



FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA

Análise e resolução de problemas de quebra da ferramenta na operação de corte da abertura livre em anéis de ferro fundido nodular

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

Autor

André Rocha Valente

Orientadores

Professor Doutor Albano Cavaleiro de Carvalho
Engenheiro Richard G. Alves

Júri

| | |
|-------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|
| Presidente | Professor Doutor Bruno C. Trindade Professor Associado da Universidade de Coimbra |
| Vogais | Professora Doutora Marta C. Oliveira Professora Auxiliar da Universidade de Coimbra |
| Orientador | Engenheiro Richard G. Alves Engenheiro da MAHLE – Componentes de Motores S.A. |

Colaboração Institucional

MAHLE

Driven by performance

MAHLE – Componentes de Motores S.A.

Coimbra, Julho, 2015

Agradecimentos

A realização deste trabalho foi possível dado o apoio que tive de algumas pessoas, a quem faço questão de agradecer:

Ao engenheiro Richard Alves pelo acompanhamento próximo, enorme disponibilidade, dedicação e interesse no sucesso do trabalho. Também pela confiança em mim, através da atribuição de outras tarefas além da tese, tornando possível eu ter tirado o máximo partido da minha primeira experiência profissional.

A todos os colaboradores da MAHLE – Componentes de Motores S.A. pela disponibilidade e ajuda que me ofereceram.

Aos meus pais, irmã e Rita pelo encorajamento, motivação, paciência, apoio incondicional e enorme interesse no meu futuro profissional.

Aos meus amigos, por serem os melhores do mundo e ajudarem a fazer destes últimos 5 anos os possivelmente melhores 5 anos da minha vida.

À Professora Marta Oliveira, pelas questões que me esclareceu ao longo do estágio, mesmo não tendo nada a ver com a minha tese.

Ao Professor Albano Cavaleiro pela revisão da tese.

Resumo

Este trabalho, realizado na MAHLE – Componentes de Motores S.A., teve como objetivo a análise e resolução do problema da quebra da ferramenta de corte (fresa) na maquinagem da abertura livre em anéis de pistão de ferro fundido nodular. Mais concretamente, pretendia-se descobrir a causa raiz do problema e tomar medidas corretivas de forma a reduzir os custos através de diminuição do consumo e aumento de rendimento. Para tal, começou-se por averiguar de onde vinha o problema e qual era o problema exatamente. De seguida, utilizando o método de deteção analítica de falhas da Kepner-Tregoe, é feita uma análise do problema. Após descobrir que a causa raiz do problema é o ferramental inadequado, alterou-se o seu diâmetro de forma a reduzir o desgaste e aumentar o apoio aos anéis. De seguida, são propostas três soluções para o problema secundário que aparece com a implementação da medida corretiva, que é o excesso de rebarba nas pontas do anel. O trabalho finaliza-se com uma análise de resultados, financeiros e de produtividade, que mostram que com esta medida corretiva obtêm-se ganhos muito elevados.

Palavras-chave: Fresa, Maquinagem, Anel de Pistão, Kepner-Tregoe, Deteção analítica de falhas, Ferramental

Abstract

The purpose of this work, carried out at MAHLE – Componentes de Motores S.A., was to analyse and solve the problem of cutting tool (milling cutter) breakage during the machining of the free gap of nodular cast iron piston rings. More specifically, the aim was to discover the root cause of the problem and take measures to reduce costs through lower consumption and higher process yield. To do so, the first move was to find out where there was a problem and what exactly the problem was. Next, using Kepner-Tregoe's analytic troubleshooting, a problem analysis is conducted. Having found out that the root cause of the problem is the tooling being inappropriate, its dimensions were changed so that wear was reduced and rings support was better. Then, three solutions to fix the excessive burr on the rings, which is a secondary problem existent due to the corrective measure, were proposed. This work ends up with a result analysis, both financial and productive, which show that with such corrective measure the savings are very high.

Keywords Milling cutter, Machining, Piston rings, Kepner-Tregoe, Analytic troubleshooting, Tooling

Índice

| | |
|------------------------------------------------------------------------------|------|
| Índice de Figuras | xi |
| Índice de Tabelas | xiii |
| Simbologia e Siglas | xv |
| Simbologia..... | xv |
| Siglas | xvi |
| 1. Introdução..... | 1 |
| 1.1. Motivação e Objetivos | 1 |
| 1.2. Estrutura do Trabalho | 2 |
| 1.3. Anéis de Pistão..... | 2 |
| 1.3.1. Dados Históricos | 2 |
| 1.3.2. Aplicação | 3 |
| 1.3.3. Abertura livre..... | 5 |
| 2. Análise do Processo..... | 7 |
| 2.1. Processo de fresagem..... | 8 |
| 2.1.1. Fresagem da abertura livre | 10 |
| 2.2. Ferramentas de corte | 14 |
| 2.2.1. Fresas utilizadas na MAHLE Componentes de Motores S.A. | 14 |
| 2.2.2. Material da fresa utilizada na MAHLE Componentes de Motores S.A. | 15 |
| 2.3. Ferramental | 17 |
| 2.3.1. Suporte do pacote de anéis | 18 |
| 2.3.2. Mecanismo de aperto..... | 19 |
| 2.4. Esforços impostos | 20 |
| 2.4.1. Na fresa..... | 20 |
| 2.4.2. Nas placas de suporte | 21 |
| 3. Avaliação da Situação | 25 |
| 3.1. Especificação do problema | 26 |
| 3.2. Localização do problema | 27 |
| 3.2.1. Célula 3 e célula 13 | 28 |
| 3.3. Recolha de dados sobre o problema | 30 |
| 4. Análise do Problema..... | 33 |
| 4.1. Diferenças e Modificações..... | 34 |
| 4.2. Possíveis causas do problema | 35 |
| 4.3. Verificação da causa raiz | 36 |
| 4.3.1. Material da fresa inadequado..... | 36 |
| 4.3.2. Espessura insuficiente da fresa | 37 |
| 4.3.3. Tipo do anel..... | 37 |
| 4.3.4. Processo de corte | 38 |
| 4.3.5. Problema nos TFV da célula 13 | 38 |
| 4.3.6. Ferramental inadequado | 40 |
| 4.3.7. Problemas com o dimensionamento da fresa | 42 |

| | | |
|--------|-----------------------------------|----|
| 5. | Medidas Corretivas | 43 |
| 5.1. | Causa raiz | 43 |
| 5.2. | Alteração do ferramental | 44 |
| 5.3. | Teste experimental..... | 47 |
| 5.4. | Efeitos secundários | 47 |
| 5.4.1. | Rebarba..... | 48 |
| 5.5. | Padronização do ferramental | 49 |
| 6. | Análise de Resultados | 51 |
| 6.1. | Análise financeira..... | 51 |
| 6.1.1. | Análise 2014..... | 52 |
| 6.1.2. | Análise 1º Semestre 2015..... | 53 |
| 6.1.3. | Análise 2º Semestre 2015..... | 55 |
| 6.1.4. | Visão geral 2015..... | 61 |
| 6.2. | Análise de produtividade | 63 |
| 6.2.1. | Na fábrica | 64 |
| 6.2.2. | Célula 13 | 65 |
| 7. | Conclusões | 67 |
| | Referências Bibliográficas | 69 |
| | Anexo A | 71 |
| | Anexo B..... | 73 |
| | Anexo C..... | 75 |
| | Anexo D | 77 |
| | Anexo E..... | 79 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1.1. Montagem típica de anéis de pistão; [MS Motor Service International GmbH]. | 3 |
| Figura 1.2. Função dos anéis: a) Vedação da câmara de combustão; b) Controlo de óleo; c) Dissipação de calor; [MS Motor Service International GmbH]. | 3 |
| Figura 1.3. Anel de óleo de duas peças (<i>Double bevelled spiral expander ring</i>); [MS Motor Service International GmbH]. | 4 |
| Figura 1.4. Anel raspador (<i>Taper faced napier ring</i>); [MS Motor Service International GmbH]. | 4 |
| Figura 1.5. Anel de compressão (<i>Rectangular ring with inside bevel</i>); [MS Motor Service International GmbH]. | 5 |
| Figura 1.6. a) Abertura livre; b) Abertura com diâmetro de trabalho. | 6 |
| Figura 2.1. Cadeia de processos, anel HV PVD. | 7 |
| Figura 2.2. Modos de operação no processo de fresagem. | 9 |
| Figura 2.3. a) Fresagem concordante; b) Fresagem discordante; [Dino Ferraresi, 1990]. | 9 |
| Figura 2.4. Fresagem: a) cilíndrica tangencial; b) cilíndrica frontal; c) topo; [ASM, 1997] | 9 |
| Figura 2.5. Torno de Forma Vertical, Dimaco CTB 170. | 10 |
| Figura 2.6. Placas circulares de ferro fundido. | 11 |
| Figura 2.7. Tubos de ferro fundido. | 11 |
| Figura 2.8. Fresadora do TFV Dimaco CTB 170. | 12 |
| Figura 2.9. Operação de fresagem: a) antes do corte; b) depois do corte. | 13 |
| Figura 2.10. Forma inicial de um anel, após a operação no TFV e o material que é removido (apara). | 13 |
| Figura 2.11. Geometria da fresa utilizada no processo de corte do <i>gap</i> de anéis de ferro fundido nodular, [Desenho TFV-008-07-4; MAHLE Componentes de Motores S.A.]. | 15 |
| Figura 2.12. Ferramental utilizado nos TFV. | 17 |
| Figura 2.13. Mecanismo de suporte do pacote de anéis. | 18 |
| Figura 2.14. Geometria das placas de suporte. | 18 |
| Figura 2.15. Mecanismo de aperto do TFV: a) Flange; b) Anilha. | 19 |
| Figura 2.16. Componentes da força de maquinagem no processo de fresagem (DIN 6584); [Dino Ferraresi, 1970] | 20 |
| Figura 2.17. Solicitação nos anéis; [Adaptado, Norma PU-TFV-021, MAHLE Componentes de Motores S.A.] | 21 |

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 2.18. Solicitação nos anéis (F) e na placa superior (Fy) [Adaptado, Norma PU-TFV-021, MAHLE Componentes de Motores S.A.]..... | 24 |
| Figura 3.1. a) Fratura por esforços normais; b) Fratura por esforços transversais..... | 25 |
| Figura 3.2. Consumo de fresas por mês em 2014. | 26 |
| Figura 3.3. Consumo de fresas por célula em 2014 e início de 2015..... | 27 |
| Figura 3.4. Tornos de forma vertical disponíveis nas células 3 e 13. | 28 |
| Figura 3.5. a) Posição devida da apara; b) Projeção de apara. | 30 |
| Figura 4.1. Fratura de fresas por AN na célula 13. | 37 |
| Figura 4.2. Falta de alinhamento das fresas dos TFV da célula 13..... | 39 |
| Figura 4.3. Conjunto de fresas a trabalhar: a) sem anilhas; b) com anilhas. | 39 |
| Figura 4.4. Falta de planicidade na placa de suporte superior: a) Vista inferior; b) Vista frontal. | 41 |
| Figura 4.5. Posição da placa de suporte superior relativamente aos anéis..... | 42 |
| Figura 5.1. Alicates de transporte de anéis. | 44 |
| Figura 5.2. Geometria da apara; Esquerda: secção do anel; Direita: vista superior..... | 45 |
| Figura 5.3 | 47 |
| Figura 5.4. Rebarba nas pontas no anel; a) ponta da esquerda; b) Ponta da direita. | 48 |
| Figura 6.1. Relação entre número de fresas para cada célula. | 56 |

ÍNDICE DE TABELAS

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 2.1. Dimensões das fresas utilizadas na MAHLE Componentes de Motores S.A.; [Desenho TFV-008-07-4, MAHLE Componentes de Motores S.A.]..... | 15 |
| Tabela 2.2. Efeito da composição química na resistência ao desgaste, dureza a quente e resistência mecânica; [Dino Ferraresi, 1990]..... | 16 |
| Tabela 2.3. Efeito do tamanho de grão na resistência ao desgaste, dureza a quente e resistência mecânica; [Dino Ferraresi, 1990]..... | 16 |
| Tabela 2.4. Dados e características da fresa CTS20 da <i>Ceratizit</i> | 17 |
| Tabela 2.5. Composição química do aço 34CrNiMo6..... | 19 |
| Tabela 2.6. Características mecânicas do aço 34CrNiMo6..... | 19 |
| Tabela 3.1. Consumo de fresas em 2012, 2013 e 2014 na MAHLE Componentes de Motores S.A..... | 26 |
| Tabela 3.2. Custo de fresas mensal por célula em 2014..... | 27 |
| Tabela 3.3. Número de fresas fraturadas entre 18 de Fevereiro e 18 de Março nas células 3 e 13..... | 28 |
| Tabela 3.4. Características do MF056-L; [Norma S-R-MS-0041, MAHLE Componentes de Motores S.A.]..... | 29 |
| Tabela 3.5. Características do MF053-L; [Norma S-R-MS-0041-en, MAHLE Componentes de Motores S.A.]..... | 29 |
| Tabela 4.1. Análise de Problemas (distinções e modificações)..... | 34 |
| Tabela 4.2. Análise de Problemas (possíveis causas)..... | 35 |
| Tabela 4.3. Dados e características da fresa CTS24 da <i>Ceratizit</i> | 36 |
| Tabela 4.4. Consumo de fresas no TFV 10 entre 18-28 Fev e 1-18 Mar..... | 40 |
| Tabela 4.5. Experiência realizada para avaliar a influência das placas de apoio..... | 40 |
| Tabela 5.1. Relação entre a área da apara e a área da apara em contacto com as placas de suporte [dimensões com base em milímetros]..... | 45 |
| Tabela 5.2. Dimensões das placas atuais e das placas de teste..... | 46 |
| Tabela 5.3. Dimensões das placas de suporte da tecnologia HV PVD..... | 50 |
| Tabela 6.1. Custo por mil anéis e gasto total com fresas em 2014 na fábrica..... | 52 |
| Tabela 6.2. Custo por mil anéis e gasto total com fresas em 2014 na célula 13..... | 53 |
| Tabela 6.3. Custo por mil anéis e gasto total com fresas no 1ºS de 2015 na fábrica..... | 53 |
| Tabela 6.4. Melhorias entre o 1ºS de 2015 e meio ano de 2014 na fábrica..... | 54 |
| Tabela 6.5. Custo por mil anéis e gasto total com fresas no 1ºS de 2015 na célula 13..... | 54 |
| Tabela 6.6. Melhorias na fábrica entre o 1ºS de 2015 e meio ano de 2014 na célula 13..... | 55 |

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 6.7. Tempo de vida das fresas (em anéis maquinados). | 55 |
| Tabela 6.8. Condições do problema de minimização do consumo de fresas novas. | 58 |
| Tabela 6.9. Valores obtidos para as variáveis da função objetivo. | 58 |
| Tabela 6.10. Custo por mil anéis e gasto total com fresas no 2ºS de 2015 na fábrica. | 59 |
| Tabela 6.11. Melhorias entre o 2ºS de 2015 e meio ano de 2014 na fábrica. | 59 |
| Tabela 6.12. Melhorias entre o 2ºS de 2015 e o 1ºS de 2015 na fábrica. | 60 |
| Tabela 6.13. Custo por mil anéis e gasto total com fresas no 2ºS de 2015 na célula 13. | 60 |
| Tabela 6.14. Melhorias entre o 2ºS de 2015 e meio ano de 2014 na célula 13. | 61 |
| Tabela 6.15. Melhorias entre o 2ºS de 2015 e o 1ºS de 2015 na célula 13. | 61 |
| Tabela 6.16. Custo por mil anéis e gasto total com fresas em 2015 na fábrica. | 62 |
| Tabela 6.17. Melhorias entre 2015 e 2014 na fábrica. | 62 |
| Tabela 6.18. Custo por mil anéis e gasto total com fresas em 2015 na célula 13. | 63 |
| Tabela 6.19. Melhorias entre 2015 e 2014 na célula 13. | 63 |
| Tabela 7.1. Resumo dos ganhos estimados. | 67 |
| Tabela 7.2. Resumo das melhorias de produtividade. | 68 |

SIMBOLOGIA E SIGLAS

Simbologia

A – Área

A_i – Área na condição i , com i = atual; teste

a_c – Avanço

A_{f1} – Número de fresas afiadas uma vez

A_{f2} – Número de fresas adiadas duas vezes

C_i – Custo por mil anéis no período de tempo i , com i = A; B

D – Diâmetro

E – Módulo de Elasticidade

e – Espessura de um dente da fresa

F – Força imposta pela fresa aos anéis

G_i – Gastos total com fresas no período i , com i = A; B

h – Altura de um dente da fresa

η – Melhoria da produtividade

I – Investimento

k_s – Pressão específica de corte

N_a – Número de anéis maquinados por fresas novas

N_f – Número de fresas novas

P_i – Pressão na condição i , com i = atual; teste

p – Profundidade de corte

P_a – Força de avanço

P_{ap} – Força de apoio

P_c – Força de corte

P_e – Força efetiva de corte

P_f – Preço de uma fresa

P_n – Força de compressão

P_p – Força passiva

P_U – Força de maquinagem

P_t – Força ativa

R_m – Tensão de ruptura

$R_{p_{0,2}}$ – Tensão limite convencional de proporcionalidade a 0,2 %

r – Raio de curvatura de um dente da fresa

s – Área da secção de corte

$Savings_C$ – Melhoria quanto ao custo por mil anéis

$Savings_G$ – Melhoria quanto ao gasto total com fresas

t – Tempo

T_{f_i} – Tempo de troca de ferramentas no período i , com $i=2014; 1S; 2S$

W – Tensão limite de flexão

$x_{i,j}$ – Número de fresas utilizadas numa célula, com $i = 1, \dots, 4; j = 1, 2, 3$

Siglas

ASME – American Society of American Engineers

ASTM – American Society for Testing and Materials

MCR236 – *Multilayer Chromium* trivalente-hexavalente

HSS – *High Speed Steel*

HV PVD – *High Value Physical Vapor Deposition*

TFV – Torno de Forma Vertical

TRS – Tensão de Ruptura Transversal.

WC – Carboneto de Tungsténio

1. INTRODUÇÃO

1.1. Motivação e Objetivos

Com a constante motivação de estar no topo, a MAHLE Componentes de Motores S.A. faz por estar na vanguarda da tecnologia e satisfazer os seus clientes da melhor maneira possível. Assim sendo, este estudo é feito com o objetivo de melhorar um processo existente de forma a aumentar a produtividade e reduzir os custos, nomeadamente evitar a quebra das ferramentas de corte da abertura livre dos anéis de pistão de ferro fundido nodular.

As exigências são cada vez mais, o que motiva a MAHLE Componentes de Motores S.A. a desenvolver soluções para uma vasta gama de pedidos, desde motores pequenos a veículos pesados ou mesmo de competição. Não se dedicando apenas a componentes de motor (sistemas de pistões, componentes de cilindros, sistemas de comando de válvulas), o grupo é especialista também em sistemas para filtragem e controlo de líquidos e sistemas para filtragem e controlo de ar. O Grupo MAHLE tem como unidades de negócio:

- Sistemas e componentes de motores;
- Periféricos de motor e filtragem;
- Gestão térmica;
- Aftermarket.

A MAHLE Componentes de Motores S.A. faz parte da unidade de negócio de sistemas e componentes de motores, fabricando anéis de pistão, componentes com importante função no desempenho e durabilidade dos motores de combustão. As recentes restrições aos níveis de emissão de CO₂ e outros poluentes constituem um desafio, sendo que o projeto de anéis passa por uma melhor vedação, redução do consumo de óleo, maior resistência ao desgaste, redução do tempo de assentamento e redução do atrito (geralmente obtido com o revestimento do anel). Também o acréscimo do custo dos combustíveis e lubrificantes é desafio em relação à performance dos anéis. Além disso, dadas estas mesmas leis, a grande maioria dos motores está a sofrer redução de tamanhos e, em muitos casos, de número de cilindros. São, portanto, diversos os obstáculos que a MAHLE

Componentes de Motores S.A. encara, lutando com recurso ao desenvolvimento tecnológico dos processos de fabricação e aprimoramento das características dos anéis.

1.2. Estrutura do Trabalho

Este estudo, dividido em 7 capítulos, começa com a expressão da motivação e objetivos e uma contextualização do trabalho. O segundo capítulo dedica-se à análise do processo de corte da abertura livre dos anéis de pistão em detalhe, acompanhado de uma revisão bibliográfica. O terceiro retrata a situação atual do problema em estudo na MAHLE Componentes de Motores S.A. através de dados fornecidos e observados na empresa. O quarto incide na análise do problema, mais concretamente na tentativa de perceber qual é a causa raiz do problema, através de testes teóricos e práticos às várias causas possíveis. No quinto capítulo determina-se a causa raiz e apresentam-se as medidas corretivas e soluções para eventuais problemas secundários. No sexto capítulo é feita uma análise financeira e de produtividade de maneira a compreender o impacto das medidas corretivas tomadas. O sétimo e último capítulo destina-se à conclusão do estudo.

1.3. Anéis de Pistão

1.3.1. Dados Históricos

Os anéis de pistão, frequentemente também chamados de segmentos, são componentes de motores de combustão com forma circular, elásticos e com elevada força de expansão. Surgiram em 1854, inventados por John Ramsbottom, e a sua utilização cresceu enormemente desde então dado que, ao reduzir o atrito, libertação de óleo para a câmara de combustão e a massa do pistão, levaram a aumentos de potência, eficiência e intervalos de manutenção. A evolução no setor dos anéis de pistão deu-se principalmente na redução de anéis por pistão e na implementação de novos revestimentos de forma a melhorar as condições de funcionamento. Com base nisto, são utilizados até hoje em motores de combustão.

1.3.2. Aplicação

Estes anéis são aplicados em torno de cada pistão de motor de combustão, em canaletas, sendo que cada pistão leva três anéis (alguns motores bastante antigos ou alguns projetos em protótipos podem ter outro montante de anéis por pistão), como representados na Figura 1.1:

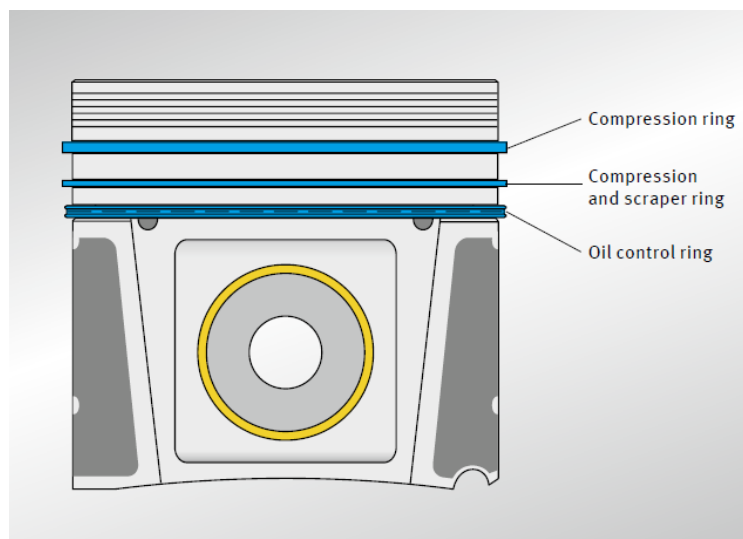


Figura 1.1. Montagem típica de anéis de pistão; [MS Motor Service International GmbH].

Têm como função vedar a câmara de combustão do cárter, limitar e regular o consumo de óleo e dissipar o calor transmitido para os pistões durante a combustão para o cilindro (Figura 1.2):

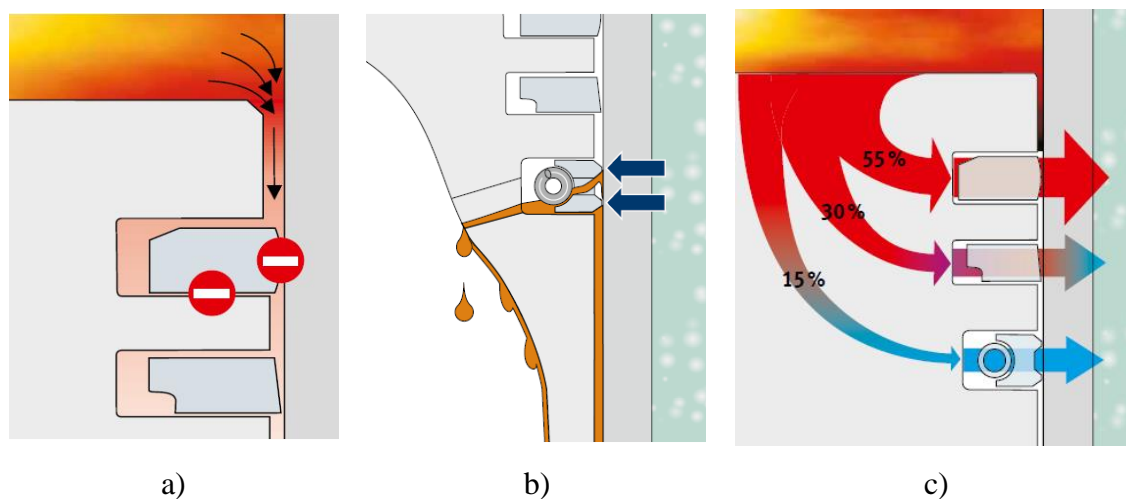


Figura 1.2. Função dos anéis: a) Vedação da câmara de combustão; b) Controle de óleo; c) Dissipação de calor; [MS Motor Service International GmbH].

Assim sendo, têm uma função crítica no bom funcionamento do motor. É feita referência aos anéis com base na canaleta em que estão situados (ex: o anel de primeira canaleta corresponde ao primeiro anel, de compressão). Dependendo do tipo de anel, sua aplicação, características e das exigências do cliente os anéis podem ser de ferro fundido ou de aço e podem também estar sujeitos à aplicação de revestimentos de forma a reduzir o atrito ou desgaste, por exemplo. Além disso, a sua secção pode tomar formas distintas. Na MAHLE Componentes de Motores S.A. os anéis são designados por “AN XXXXX” em que “XXXXX” corresponde ao número de cada anel.

1.3.2.1. Anel de Óleo

O anel de terceira canaleta, o anel de óleo, certifica que não há consumo desnecessariamente excessivo de óleo, assim como que há óleo suficiente para o adequado funcionamento do motor, através da regulação do fluxo do mesmo. Apenas é requerida uma película fina de óleo entre os anéis e a superfície de trabalho do cilindro. Uma configuração típica deste anel mostra-se na Figura 1.3.

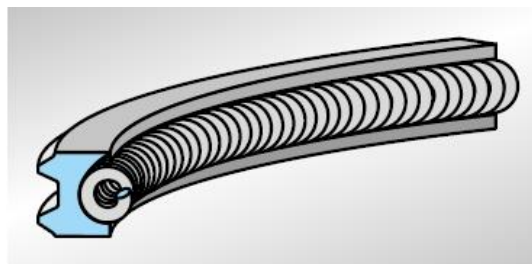


Figura 1.3. Anel de óleo de duas peças (*Double bevelled spiral expander ring*); [MS Motor Service International GmbH].

1.3.2.2. Anel Raspador

Este anel ajuda o anel de óleo na raspagem do óleo em excesso. Além disso, ajuda o anel de primeira canaleta na vedação da câmara de combustão. Assim, pode-se dizer que o segundo anel tem uma ação dupla, no entanto, não tem a função principal em nenhuma das suas tarefas. Uma configuração típica deste anel mostra-se na Figura 1.4.

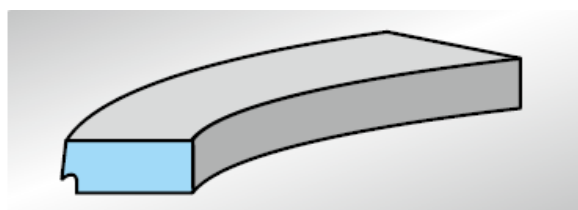


Figura 1.4. Anel raspador (*Taper faced napier ring*); [MS Motor Service International GmbH].

1.3.2.3. Anel de Compressão

Este anel tem como principal tarefa a vedação da câmara de combustão. Este anel é o que está sujeito a condições de trabalho mais exigentes, sendo que é o anel que está sob maior pressão e temperatura.

A pequena parte de óleo que ficar na superfície interna do cilindro acima do segundo anel fica para utilização pelo primeiro anel. Sempre que parte do óleo que lubrifica o anel de primeira canaleta evapora, é queimado na câmara de combustão. Assim sendo, um pequeno consumo de óleo pode ser um indicador de uma boa lubrificação deste anel o que, sendo o mais crítico, é um indicador positivo.

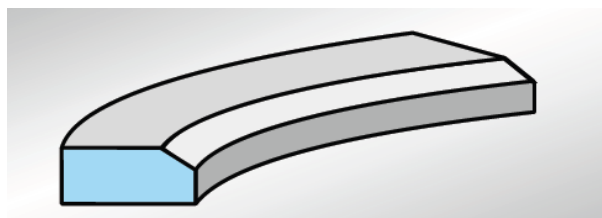


Figura 1.5. Anel de compressão (*Rectangular ring with inside bevel*); [MS Motor Service International GmbH].

1.3.3. Abertura livre

De forma a obter uma vedação eficiente, o anel de pistão deve estar bem ajustado com o cilindro e o topo ou base da canaleta do anel. Para tal, o anel é forçado contra a parede do cilindro sob uma pressão de contacto que depende das dimensões do anel, seu módulo de elasticidade, diâmetro a 90-270° do centro da abertura livre (maior diâmetro no seu estado livre) e também do tamanho da abertura livre.

A abertura livre, ou *gap*, é definida como a distância entre as duas pontas do anel, medida na linha neutra, quando não está em compressão, como representado na Figura 1.6 a). É uma consequência das características do anel; não é um parâmetro que é calculado de forma a obter uma característica. As características que maioritariamente ditam o valor da abertura livre são a força tangencial e a folga. Um aumento da abertura livre resulta num aumento da força tangencial e da folga, sendo controlada através do valor da folga para um determinado diâmetro.

A força tangencial resume-se à força a aplicar de forma a que o anel feche até ao seu diâmetro de trabalho, quando tem uma determinada folga. A folga, representada na Figura 1.6 b), é a medida entre as pontas do anel quando este está montado no motor, sob pressão, compensando a dilatação do anel resultante do trabalho a elevadas temperaturas.

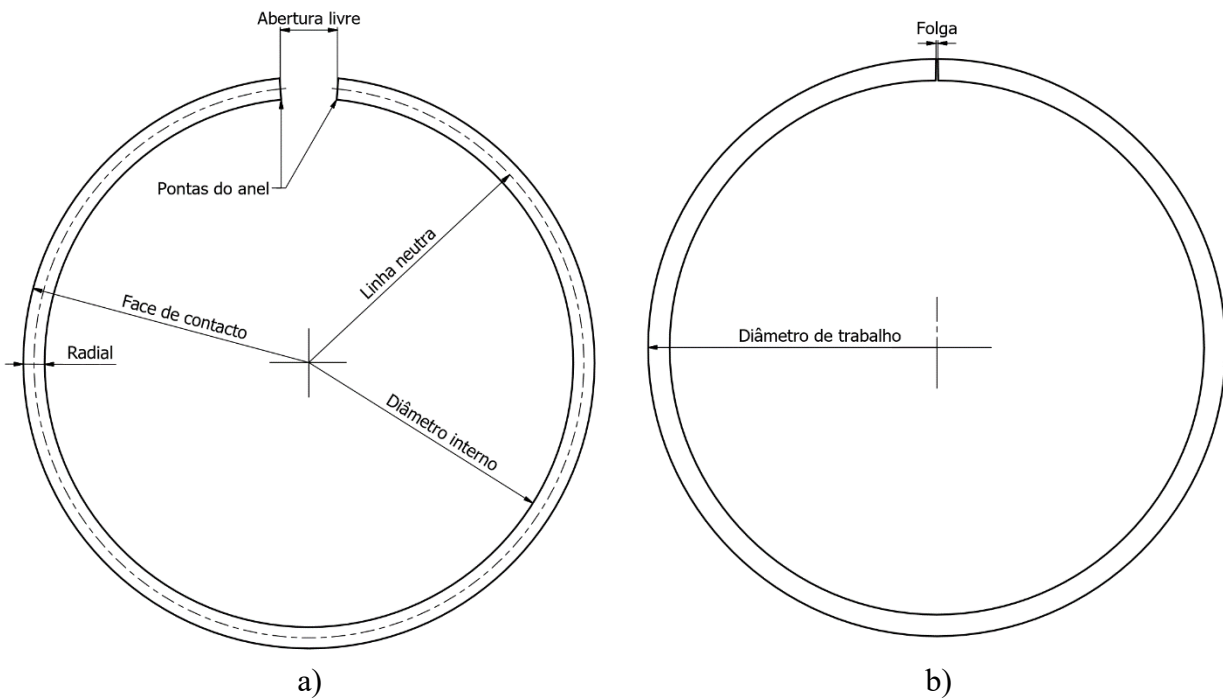


Figura 1.6. a) Abertura livre; b) Abertura com diâmetro de trabalho.

2. ANÁLISE DO PROCESSO

O processo de fresagem da abertura livre, chamado de Torneamento de Forma Vertical, é apenas um dos vários processos a que cada anel está sujeito. Os processos não são necessariamente os mesmos para todos os anéis. Um exemplo de uma linha de processos pode ser o do HV PVD (*High Value Physical Vapor Deposition*) esquematizado na Figura 2.1:

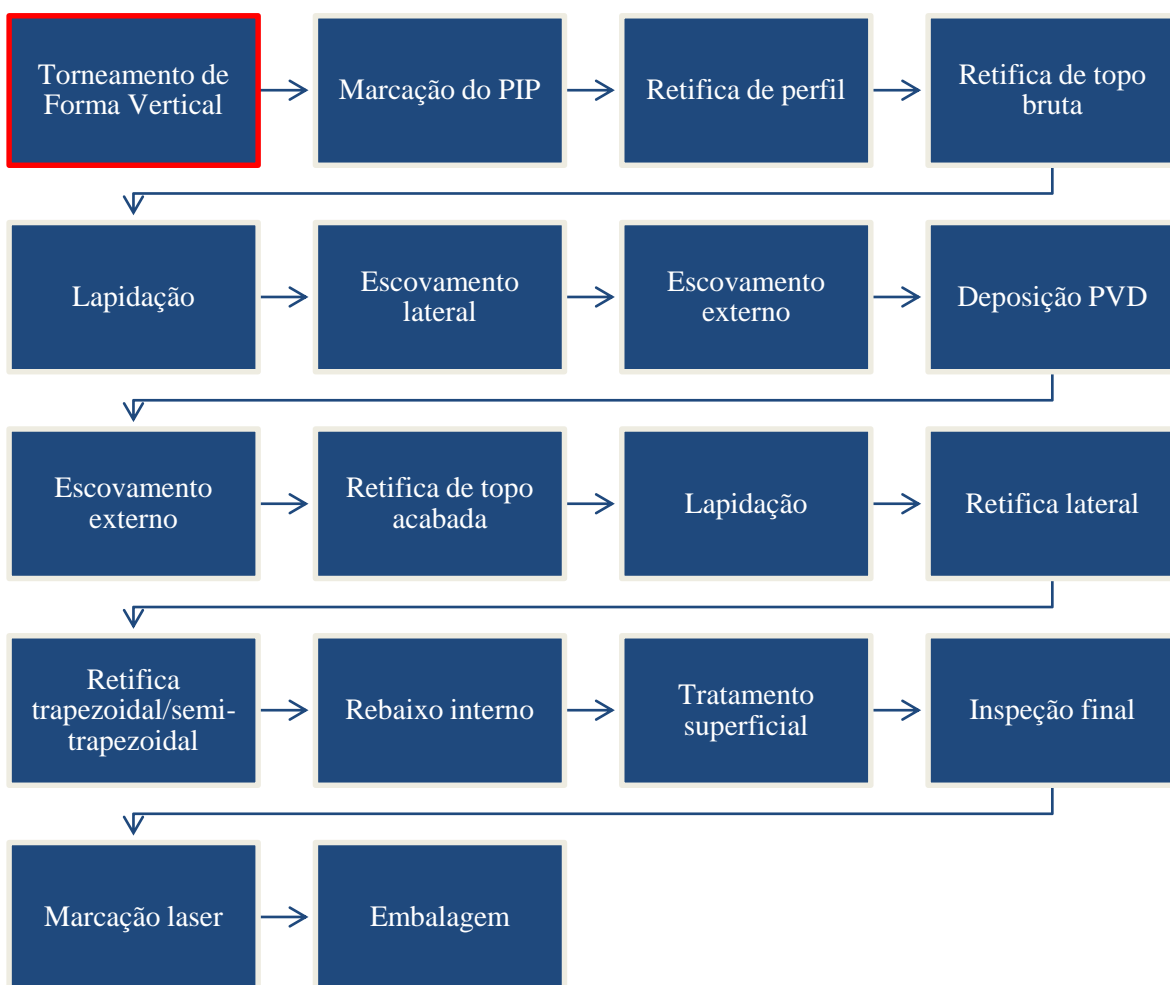


Figura 2.1. Cadeia de processos, anel HV PVD.

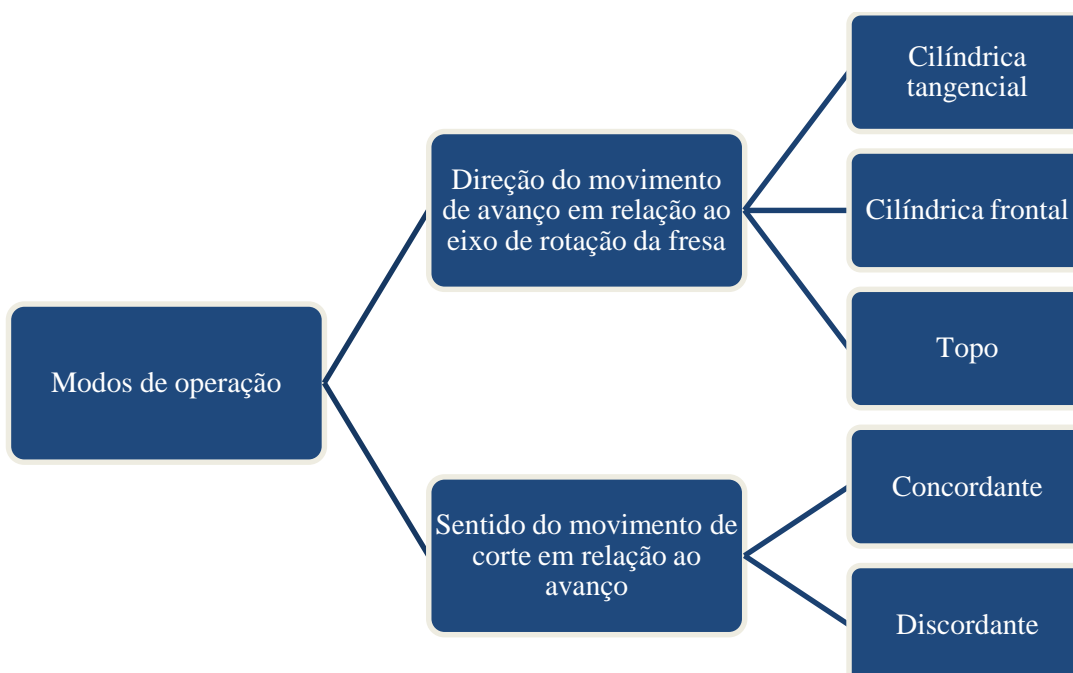
2.1. Processo de fresagem

O processo de fresagem consiste na utilização de ferramentas de corte (multicortantes) em rotação, de forma a remover material de um componente, na direção de avanço da máquina. A remoção de material é feita com recurso a uma ferramenta denominada fresa (Diniz, 2006). É um processo frequentemente usado, sendo que é muito versátil, conseguindo trabalhar diversos tipos de materiais, com distintas características, obtendo produtos com excelente acabamento e dimensionamento finais. A fresa gira contra a superfície de uma peça, sendo que se distinguem dois movimentos:

- Movimento de corte: movimento gerado através da rotação da fresa em torno do seu eixo de rotação.
- Movimento de avanço: movimento da peça fixada na mesa da máquina, passando pela ferramenta de corte em rotação ou movimento da ferramenta de corte em rotação ao longo da peça fixada na mesa da máquina, estando esta última, por sua vez, imóvel.

Este processo caracteriza-se por ser uma operação que impõe à ferramenta de corte, em regra geral, ciclos de forças de impacto e choques térmicos.

Os modos de operação dependem essencialmente da direção do movimento de avanço em relação ao eixo de rotação da fresa e o sentido do movimento de corte em relação ao avanço, como se ilustra na Figura 2.2.



Os modos de operação encontram-se graficamente representados na Figura 2.3 e Figura 2.4.

Figura 2.2. Modos de operação no processo de fresagem.

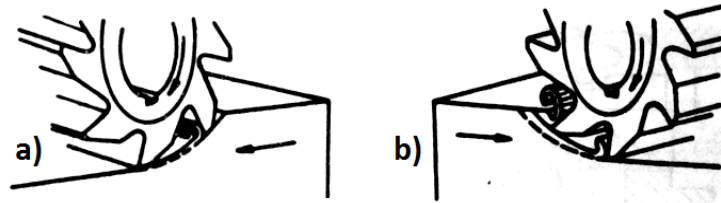


Figura 2.3. a) Fresagem concordante; b) Fresagem discordante; [Dino Ferraresi, 1990].

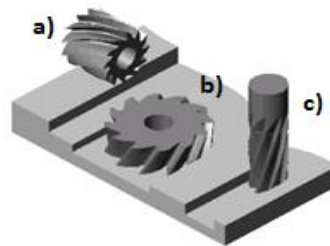


Figura 2.4. Fresagem: a) cilíndrica tangencial; b) cilíndrica frontal; c) topo; [ASM, 1987]

Para efetuar o processo de fresagem há oferta de uma diversidade de máquinas. Na MAHLE Componentes de Motores S.A. usam-se Tornos de Forma Vertical (TFV Dimaco CTB 170, Figura 2.5) para os processos de torneamento e fresagem. Estes TFV têm duas estações, representadas na Figura 2.5 por 1 e 2, responsáveis pelo torneamento e fresagem respetivamente.



Figura 2.5. Torno de Forma Vertical, Dimaco CTB 170.

Em todos os processos de fresagem, o tipo de fresagem é discordante, com sentido do movimento de avanço de cima para baixo, e tangencial. Tendo um sistema de aspiração logo por cima das fresas e um funcionamento de modo discordante com sentido de movimento de avanço de baixo para cima favorece a aspiração de avara e limalhas. Para além disso, o funcionamento em modo concordante, apesar de minimizar o atrito entre a ferramenta e a peça, pode causar vibração no sistema, que resulta numa redução da qualidade da superfície maquinada (Wrublak, Pilatti, & Pedroso, 2008).

2.1.1. Fresagem da abertura livre

O processo de corte da abertura livre apenas é feito apenas em anéis de ferro fundido. Os anéis de aço são feitos a partir de fitas de aço, sendo-lhes dada a forma pretendida enquanto os anéis de ferro fundido são obtidos a partir de placas circulares de ferro fundido, ilustradas na Figura 2.6:



Figura 2.6. Placas circulares de ferro fundido.

Estas placas, por sua vez, são provenientes de tubos/cilindros, obtidos por moldação e centrifugação, representados na Figura 2.7:



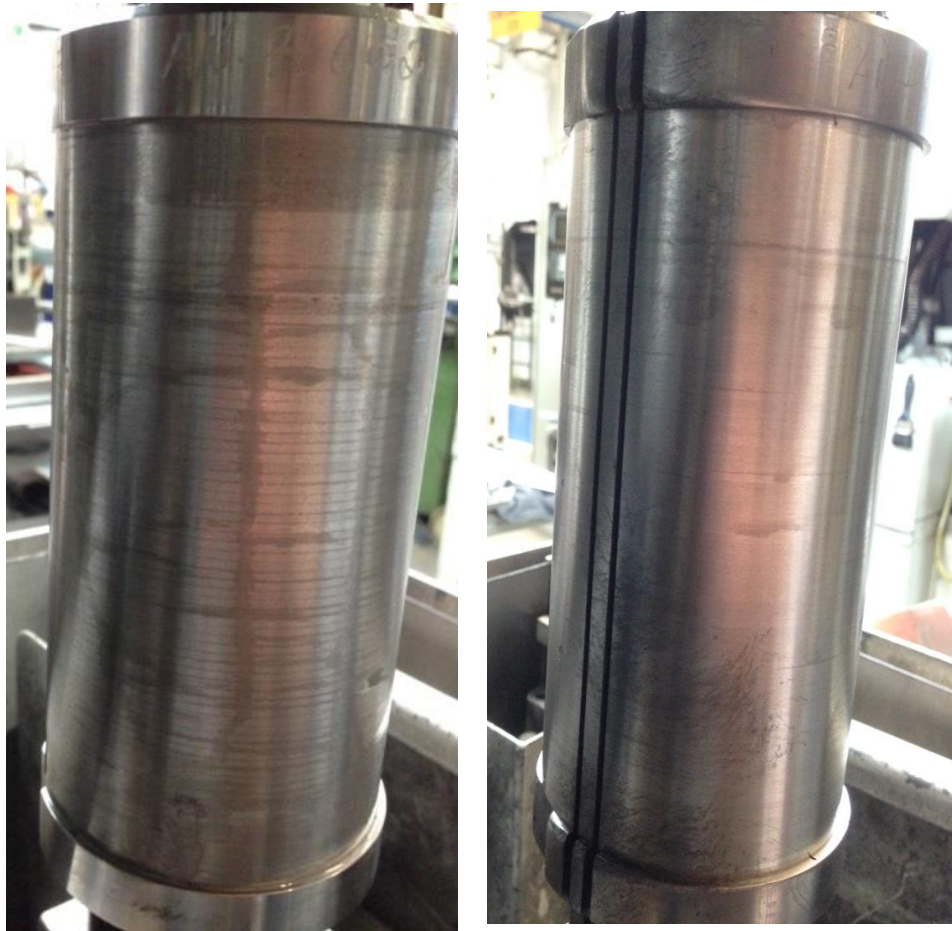
Figura 2.7. Tubos de ferro fundido.

Para anéis de primeira e segunda canaleta o processo de fresagem é feito com recurso a duas fresas, sendo que tanto o seu distanciamento como o ângulo de corte são determinados com base no valor que se pretende para a abertura livre. Já para anéis de terceira canaleta é utilizada apenas uma fresa, com maior espessura que as supra-referidas, que efetua o corte pretendido, já que o valor da abertura livre não tem a importância que tem para os anéis de primeira e segunda canaleta (para estes é uma característica crítica).

Na Figura 2.8 está representada a fresadora, responsável pelo corte de anéis de ferro fundido de compressão neste caso e na Figura 2.9 mostra-se o estado dos anéis antes e depois do corte:



Figura 2.8. Fresadora do TFV Dimaco CTB 170.



a)

b)

Figura 2.9. Operação de fresagem: a) antes do corte; b) depois do corte.

Após o corte, obtém-se a forma inicial do anel e o material removido, como ilustrados na Figura 2.10:

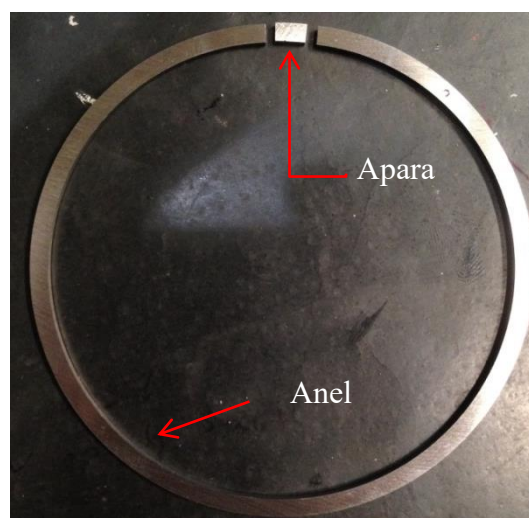


Figura 2.10. Forma inicial de um anel, após a operação no TFV e o material que é removido (apara).

2.2. Ferramentas de corte

Podem ser utilizadas neste processo fresas com geometrias distintas, variando com a aplicação das mesmas e a precisão e acabamento pretendidos. Em norma, as ferramentas de corte, neste processo, avançam num eixo perpendicular ao seu eixo de rotação, mas nem sempre é o caso. A remoção de material consegue-se produzindo no componente a maquinar vários cortes pequenos; para tal, há que trabalhar com ferramentas de fresagem com vários dentes, elevada velocidade de rotação ou utilizar uma velocidade de avanço das fresas em relação ao componente a maquinar baixa, sendo geralmente utilizada alguma combinação dos três tipos de funcionamento mencionados (Ferraresi, 1990). O material das ferramentas varia com a aplicação, material a maquinar, exigências pretendidas e características do processo, sendo os mais utilizados os aços de alta velocidade (*HSS*) ou metais duros (base de carboneto de tungsténio). Este último é mais caro mas tem também uma vida útil maior e pode ser utilizado a velocidades mais elevadas, o que o torna mais barato a longo prazo. Quando as fresas apresentam algum desgaste (queimam as pontas do anel) e falta de qualidade de corte, não apresentando mais que dois dentes consecutivos fraturados, são submetidas a uma afiação com o intuito de torná-las novamente utilizáveis com uma excelente qualidade de corte. As fresas podem ser submetidas a diversas afiações, dependendo, no entanto, do seu ciclo de vida (por sua vez dependente maioritariamente da dureza do material a maquinar).

2.2.1. Fresas utilizadas na MAHLE Componentes de Motores S.A.

Dependendo do produto final que se pretende obter, ainda que os anéis passem por processos semelhantes, as características dos processos diferem. No processo de fresagem em anéis de ferro fundido a diferença que existe entre as ferramentas de corte utilizadas são as suas dimensões, ou seja, as fresas partem do mesmo desenho (Tabela 2.1 e Figura 2.11, sendo a espessura dada pela letra “e”, a altura de um dente pela letra “h” e o raio de curvatura de um dente pela letra “r”). O método de afiação varia com base nas dimensões da fresa, podendo ser normal, ou alternada (visível no Anexo A).

Tabela 2.1. Dimensões das fresas utilizadas na MAHLE Componentes de Motores S.A.; [Desenho TFV-008-07-4, MAHLE Componentes de Motores S.A.].

| ØD [mm] | e [mm] | Nº dentes | h [mm] | r [mm] | Afição |
|---------|--------|-----------|--------|--------|----------|
| 90 | 4 | 32 | 2,5 | 2,4 | Normal |
| | 5 | | | 3,5 | Especial |
| | 6,1 | | | 4,5 | Especial |
| 105 | 1,6 | 42 | 2 | 1,6 | Normal |
| | | 80 | 1,6 | 1,2 | Normal |
| | 2 | 42 | 2 | 1,6 | Normal |
| | | 80 | 1,6 | 1,2 | Normal |

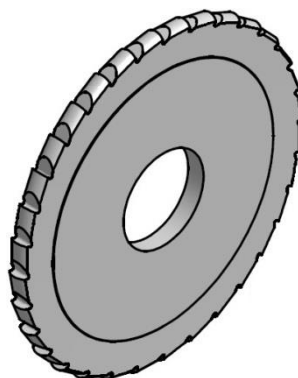


Figura 2.11. Geometria da fresa utilizada no processo de corte do *gap* de anéis de ferro fundido nodular, [Desenho TFV-008-07-4; MAHLE Componentes de Motores S.A.].

O ciclo de vida as fresas depende do seu estado de afiação. Uma fresa nova irá, obviamente, trabalhar mais anéis do que uma fresa afiada. As fresas deverão ser afiadas assim que comecem a queimar as pontas dos anéis, consequência de um fraco poder de corte. O número médio de anéis que são feitos em cada fase de afiação não é sabido, pelo que também será feita tal análise no fim deste estudo.

2.2.2. Material da fresa utilizada na MAHLE Componentes de Motores S.A.

As fresas utilizadas na MAHLE Componentes de Motores S.A. no processo de corte do *gap* de anéis de ferro fundido nodular são de metal duro (carboneto de tungsténio sinterizado), produto da metalurgia do pó. Os seus constituintes são misturados na forma de pós e submetidos a um processamento que compreende essencialmente compressão, sinterização e retificação. Obtém-se de uma mistura de carbonetos ligantes, tal como o

cobalto, níquel ou uma combinação entre eles. O processo de sinterização consiste no aquecimento a uma temperatura suficiente para fundir o metal ligante que preenche o espaço vazio entre os grãos de carbonetos. Resulta assim um produto denso com boa resistência mecânica, dureza e tenacidade, características adequadas para ferramentas de corte. Os carbonetos conferem a dureza à temperatura ambiente e resistência ao desgaste. O elemento aglomerante é o responsável pela tenacidade do material.

Existem inúmeros tipos de carbonetos sinterizados, de modo a atender a diferentes condições de maquinagem, não só no que diz respeito aos parâmetros de corte mas também ao material a maquinar. A vasta aplicação deste material deve-se à possível modificação dos teores de carbonetos presentes (Tabela 2.2) e pela modificação do tamanho de grão (Tabela 2.3).

Tabela 2.2. Efeito da composição química na resistência ao desgaste, dureza a quente e resistência mecânica; [Dino Ferraresi, 1990].

| Composição | | Efeito sobre | | |
|------------|---------------------|-------------------------|-----------------|----------------------|
| Componente | Quantidade relativa | Resistência ao desgaste | Dureza a quente | Resistência mecânica |
| Cobalto | Pequena | Aumenta muito | Aumenta | Diminui muito |
| | Grande | Diminui muito | Diminui | Aumenta muito |
| WC | Pequena | Diminui muito | Diminui | Aumenta muito |
| | Grande | Aumenta muito | Aumenta | Diminui muito |

Tabela 2.3. Efeito do tamanho de grão na resistência ao desgaste, dureza a quente e resistência mecânica; [Dino Ferraresi, 1990].

| Tamanho de grão | Quantidade relativa | Efeito sobre | | |
|-----------------|---------------------|-------------------------|-----------------|----------------------|
| | | Resistência ao desgaste | Dureza a quente | Resistência mecânica |
| Fino | Pequena | Aumenta ligeiramente | Pequeno efeito | Diminui grandemente |
| | Grande | Aumenta grandemente | Pequeno efeito | Diminui grandemente |
| Grossoiro | Pequena | Diminui ligeiramente | Pequeno efeito | Aumenta ligeiramente |
| | Grande | Diminui grandemente | Pequeno efeito | Aumenta grandemente |

Sendo que as ferramentas de corte trabalham em condições críticas, a sua concepção deve ser rigorosamente controlada. Na MAHLE Componentes de Motores S.A.

é utilizado o modelo CTS20 da marca *Ceratizit* e as suas características são dadas na Tabela 2.4:

Tabela 2.4. Dados e características da fresa CTS20 da Ceratizit.

| Modelo | | CTS20 |
|-----------------------------------|--------|-----------|
| Co % | | 10 |
| Dureza | [HV10] | 1650 |
| | [HV30] | 1630 |
| | [HRA] | 92,1 |
| TRS. | [MPa] | 3700 |
| | [PSI] | 537.000 |
| E [GPa] | | 574 |
| Tamanho de grão [μm] | | 0,5 – 0,8 |
| Revestimento | | - |

2.3. Ferramental

Para adaptar as máquinas fresadoras ao processo pretendido é imperativo a criação de ferramental. O ferramental é material fabricado pela MAHLE Componentes de Motores S.A. (por vezes comprado a outra empresa). Nos TFV o ferramental utilizado encontra-se esquematizado na Figura 2.12:

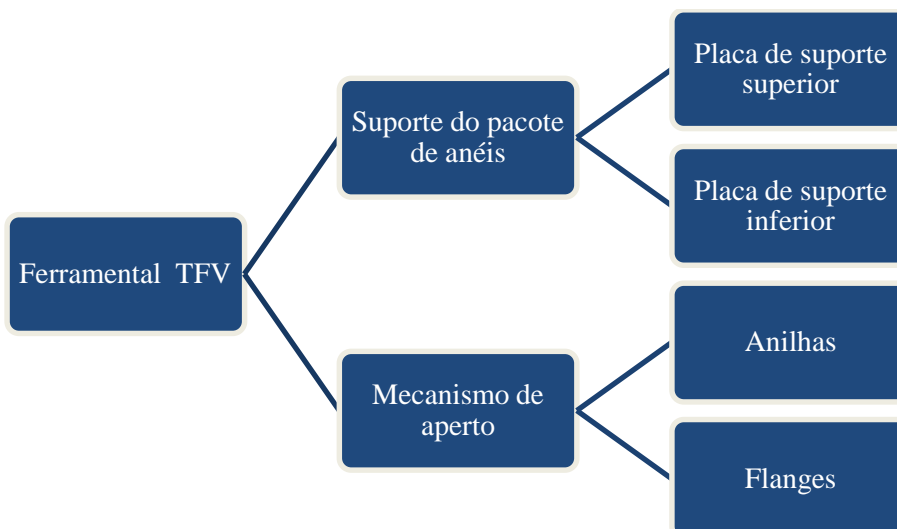


Figura 2.12. Ferramental utilizado nos TFV.

2.3.1. Suporte do pacote de anéis

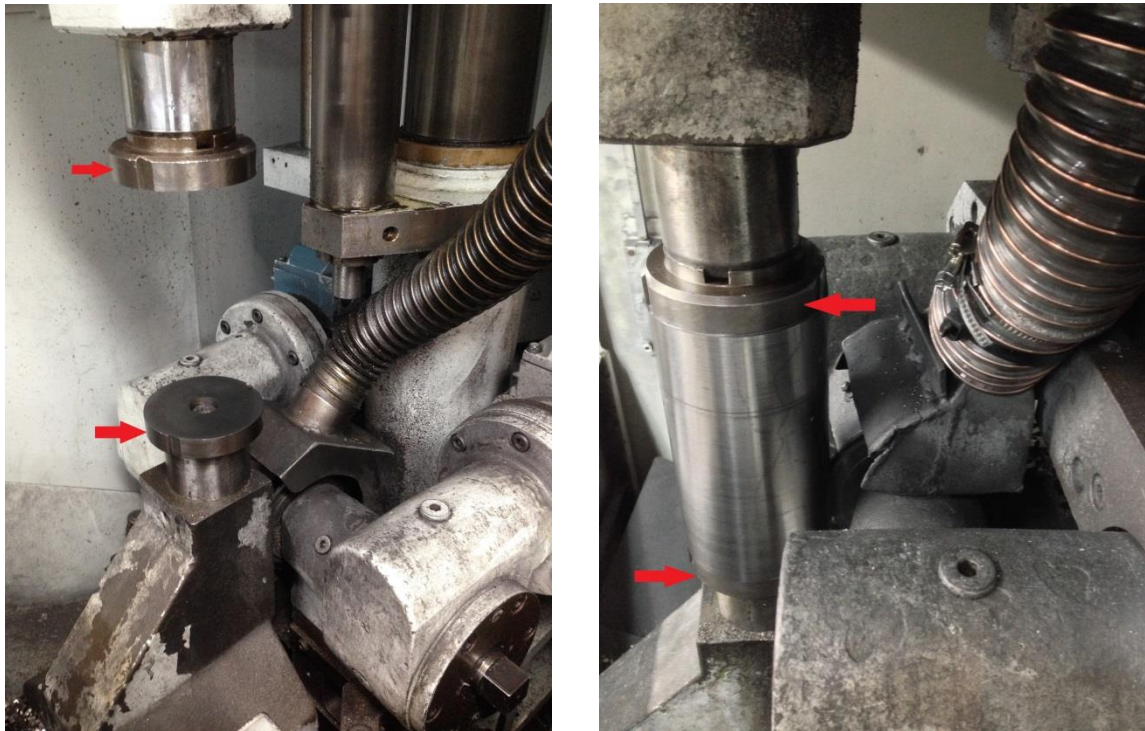


Figura 2.13. Mecanismo de suporte do pacote de anéis.

O mecanismo de suporte do pacote de anéis, indicado com setas vermelhas na Figura 2.13, é constituído por duas placas, superior e inferior. Cada placa tem a geometria indicada na Figura 2.14 (desenho completo no Anexo B):

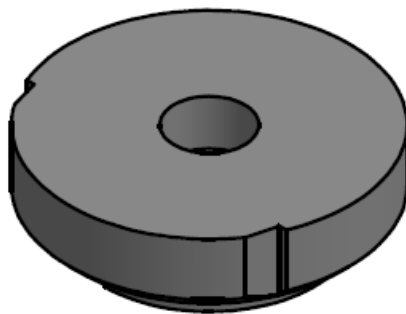


Figura 2.14. Geometria das placas de suporte.

A dimensão das placas varia de acordo com o anel que tem de suportar. Aplicam pressão nos anéis, impossibilitando qualquer movimento, ficando com rasgos devido à passagem das fresas após a primeira utilização, visível na Figura 2.9 b).

O ferramental é fabricado a partir de um aço de construção ligado, o 34CrNiMo6 temperado e revenido, sendo a sua composição química dada pela Tabela 2.5 e características mecânicas (segundo DIN 17200) dadas pela Tabela 2.6:

Tabela 2.5. Composição química do aço 34CrNiMo6.

| 34CrNiMo6 | Composição Química [%] | | | | | |
|-----------|------------------------|-----|------|-----|------|-----|
| | C | Si | Mn | Cr | Mo | Ni |
| | 0,34 | 0,4 | 0,65 | 1,5 | 0,22 | 1,5 |

Tabela 2.6. Características mecânicas do aço 34CrNiMo6.

| | |
|-------------------------------|------------|
| Dureza [HB] | 240 – 405 |
| R_m [MPa] | 700 – 1400 |
| R_{p0,2} [MPa] | 490 |

2.3.2. Mecanismo de aperto

O ferramental que faz parte do mecanismo de aperto é constituído por duas flanges e duas anilhas (por máquina, metade por fresa). As flanges têm a função de impossibilitar qualquer movimento axial ou angular das fresas (único grau de liberdade sendo a rotação das mesmas), fixando-as na sua posição de trabalho.

Dado que as fresas são de material extremamente duro, com o intuito de evitar qualquer tensão de torção nas fresas, as flanges foram adaptadas e foram adicionadas anilhas interiores às fresas (Figura 2.15 a) e b) respetivamente).

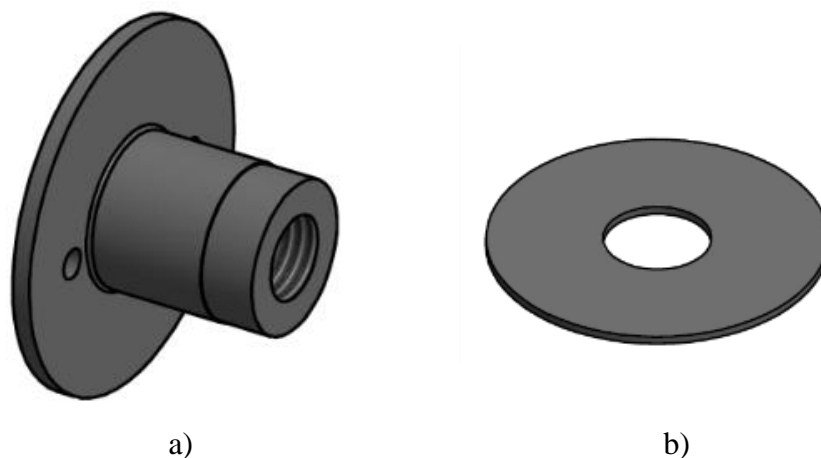


Figura 2.15. Mecanismo de aperto do TFV: a) Flange; b) Anilha.

As flanges têm o mesmo diâmetro das anilhas, no entanto com uma redução de espessura ao longo do raio, dado que, sendo que as fresas trabalham com distanciamentos de cerca de 8 milímetros e ângulos de cerca de 4° em alguns casos, o espaço entre fresas é extremamente limitado. O diâmetro pode ser de 60 ou 80 milímetros, usando-se o maior sempre que possível.

2.4. Esforços impostos

2.4.1. Na fresa

Durante o processo de fresagem, a fresa é sujeita a uma força de maquinagem, P_U . Esta força é a resultante que atua numa cunha cortante ao longo do processo. Pode ser decomposta numa série de forças, representadas na Figura 2.16. Estas componentes são afetadas pelo material da peça, ferramenta, geometria, profundidade de corte, velocidade de avanço e velocidade de corte (Ferraresi, 1990).

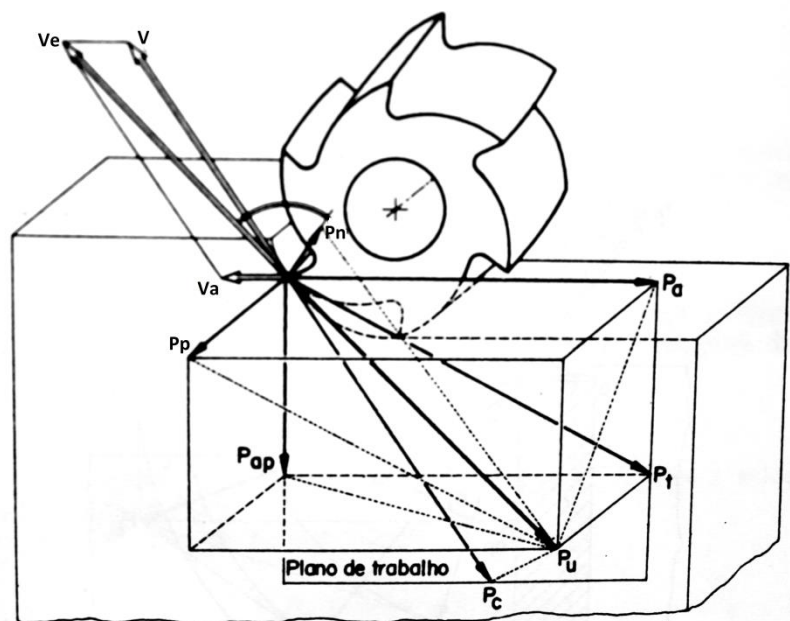


Figura 2.16. Componentes da força de maquinagem no processo de fresagem (DIN 6584); [Dino Ferraresi, 1970]

Em que:

- P_t → Força ativa. Obtida através da projeção da força P_u no plano de trabalho;

- P_c → Força de corte. Obtida através da projeção da força P_u sobre a direção de corte;
- P_a → Força de avanço. Obtida através da projeção da força P_u segundo a direção de avanço
- P_{ap} → Força de apoio. Obtida através da projeção da força P_u segundo a direção perpendicular à direção de avanço, situada no plano de trabalho;
- P_e → Força efetiva de corte. Obtida através da projeção da força P_u segundo a direção efetiva de corte;
- P_p → Força passiva. Obtida através da projeção da força P_u segundo uma perpendicular ao plano de trabalho;
- P_n → Força de compressão. Obtida através da projeção de P_u segundo uma direção perpendicular à superfície principal de corte.

Nenhuma das componentes da força de maquinagem situadas no plano efetivo de referência contribui para a potência de maquinagem (Ferraresi, 1990).

2.4.2. Nas placas de suporte

As placas de suporte, de modo a impossibilitar o movimento dos anéis, têm de ser capazes de contrariar a força que se faz sentir nos anéis. A força exigida aos anéis pelas fresas, F , reação a P_c , está representada na Figura 2.17:

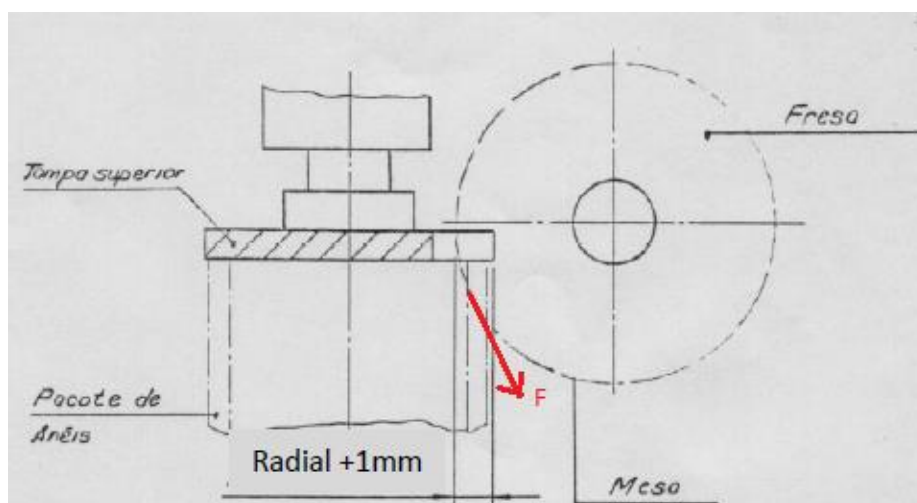


Figura 2.17. Solicitação nos anéis; [Adaptado, Norma PU-TFV-021, MAHLE Componentes de Motores S.A.]

Esta força pode ser calculada pela equação (2.1):

$$P_c = k_s \cdot s \quad (2.1)$$

Em que:

- k_s → Pressão específica de corte. Varia com o material da peça, material e geometria da ferramenta, secção de corte, velocidade de corte, condições de lubrificação e estado de afiação da ferramenta;
- s → Área da secção de corte, calculada pela equação (2.2):

$$s = p \cdot a_c \quad (2.2)$$

Em que:

- p → Profundidade de corte;
- a_c → Avanço.

O cálculo de k_s é de grande dificuldade, sendo que alguns autores apresentam modelos analíticos para a sua resolução. Destes destacam-se Taylor, Schlesinger, Vieregge, Friedrich, Hippler, AWF, Kronenberg, Boston & Kraus, Schallbroch, Okoshi & Okochi, Hucks, Opitz & Victor, Kienzle e ASME (Ferraresi, 1990). Em suma, os fatores que mais influenciam este parâmetro são:

- Material da peça: A composição química do material tem um papel notável no valor de k_s sendo que o aumento de carbono resulta num aumento, já o aumento de fósforo resulta numa redução; O valor de k_s aumenta com o aumento da tensão de corte na rutura do material (não sendo diretamente proporcional) (Ferraresi, 1990);
- Secção de corte: O aumento da área da secção de corte resulta numa redução do valor de k_s , estudado experimentalmente por Hippler (Ferraresi, 1990). Um maior avanço resulta também numa redução de k_s ;
- Geometria da ferramenta: Quanto maior for o valor do ângulo de saída, menor será o valor de k_s (Vieregge, 1959). Deve-se notar que, no entanto, o aumento deste ângulo diminui a resistência da ferramenta e aumenta a sua sensibilidade ao choque (Ferraresi, 1990);

- Ângulo de posição: Tema estudado por Vieregge (1959) e Richter (1964), mostra que a força de corte diminui com o aumento do ângulo de posição sempre que não houver interferência da aresta lateral de corte com a superfície trabalhada da peça (Ferraresi, 1990);
- Afição da ferramenta: Estudos feitos por Meyer (1964) mostram que o estado de afiação afeta também o valor de k_s , aumentando com um maior desgaste (Ferraresi, 1990);;
- Velocidade de corte: Gappish (1965) verificou que em grande parte dos casos de trabalho de metais com ferramentas de metal duro, o valor de k_s diminui com o aumento da velocidade de corte (Ferraresi, 1990);;
- Fluido de corte: Com recurso a fluidos de corte é possível uma redução da pressão específica de corte, no entanto, tal só se verifica para velocidades de corte baixas. A diminuição de k_s é tanto maior quanto mais eficiente for a penetração do fluido na zona de contacto aparaferramenta. Para velocidades de corte elevadas torna-se difícil a penetração do fluido na zona de contacto (Ferraresi, 1990);
- Rigidez da ferramenta: A rigidez da ferramenta, se pequena, resulta numa força de maquinagem maior (Berthold, 1957).

Na MAHLE Componentes de Motores S.A., a situação real corresponde ao movimento inverso ao demonstrado na Figura 2.17, ou seja, o movimento de avanço dá-se de baixo para cima e a força F toma este mesmo sentido. Importante salientar que há uma sollicitação com componentes horizontal e vertical nos anéis. Tendo as placas de suporte a superfície de contacto com os anéis perfeitamente plana, esta tem como função:

- Impossibilitar o movimento vertical por obstrução do movimento, contrariando a componente vertical da força a que os anéis estão sujeitos;
- Exercer pressão suficiente nos anéis de forma a que esteja presente uma força de atrito suficientemente elevada para contrariar a componente horizontal da força a que os anéis estão sujeitos.

A placa de suporte inferior está apenas sujeita ao peso dos anéis e à pressão efetiva para impossibilitar o movimento horizontal dos anéis. Na placa de suporte superior, além de estar sujeita à reação da placa inferior (força normal à força exercida ao aplicar pressão), é imposta uma força, F_y , componente vertical da força imposta pela fresa e que os anéis estão sujeitos, F , dada pela Figura 2.18:

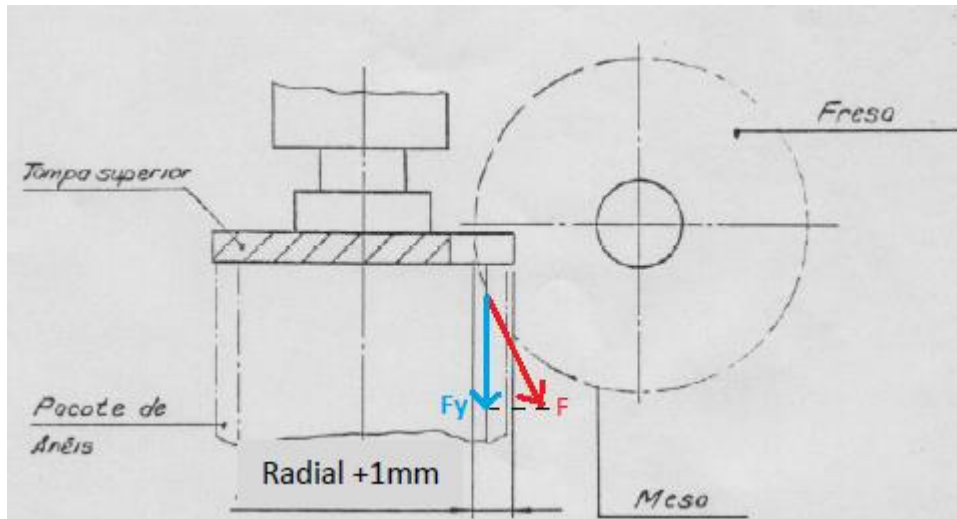


Figura 2.18. Solicitação nos anéis (F) e na placa superior (F_y) [Adaptado, Norma PU-TFV-021, MAHLE Componentes de Motores S.A.].

3. AVALIAÇÃO DA SITUAÇÃO

O problema existente na MAHLE Componentes de Motores S.A. é o consumo muito elevado de fresas. Este consumo deve-se no entanto à fratura das fresas, que ocorre muito frequentemente. Este problema resulta num maior custo por aquisição de fresas e uma menor produtividade devido ao elevado número de trocas de ferramentas.

Das fresas fraturadas distinguem-se dois tipos de fraturas, sendo estas a fratura por esforços normais à fresa e a fratura por esforços transversais à fresa. A fratura por esforços normais, representada na Figura 3.1 a), resulta na fratura de um ou vários dentes devido a um excesso de força na superfície de corte. A fratura por esforços transversais, correspondente a cerca de 70% da totalidade de fresas fraturadas, representada na Figura 3.1 b), resulta numa fratura parcial ou total da fresa, lascando sempre na zona em que a fratura se inicia.

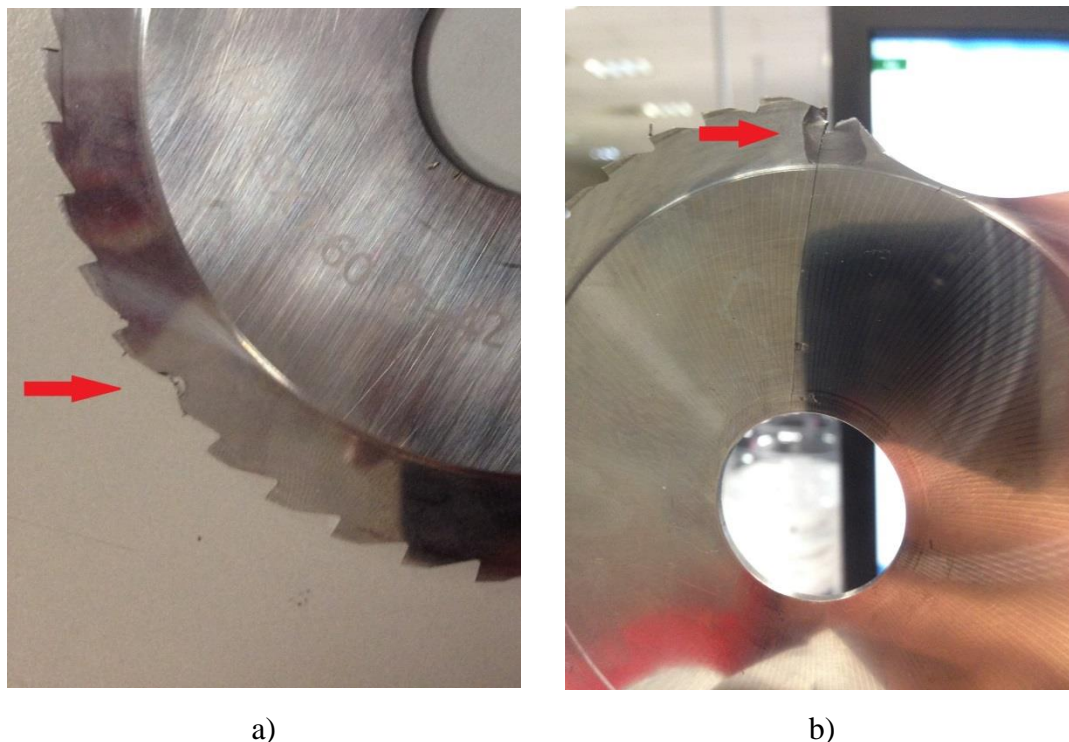


Figura 3.1. a) Fratura por esforços normais; b) Fratura por esforços transversais.

Tal como os nomes indicam, a fratura por esforços normais chama-se assim pois a fratura resulta de um excesso de esforços normais na superfície de corte da fresa. A

fratura por esforços transversais designa-se assim devido a ser proveniente de um excesso de esforços transversais no plano de rotação da fresa.

3.1. Especificação do problema

Na MAHLE Componentes de Motores S.A., como referido na secção 2.2.1, são utilizadas algumas fresas diferentes. Ainda assim, as únicas fresas que fraturam são as fresas de 1,6 mm. Também analisando os dados referentes ao consumo de materiais da empresa nos últimos três anos chega-se à conclusão que o problema está nas fresas de 1,6 mm (Tabela 3.1), dado que a diferença de consumos não é proporcional, de todo, às produções de cada tipo de anel.

Tabela 3.1. Consumo de fresas em 2012, 2013 e 2014 na MAHLE Componentes de Motores S.A.

| | Consumos 2012 | Consumos 2013 | Consumos 2014 |
|------------------|---------------|---------------|---------------|
| FRESA 1,6 | 88 | 131 | 321 |
| FRESA 5,0 | 19 | 6 | 16 |
| FRESA 6,1 | 1 | 0 | 18 |

O consumo mensal destas fresas em 2014 é dado pela Figura 3.2:

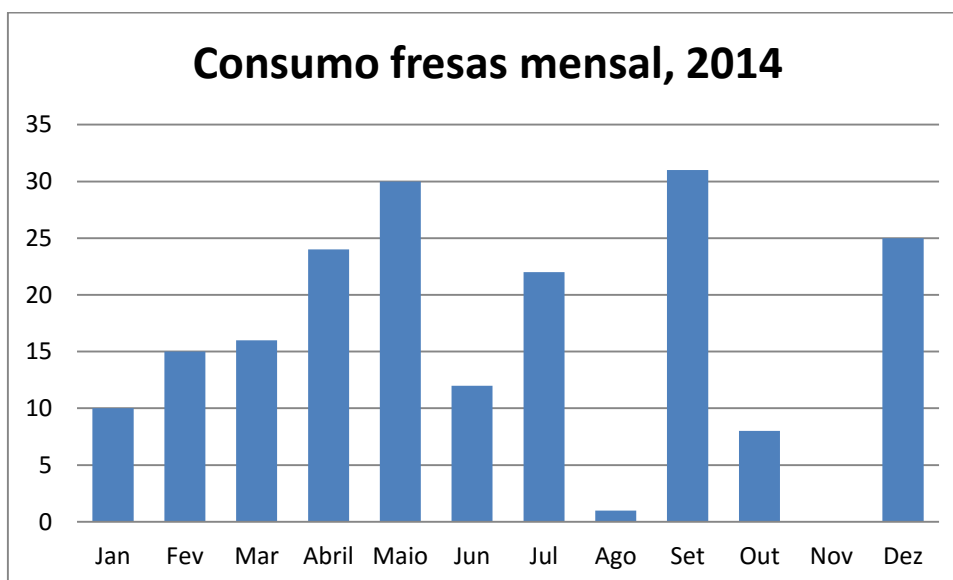


Figura 3.2. Consumo de fresas por mês em 2014.

As fresas de 1,6 mm são utilizadas no corte da abertura livre dos anéis de primeira e segunda canaleta, enquanto as de 5 mm e 6,1 mm são utilizadas em anéis de

óleo. Com isto em mente, as fresas envolvidas no corte da abertura livre de anéis de primeira e segunda canaleta estão sujeitas a um processo mais complexo.

3.2. Localização do problema

A fábrica está dividida por células de trabalho, em que cada uma trabalha com um tipo de produto (por vezes grupos de células trabalham um tipo de produto). Assim sendo, as fresas de 1,6 milímetros são utilizadas em diversas células. De forma a perceber onde ocorre o problema, foi efetuada uma análise ao consumo de fresas de 1,6 mm por cada célula em 2014, que segue na Figura 3.3 e o seu custo na Tabela 3.2 (nota: a célula 3 e a célula 13 têm o mesmo centro de custo, ou seja, não se distingue o consumo de cada uma, tendo-se sim o consumo total das duas agrupadas):

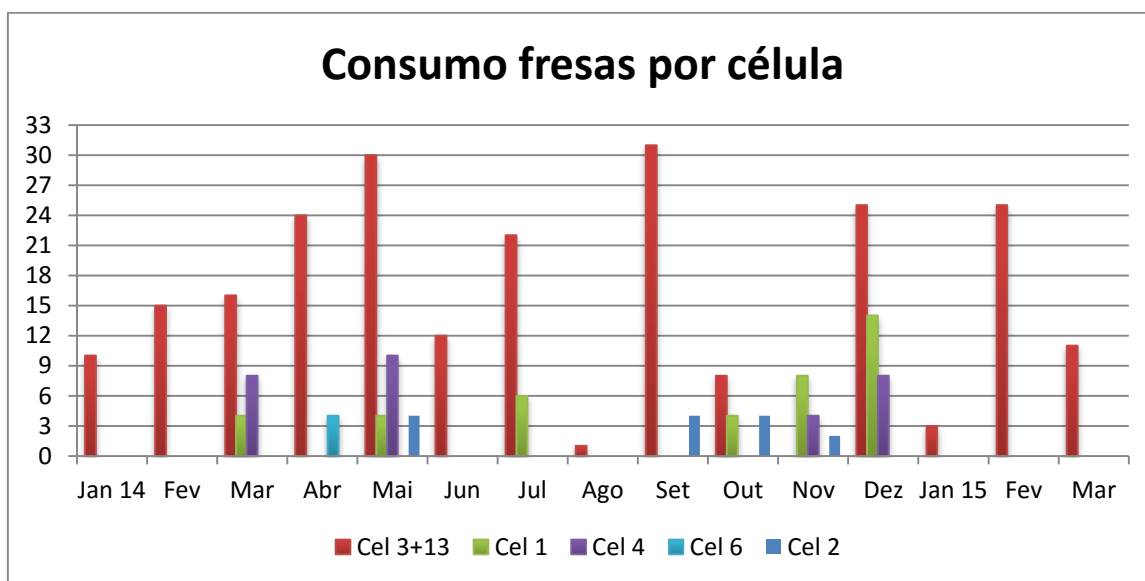


Figura 3.3. Consumo de fresas por célula em 2014 e início de 2015.

Tabela 3.2. Custo de fresas mensal por célula em 2014.

| | Célula 3+13 | Célula 1 | Célula 4 | Célula 6 | Célula 2 | Outros | Total |
|-----------------------|-------------|----------|----------|----------|----------|--------|-------|
| Fresas/mês | 16,17 | 3,3 | 2,5 | 0,33 | 1,17 | 3,25 | 26,75 |
| Custo relativo | 61% | 12% | 9% | 2% | 4% | 12% | |

Na Tabela 3.2, por “Outros” entenda-se fresas para teste, requisitadas por diversos departamentos.

É nítido que o consumo é bastante mais elevado nas células 3 e 13 do que nas restantes. Assim sendo, o seguimento do estudo dar-se-à com ênfase nestas células.

3.2.1. Célula 3 e célula 13

A célula 3 trabalha com anéis da tecnologia MCR236 e a célula 13 com anéis da tecnologia HV PVD. Tanto a célula 3 como a célula 13 contam com dois tornos de forma vertical, conforme mostra a Figura 3.4:

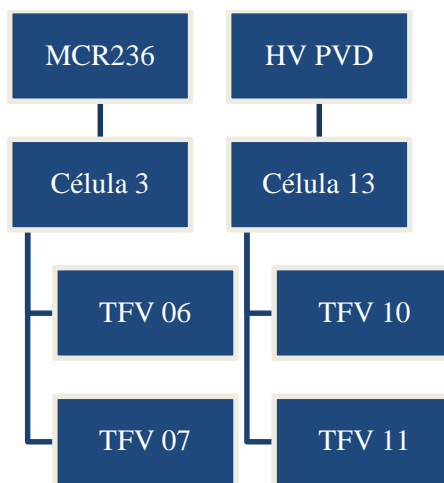


Figura 3.4. Tornos de forma vertical disponíveis nas células 3 e 13.

De forma a compreender se a fratura de fresas é mais frequente na célula 3 ou na célula 13 foi analisada a produção de anéis entre 18 de Fevereiro e 18 de Março, obtendo-se os valores do número de fresas fraturadas neste período, apresentados na Tabela 3.3:

Tabela 3.3. Número de fresas fraturadas entre 18 de Fevereiro e 18 de Março nas células 3 e 13.

| | Célula 13 | | Célula 3 | | Total |
|-------------|-----------|--------|----------|--------|-------|
| | TFV 11 | TFV 10 | TFV 07 | TFV 06 | |
| 18 – 28 Fev | 2 | 13 | 0 | 0 | 15 |
| 1 – 18 Mar | 4 | 3 | 0 | 0 | 7 |

Analisando a Tabela 3.3 percebe-se que o problema existe na célula 13 e não na célula 3, seguindo-se o estudo com foco nos processos da célula 13.

3.2.1.1. Material do anel

São diversos os materiais utilizados na MAHLE Componentes de Motores S.A. Distinguem-se principalmente por serem ferro fundido ou aço. Dentro dos ferros fundidos ainda há a possibilidade de serem nodulares ou cinzentos.

Os anéis trabalhados nesta célula são do tipo nodular e o material base pode ser, dado pelo código, o MF056-L ou o MF053-L.

3.2.1.1.1. MF056-L

Conhecido internamente também como material J, tem as suas propriedades dadas pela Tabela 3.4:

Tabela 3.4. Características do MF056-L; [Norma S-R-MS-0041, MAHLE Componentes de Motores S.A.].

| Descrição do Material | Martensítico |
|------------------------|--------------|
| Dureza [HV] | 345 – 445 |
| Tensão de flexão [MPa] | 1300 |
| Módulo de Young [GPa] | 145 – 193 |

3.2.1.1.2. MF053-L

Conhecido internamente como material C, tem as propriedades dadas pela Tabela 3.5:

Tabela 3.5. Características do MF053-L; [Norma S-R-MS-0041-en, MAHLE Componentes de Motores S.A.].

| Descrição do Material | Martensítico |
|------------------------|--------------|
| Dureza [HV] | 286 – 412 |
| Tensão de flexão [MPa] | 1300 |
| Módulo de Young [GPa] | 145 – 193 |

3.3. Recolha de dados sobre o problema

De forma a prosseguir o estudo foi feita uma análise extensiva ao processo de fresagem da célula 13 ao longo de 30 dias com fim a obter mais informação sobre o problema. Observou-se a fratura de fresas sendo que foram determinadas duas condições de trabalho que provocam tal fenómeno:

1. Quando há libertação e projeção de apara para as fresas na maquinagem de alguns anéis, como mostra a Figura 3.5 b), há probabilidade de fratura da fresa por esforços transversais. Não resulta sempre em fratura, mas quando resulta durante o movimento ascendente é por este motivo. Na verdade, o que se pretende é que toda a apara fique apoiada, sem cair, como mostra a Figura 3.5 a);



a)

b)

Figura 3.5. a) Posição devida da apara; b) Projeção de apara.

2. Após ocorrência da condição (a), por vezes uma apara fica presa nos rasgos da placa de suporte inferior. Nestas condições, sendo que no movimento descendente as fresas não têm qualquer movimento que não o deslocamento vertical, ao tentar passar pelos rasgos da placa inferior,

encontrando lá a apara, a fresa torce e fratura por esforços transversais também.

O modo de quebra por esforços normais é raro e deve-se a um sobrecarregamento numa fresa por falta de poder de corte da outra. Isto verifica-se quando as fresas têm tempos de vida demasiado distintos, em que uma devia ser afiada mas continua a trabalhar sem o devido poder de corte, ou quando uma fratura e o operador não dá conta, resultando em esforços desiguais nas fresas. Este tipo de fratura também também pode ser dado por falta de alinhamento das fresas (Lexington Cutter Inc., 2015).

Após isto, verificou-se a frequência com que ocorrem as condições supra-referidas. A condição 2 acontece muito raramente. A condição 1 acontece constantemente na maquinagem de alguns anéis. Em termos de fratura de fresas, a condição 1 é responsável por 70% das fraturas e a condição 2 por 30%. Assim sendo, evitar a condição 1 é mais urgente que a condição 2, até porque desta forma evita-se que a condição 2 ocorra também. Generalizando, os anéis em que há projeção de apara são os que levam à produção de apara de dimensões pequenas. De facto, o processo de fresagem da célula 13 é o que trabalha com os anéis que têm diâmetros e aberturas livres menores, o que se deve ao facto dos anéis, por ser de baixo atrito, terem uma força tangencial pequena.

4. ANÁLISE DO PROBLEMA

Conhecendo agora o problema, é possível realizar uma deteção analítica de falhas de forma a encontrar a causa raiz do problema. Existem múltiplas técnicas para tal. Neste estudo aplicou-se uma deteção analítica de falhas segundo Kepner-Tregoe (*DAF - Detección Análítica de Fallas*, Kepner-Tregoe, 1998). Kepner-Tregoe é uma empresa multinacional com sede em New Jersey, E.U.A., que oferece serviços de consultoria e treinamento. Estes serviços são prestados com recurso a *workshops* disponíveis para empresas e/ou profissionais interessados em adquirir habilidades de negócios estratégicas. Nos últimos 40 anos, mais de 20 milhões de pessoas foram treinadas segundo este método e é um método utilizado em empresas tais como a Sony, NASA, IBM, entre muitas outras (Richetti & Tregoe, 2001). Este método fornece uma estrutura lógica para controlo estatístico de processos, de manufatura *Lean*, *Six Sigma*, TPM – *Total Productive Maintenance*, equipas de trabalho autogeridas, entre outros. A deteção analítica de falhas tem foco principal em encontrar a causa raiz e tomar ações corretivas. Desta forma evitam-se conclusões precipitadas e medidas corretivas com fundamento meramente instintivo.

Encontrar a causa raiz inclui priorizar os problemas, descrevendo-os em detalhe, identificar e testar as possíveis causas raízes. Os participantes dos *workshops* aprendem a diferenciar entre os tipos de problemas e fazer perguntas de sondagem para reunir informações pertinentes. Aprendem também a testar e confirmar a verdadeira causa antes de efectuar correções.

A toma de ações corretivas tem foco na seleção de uma correção e, de seguida, pensar mais além de forma a evitar problemas futuros. Os participantes dos *workshops* aprendem a pensar sobre os objetivos pretendidos e como encontrar alternativas inteligentes, equilibrando os riscos antes de resolver um problema. Parte da deteção analítica de falhas é também examinar outras áreas que podem ser afetadas da mesma forma e planear a implementação de ações.

Para a aplicação deste método utilizou-se o material de apoio fornecido pela Kepner-Tregoe numas das consultorias feitas na MAHLE Componentes de Motores S.A.

4.1. Diferenças e Modificações

Vai ser tratado como problema a projeção de apara. Ao evitar isto, problema mais urgente, resolvem-se os outros problemas também, dado que:

- Para a apara ficar presa nos rasgos e a fresas partirem no seu movimento descendente é necessário que a apara tenha movimento livre;
- Para uma fresa trabalhar normalmente e não fraturar por esforços normais basta um operador prestar a devida atenção à qualidade de corte das serras; com baixo poder de corte queimam as pontas do anel.

O primeiro passo nesta etapa é especificar as diferenças e modificações históricas daquilo que é e não é problema, de forma a perceber as fronteiras do problema. Para tal, criou-se a Tabela 4.1, que segue o modelo da Kepner-Tregoe.

Tabela 4.1. Análise de Problemas (distinções e modificações).

| | É | NÃO É | Distinções | Modificações |
|--------|------------------------------------------|----------------------------------------|-------------------------------|--------------------------------------|
| QUE | Fresas com $e = 1,6$ mm | Fresas com $e \neq 1,6$ mm | Espessura | - |
| | | | Local de trabalho | - |
| | Fratura | Desgaste por fadiga | Esforço que impõe fim de vida | - |
| ONDE | Célula 13 | Células 1, 2, 3, 4 ou 6 | Anel maquinado; ferramental | Placas de suporte do pacote de anéis |
| QUANDO | Problema existente há anos | Recente | - | - |
| QUANTO | Média de 2014 são cerca de 16 fresas/mês | - | - | - |
| | $D = 105$ mm, $e = 1,6$ mm | $D \neq 105$, $e \neq 1,6$ mm | Dimensões da fresa | - |
| | Aumenta com o aumento da produção | Independente do nº de anéis produzidas | Nº de peças | Maior produção em 2014 |

Em que:

- A coluna “É” representa aquilo que é o problema;
- A coluna “NÃO É” representa aquilo que não é o problema;
- A coluna “Distinções” representa em que é que o “É” difere do “NÃO É”;

- A coluna “Modificações” representa de que maneira o “É” foi modificado no passado.

4.2. Possíveis causas do problema

O passo seguinte passa por estabelecer as possíveis causas raízes da ocorrência do problema fazendo referência àquilo que essa causa não explica e em que condições particulares explica o problema. Para isso criou-se a Tabela 4.2, que segue o modelo da Kepner-Tregoe:

Tabela 4.2. Análise de Problemas (possíveis causas).

| | É | NAO É | Possíveis Causas | Não Explica | Explica somente se |
|--------|------------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|
| QUE | Fresas com e = 1,6 mm | Fresas com e ≠ 1,6 mm | Material da fresa inadequado | Problema apenas com alguns anéis | - |
| | | | Espessura insuficiente | Problema apenas na célula 13 | - |
| | Fratura | Desgaste por fadiga | - | - | - |
| ONDE | Célula 13 | Células 1, 2, 3, 4 ou 6 | Tipo do anel | - | Existir limitação com dimensões de alguns anéis |
| | | | Processo de corte | Problema apenas na célula 13 | Existir limitação com o processo de um anel Existir limitação com dimensões de alguns anéis |
| | | | Problema nos TFV da célula 13 | - | Falha da manutenção |
| | | | Ferramental inadequado | Problema apenas na célula 13 | Existir limitação com dimensões de alguns anéis |
| QUANDO | Problema existente há anos | Recente | - | - | - |
| QUANTO | Média de 2014 são cerca de 16 fresas/mês | Média de 2014 ≠ 16 fresas/mês | - | - | - |
| | D = 105 mm, e = 1,6 mm | D ≠ 105, e ≠ 1.6 mm | Problemas com dimensionamento da fresa | Problema apenas na célula 13 | - |
| | Aumenta com o aumento da produção | Independente do nº de peças produzidas | - | - | - |

4.3. Verificação da causa raiz

De forma a determinar a causa raiz foram postas à prova todas as possíveis causas, de maneira a criar ou evitar o acontecimento do problema, conforme pretendido. Assim sendo, esta secção dedica-se a testes e verificação das possíveis causas.

4.3.1. Material da fresa inadequado

A fresa, como referido antes, é utilizada em todas as células com processos de fresagem igual à célula 13, variando os anéis a maquinar, seu material e, portanto, o ferramental. O material do anel maquinado na célula 13 está descrito no capítulo 3.2.1.1. e é o material de anel mais duro utilizado na MAHLE Componentes de Motores S.A. Mesmo sabendo que o problema existe apenas na célula 13, ainda que este mesmo material seja maquinado em outras células, testou-se uma fresa diferente. Esta fresa, também da *Ceratizit*, de nome CTS24, tem as suas características apresentadas na Tabela 4.3:

Tabela 4.3. Dados e características da fresa CTS24 da Ceratizit

| | | |
|-----------------------------|-----------|---------|
| Modelo | CTS24 | |
| Co % | 12 | |
| Dureza | [HV10] | 1490 |
| | [HV30] | 1470 |
| | [HRA] | 90,9 |
| TRS. | [MPa] | 4000 |
| | [PSI] | 580.000 |
| E [GPa] | 549 | |
| Tamanho de grão [µm] | 0,5 – 0,8 | |
| Revestimento | - | |

Apresentando menor dureza mas maior tensão de rotura transversal, verificou-se que a quebra destas fresas ocorria ainda para ciclos de trabalho demasiado pequenos (por vezes horas apenas). A célula 3 utilizou também esta fresa, atingindo o seu limite de utilização ao fim de duas semanas por desgaste. Assim sendo, o problema de quebra de ferramentas não parece ser derivado do material da fresa utilizado atualmente, mas sim de algo que as células 3 e 13 não partilham.

4.3.2. Espessura insuficiente da fresa

Pelos mesmos motivos referidos na secção 4.3.1, a espessura da fresa não parece ser a causa raiz do problema, sendo que várias células usam a mesma fresa e maquinam o mesmo tipo de material sem problemas. É certo, uma maior espessura pode contribuir para uma maior resistência à fratura, no entanto, tal como não explica as condições descritas na secção 3.3, não soluciona o problema. Além disso, em alguns casos é impossível aumentar a espessura das fresas, sendo que dessa forma as flanges do mecanismo de aperto iriam colidir.

4.3.3. Tipo do anel

Com “tipo do anel” pretende-se diferenciar os anéis, não só quanto aos seus materiais, mas quanto à sua forma e dimensões. De facto, o problema só se verifica na maquinagem de alguns anéis, representados no gráfico de barras da Figura 4.1. Quanto à forma e dimensões dos anéis não há absolutamente nada a fazer, sendo que é tudo calculado com base no produto a obter, ou seja, os parâmetros de forma e dimensões não podem ser tratados como variáveis.

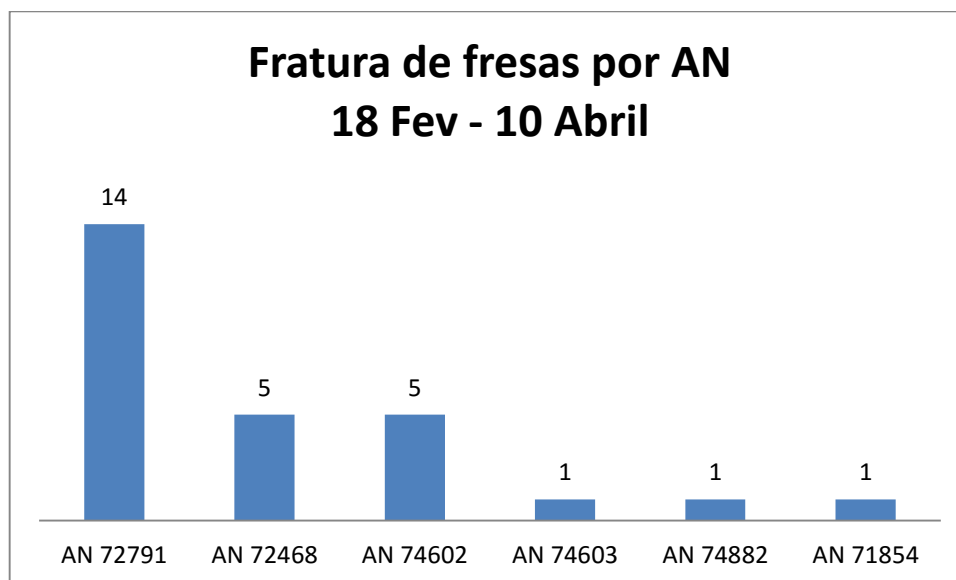


Figura 4.1. Fratura de fresas por AN na célula 13.

Tendo em conta que a produção dos anéis nesta célula foi relativamente semelhante entre 18 de Fevereiro e 10 de Abril (destaca-se o AN 74602 com maior produção), é visível na Figura 4.1 que a quebra de ferramentas repete-se mais frequentemente ao trabalhar alguns anéis que outros. Isto pode querer dizer que, de facto, o

problema pode estar associado a algo que está diretamente relacionado com as dimensões dos anéis.

4.3.4. Processo de corte

Os processos de corte dependem das máquinas existentes, não sendo por isso possível alterá-los na totalidade.

Os parâmetros de corte, obtidos com recurso a um software da MAHLE Componentes de Motores S.A., podem ser modificados. Neste processo pode ser alterada apenas a velocidade de avanço da fresa. A velocidade de avanço *standard* nesta célula é de 45 mm/min. Testou-se o funcionamento com uma velocidade de avanço de 20, 30, 40 e 50 mm/min, ocorrendo sempre a projeção de apara.

O modo de corte também pode ser alterado, de discordante para concordante. No entanto, não parece uma boa solução, dado que a projeção de apara é mais favorável em modo concordante.

De forma a evitar a quebra de fresas no movimento descendente (sem rotação), alterou-se um parâmetro do funcionamento do motor responsável pela rotação das fresas TFV 11 de forma a que tenha movimento descendente ainda com rotação das fresas. De tal maneira, ao encontrar apara nos rasgos das placas, não irá ocorrer fratura dado que as fresas em rotação conseguem cortar o material do anel sem problemas. Isto é apenas uma medida temporária, pelo que é esperado resolver os dois problemas existentes por imobilidade da apara aquando do corte dos anéis.

4.3.5. Problema nos TFV da célula 13

Após análise aos TFV da célula 13 verificou-se que:

- Há uma pequena falta de alinhamento das duas fresas (controlado pela manutenção e não pelo operador), o que pode resultar em esforços não simétricos quanto à linha neutra da apara/anel. Por exemplo, uma fresa pode estar a maquinar o início do terceiro anel e a outra fresa ainda está a acabar de maquinar o segundo anel. É dado um exemplo de falta de alinhamento na Figura 4.2:

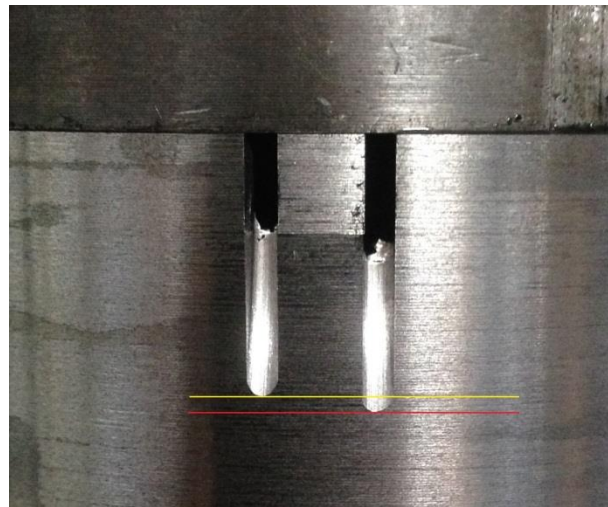


Figura 4.2. Falta de alinhamento das fresas dos TFV da célula 13.

- O TFV 10, por algum motivo, não contava com anilhas até ao dia 1 de Março, como é possível ver na Figura 4.3 a). É desconhecido o período de tempo no qual esteve a trabalhar desta forma, sendo que assim que tal foi observado foram colocadas as anilhas, Figura 4.3 b).

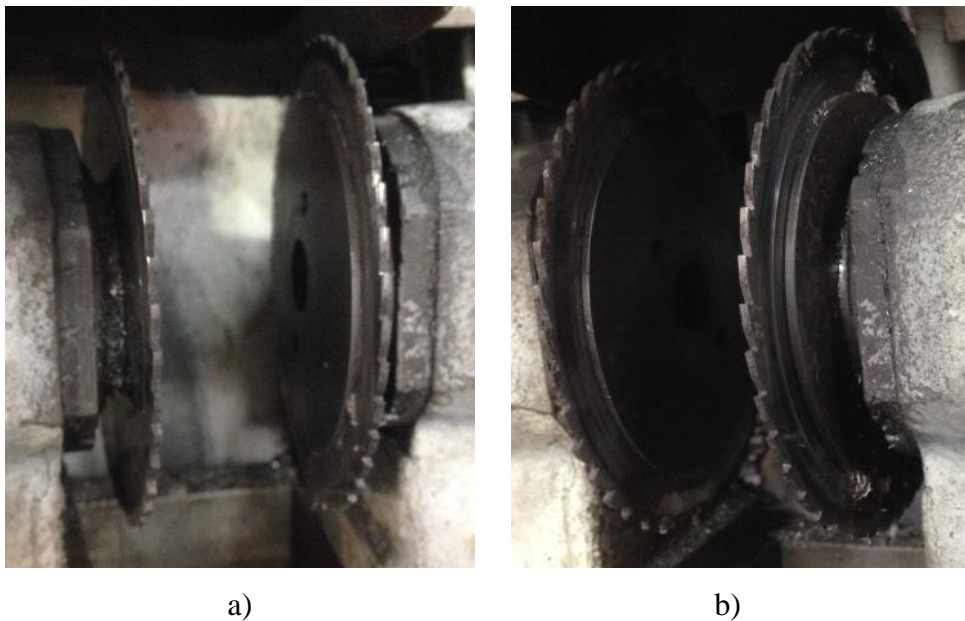


Figura 4.3. Conjunto de fresas a trabalhar: a) sem anilhas; b) com anilhas.

A quebra de fresas entre 18 de Fevereiro e 1 de Março foi exageradamente frequente, reduzindo bastante posteriormente (Tabela 4.4), o que indica que a aplicação das anilhas melhorou, como era suposto, bastante. De qualquer maneira, não resolveu o problema da quebra de ferramentas nos TFV da célula 13, pelo que a falta de anilhas não é a causa raiz do problema.

Tabela 4.4. Consumo de fresas no TFV 10 entre 18-28 Fev e 1-18 Mar.

| | 18 – 28 Fev | 1 – 18 Mar |
|--------------------------|-------------|------------|
| Consumo de fresas | 13 | 7 |
| Média diária | 1,3 | 0,4 |

4.3.6. Ferramental inadequado

O funcionamento nas condições de trabalho descritas na secção 3.3 é influenciado pelo estado das placas de suporte, sendo estas responsáveis pelo apoio da apara mas não pelo mecanismo de aperto, que nada tem a ver com a libertação de apara. Com isto em mente, foi feita uma experiência na célula 13 quando no TFV 10 a apara estavam a ser projetada para a fresa e no TFV 11 a apara permanecia apoiada entre as placas de suporte superior e inferior, maquinando exatamente o mesmo anel. Esta experiência consistiu em dois testes:

1. Trocar a placa de apoio inferior dos dois TFV;
2. Trocar a placa de apoio superior dos dois TFV.

As placas de apoio são numeradas aos pares de forma a serem assim utilizadas nos TFV (assumindo que vão ter desgaste semelhante, etc). Por motivos de conveniência, assumo-se que o par de placas de suporte a ser utilizado na situação inicial era:

- Par 1 (Superior 1, Inferior 1) no TFV 10;
- Par 2 (Superior 2, Inferior 2) no TFV 11.

A Tabela 4.5 representa a experiência realizada, e indica:

- A verde: a apara ficou apoiada entre as placas de suporte;
- A vermelho: a apara foi projetados para a fresa;
- Assinalado com “x”: placa que foi utilizada.

Tabela 4.5. Experiência realizada para avaliar a influência das placas de apoio.

| | | Superior 1 | Inferior 1 | Superior 2 | Inferior 2 |
|-------------------------|--------|------------|------------|------------|------------|
| Situação inicial | TFV 10 | x | x | | |
| | TFV 11 | | | x | x |
| Teste 1 | TFV 10 | x | | | x |
| | TFV 11 | | x | x | |
| Teste 2 | TFV 10 | | | x | x |
| | TFV 11 | x | x | | |

Sendo clara a influência das placas de suporte no apoio da avara, efetuou-se a medição da planicidade das mesmas. Verificou-se que muitas das placas, tanto superiores como inferiores, de diversos anéis, não estavam dentro dos parâmetros definidos para a altura da placa (mínimo de 23,50 cm de altura), estabelecida nas normas da MAHLE Componentes de Motores S.A. Em todos os casos, a altura era mínima no apoio da avara na placa de suporte superior, tal como mostra a Figura 4.4:

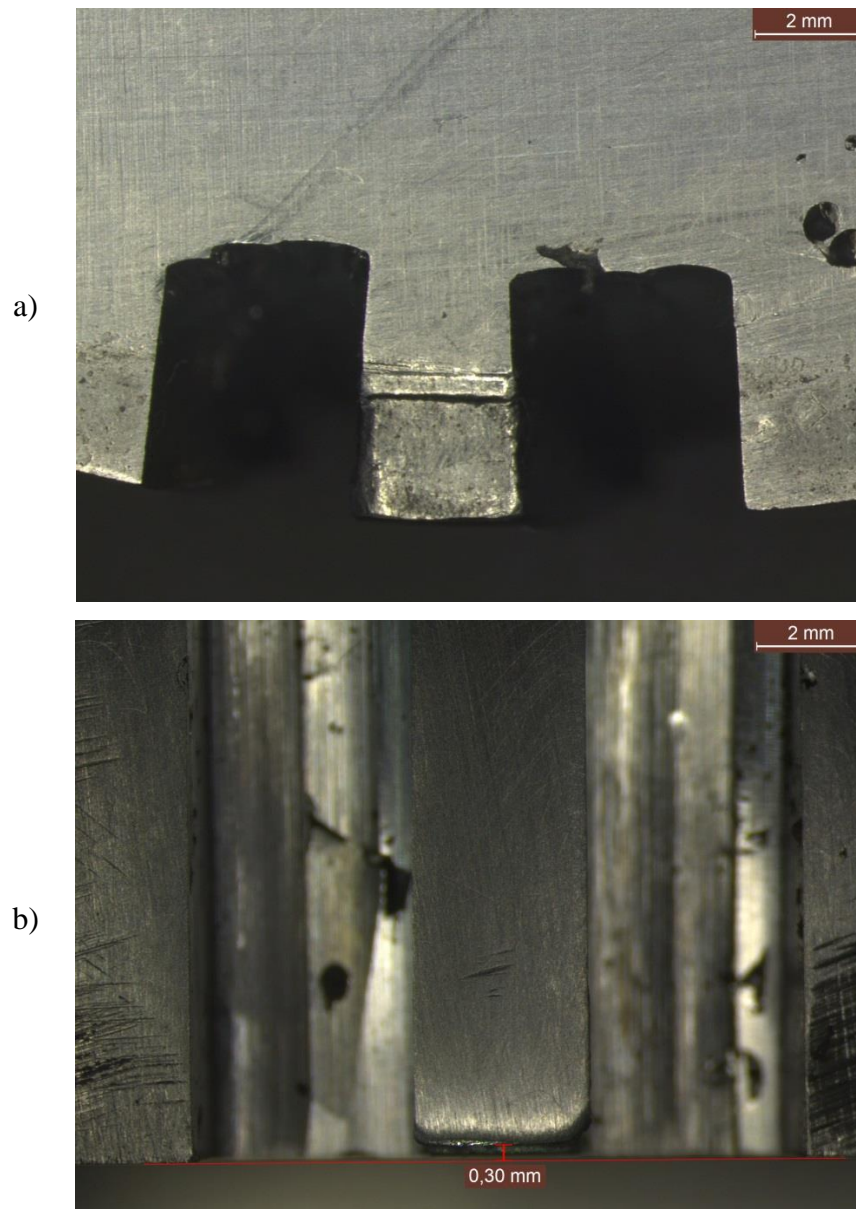


Figura 4.4. Falta de planicidade na placa de suporte superior: a) Vista inferior; b) Vista frontal.

Dado o desgaste existente, não é possível dar apoio à avara, sendo que está sujeita a uma força vertical mas não tem nada que a contrarie (sendo esse um dos papéis

das placas de suporte). Foi assim realizada uma retificação plana às placas de suporte superior que tivessem possibilidade de reduzir a sua altura.

Mesmo utilizando ferramental novo ou retificado a queda da apara continuou a acontecer. Após mais uma análise ao processo observou-se que as placas de suporte não fornecem apoio em todo o anel por terem diâmetros menores que os diâmetros dos anéis que maquinam, isto é, não fornecem apoio em toda a radial do anel, tal como é visível na Figura 4.5:



Figura 4.5. Posição da placa de suporte superior relativamente aos anéis.

Assim sendo, o problema acontece apenas na maquinagem de anéis com dimensões pequenas, indo de encontro à análise inicialmente feita, não sendo viável o suporte da apara.

4.3.7. Problemas com o dimensionamento da fresa

Para além de terem sido testados dois tipos de fresas diferentes, este problema ocorre apenas na célula 13. Mais, aquando da chegada das fresas à empresa é feito um controlo dimensional à totalidade das fresas.

5. MEDIDAS CORRETIVAS

5.1. Causa raiz

De todas as possíveis causas raiz, as que melhor justificam as condições descritas na secção 3.3 são um problema com os TFV da célula 13 e/ou ferramental inadequado. Ainda assim, o problema com os TFV não deveria causar as condições descritas na secção 3.3, sendo que um apoio correto à apara contrariaria qualquer movimento dos mesmos. Com isto, volta-se à questão do apoio correto dos anéis/apara, que é dependente do ferramental, e explica o problema, visto que há uma limitação com anéis de menores dimensões, feitos na célula 13. Assim sendo, a que foi considerada primeiramente como sendo a causa mais provável foi o ferramental inadequado, nomeadamente as placas de suporte dos anéis. Isto justifica plenamente as condições descritas na secção 3.3, tanto pelo desgaste e falta de planicidade, não contrariando a força exercida nos anéis (F), como pelo diâmetro inferior ao dos anéis, ou seja, pela falta de suporte em toda a radial. Teoricamente, aplicando pressão suficiente em toda a radial garante:

- Impossibilidade de movimento vertical por parte dos anéis e da apara dado que as placas de suporte contrariam a força vertical imposta aos anéis na totalidade;
- Menor desgaste na placa superior na zona de apoio da apara (Figura 4.4) devido a uma maior secção e portanto uma redução de pressão diretamente proporcional ao aumento da área (a força permanece a mesma, sendo imposta pelas fresas), como se verifica pela equação (5.1):

$$P = \frac{F}{A} \quad (5.1)$$

Sendo que usando ferramental com uma área de teste, A_{teste} , maior que a área do ferramental atual, A_{atual} obtém-se:

$$P_{teste} = \frac{A_{atual}}{A_{teste}} \times P_{atual} \Rightarrow P_{teste} < P_{atual}$$

Com base na mesma ideia explica-se o porquê das placas utilizadas em anéis grandes ou com aberturas livres grandes terem um desgaste muito menor que as placas utilizadas em anéis pequenos ou com aberturas livres pequenas;

- Impossibilidade de movimento horizontal dado que é aplicada uma força de atrito maior que a componente horizontal da força F . Esta força de atrito é maior que a força de atrito criada por uma pressão aplicada em parte da radial apenas, sendo que esta depende da massa dos objetos em contacto e para aplicar pressão em toda a radial utilizar-se-ia, obrigatoriamente, ferramental com maiores dimensões. É, no entanto, independente da área de contacto.

5.2. Alteração do ferramental

De forma a evitar que ocorram mais fraturas de fresas, a primeira ideia passa pela alteração das dimensões do ferramental (Anexo B). As dimensões D e H têm de ser mantidas iguais pois servem para o encaixe do alicate (mecanismo de transporte dos anéis), representado na Figura 5.1.

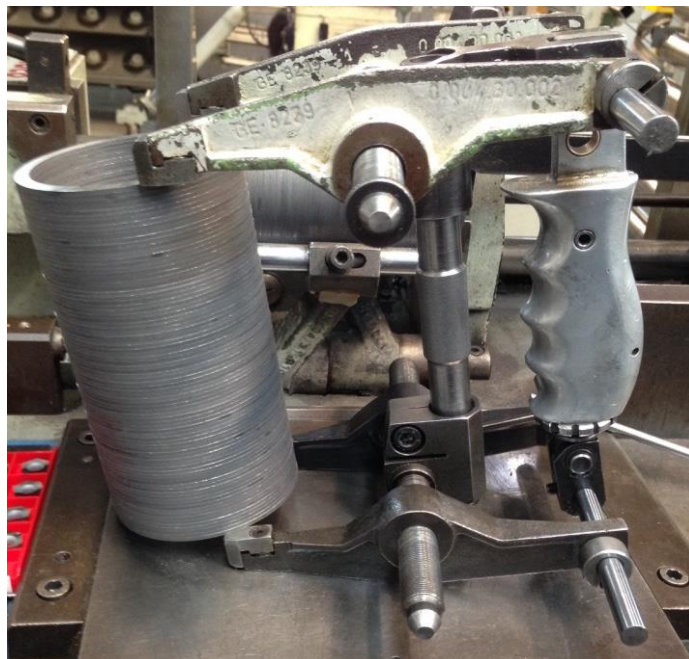


Figura 5.1. Alicates de transporte de anéis.

No entanto, o parâmetro que tem influência no apoio dos anéis é o DFE. A importância desta cota foi clara após o cálculo da área total da apara e da área da apara em contacto com as placas superior/inferior.

Com recurso ao software *Inventor 2015* desenhou-se a apara e calculou-se a sua área total (superfície superior/inferior) e área em contacto com as placas de suporte. O desenho de cada apara foi feito conforme a Figura 5.2:

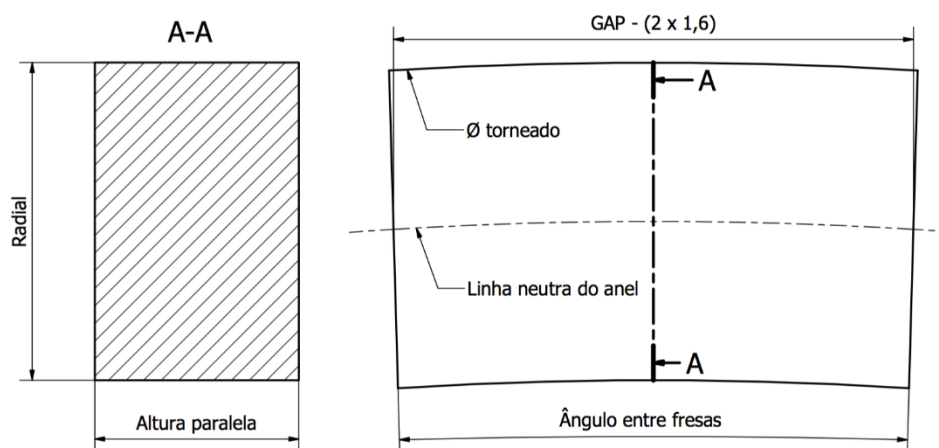


Figura 5.2. Geometria da apara; Esquerda: secção do anel; Direita: vista superior.

Com base nisto obtém-se a Tabela 5.1:

Tabela 5.1. Relação entre a área da apara e a área da apara em contacto com as placas de suporte [dimensões com base em milímetros].

| Anel | GAP | Radial | Altura | Diâmetro | Ângulo fresa | Área apara | Área contacto | Área contacto [% total] | Material |
|-------------|------|--------|--------|----------|--------------|------------|---------------|-------------------------|----------|
| AN 72791 | 7,60 | 2,74 | 1,930 | 76,91 | 3°40' | 12,063 | 8,132 | 67 | J |
| AN 72468 | 8,77 | 2,73 | 1,930 | 78,63 | 4°15' | 15,152 | 10,923 | 72 | J |
| AN 72596 | 8,40 | 3,09 | 1,995 | 85,59 | 3°30' | 16,079 | 10,097 | 63 | C |
| AN 72596.04 | 7,60 | 3,09 | 1,995 | 85,69 | 3°20' | 13,602 | 8,304 | 61 | C |
| AN 74602 | 8,20 | 3,00 | 1,930 | 83,60 | 3°20' | 15,010 | 10,383 | 69 | J |
| AN 74882 | 8,90 | 3,09 | 1,995 | 85,69 | 4°00' | 17,627 | 10,767 | 61 | C |
| AN 74882.04 | 7,63 | 3,09 | 1,995 | 85,76 | 4°00' | 13,695 | 8,174 | 60 | C |
| AN 74603 | 8,80 | 2,84 | 1,730 | 79,37 | 3°40' | 15,918 | 11,193 | 70 | J |

Observando a Tabela 5.1 e comparando com o que é dito na secção 4.3.3 (Figura 4.1) percebe-se que:

- Só há uma ocorrência de quebra de ferramenta durante a maquinação de um material C que é por norma mais macio que o J;

- A maquinagem do AN 72791 é a mais crítica, para a qual mais frequente fraturam ferramentas, e este anel é o que tem, dos materiais J, menor percentagem da sua área em contacto com as placas de suporte.

Sendo que a discrepância entre a quebra de ferramentas a maquinar o AN 74602, AN 72468 e AN 74603 explica-se da seguinte maneira:

- O AN 74602 tem uma produção muito mais elevada que os outros dois;
- O AN 72468 é mais antigo que os outros dois.

Ou seja, ainda que não devesse ser assim, o ferramental do AN 72468 tem um elevado desgaste dado o seu tempo de vida e o ferramental do AN 74602 tem um elevado desgaste dado a sua enorme utilização. Com os dois pontos supra-referidos compreende-se a menos frequente quebra de ferramentas a maquinar o AN 74603.

Conclui-se assim que, sendo que a maquinagem mais crítica é a do AN 72791, o teste deve ser feito para este mesmo anel.

Tendo em conta todos os pontos até aqui mencionados, criaram-se novas placas de suporte do anel com base no mesmo desenho mas com a dimensão “DFE” diferente, como mostra a Tabela 5.2:

Tabela 5.2. Dimensões das placas atuais e das placas de teste.

| Anel | Ø torneado [mm] | Ferramental | DFE [mm] | D [mm] | H [mm] | Δ raio [mm] |
|----------|-----------------|-------------|----------|--------|--------|-------------|
| AN 72791 | 76,91 | Atual | 75,168 | 12,855 | 65,5 | -0,871 |
| | | Teste | 79,168 | 12,855 | 65,5 | 1,129 |

Em que Δ raio é calculado pela (5.2):

$$\Delta \text{ raio} = \frac{DFE - \text{Ø torneado}}{2} \quad (5.2)$$

Como se constata na Tabela 5.2, passou-se de quase um milímetro sem apoio em toda a radial para pouco mais de um milímetro com apoio. Assim sendo, para a o novo ferramental, a percentagem da superfície superior/inferior da apara em contacto com as placas correspondentes é 100%, como pretendido.

5.3. Teste experimental

As placas foram testadas em condições de trabalho ótimas, ou seja, o sistema já estava completamente afinado, com recurso às placas de apoio “antigas” para o efeito. Testadas para o AN 72791 durante a operação de 24780 anéis seguidos, a experiência foi um sucesso dado que a apara não caiu uma única vez, como mostra a Figura 5.3 (anteriormente caía em 100% das maquinagens dos diferentes pacotes), ou seja, não houve fratura de fresas. Na verdade, não partiram nem lascaram, mantiveram-se em ótimas condições, algo impensável até ao momento na maquinagem deste anel.



Figura 5.3. Posição da apara utilizando placas de suporte novas, maquinando o AN 72791.

5.4. Efeitos secundários

Para ser possível afirmar que esta medida corretiva foi um sucesso é imperativo analisar eventuais efeitos secundários indesejados que surjam.

De facto, observou-se que, utilizando as placas de teste, a quantidade de rebarba nas pontas do primeiro e último anel de cada pacote é maior, visível na Figura 5.4.

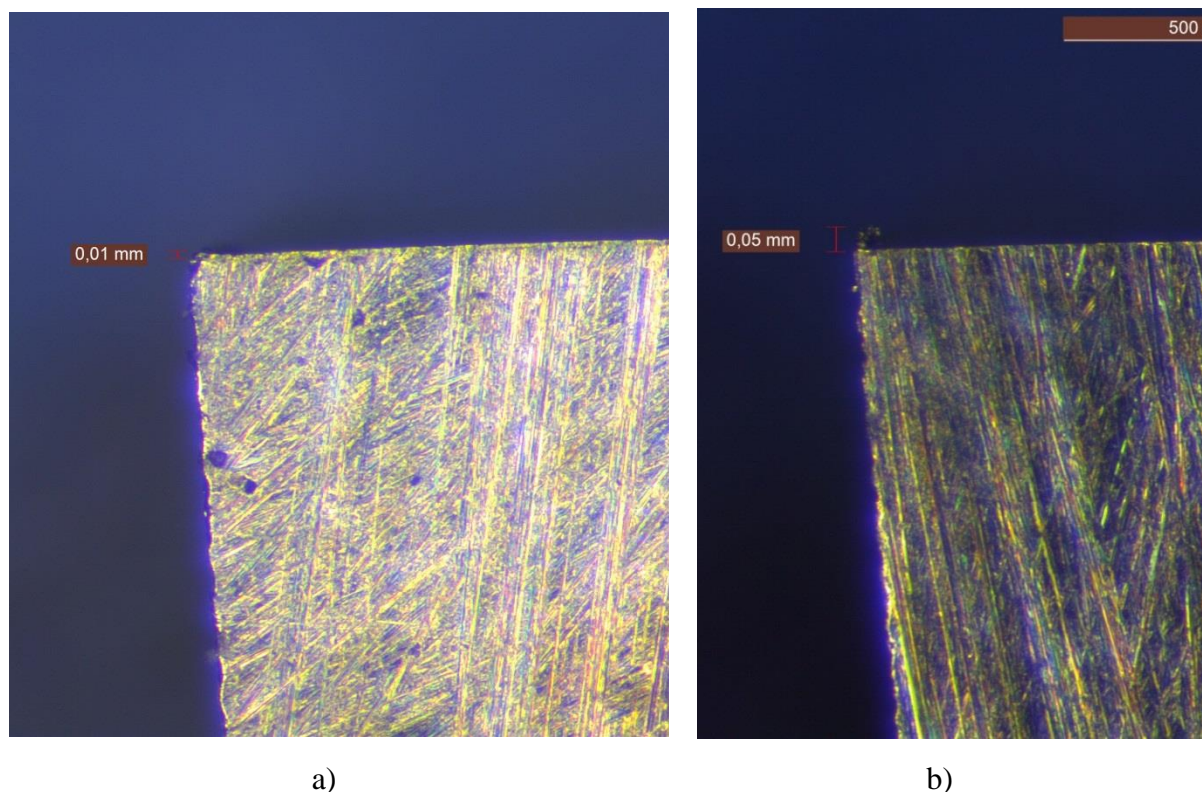


Figura 5.4. Rebarba nas pontas no anel; a) antes da medida corretiva; b) depois da medida corretiva.

Na verdade, após a maquinação de cada pacote, o operador tem de passar uma lixa na superfície que esteve sujeita ao corte de modo a remover a rebarba existente nas pontas no anel. Com as antigas placas, sendo que são mais pequenas que os anéis, tinha-se fácil acesso a qualquer anel, algo que já não acontece com as novas que, sendo maiores que os anéis, tornam muito difícil o acesso ao primeiro e último anel.

5.4.1. Rebarba

A rebarba é um resíduo que envolve a deformação plástica tridimensional e, embora indesejável, nesta operação é inevitável. A importância da rebarba para os anéis desta célula é elevada devido à operação seguinte, uma retificação de perfil. Esta operação consiste na remoção de material no diâmetro exterior do anel, de forma a dar-lhe o perfil desejado. Para tal, o anel tem de assentar perfeitamente, isto é, ter todo o seu diâmetro exterior em contacto com o bucha, o que não acontece no caso de existência de rebarba nas pontas no anel. Para evitar que isto aconteça é feito um controlo de luz no final da primeira operação. Ao colocar o anel num calibre, no caso de se ver luz entre ambos, o anel é reprovado, indicando que não tem todo o seu diâmetro exterior em contacto com o calibre.

Este calibre é escolhido em função do diâmetro da bucha a ser utilizada na operação seguinte.

A remoção da rebarba não é difícil, sendo que este problema sempre existiu e era resolvido com recurso ao lixamento das pontas dos anéis após fresagem. No entanto, com o novo ferramental, tendo placas com diâmetro superior ao diâmetro dos anéis, o lixamento dos primeiros e últimos dois anéis torna-se quase impossível desta forma. Com isto em mente, este problema deve ser resolvido, propondo como soluções:

- Inversão do sentido de rotação das fresas, de forma a que a rebarba se dê, na maior parte, no sentido do diâmetro interior, onde não tem importância;
- Separação dos dois primeiros e últimos anéis numa vara à parte e, no final de cada lote, lixar manualmente os cerca de 220 anéis (4 anéis por cada pacote de 75 anéis por um lote de 4130 anéis). Esta lixagem consistiria na passagem de uma lixa ao longo das pontas de um lado do anel, seguido da passagem da lixa ao longo das pontas do outro lado do anel;
- Modificação de um componente da máquina de gravação (marca que ajuda o operador, indicando qual a posição de topo/baixo), que se realiza logo após o TFV. A alteração deste componente (representado no Anexo C) permite remover a rebarba dado que é este o componente que alinha os anéis pela aresta da rebarba e tem um movimento axial, comportando-se como um rascador. O componente atualmente não pode ter tal finalidade, necessitando de um revestimento para que o seu desgaste, e consequente lixo, seja o mínimo possível.

5.5. Padronização do ferramental

De modo a resolver o problema da quebra das fresas, aplicou-se a mesma medida corretiva a todos os anéis da tecnologia HV PVD (célula 13), correspondentes a 100% das fraturas de fresas entre Janeiro e Abril de 2015. Para além disso, nesta célula, para evitar o desgaste prematuro, cada anel terá o seu ferramental próprio. Isto deve-se ao facto de, hoje em dia, caso dois anéis tenham diâmetros iguais ou muito semelhantes,

usarem o mesmo ferramental; no entanto, as suas aberturas livres são distintas, abrindo rasgos exageradamente grandes nas placas de suporte. Isto pode induzir o problema descrito na secção 3.3 (b). Além disso, de forma a que seja uma medida padronizada para a tecnologia HV PVD e todos os anéis tenham placas com pelo menos 1 milímetro a mais de raio que a sua radial, optou-se por adicionar ao parâmetro “DFE” 5 milímetros (previamente testados 4 mm). Tal como referido na secção 5.1, a área em contacto será de 100%. Assim sendo, obtém-se a Tabela 5.3:

Tabela 5.3. Dimensões das placas de suporte da tecnologia HV PVD.

| ANEL | Ø torneado [mm] | Ferramental | DFE [mm] | D [mm] | H [mm] | Δ raio [mm] |
|-------------|-----------------|-------------|----------|--------|--------|-------------|
| AN 72791 | 76,91 | Atual | 75,168 | 12,855 | 65,50 | -0,871 |
| | | Teste | 80,168 | 12,855 | 65,50 | 1,629 |
| AN 72468 | 78,63 | Atual | 77,132 | 13,190 | 68,90 | -0,749 |
| | | Teste | 82,132 | 13,190 | 68,90 | 1,751 |
| AN 74602 | 83,60 | Atual | 81,793 | 13,987 | 73,30 | -0,904 |
| | | Teste | 86,793 | 13,987 | 73,30 | 1,597 |
| AN 72596 | 85,59 | Atual | 83,340 | 14,250 | 74,34 | -1,125 |
| | | Teste | 88,340 | 14,250 | 74,34 | 1,375 |
| AN 72596.04 | 85,69 | Atual | 83,340 | 14,250 | 74,34 | -1,175 |
| | | Teste | 88,340 | 14,250 | 74,34 | 1,325 |
| AN 74603 | 79,37 | Atual | 77,719 | 13,291 | 69,30 | -0,826 |
| | | Teste | 82,719 | 13,291 | 69,30 | 1,675 |
| AN 74882 | 85,69 | Atual | 83,340 | 14,250 | 74,34 | -1,175 |
| | | Teste | 88,340 | 14,250 | 74,34 | 1,325 |
| AN 74882.04 | 85,76 | Atual | 83,340 | 14,250 | 74,34 | -1,210 |
| | | Teste | 88,340 | 14,250 | 74,34 | 1,290 |

Sendo que os anéis 72596.04 e 74882.04 são sobremedidas do 72596 e 74882 respectivamente, haverá, excepcionalmente, partilha de ferramental entre os mesmos. Assim sendo, a padronização do ferramental foi feita após a concepção de 3 pares de placas (superior + inferior) por cada anel representado na Tabela 5.3 excluindo os que são sobremedidas.

O investimento nesta operação, tendo em conta o preço de 90€ por par, é:

$$I = 3 \cdot 6 \cdot 90 = 1620\text{€}$$

Dado o lento desgaste imposto às placas, é estimado que este investimento seja repetido anualmente, na pior das circunstâncias.

6. ANÁLISE DE RESULTADOS

De forma a compreender a influência da medida corretiva aplicada ao ferramental, é feita neste capítulo uma análise financeira e uma análise de produtividade.

Para a elaboração deste capítulo foi determinado o tempo de vida das fresas em função do número de anéis maquinados, de forma a saber quantas fresas são esperadas consumir e de que forma o custo irá variar. Para esta análise entram as células que utilizam as fresas de 1,6 mm, sendo estas as células 1, 2, 3 e 13.

6.1. Análise financeira

Neste capítulo é feita uma comparação de dados entre o primeiro semestre de 2015 com 2014, a estimativa do segundo semestre de 2015 com 2014, a estimativa do segundo semestre de 2015 com o primeiro semestre de 2015 e a estimativa do total de 2015 com 2014.

O primeiro semestre entra na análise dado que um acompanhamento constante permite que haja um melhor controlo, especialmente do ferramental. O operador não tem qualquer preocupação com a qualidade do ferramental que está prestes a utilizar. Além disso, a partir do mês de Maio são visíveis ganhos, dado a entrada do novo ferramental.

As análises supra-referidas são feitas com base na produção total da fábrica e também da célula 13. O custo das fresas de 1,6 mm virá em € por mil anéis, sendo estes anéis a totalidade da produção, ou apenas da célula 13, dependendo da análise a ser feita. Também será apresentado o gasto total com o consumo de fresas.

A maior percentagem da redução de custos por mil anéis deve-se à resolução do problema de fratura de ferramentas e de, com isto, tornar as ferramentas reutilizáveis mais frequentemente, jogando tudo a favor de um menor consumo de ferramentas.

De forma a conhecer o custo por mil anéis basta aplicar a equação (6.1):

$$C = \frac{1000 \cdot N_f}{N_a} \cdot P_f \text{ [€/mil anéis]} \quad (6.1)$$

Em que:

C → Custo das fresas novas por mil anéis produzidos.

N_f → Número de fresas novas utilizadas;

N_a → Número de anéis maquinados pelas fresas utilizadas;

P_f → Preço de uma fresa.

6.1.1. Análise 2014

6.1.1.1. Fábrica

Na fábrica, em 2014, foram produzidos 24.658.000 anéis nas células que utilizam as fresas de 1,6 mm. Como analisado na secção 3.1, foram consumidas 321 fresas, com preço unitário de 112,36€. Resolvendo a equação (6.1):

$$C = \frac{1.000 \cdot 321}{24.658.000} \cdot 112,36 = 1,46 \frac{\text{€}}{\text{mil anéis}}$$

No total, sendo o gasto dado por G , obtém-se:

$$G = 321 \cdot 112,36 = 36.068\text{€}$$

O gasto com fresas representa, neste período, 19,5% do custo total das ferramentas de arranque de apara da fábrica. Resumindo, obtém-se a Tabela 6.1

Tabela 6.1. Custo por mil anéis e gasto total com fresas em 2014 na fábrica.

| 2014 | |
|------------------------------------------------------|-----------------|
| $C \left[\frac{\text{€}}{\text{mil anéis}} \right]$ | $G \text{ [€]}$ |
| 1,46 | 36.068 |

6.1.1.2. Célula 13

Quanto à célula 13, em 2014, foram feitos 2.229.490 anéis. O consumo de fresas da célula 3 e célula 13 (as duas juntas) foi de 194 fresas, pelo que, sendo que a fratura de fresas era ocorrente em 80% dos casos na célula 13, assume-se um consumo nesta de 150 fresas. Ou seja:

$$C = \frac{1.000 \cdot 150}{2.229.490} \cdot 112,36 = 7,56 \frac{\text{€}}{\text{mil anéis}}$$

$$G = 150 \cdot 112,36 = 16.854\text{€}$$

Em que o custo por mil anéis, neste caso, vem por mil anéis produzidos na célula 13. Resumindo, obtém-se a Tabela 6.2:

Tabela 6.2. Custo por mil anéis e gasto total com fresas em 2014 na célula 13.

| 2014 | |
|-------------------------------------------|--------|
| C [$\frac{\text{€}}{\text{mil anéis}}$] | G [€] |
| 7,56 | 16.854 |

6.1.2. Análise 1º Semestre 2015

A medida corretiva apenas começou a ser implementada na fábrica a partir de meados de Abril de 2015. Além disso, foi dado suporte constante, tentando ao longo dos restantes meses não permitir que o problema ocorresse tão frequentemente como previsto. Assim, espera-se uma redução de custo por mil anéis em relação a 2014.

6.1.2.1. Fábrica

Na fábrica, no primeiro semestre de 2015, foram feitos 13.619.000 anéis nas células onde são utilizadas fresas de 1,6 mm. Foram consumidas 81 fresas neste período. Assim:

$$C = \frac{1.000 \cdot 81}{13.619.000} \cdot 112,36 = 0,67 \frac{\text{€}}{\text{mil anéis}}$$

$$G = 81 \cdot 112,36 = 9.101\text{€}$$

Este custo, G, representa agora 9,8% do custo do total das ferramentas de arranque de apara do 1º semestre de 2015. Resumindo, obtém-se a Tabela 6.3:

Tabela 6.3. Custo por mil anéis e gasto total com fresas no 1ºS de 2015 na fábrica.

| 1º Semestre 2015 | |
|-------------------------------------------|-------|
| C [$\frac{\text{€}}{\text{mil anéis}}$] | G [€] |
| 0,67 | 9.101 |

A melhoria quanto a gastos com fresas, Savings_G , é dada pela equação (6.2) e a melhoria quando ao custo das fresas por mil anéis, Savings_C , pela equação (6.3):

$$Savings_G = \frac{G_A - G_B}{G_A} \cdot 100 \quad (6.2)$$

$$Savings_C = \frac{C_A - C_B}{C_A} \cdot 100 \quad (6.3)$$

Sendo A e B períodos de tempo bem definidos.

Relativamente a meio ano de 2014:

$$Savings_G = \frac{\frac{36.068}{2} - 9.101}{\frac{36.068}{2}} = 49,5\%$$

Ou, por mil anéis:

$$Savings_C = \frac{1,46 - 0,67}{1,46} = 54\%$$

Resumindo, obtém-se a Tabela 6.4:

Tabela 6.4. Melhorias entre o 1ºS de 2015 e meio ano de 2014 na fábrica.

| | vs 2014 | |
|----------|----------------------|----------------------|
| 1ºS 2015 | Savings _C | Savings _G |
| | 54% | 49,5% |

6.1.2.2. Célula 13

Quanto à célula 13, no primeiro semestre de 2015, foram feitos 2.064.460 anéis e foram consumidas 55 fresas. Aplicando a equação (6.1):

$$C = \frac{1.000 \cdot 55}{2.064.460} \cdot 112,36 = 2,99 \frac{\text{€}}{\text{mil anéis}}$$

$$G = 55 \cdot 112,36 = 6.180\text{€}$$

Resumindo, obtém-se a Tabela 6.5:

Tabela 6.5. Custo por mil anéis e gasto total com fresas no 1ºS de 2015 na célula 13.

| 1º Semestre 2015 | |
|-------------------------------------------|-------|
| C [$\frac{\text{€}}{\text{mil anéis}}$] | G [€] |
| 0,67 | 9.101 |

Relativamente a meio ano de 2014:

$$Savings_G = \frac{\frac{16.854}{2} - 6.180}{\frac{16.854}{2}} = 27\%$$

Ou, por mil anéis:

$$Savings_C = \frac{7,56 - 2,99}{7,56} = 60,4\%$$

Resumindo, obtém-se a Tabela 6.6:

Tabela 6.6. Melhorias na fábrica entre o 1ºS de 2015 e meio ano de 2014 na célula 13.

| | | vs 2014 | |
|----------|----------------------|----------------------|--|
| 1ºS 2015 | Savings _C | Savings _G | |
| | 60,4% | 27% | |

6.1.3. Análise 2º Semestre 2015

Para efetuar esta análise são utilizados os valores previstos de produção de anéis. Sendo assim, é uma estimativa. Além disso, de forma a saber o número necessário de ferramentas, determinou-se o seu tempo de vida, ilustrado na Tabela 6.7 :

Tabela 6.7. Tempo de vida das fresas (em anéis maquinados).

| | Número de afiações | Nº de Anéis de Referência |
|--------------|--------------------|---------------------------|
| | 0 | 175.000 |
| | 1 | 50.000 |
| | 2 | 25.000 |
| Total | 2 | 250.000 |

O tempo de vida foi determinado com base no número de anéis de referência que maquina. Os tempos de vida foram calculados em células que maquinam anéis com 2 mm de altura, em média, em conjuntos de 150 mm, como é o caso da célula 2, 3 e 13. No entanto, a célula 1 maquina também conjuntos de 150 mm mas de anéis de 1,5mm em média. O objetivo é calcular o tempo de vida em função da área maquinada.

Uma fresa demora cerca de 4 dias entre sair do torno para ser reparada até estar pronta para utilização novamente.

6.1.3.1. Fábrica

Na fábrica, estima-se que sejam produzidos 9.073.650 anéis com recurso às fresas de 1,6 mm. O consumo de fresas, dada a Tabela 6.7, pode ser estimado. O método utilizado para tal foi uma análise de programação linear com recurso ao *Solver* do Excel. Para isto, trabalhou-se com o total de fresas consumidas divididas pelo número de células, ou seja, em grupos de 4 fresas com o mesmo tempo de vida dentro de cada célula (ver Figura 6.1). Isto evita que o *Solver* sugira uma solução que não seja múltipla de 4 fresas para uma determinada célula, o que não deve acontecer, visto que, na maior parte dos casos, os dois tornos maquinam o mesmo anel.

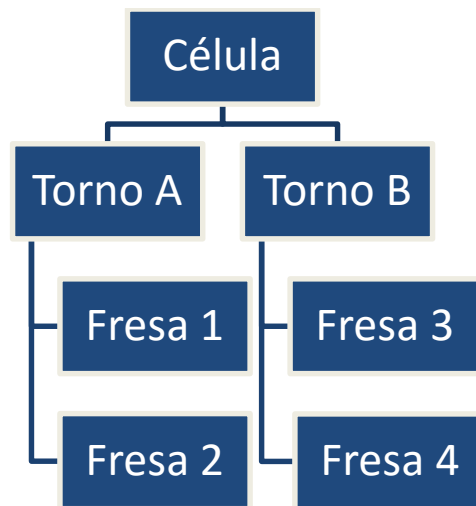


Figura 6.1. Relação entre número de fresas para cada célula.

Para poder realizar isto desta forma, a vida das fresas vai ser tomada como o dobro de anéis, dado a utilização do dobro das fresas. A função objetivo a usar no *Solver* é a (6.4), que representa o objetivo de minimizar o consumo de fresas novas:

$$\min(Z) = \sum_{i=1}^4 x_{i,j}; j = 1 \quad (6.4)$$

Em que:

x → Número de fresas utilizadas numa célula;

i → Este índice representa a célula, variando entre 1 e 4 (índice 1, 2, 3 e 4 para as células 1, 2, 3 e 13 respetivamente);

j → Este índice representa o estado de afiação das fresas. Varia entre 1 e 3; índice 1 para novas, 2 para fresas com uma afiação e 3 para fresas com duas afiações.

As condições para este problema são de 4 tipos:

1. Permitir a produção de pelo menos o número de anéis previstos;
2. Garantir que o número de fresas afiadas uma vez, Af_1 , nunca é superior ao número de fresas novas utilizadas e o número de fresas afiadas pela segunda vez, Af_2 , nunca é superior ao número de fresas afiadas uma vez;
3. Garantir que, no limite, só é possível ter 8 pares de fresas novas (2 por 4 células) a mais que afiadas, ou de fresas afiadas uma vez a mais que fresas afiadas duas vezes (situação em que a produção conclui-se a usar fresas novas, por exemplo);
4. Condição inicial do problema, em que se simula um caso em que todas as células começam com dois pares de fresas novas.

Assim, traduzidas em equações, obtém-se a Tabela 6.8:

Tabela 6.8. Condições do problema de minimização do consumo de fresas novas.

| | | |
|----------|--------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 | Cel. 1 | $\frac{2}{1,5} \cdot 35000 \cdot x_{1,1} + \frac{2}{1,5} \cdot 100000 \cdot x_{1,2} + \frac{2}{1,5} \cdot 50000 \cdot x_{1,3} \geq 4043820$ |
| | Cel. 2 | $350000 \cdot x_{2,1} + 100000 \cdot x_{2,2} + 50000 \cdot x_{2,3} \geq 117973$ |
| | Cel. 3 | $350000 \cdot x_{3,1} + 100000 \cdot x_{3,2} + 50000 \cdot x_{3,3} \geq 2288925$ |
| | Cel. 13 | $350000 \cdot x_{4,1} + 100000 \cdot x_{4,2} + 50000 \cdot x_{4,3} \geq 2623035$ |
| 2 | Novas \geq Af ₁ | $\sum_1^4 x_{i,1} \geq \sum_1^4 x_{i,2}$ |
| | Novas \geq Af ₂ | $\sum_1^4 x_{i,1} \geq \sum_1^4 x_{i,3}$ |
| | Af ₁ \geq Af ₂ | $\sum_1^4 x_{i,2} \geq \sum_1^4 x_{i,3}$ |
| 3 | Novas \leq Af ₁ + 4 | $\sum_1^4 x_{i,1} \leq \sum_1^4 x_{i,2} + 4$ |
| | Novas \leq Af ₂ + 4 | $\sum_1^4 x_{i,1} \leq \sum_1^4 x_{i,3} + 4$ |
| | Af ₁ \leq Af ₂ + 4 | $\sum_1^4 x_{i,2} \leq \sum_1^4 x_{i,3} + 4$ |
| 4 | Novas \geq 1 | $x_{1,1} \geq 1$ |
| | | $x_{2,1} \geq 1$ |
| | | $x_{3,1} \geq 1$ |
| | | $x_{4,1} \geq 1$ |

A resolução deste problema encontra-se apresentada no Anexo D e Anexo E, sendo que foram obtidos os resultados da Tabela 6.9:

Tabela 6.9. Valores obtidos para as variáveis da função objetivo.

| $x_{1,1}$ | $x_{1,2}$ | $x_{1,3}$ | $x_{2,1}$ | $x_{2,2}$ | $x_{2,3}$ | $x_{3,1}$ | $x_{3,2}$ | $x_{3,3}$ | $x_{4,1}$ | $x_{4,2}$ | $x_{4,3}$ |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 9 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 12 | 15 | 6 | 5 | 1 |

Ou seja, o consumo de fresas novas é:

$$4 \cdot \sum_1^4 x_{i,1} = 4 \cdot (9 + 1 + 1 + 6) = 68$$

Este valor deve ser considerado o consumo mínimo possível. Isto deve-se ao facto de, na prática, levar 4 dias o processo de afiação de uma fresa, o que não é possível traduzir para uma equação de restrição a aplicar no *Solver*. O valor obtido é meramente indicativo e uma estimativa dos requisitos.

A produção de anéis estimada nas células onde são utilizadas as fresas de 1,6 mm é de 15.335.000. Assim:

$$C = \frac{1.000 \cdot 68}{15.335.000} \cdot 112,36 = 0,50 \frac{\text{€}}{\text{mil anéis}}$$

$$G = 68 \cdot 112,36 = 7.640,5 \text{ €}$$

Este gasto, G, representa agora 11% do custo previsto do total das ferramentas de arranque de apara do 2º semestre de 2015. Resumindo, obtém-se a Tabela 6.10:

Tabela 6.10. Custo por mil anéis e gasto total com fresas no 2ºS de 2015 na fábrica.

| 2º Semestre 2015 | |
|-------------------------------------------|---------|
| C [$\frac{\text{€}}{\text{mil anéis}}$] | G [€] |
| 0,50 | 7.640,5 |

Relativamente a meio ano de 2014:

$$Savings_G = \frac{\frac{36.068}{2} - 7.640,5}{\frac{36.068}{2}} = 58\%$$

Ou, por mil anéis:

$$Savings_c = \frac{1,46 - 0,5}{1,46} = 66\%$$

Resumindo, obtém-se a Tabela 6.11:

Tabela 6.11. Melhorias entre o 2ºS de 2015 e meio ano de 2014 na fábrica.

| | vs 2014 | |
|----------|----------------------|----------------------|
| 2ºS 2015 | Savings _c | Savings _G |
| | 54% | 49,5% |

E relativamente ao primeiro semestre:

$$Savings_G = \frac{9.101 - 7.640,5}{9.101} = 16\%$$

Ou, por mil anéis:

$$Savings_c = \frac{0,67 - 0,5}{0,67} = 25\%$$

Resumindo, obtém-se a Tabela 6.12:

Tabela 6.12. Melhorias entre o 2ºS de 2015 e o 1ºS de 2015 na fábrica.

| | | vs 1ºS 2015 | |
|----------|----------------------|----------------------|--|
| 2ºS 2015 | Savings _c | Savings _G | |
| | 54% | 49,5% | |

6.1.3.2. Célula 13

Estima-se que a produção de anéis da célula 13 seja de 2.623.035. O consumo de fresas estimado é obtido da Tabela 6.9:

$$N_f = 4 \cdot x_{4,1} = 4 \cdot 6 = 24$$

Obtendo-se:

$$C = \frac{1.000 \cdot 24}{2.623.035} \cdot 112,36 = 1,03 \frac{\text{€}}{\text{mil anéis}}$$

$$G = 24 \cdot 112,36 = 2.697 \text{ €}$$

Resumindo, obtém-se a Tabela 6.13:

Tabela 6.13. Custo por mil anéis e gasto total com fresas no 2ºS de 2015 na célula 13.

| 2º Semestre 2015 | |
|-------------------------------------------|-------|
| C [$\frac{\text{€}}{\text{mil anéis}}$] | G [€] |
| 1,03 | 2.967 |

Relativamente a meio ano de 2014:

$$Savings_G = \frac{\frac{16.854}{2} - 2.697}{\frac{16.854}{2}} = 84\%$$

Ou, por mil anéis:

$$Savings_C = \frac{7,56 - 1,03}{7,56} = 86\%$$

Resumindo, obtém-se a Tabela 6.14:

Tabela 6.14. Melhorias entre o 2ºS de 2015 e meio ano de 2014 na célula 13.

| | vs 2014 | |
|----------|----------------------|----------------------|
| 2ºS 2015 | Savings _C | Savings _G |
| | 86% | 84% |

E relativamente ao primeiro semestre:

$$Savings_G = \frac{6.180 - 2.697}{6.180} = 56\%$$

Ou, por mil anéis:

$$Savings_C = \frac{2,99 - 1,03}{2,99} = 66\%$$

Resumindo, obtém-se a Tabela 6.15:

Tabela 6.15. Melhorias entre o 2ºS de 2015 e o 1ºS de 2015 na célula 13.

| | vs 1ºS 2015 | |
|----------|----------------------|----------------------|
| 2ºS 2015 | Savings _C | Savings _G |
| | 66% | 56% |

6.1.4. Visão geral 2015

6.1.4.1. Fábrica

Contando com as previsões, 2015 vai ser concluído com uma produção anual de 29.000.000 anéis nas células em que são utilizadas as fresas de 1,6 mm. O consumo de fresas anual deverá ser no mínimo de 150 fresas. Com isto:

$$C = \frac{1.000 \cdot 150}{29.000.000} \cdot 112,36 = 0,58 \frac{\text{€}}{\text{mil anéis}}$$

$$G = 150 \cdot 112,36 = 16.854\text{€}$$

Resumindo, obtém-se a Tabela 6.16:

Tabela 6.16. Custo por mil anéis e gasto total com fresas em 2015 na fábrica.

| 2015 | |
|------------------------------------------------------|--------|
| $C \left[\frac{\text{€}}{\text{mil anéis}} \right]$ | G [€] |
| 0,58 | 16.854 |

Comparando com 2014:

$$Savings_G = \frac{36.068 - 16.854}{36.068} = 53\%$$

Ou, por mil anéis:

$$Savings_C = \frac{1,46 - 0,58}{1,46} = 60\%$$

O consumo de fresas representa, nesta situação, 11% do consumo total de ferramentas de apara. Resumindo, obtém-se a Tabela 6.17:

Tabela 6.17. Melhorias entre 2015 e 2014 na fábrica.

| | vs 2014 | |
|------|----------------------|----------------------|
| 2015 | Savings _C | Savings _G |
| | 60% | 53% |

6.1.4.2. Célula 13

Novamente, contando com as previsões, a produção na célula 13 em 2015 será de 4.687.500 anéis. O consumo de fresas anual deverá ser de pelo menos 80 unidades. Com isto:

$$C = \frac{1.000 \cdot 80}{4.687.500} \cdot 112,36 = 1,92 \frac{\text{€}}{\text{mil anéis}}$$

$$G = 80 \cdot 112,36 = 8.989 \text{ €}$$

Resumindo, obtém-se a Tabela 6.18:

Tabela 6.18. Custo por mil anéis e gasto total com fresas em 2015 na célula 13.

| 2015 | |
|-------------------------------------------|-------|
| C [$\frac{\text{€}}{\text{mil anéis}}$] | G [€] |
| 1,92 | 8.989 |

Comparando com 2014:

$$Savings_G = \frac{16.854 - 8.989}{16.854} = 47\%$$

Ou, por mil anéis:

$$Savings_C = \frac{7,56 - 1,92}{7,56} = 75\%$$

Resumindo, obtém-se a Tabela 6.19:

Tabela 6.19. Melhorias entre 2015 e 2014 na célula 13.

| | vs 2014 | |
|------|----------------------|----------------------|
| 2015 | Savings _C | Savings _G |
| | 75% | 47% |

6.2. Análise de produtividade

A análise de produtividade reflete o melhor aproveitamento do tempo de trabalho das célula, mostrando de que maneira a medida corretiva influencia o processo.

Sempre que uma fresa fratura, ao colocar uma nova desafia-se o conjunto do torno. Isto é claro, ao mudar a posição axial das fresas perde-se o valor da abertura livre e folga que estavam a ser obtidos. Assim sendo, desperdiça-se tempo a afinar novamente o conjunto, coisa que não acontece tão frequentemente se as fresas não partirem. Em média, o tempo utilizado no processo de troca de uma fresa, chamado T_f , demora 15 minutos. O tempo utilizado em troca de ferramentas num dado período t , é dado pela equação (6.5):

$$T_f = \frac{15 \cdot N_f + 15 \cdot A_{f1} + 15 \cdot A_{f2}}{t} \quad (6.5)$$

6.2.1. Na fábrica

Assumindo que em 2014 não foram utilizadas fresas afiadas na célula 13, o que é uma premissa falsa mas não foge muito à realidade, o tempo médio mensal utilizado em trocas de ferramentas em 2014 é dado pelo número de fresas utilizadas nesse mesmo ano multiplicado por T_f e dividido por 12 meses. Sabendo que cada fresa pode ser afiada duas vezes, serão feitas três trocas de ferramenta por fresa que não fratura. Em 2014 foram utilizadas cerca de 150 fresas na célula 13, restando 171 para obter o total anual de 321. O tempo de troca de ferramentas mensal após implementação da medida corretiva é dado por:

$$T_{f_{2014}} = \frac{15 \cdot (150 + 3 \cdot 171)}{12} = 828,75 \text{ minutos/mês}$$

Já no 1º semestre de 2015, o tempo de setup média mensal, sabendo que apenas 20 fresas foram afiadas, é dado por:

$$T_{f_{1S}} = \frac{15 \cdot (35 + 3 \cdot 45)}{6} = 425 \text{ minutos/mês}$$

Sabe-se que a estimativa do número mínimo do consumo de fresas para o 2º semestre de 2015 é de 68 unidades. Assim, o tempo de troca de ferramentas após implementação da medida corretiva é:

$$T_{f_{2S}} = \frac{15 \cdot 68 \cdot 3}{6} = 255 \text{ minutos/mês}$$

Com isto é possível calcular a melhoria de produtividade, η , em relação à produtividade de 2014 através da equação (6.6) e em relação à produtividade do 1º semestre de 2015 através da equação (6.7):

$$\eta = \frac{T_{f_{2014}} - T_{f_{2S}}}{T_{f_{2014}}} \quad (6.6)$$

$$\eta = \frac{828,75 - 255}{828,75} = 69\%$$

$$\eta = \frac{T_{f_{1S}} - T_{f_{2S}}}{T_{f_{1S}}} \quad (6.7)$$

$$\eta = \frac{425 - 255}{425} = 40\%$$

6.2.2. Célula 13

$$T_{f_{2014}} = \frac{15 \cdot 150}{12} = 187,5 \text{ minutos/mês}$$

Sabe-se que a estimativa do número mínimo do consumo de fresas para o 2º semestre de 2015 na célula 13 é de 6 novas, 5 afiadas uma vez e uma afiada duas vezes. Assim, o tempo de troca de ferramentas após implementação da medida corretiva é:

$$T_{f_{2S}} = \frac{15 \cdot (6 + 5 + 1)}{6} = 30 \text{ minutos/mês}$$

Com isto é possível calcular a melhoria de produtividade, η , em relação à produtividade de 2014 através da equação (6.8):

$$\eta = \frac{T_{f_{2014}} - T_{f_{2S}}}{T_{f_{2014}}} \quad (6.8)$$
$$\eta = \frac{187,5 - 30}{187,5} = 84\%$$

7. CONCLUSÕES

A primeira conclusão que é possível obter deste trabalho é a da importância do ferramental e da condição em que está. Com a produção na célula 13 de tendência crescente, ter ferramental dedicado para cada anel também é uma medida importante. É feito um investimento de 1620 €, o que, ainda assim, dadas as estimativas do consumo do segundo semestre de 2015, tem um período de retorno de cerca de 37 dias. Isto representa um investimento muito interessante dado o valor extremamente reduzido, quando comparado com o gasto em ferramentas, e as melhorias que proporciona.

O ferramental deve ser trocado ou retificado, se possível, sempre que apresentar condições precárias. A medida corretiva pode ser implementada também nas outras células, caso venha a ser necessário no futuro, ainda que não deva gerar um ganho tão elevado como o que se obteve com as alterações na célula 13.

Os ganhos financeiros são possíveis mesmo com um aumento de produção relativamente a 2014, o que reflete o fraco aproveitamento das fresas nesse período. A base de comparação, por mil anéis, mostra ganhos bastante elevados, ainda que os cálculos sejam feitas pelo limite de ganhos teóricos/máximos. Resumidamente, os ganhos com a medida corretiva em constante funcionamento são os da Tabela 7.1:

Tabela 7.1. Resumo dos ganhos estimados.

| Redução de custos | | |
|--------------------------|---------------------|----------------|
| 2ºS 2015 | vs 2014 | |
| | [/mil anéis] | [total] |
| | 66% | 58% |
| 2ºS 2015 | vs 1ºS 2015 | |
| | [/mil anéis] | [total] |
| | 25% | 16% |
| 2015 | vs 2014 | |
| | [/mil anéis] | [total] |
| | 60% | 53% |

Os ganhos de produtividade são bastante elevados, ainda que a reutilização de ferramentas aumente bastante. Isto só é possível com a resolução do problema da fratura de ferramentas. Na realidade, o tempo de troca de uma ferramenta mantém-se igual, sendo os

ganhos resultantes da redução da improdutividade da máquina e, assim, diminuir o número de trocas a efetuar ao longo do tempo.

Os valores estimados de produtividade para o segundo semestre de 2015, comparadas com o primeiro semestre e com 2014 encontram-se na Tabela 7.2:

Tabela 7.2. Resumo das melhorias de produtividade.

| | |
|-----------------|--------------------------------|
| 2ºS 2015 | Ganhos de produtividade |
| | vs 2014 |
| | 69% |
| | vs 1ºS 2015 |
| | 40% |

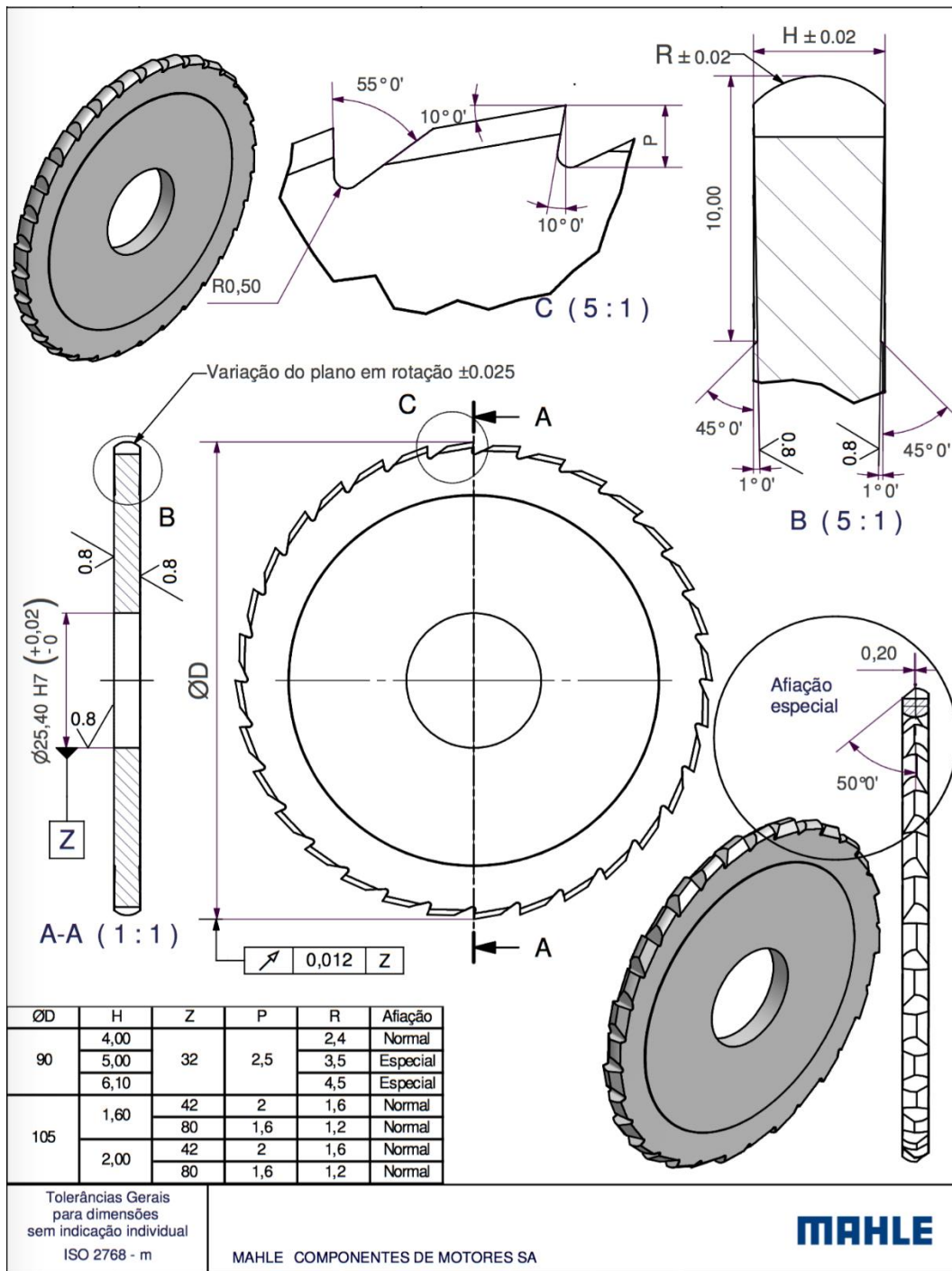
O problema da rebarba deve ser estudado num trabalho posterior, de forma a reduzir o refugo na fábrica. O teste de alteração do sentido de rotação das fresas foi realizado, mas inconclusivo dado o pequeno número de lotes de teste (apenas dois). Ainda assim, com os valores obtidos, o trabalho com rotação invertida problemático certamente não é, pelo que testes em maior escala devem ser efetuados. A qualidade de corte não é de forma alguma pior, mesmo com funcionamento de modo concordante. A análise a ser feita é a de refugo de luz, na inspeção final a 100%, sendo que o problema da rebarba está no consequente mau assentamento. O lixamento das varas no final de cada lote também foi experimentado. Não é um processo complexo, é bastante simples e o resultado é o ideal. A complexidade está em implementar esta ação na célula 13, garantindo que os operadores se preocupam com as quantidades de rebarba (o que muitas vezes não acontece). A alteração do componente da gravadora ainda não foi testado. No entanto, o que se deve ter em conta nesta análise é a quantidade de rebarba que os anéis têm após a passagem por este componente e a quantidade de lixo que é depositado na máquina. Existe um sistema de aspiração, mas uma avaliação da sua capacidade deve ser feita, procedendo-se a alterações no caso de serem necessárias.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- A.S.T.M.E. (1962). *Machining with carbides and oxides*. New York: McGraw-Hill
- Analytic Troubleshooting*. (s.d.). Obtido em 24 de Março de 2015, de Kepner-Tregoe: <http://www.kepner-tregoe.com/training-workshops/our-training-workshops/analytic-trouble-shooting/>
- A.S.M. (1987), *Engineered Materials Handbook*
- Berthold, H. (1957). *Das Messen der Schnittkräfte beim Drehen*. Dresden.
- Company, F. C. (s.d.). *Modes of Failure of Carbide Wear Parts*. Obtido em 13 de Maio de 2015, de http://www.federalcarbide.com/modes_of_failure_of_carbide_wear_parts.html
- Diniz, A. E. (2006). *“Tecnologia da Usinagem dos Materiais (2 ed.)*
- Ferraresi, D. (1990). *Fundamentos da Usinagem dos Metais*. Editora Edgard Blücher Ltda
- GmbH, A. G. (1995). *Piston Ring Manual*. AE Goetze GmbH
- Kobayashi, S., & Thomsen, E. G. (1959). Metal Cutting Analysis. *Journal of Engineering for Industry*, 251-262.
- Lexington Cutter Inc. (22 de Fevereiro de 2015). *Technical Support*. Obtido de LexCut: www.lexcut.com/technical-support
- MAHLE - Componentes de Motores S.A. (17 de Novembro de 2010). Norma S-R-MS-0041-en. *Norma S-R-MS-0041-en*.
- Merchant, M. (1945). *Mechanics of Metal Cutting Process*.
- MS Motor Service*. (02 de Abril de 2015). Obtido em 02 de Abril de 2015, de MS Motor Service: <http://www.ms-motorservice.com/en/>
- Pug, H. L. (1958). Mechanics of the Cutting Process. *The Institution of Mechanical Engineers-Conference on Technology of Engineering Manufacture*, (pp. 273-278). London.
- Richetti, T. C., & Tregoe, B. B. (2001). *Analytic Processes for School Leaders*. ASCD.
- Shawn, M. C. (1965). *Metal Cutting Principles*. The M.I. Press.
- Vieregge, G. (1959). *Zerspanung Der Eisenwerkstoffe*. Düsseldorf: Verlag Stahleisen M. B. H.
- Workshops*. (s.d.). Obtido em 24 de Março de 2015, de Kepner-Tregoe: <http://www.kepner-tregoe.com/training-workshops/our-workshops/>
- Wrublak, O., Pilatti, A. L., & Pedroso, B. (2008). *Parâmetros e métodos de usinagem e sua relação com os custos do processo e o acabamento final do produto*. Paraná, Brasil: UTFPR.

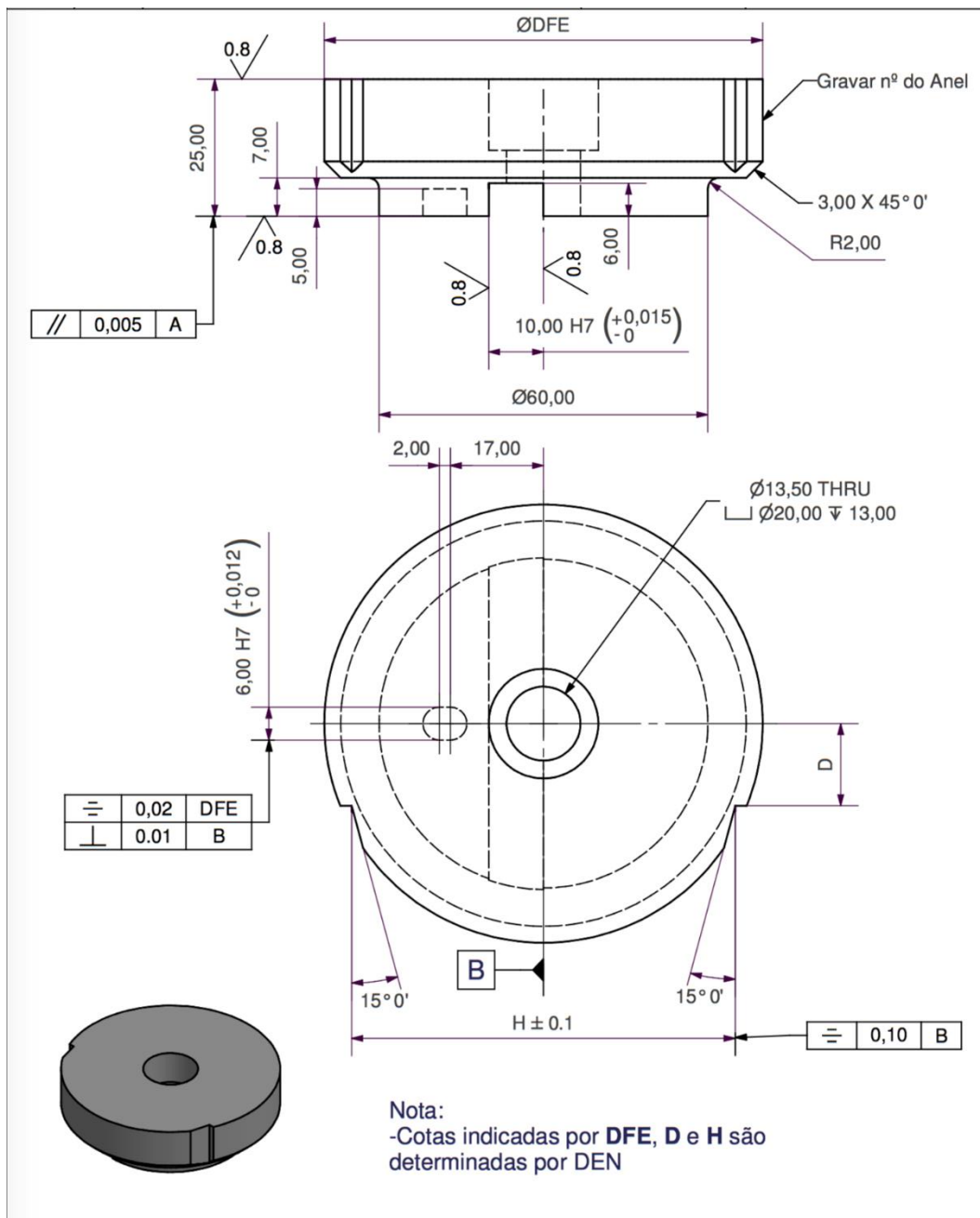
ANEXO A

Desenho das fresas utilizadas na MAHLE Componentes de Motores S.A..



ANEXO B

Desenho das placas de suporte dos anéis.



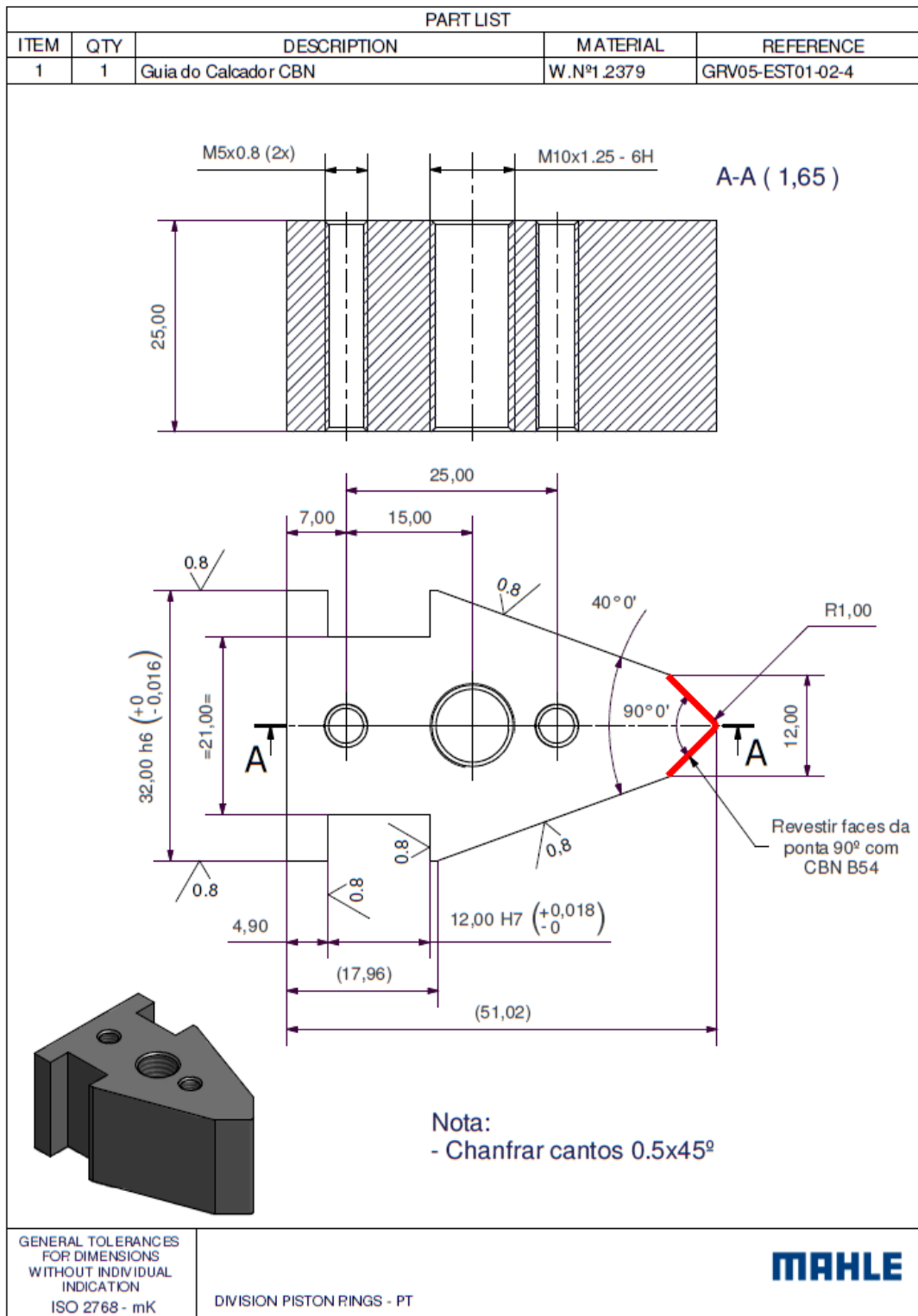
Tolerâncias Gerais
para dimensões
sem indicação individual
ISO 2768 - m

MAHLE COMPONENTES DE MOTORES SA

MAHLE

ANEXO C

Protótipo do componente para máquina gravadora.



ANEXO D

Dados de *Input* e resultados da aplicação do *Solver*.

| Variáveis | x11 | x12 | x13 | x21 | x22 | x23 | x31 | x32 | x33 | x41 | x42 | x43 |
|-----------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Valor variáveis | 9 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 12 | 15 | 6 | 5 | 1 |

| | | | | | | | | | | | | | |
|--------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|
| min(Z) | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 17 |
|--------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|

| | | | | | | | | | | | | | | |
|---|--------|--------|-------|--------|--------|-------|--------|--------|-------|--------|--------|-------|---------|---------|
| 1 | 466666 | 133334 | 66666 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4266660 | 4043820 |
| | 0 | 0 | 0 | 350000 | 100000 | 50000 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 350000 | 117973 |
| | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 350000 | 100000 | 50000 | 0 | 0 | 0 | 2300000 | 2288925 |
| | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 350000 | 100000 | 50000 | 2650000 | 2623035 |
| 2 | 1 | -1 | | 1 | -1 | | 1 | -1 | | 1 | -1 | | 0 | 0 |
| | 1 | | -1 | 1 | | -1 | 1 | | -1 | 1 | | -1 | 0 | 0 |
| | | 1 | -1 | | 1 | -1 | | 1 | -1 | | 1 | -1 | 0 | 0 |
| 3 | 1 | -1 | | 1 | -1 | | 1 | -1 | | 1 | -1 | | 0 | 4 |
| | 1 | | -1 | 1 | | -1 | 1 | | -1 | 1 | | -1 | 0 | 4 |
| | | 1 | -1 | | 1 | -1 | | 1 | -1 | | 1 | -1 | 0 | 4 |
| 4 | 1 | | | | | | | | | | | | 9 | 1 |
| | | | | 1 | | | | | | | | | 1 | 1 |
| | | | | | | | 1 | | | | | | 1 | 1 |
| | | | | | | | | | | 1 | | | 6 | 1 |

ANEXO E

Answer Report após execução do Solver.

Microsoft Excel 15.0 Answer Report

Worksheet: [Solver financeira.xlsx]Sheet1

Report Created: 06/07/15 17:14:53

Result: Solver found a solution. All Constraints and optimality conditions are satisfied.

Solver Engine

Engine: Simplex LP

Solution Time: 42,328 Seconds.

Iterations: 7 Subproblems: 23342

Solver

Options

Max Time Unlimited, Iterations Unlimited, Precision 0,0000000001, Use Automatic Scaling

Max Subproblems Unlimited, Max Integer Sols Unlimited, Integer Tolerance 0%, Assume

NonNegative

Objective Cell (Min)

| Cell | Name | Original Value | Final Value |
|--------|--------|----------------|-------------|
| \$Q\$5 | min(Z) | 0 | 17 |

Variable Cells

| Cell | Name | Original Value | Final Value | Integer |
|--------|---------------------|----------------|-------------|---------|
| \$E\$3 | Valor variáveis x11 | 0 | 9 | Integer |
| \$F\$3 | Valor variáveis x12 | 0 | 0 | Integer |
| \$G\$3 | Valor variáveis x13 | 0 | 1 | Integer |
| \$H\$3 | Valor variáveis x21 | 0 | 1 | Integer |
| \$I\$3 | Valor variáveis x22 | 0 | 0 | Integer |
| \$J\$3 | Valor variáveis x23 | 0 | 0 | Integer |
| \$K\$3 | Valor variáveis x31 | 0 | 1 | Integer |
| \$L\$3 | Valor variáveis x32 | 0 | 12 | Integer |
| \$M\$3 | Valor variáveis x33 | 0 | 15 | Integer |
| \$N\$3 | Valor variáveis x41 | 0 | 6 | Integer |
| \$O\$3 | Valor variáveis x42 | 0 | 5 | Integer |
| \$P\$3 | Valor variáveis x43 | 0 | 1 | Integer |

Constraints

| Cell | Name | Cell Value | Formula | Status | Slack |
|-----------------------|------|------------|------------------|-------------|-------|
| | | | | | 22284 |
| \$Q\$7 | | 4266660 | \$Q\$7>=\$R\$7 | Not Binding | 0 |
| | | | | | 23202 |
| \$Q\$8 | | 350000 | \$Q\$8>=\$R\$8 | Not Binding | 7 |
| \$Q\$9 | | 2300000 | \$Q\$9>=\$R\$9 | Not Binding | 11075 |
| \$Q\$10 | | 2650000 | \$Q\$10>=\$R\$10 | Not Binding | 26965 |
| \$Q\$11 | | 0 | \$Q\$11>=\$R\$11 | Binding | 0 |
| \$Q\$12 | | 0 | \$Q\$12>=\$R\$12 | Binding | 0 |
| \$Q\$13 | | 0 | \$Q\$13>=\$R\$13 | Binding | 0 |
| \$Q\$14 | | 0 | \$Q\$14<=\$R\$14 | Not Binding | 4 |
| \$Q\$15 | | 0 | \$Q\$15<=\$R\$15 | Not Binding | 4 |
| \$Q\$16 | | 0 | \$Q\$16<=\$R\$16 | Not Binding | 4 |
| \$Q\$17 | | 9 | \$Q\$17>=\$R\$17 | Not Binding | 8 |
| \$Q\$18 | | 1 | \$Q\$18>=\$R\$18 | Binding | 0 |
| \$Q\$19 | | 1 | \$Q\$19>=\$R\$19 | Binding | 0 |
| \$Q\$20 | | 6 | \$Q\$20>=\$R\$20 | Not Binding | 5 |
| \$E\$3:\$P\$3=Integer | | | | | |