem, associadas ao aperto exercido pelos dispositivos de fixação, podem ter provocado tensões internas não uniformes no material. Assim, quando a peça foi libertada das fixações, essas tensões libertaram-se de forma desigual, levando ao encurvamento ligeiro (deformação côncava) da base.

No entanto, este problema não foi inicialmente detetado, facto que se explica pelo modo de funcionamento da própria máquina de retificação. Este tipo de equipamento está

dotado de uma mesa magnética, cuja função é fixar firmemente as peças durante o processo de retificação.

Assim, ao ser colocada sobre a mesa e submetida à força magnética, a “Base” deformava-se ligeiramente, assentando de forma aparente e temporariamente plana sobre a superfície da mesa. Assim, ao desativar o íman, a “Base” voltava a apresentar o empeno original, evidenciando que, apesar de ter sido retificada, o processo foi realizado num plano que não correspondia à geometria natural da peça. Em outras palavras, a retificação foi executada enquanto a base se encontrava forçada contra a mesa magnética, o que fez com que o plano obtido estivesse condicionado pela deformação induzida.

Desta forma, quando a peça se encontrava livre de qualquer aperto ou força externa, retomava a sua forma côncava, revelando que o plano retificado não era efetivamente plano em condições naturais, comprometendo assim a precisão e a planicidade real da superfície de trabalho. Consequentemente, com o objetivo de corrigir o problema identificado, recorreu-se à utilização de calços de aço com 0,4 mm de espessura, colocados em ambas as extremidades da peça. Estes calços tiveram a função de compensar a folga existente e suportar uniformemente a base, evitando que esta se deformasse sob a ação do campo magnético da mesa.

Ao assegurar que a peça permanecia na sua forma natural durante a operação de retificação, tornou-se possível retificar a superfície de modo efetivamente plano e preciso, eliminando o empeno anteriormente detetado. Desta forma, garantiu-se a planicidade e estabilidade geométrica da base, restabelecendo as condições adequadas para o correto alinhamento do conjunto da ferramenta.

Desta forma, após a retificação da superfície com os calços colocados, procedeu-se à desativação do íman da mesa e à verificação da planicidade através da utilização de um comparador ao longo de toda a superfície. A medição permitiu confirmar que a retificação foi corretamente executada, apresentando uma superfície uniforme e isenta de deformações.

Com este resultado positivo, restava apenas retificar o lado oposto da base e, posteriormente, montar novamente o conjunto da ferramenta para verificar se o problema da folga e o empeno anteriormente identificados haviam sido totalmente eliminados. Este

procedimento assegurou a correção definitiva da geometria da base e a restauração da planicidade necessária ao bom funcionamento da ferramenta.

De facto, após a montagem, verificou-se visualmente uma melhoria significativa, já não sendo possível observar qualquer folga entre as “Bases meio” e a mesa da máquina. Para confirmar esta melhoria, recorreu-se novamente a um apalpa-folgas, permitindo avaliar com precisão a existência de qualquer desvio residual. Efetivamente, a medição revelou a presença de uma folga residual de apenas 0,05 mm, valor que se mostrou desprezável, uma vez que, ao ativar o íman da mesa, esta diferença era totalmente eliminada, garantindo o contacto completo da superfície das bases.

Com todas as bases da ferramenta devidamente alinhadas e estabilizadas, restava apenas proceder à retificação da superfície superior da ferramenta, de modo a assegurar que, durante a operação normal de retificação de bielas, o plano de trabalho se mantivesse rigorosamente plano, garantindo a precisão e a fiabilidade necessárias para o desempenho correto da ferramenta.

Mordente fixo e móvel

No que respeita aos mordentes do sistema, também se verificaram problemas durante a fase de montagem da ferramenta. Após a maquinagem dos componentes, as dez unidades de cada tipo de mordente foram submetidas a um tratamento térmico de têmpera, com o objetivo de aumentar a dureza e a resistência ao desgaste, garantindo assim uma maior durabilidade em serviço.

Contudo, este processo deu origem a variações dimensionais que não foram devidamente consideradas nos desenhos técnicos utilizados durante a produção. Como consequência, as peças sofreram ligeiros aumentos dimensionais, o que comprometeu o seu encaixe nos respetivos alojamentos durante a montagem.

No caso específico dos mordentes fixos, verificou-se que estes não encaixavam entre os batentes, uma situação inaceitável tendo em conta o princípio de funcionamento do sistema. Tal como referido anteriormente, o mordente fixo deve posicionar-se entre os dois batentes, estando todos estes componentes interligados através da “cavilha eixo”. É ainda essencial que o mordente apresente uma folga controlada, permitindo a rotação livre e o movimento de aperto da biela durante o funcionamento normal da ferramenta. A ausência

dessa folga, resultante do excesso dimensional após a têmpera, impedia o movimento adequado e comprometia o desempenho funcional do conjunto.

Para resolver este problema, optou-se por montar os batentes sem o mordente, de modo a medir com precisão o espaço disponível para o seu encaixe. Com recurso a um paquímetro, determinou-se a dimensão mínima necessária para garantir o correto posicionamento do mordente, obtendo-se um valor de 44,85 mm. Por sua vez, as medições efetuadas à largura dos mordentes temperados revelaram uma dimensão média de 45,25 mm, evidenciando assim um excesso de cerca de 0,4 mm relativamente ao espaço disponível. Assim, para eliminar este material excedente, recorreu-se a uma retificadora de planos manual, permitindo remover o excesso de forma controlada e precisa. Efetivamente, o objetivo foi ajustar a dimensão final dos mordentes de modo a assegurar uma folga funcional de aproximadamente 0,2 mm, resultando numa dimensão total de 49,65 mm dos mordentes. Esta folga cuidadosamente controlada garante que o mordente fixo possa movimentar-se livremente, permitindo a sua rotação e atuação correta durante o funcionamento da ferramenta, sem comprometer o alinhamento, o aperto da biela ou a estabilidade do conjunto.

Relativamente ao mordente móvel, o problema identificado dizia respeito ao encaixe do componente nas guias, realizado através da saliência arredondada existente na sua parte inferior.

Durante a montagem, verificou-se que esta saliência não encaixava corretamente no rasgo correspondente da base, impossibilitando o movimento de translação suave necessário ao funcionamento do sistema. Este desajuste dimensional, à semelhança do que ocorreu com os mordentes fixos, foi também consequência do processo de têmpera, que provocou ligeiras variações nas dimensões e na geometria do componente, em especial na zona de contacto entre o mordente e a base. No entanto, ao contrário do que ocorreu com o mordente fixo, a geometria do mordente móvel impossibilitava a utilização da retificadora de planos manual para corrigir as superfícies pretendidas. A forma complexa do componente, com zonas de difícil acesso, tornava inviável a obtenção de um acabamento preciso através desse método.

Perante esta limitação, optou-se por recorrer a um centro de maquinagem CNC, que permitiu uma remoção controlada e gradual do material onde o operador procedeu à

maquinagem por etapas, retirando pequenas quantidades de material e verificando periodicamente o encaixe do mordente na calha até se alcançar um ajuste perfeito e funcional.

3.6 Aplicação do sistema

Com todos os componentes devidamente ajustados e a montagem da ferramenta concluída com sucesso, restava apenas proceder à sua instalação no local de trabalho, ou seja, na retificadora plana, e realizar posteriormente os ensaios experimentais da ferramenta.

Esta fase tem como principal objetivo avaliar a eficácia da solução desenvolvida, verificando se a ferramenta era capaz de corrigir o problema inicialmente identificado e de garantir a retificação precisa e uniforme das faces das bielas. Assim, através destes testes, seria possível validar o desempenho funcional da ferramenta, confirmando se o seu comportamento em operação correspondia aos requisitos de planicidade, estabilidade e repetibilidade exigidos no processo de produção.

Inicialmente, no que diz respeito à montagem da ferramenta no local de trabalho, esta operação foi executada pela equipa de manutenção da empresa, uma vez que a ferramenta integrava um sistema pneumático no seu funcionamento, ou seja, foi necessário conceber e instalar todo o circuito pneumático responsável pelo controlo dos cilindros integrados na ferramenta, assegurando a sua correta alimentação e sincronização operacional, conforme apresentado na Figura 56.

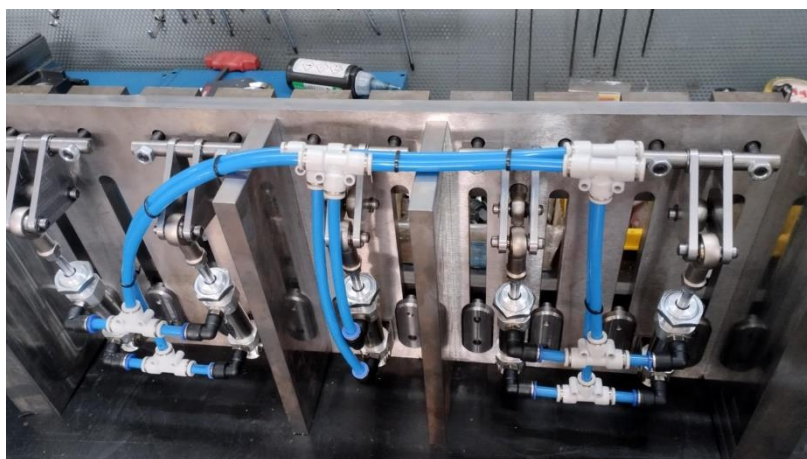


Figura 57 - Circuito pneumático montado na ferramenta

Assim, durante a instalação da ferramenta na retificadora de planos, foi necessário proceder à ligação do sistema pneumático à rede de ar comprimido da fábrica, garantindo um

fornecimento contínuo, estável e controlado de pressão, indispensável ao funcionamento eficiente e seguro da ferramenta ao longo do processo de retificação. Para além deste aspeto funcional, a instalação foi também planeada tendo em conta a natureza removível da ferramenta. Com efeito, esta foi concebida para ser facilmente montada e desmontada da mesa da retificadora, consoante o tipo de biela a ser produzido. Assim, a montagem teve de assegurar simplicidade e rapidez de instalação, sem comprometer a precisão do posicionamento nem a repetibilidade do alinhamento entre utilizações.



Figura 58 - Ferramenta finalizada montada na retificadora

Com toda a montagem concluída e o sistema devidamente preparado, restava apenas iniciar os preparativos para a realização do primeiro teste de retificação. Nesta fase, o passo seguinte consistiu na retificação das calhas, elementos essenciais responsáveis por suportar as faces das bielas e garantir o seu correto nivelamento durante o processo. Importa salientar que esta operação não havia sido realizada anteriormente, uma vez que, até ao momento, não estava definida qual seria a biela utilizada no primeiro ensaio. Dado que as dimensões das cabeças das bielas podem variar entre modelos, nomeadamente no que respeita à largura e pequenas diferenças geométricas, apenas após a escolha do componente específico foi possível ajustar e retificar as calhas de forma precisa, assegurando um apoio perfeito e um plano de trabalho rigorosamente paralelo à superfície de retificação.

Tendo sido definida a biela a utilizar no primeiro ensaio, foi então possível proceder à retificação final das calhas de apoio, ajustando-as de acordo com as dimensões reais das cabeças da biela.

De facto, a biela seleccionada apresentava larguras de 14.8 mm e 15.5 mm nas respectivas cabeças, verificando-se uma diferença dimensional de 0.7 mm entre ambas. Desta forma, considerando que, durante a operação de retificação, a biela deve posicionar-se cerca de 0,5 mm acima do nível dos mordentes, de modo a permitir a correta remoção de material, tornou-se necessário compensar essa diferença de alturas através da retificação diferenciada das calhas.

Assim, após o processo de ajuste, uma das calhas foi retificada para uma altura de 10.7 mm e a outra para 10 mm, assegurando a correção da assimetria existente e permitindo que a biela assentasse de forma estável e uniforme. Com esta compensação, o plano das faces da biela ficou perfeitamente alinhado com o plano de trabalho da ferramenta, garantindo as condições ideais para o início do ensaio de retificação.

No que diz respeito ao funcionamento do ciclo de retificação com recurso à ferramenta, o processo inicia-se com o posicionamento das bielas na ferramenta. Para tal, os parafusos dos mordentes e das calhas móveis são previamente desapertados, permitindo um ajuste preciso da ferramenta em função do comprimento da biela a ser retificada. Uma vez ajustada e mantendo esta posição, os parafusos do mordente e da calha móvel são apertados, fixando o conjunto e garantindo o alinhamento correto da peça. Posteriormente, as bielas são posicionadas nos respetivos espaços entre os mordentes, assegurando que todas ficam uniformemente alinhadas. Por fim, é acionado o cilindro pneumático, que efetua a fixação das bielas, preparando-as para a retificação das faces com precisão e consistência ao longo de todo o ciclo.

Após todos os componentes estarem devidamente fixados e montados, a máquina encontra-se pronta para ser ativada e iniciar o processo de retificação. É importante salientar que, previamente ao início do ciclo, foram programados na máquina dois programas distintos, correspondentes a cada uma das faces da biela. Para cada programa, foi definido um zero-peça, obtido através do encosto da mó na face pretendida, garantindo assim que a referência inicial do movimento da retificadora corresponde às dimensões corretas da peça.

Durante o ciclo de retificação, a pedra executa primeiro a retificação de uma das faces da biela. Em seguida, realiza-se a alteração do seu posicionamento ao longo do eixo Z, permitindo que a máquina retifique a segunda face com precisão, assegurando que ambas as superfícies fiquem planas, paralelas e alinhadas entre si, conforme os requisitos dimensionais e geométricos da peça.

3.7 Parâmetros após a implementação da solução

De facto, devido a atrasos internos no desenvolvimento da ferramenta, não foi possível realizar um número alargado de ensaios experimentais que permitisse uma avaliação estatisticamente representativa da produtividade obtida com a sua implementação. Assim, optou-se por utilizar como referência os resultados obtidos com as bielas utilizadas no primeiro ensaio, que serviram como base de validação do desempenho da ferramenta.

Na altura, essas bielas encontravam-se prestes a entrar em produção, coincidindo com a fase de implementação da nova ferramenta, o que possibilitou a realização de um teste direto em condições reais de fabrico. Esse ensaio inicial teve como objetivo verificar, com o apoio do departamento de qualidade, se a ferramenta assegurava uma retificação correta e precisa das faces da biela, cumprindo os requisitos dimensionais e geométricos exigidos.

Os resultados obtidos confirmaram a eficácia da ferramenta, demonstrando que o processo de retificação decorria de forma estável, repetível e conforme as especificações técnicas. Assim, a produção em série das bielas em estudo foi oficialmente autorizada, e os valores de produtividade registados para este modelo específico foram considerados representativos do desempenho da ferramenta.

De facto, para determinar o número de peças produzidas por hora, procedeu-se à temporização de um ciclo de produção completo. Isto significa que não foi considerado apenas o tempo de ciclo de retificação, mas também o tempo de operador, incluindo todas as operações necessárias para montar as bielas na ferramenta e retirá-las posteriormente. Desta forma, obteve-se um tempo de ciclo global e preciso, que reflete de forma fidedigna todas as atividades envolvidas no processo de produção, permitindo calcular a produtividade real da ferramenta e garantindo que os valores registados correspondem às condições operacionais efetivas.

Efetivamente, após a realização das medições de tempo, foi possível determinar que o tempo médio de ciclo completo correspondia a aproximadamente 308 segundos, o que corresponde a sensivelmente cinco minutos. Considerando que, durante cada ciclo, são retificadas dez bielas, pode-se concluir que a produtividade da ferramenta é de cerca de 120 bielas por hora. Assim, tendo em conta que os valores médios de produção antes da implementação da ferramenta situavam-se na ordem das 71 peças por hora, considerando um conjunto de cinco modelos distintos de bielas, de forma global, observa-se que os resultados obtidos após a introdução da solução são bastante superiores. Para além da melhoria quantitativa na produção, é igualmente importante destacar a redução de não conformidades dimensionais e de peças rejeitadas, visto que no decorrer de toda a ordem de produção não foram detetadas bielas não conformes.

De facto, é importante salientar que estes valores de produtividade serão muito semelhantes entre os diversos modelos de bielas. Antes da implementação da ferramenta, o número de bielas que podia ser colocado na mesa variava significativamente, devido à diversidade de comprimentos e diâmetros existentes. No entanto, com a nova ferramenta, este fator deixa de ser relevante, uma vez que a sua versatilidade permite fixar bielas de diferentes dimensões de forma consistente, garantindo que, independentemente do modelo, serão sempre retificadas dez bielas por ciclo.

Assim, no contexto da retificação com auxílio da ferramenta, os únicos fatores que podem influenciar o número de peças produzidas por hora são o tempo de ciclo de retificação, que depende da quantidade de material a remover e do acabamento exigido. Contudo, mesmo estes fatores apresentam diferenças desprezáveis no tempo de ciclo final entre os diferentes modelos. Desta forma, pode-se concluir que os valores de produtividade obtidos durante o primeiro ensaio são representativos e aplicáveis aos restantes modelos, refletindo a eficácia e consistência do desempenho da ferramenta em condições reais de produção.

Consequentemente, ao comparar os resultados atuais com os valores anteriormente registados, nos quais a média de produção rondava as 71 bielas por hora, é possível concluir que a solução implementada se revelou altamente eficaz e vantajosa, uma vez que se verificou um aumento de 49 bielas por hora.

Este resultado representa uma melhoria significativa no desempenho produtivo, permitindo à empresa dispor de um processo de retificação mais rápido, estável e fiável, que se traduz não apenas em ganhos de produtividade, mas também em melhorias na qualidade do produto final e, sobretudo, em reduções substanciais de custos operacionais.

De facto, este incremento de produtividade exclusivamente na etapa de retificação conduz a uma diminuição direta do custo unitário por biela, uma vez que o tempo de máquina, contabilizado com base num custo horário fixo é agora distribuído por um maior número de peças produzidas.

De forma mais precisa, este aumento de eficiência resultou numa redução anual estimada de custos de aproximadamente 17 740,8 €, considerando o tempo total de trabalho da máquina dedicado à produção destas bielas. Este valor evidencia o impacto económico positivo da ferramenta desenvolvida, reforçando a sua relevância técnica e estratégica no contexto produtivo da empresa. Para além disso, é importante salientar que a implementação da nova ferramenta trará também reduções adicionais de custos e perdas de tempo ao longo do processo produtivo. Com o aumento significativo da velocidade de retificação, as bielas em estudo deixarão de constituir o principal gargalo da produção, permitindo um fluxo de trabalho mais contínuo e equilibrado entre as diferentes etapas do fabrico.

Esta melhoria traduz-se numa diminuição dos tempos de espera entre operações e numa melhor gestão dos recursos produtivos, reduzindo assim a acumulação de peças pendentes e os períodos de inatividade da máquina

3.8 Custos

A análise de custos assume um papel determinante na avaliação da viabilidade de qualquer projeto industrial, uma vez que a adoção de uma solução não deve apenas responder a critérios técnicos, mas também assegurar a sustentabilidade financeira da empresa.

No presente trabalho, a implementação de um novo sistema de fixação para o processo de retificação de bielas envolve inevitavelmente um conjunto de custos associados que importa identificar e analisar de forma crítica. Estes custos dizem respeito, nomeadamente às peças torneadas e fresadas que constituem parte integrante do sistema desenvolvido. Desta forma, a produção implica custos de aquisição de matéria-prima, bem

como custos de maquinagem associados às operações de torneamento e fresagem. É importante notar que estes custos diretos de fabrico já incluem consumíveis, energia e tempo de operação das máquinas. Contudo, o facto de a empresa dispor da capacidade interna para produzir grande parte destes componentes confere-lhe maior controlo sobre o processo e elimina, em grande medida, a dependência de fornecedores externos, reduzindo prazos e custos adicionais relacionados com transporte ou subcontratação.

No entanto, não foi possível apresentar um custo estimado da ferramenta, uma vez que alguns dos valores e dados relativos aos materiais, componentes e processos de fabrico não podem ser divulgados, por questões de confidencialidade associadas à empresa. Contudo, quando se compara o investimento necessário para a implementação deste sistema com a alternativa anteriormente analisada, ou seja, a aquisição de uma máquina de retificação como a Nissei H-5RS, as diferenças são substanciais. A compra de uma nova máquina representaria não apenas um custo inicial muito elevado, mas também encargos adicionais de transporte, instalação, formação de operadores e manutenção especializada. Para além disso, a recuperação de um investimento desta magnitude exigiria um longo período de tempo e volumes de produção que justificassem economicamente tal aquisição.

Neste sentido, pode concluir-se que a solução apresentada neste projeto apresenta uma relação custo-benefício claramente mais vantajosa. Embora envolva custos de fabrico, montagem e manutenção, o valor global permanece bastante inferior ao de uma máquina nova e garante, de forma igualmente eficaz, a resolução das não conformidades dimensionais verificadas no atual processo de retificação de bielas. A empresa, deste modo, assegura a melhoria da qualidade do seu processo produtivo, preservando simultaneamente a sua sustentabilidade económica e evitando um investimento avultado que, face às necessidades identificadas, não se justifica.

4. Conclusão

O presente trabalho teve como objetivo a análise e otimização de um processo de fabrico associado à operação de retificação de componentes metálicos, com vista à melhoria da precisão dimensional, da estabilidade operacional e da eficiência produtiva. A investigação realizada permitiu compreender de forma sistemática as limitações existentes no processo e desenvolver uma solução técnica capaz de responder às necessidades identificadas, contribuindo para a melhoria global do desempenho produtivo.

A abordagem adotada baseou-se na observação detalhada do processo, na identificação das suas principais fontes de variabilidade e na conceção de uma proposta de melhoria orientada para o aumento da fiabilidade e da qualidade das operações. A implementação da solução desenvolvida, centrada na otimização do sistema de fixação das peças, revelou-se determinante para garantir maior uniformidade e repetibilidade durante a retificação, assegurando resultados mais consistentes e dentro das tolerâncias especificadas.

Os resultados obtidos após a introdução das melhorias evidenciaram um aumento da eficiência produtiva e uma redução das não conformidades dimensionais, refletindo o impacto positivo de uma intervenção planeada e sustentada em princípios de engenharia. Esta evolução demonstrou que a análise detalhada dos processos, aliada a um pensamento crítico e à aplicação de metodologias de melhoria contínua, é essencial para alcançar padrões elevados de desempenho na indústria metalomecânica.

Para além dos ganhos técnicos, o trabalho desenvolvido reforçou a importância da integração entre a teoria e a prática, mostrando que o conhecimento científico, quando aplicado de forma estruturada e orientada para a resolução de problemas reais, pode gerar resultados tangíveis e duradouros. A experiência adquirida ao longo deste estudo evidencia o valor da engenharia enquanto ferramenta de inovação e de progresso industrial, destacando o papel fundamental da investigação aplicada na competitividade das empresas.

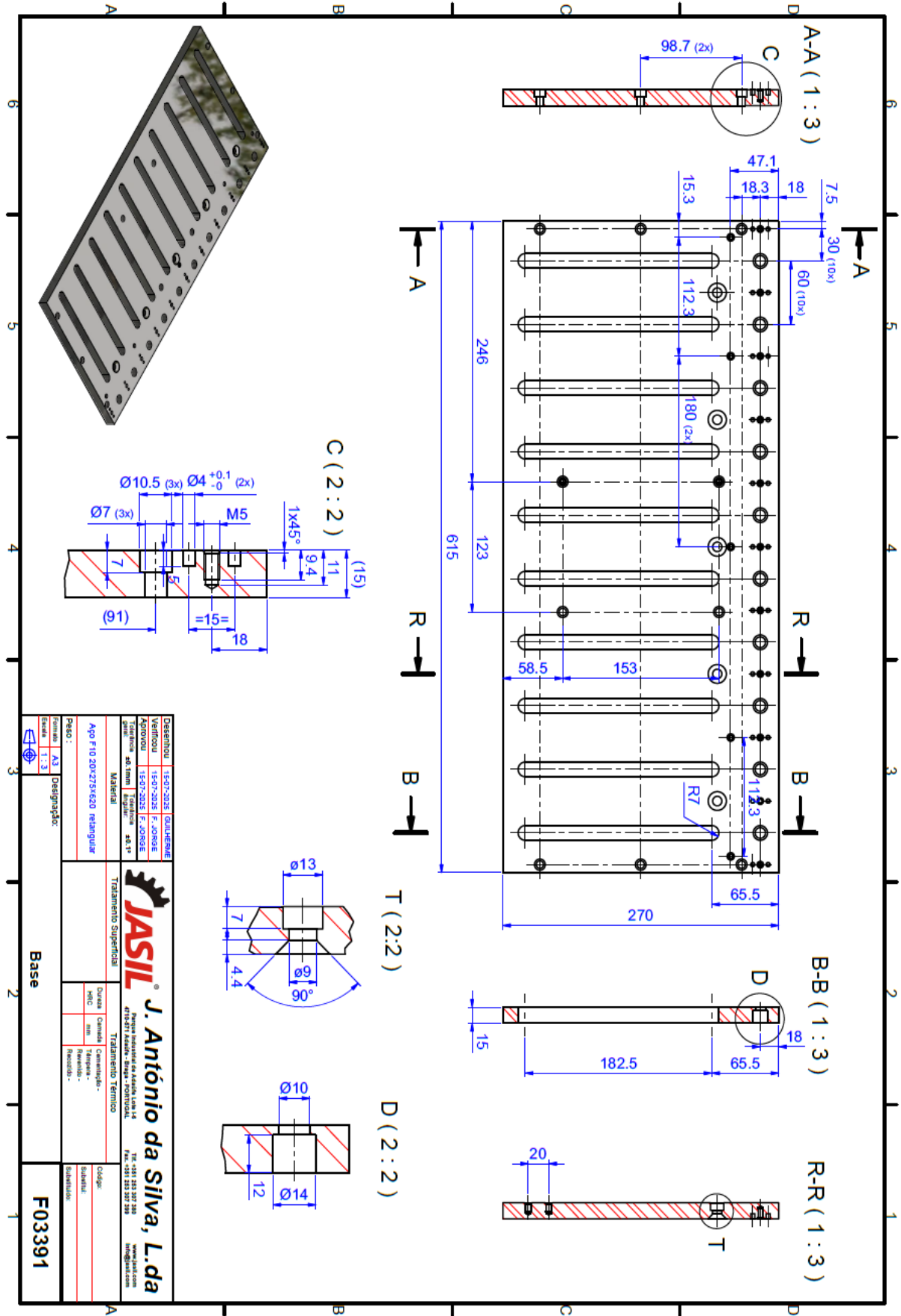
Em suma, este projeto constitui um contributo relevante para a melhoria dos processos de fabrico no setor metalomecânico, demonstrando que a combinação entre análise rigorosa, planeamento cuidadoso e aplicação prática de soluções técnicas é o caminho para uma produção mais precisa, eficiente e sustentável.

Referências Bibliográficas

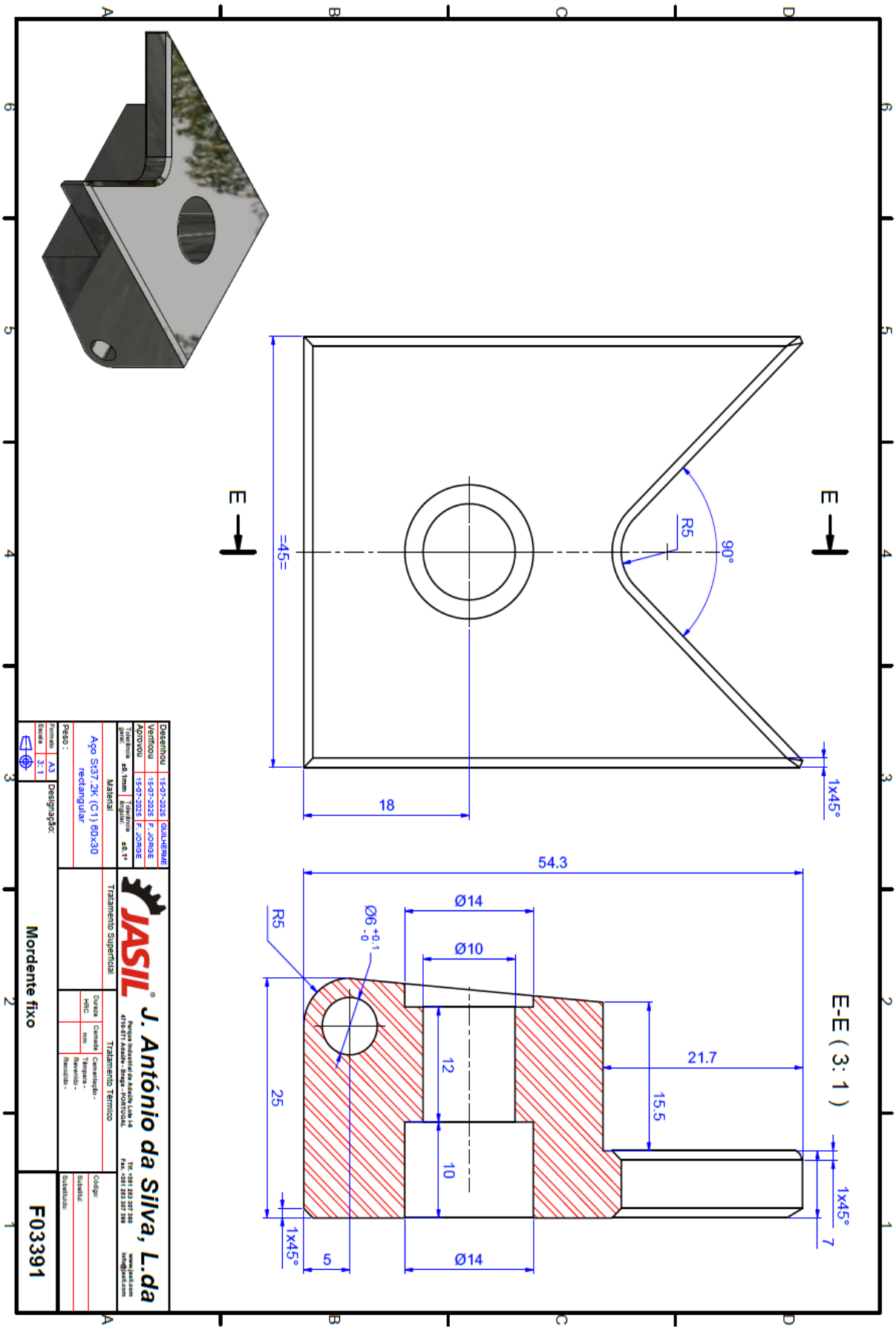
- [1] *Grinding (Machining) - an overview* / ScienceDirect Topics. (n.d.). Wwww.sciencedirect.com.
<https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/grinding-machining>
- [2] Blue Line Abrasives. (2024, March 19). *What Does Grit Mean? Numbers & Sizes Explained* - Blue Line Abrasives. Blue Line Abrasives. <https://bluelineabrasives.co.uk/product-use/what-does-grit-mean-numbers-sizes-explained/>
- [3] Tian, C., Wan, Y., Li, X., & Rong, Y. (2022). Pore morphology design and grinding performance evaluation of porous grinding wheel made by additive manufacturing. *Journal of Manufacturing Processes*, 79, 1–10.
<https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.04.024>
- [4] *Various grinding methods* / A.L.M.T. Corp. (n.d.). Wwww.allied-Material.co.jp.
https://www.allied-material.co.jp/en/products/diamond/knowledge/various_grinding.html
- [5] Hendrix, K. (2023, November 16). *A Guide to Choosing the Right Grit Size for Precision Grinding*. Eaglesuperabrasives.com; Eagle Superabrasives, Inc.
<https://info.eaglesuperabrasives.com/blog/choosing-the-right-grit-size-for-precision-grinding-a-comprehensive-guide>
- [6] Jasil. (2019). *Jasil*. Jasil. <https://jasil.com/>
- [7] *International Vocabulary of Metrology – Basic and general concepts and associated terms (VIM), 3rd edition*. (2012). <https://doi.org/10.59161/jcgm200-2012>
- [8] Khan, A. A. (2018, October). *Grinding Wheel: A Definite Guide For You (With PDF)*. Learn Mechanical. <https://dizz.com/grinding-wheels/>

- [9] *Abrasive Machining: What It Is, Its Types And Applications - LEADRP - Rapid Prototyping And Manufacturing Service.* (2024, May 13). Leadrp.net.
<https://leadrp.net/blog/abrasive-machining-what-it-is-its-types-and-applications/>
- [10] Médio, E., & Profissional, E. (n.d.). *Escola Estadual de Educação Profissional -EEEP Metrologia Dimensional.* Retrieved November 13, 2025, from
https://www.seduc.ce.gov.br/wp-content/uploads/sites/37/2011/10/mecanica_metrologia_dimensional.pdf
- [11] *Grinding in Engineering : Definition, Process, and Applications | TEAM MFG.* (2015). Team-Mfg.com. <https://www.team-mfg.com/blog/grinding-in-engineering.html>
- [12] mars. (2024, August 21). *O que é retificação de precisão e tipos, materiais, processos - Richconn.* Richconn. <https://www.richconn-cnc.com/pt/what-is-precision-grinding.html>
- [13] RV Metalúrgica. (2022, May 26). *O que é definição da metrologia dimensional? - RV Metalúrgica.* RV Metalúrgica. <https://www.rvmetalurgica.com.br/o-que-e-definicao-da-metrologia-dimensional/>
- [14] Chen, F. (2024, July 9). *O que é retificação: definição, tipos, usos e processo de trabalho - BOYI.* BOYI. <https://pt.boyiprototyping.com/cnc-machining-guide/what-is-grinding-definition-types-uses-and-working-process/>
- [15] High, in. (2024, June 6). *Continental Diamond Tool.* Continental Diamond Tool.
<https://www.cdtusa.net/blog/common-bond-systems-in-grinding>
- [16] *Precision Grinding: All Need To Know in Grinding Machining - WayKen.* (2022, October 21). Rapid Prototype Manufacturing in China - WayKen.
<https://waykenrm.com/blogs/precision-grinding/>

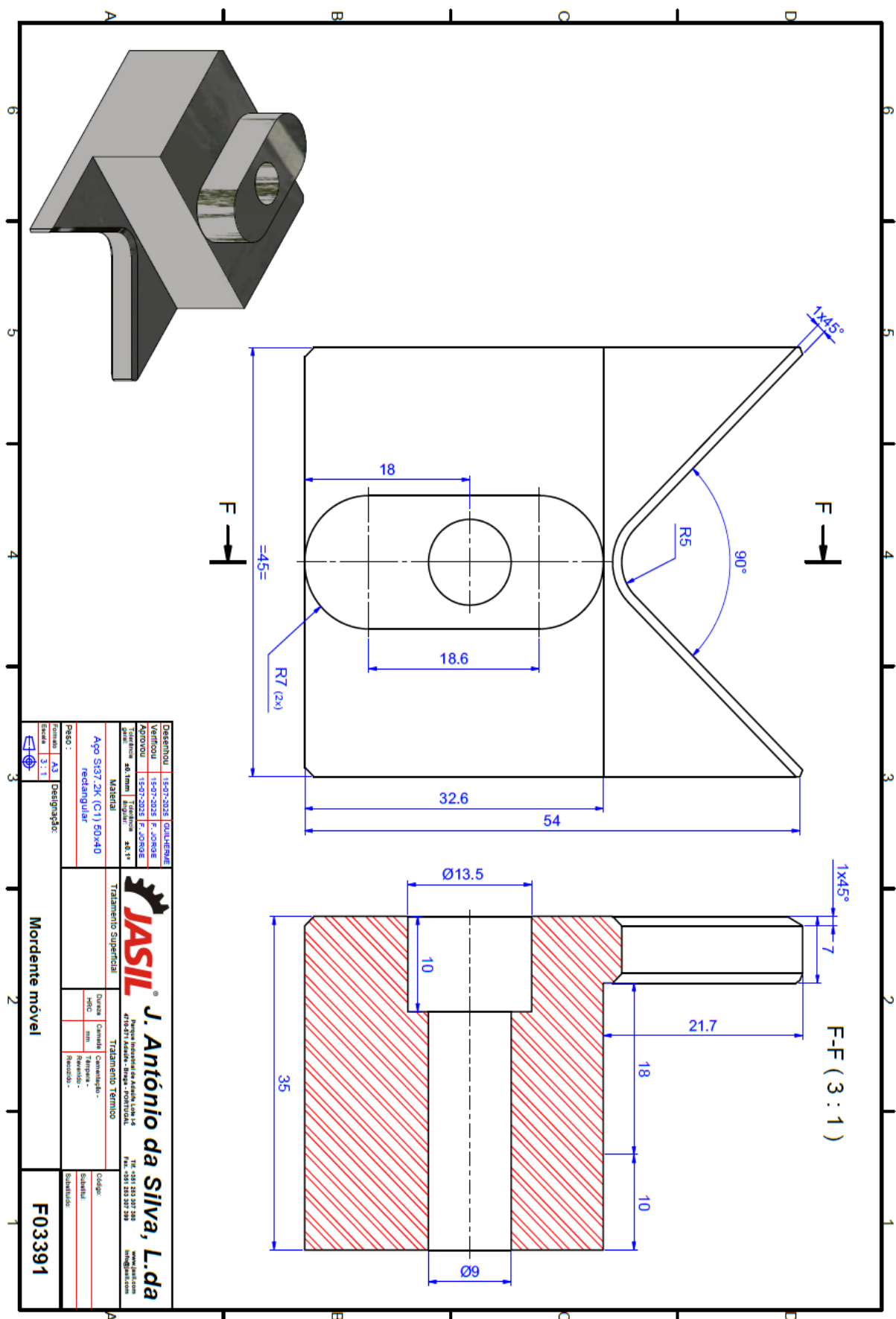
Anexo A



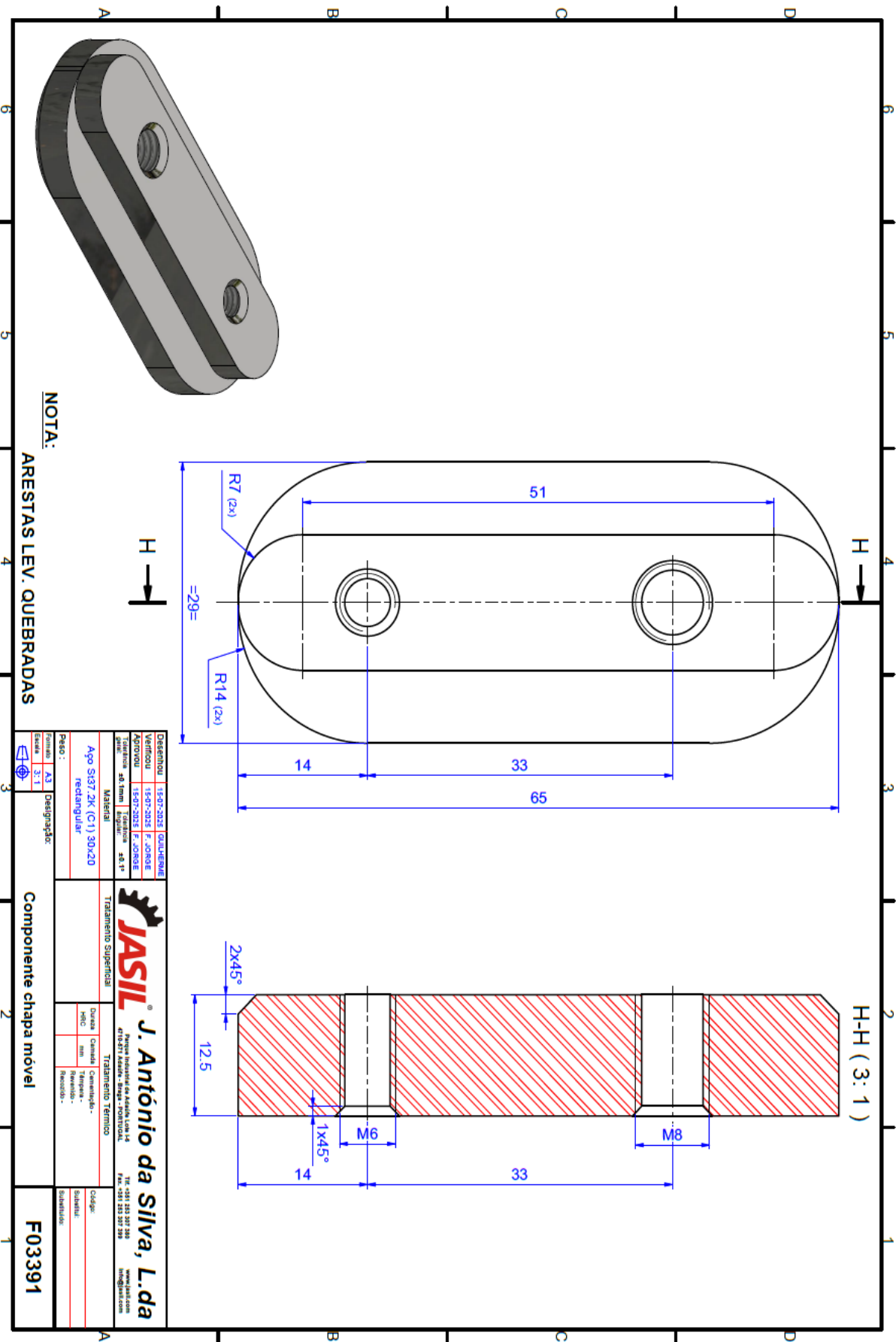
Anexo B

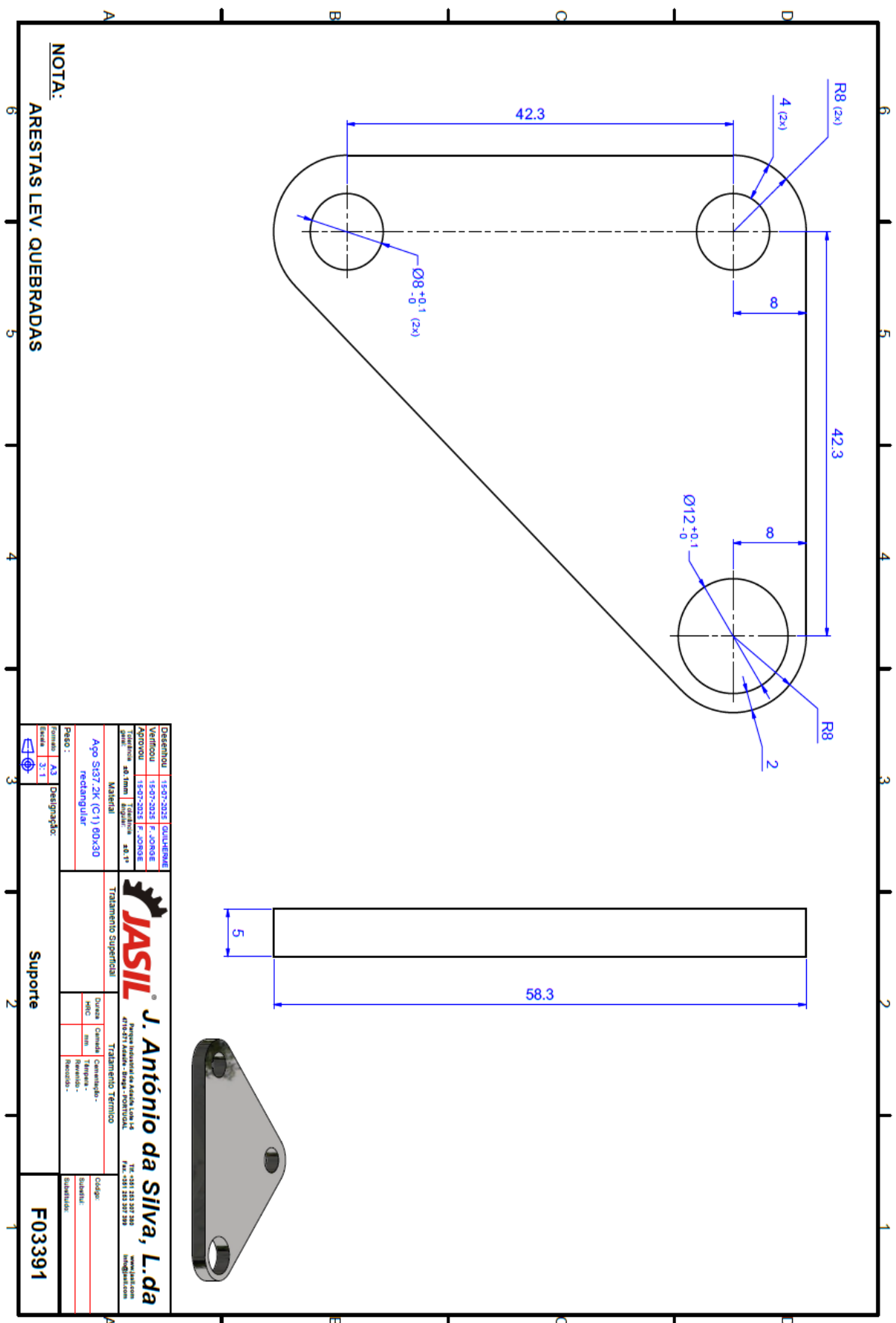


Anexo C

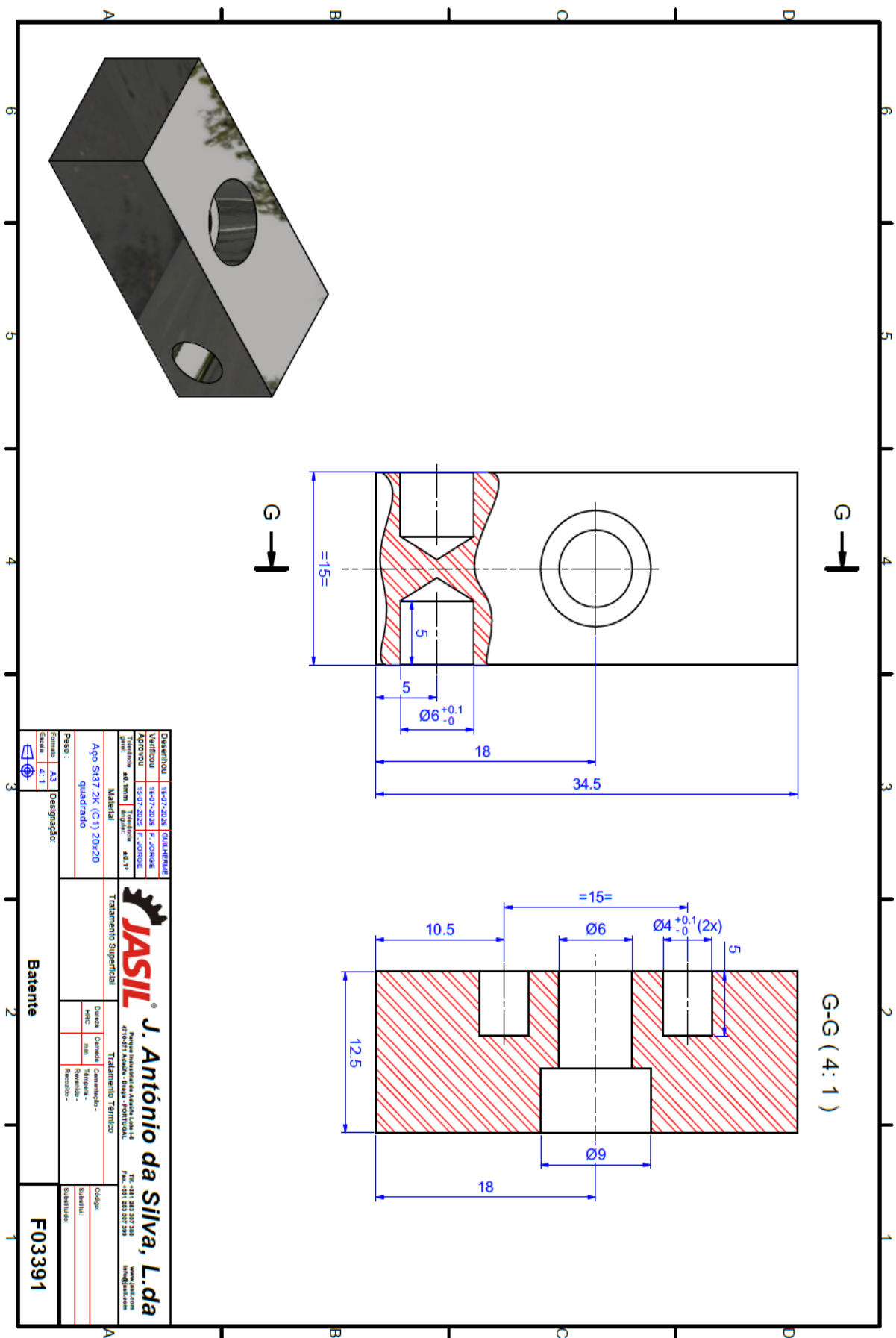


Anexo D

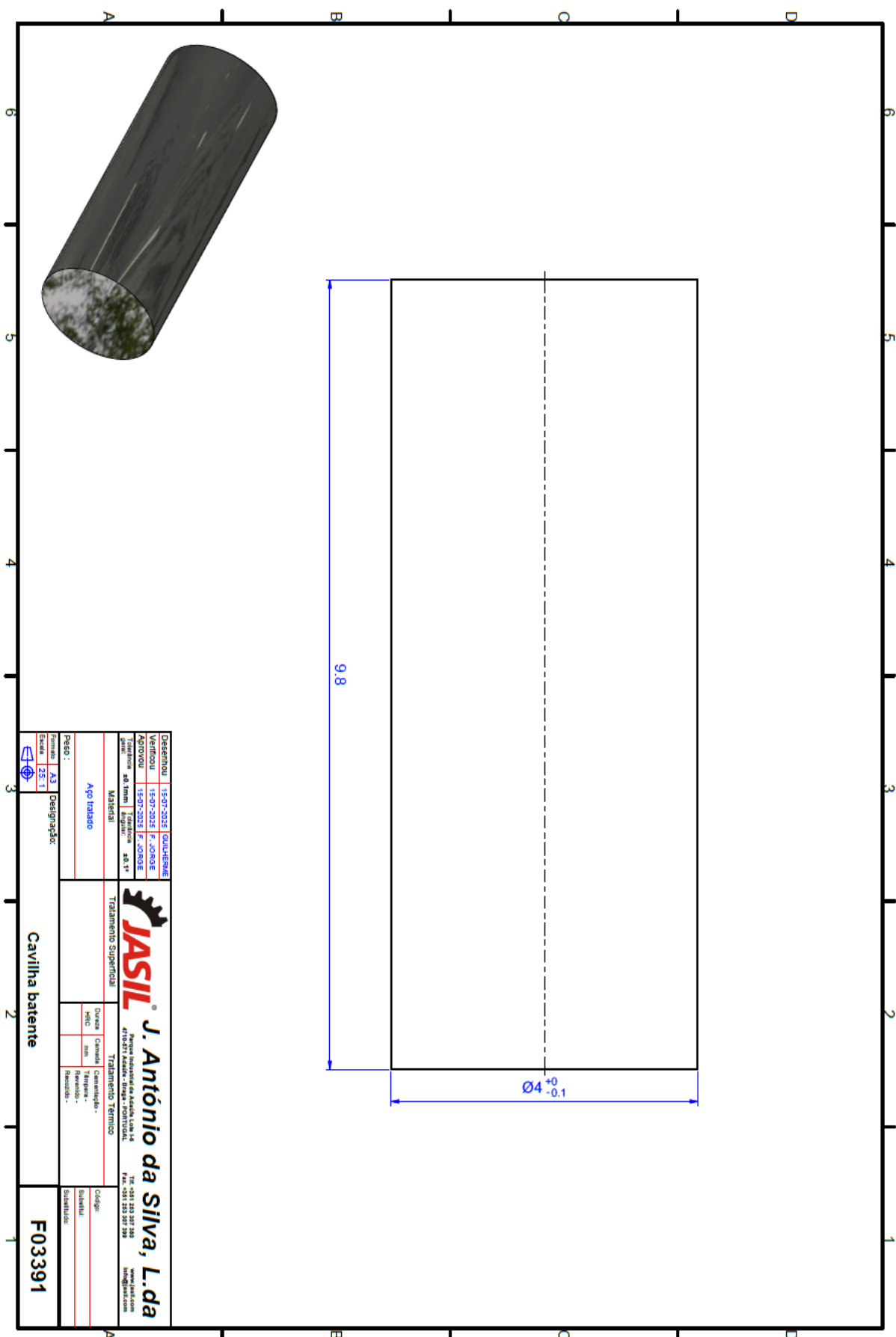




Anexo F



Anexo G



Anexo H

