



**Estudo da influência das tensões residuais na fractura  
catastrófica de rodas dentadas em serviço**

**Marcelo José Rodrigues Castanheira Sousa**

Relatório de estágio e projecto para a obtenção do grau de Mestre em:

**Engenharia Industrial**

**Ramo Engenharia Mecânica**

**Dezembro de 2010**



**Estudo da influência das tensões residuais na fractura  
catastrófica de rodas dentadas em serviço**

**Marcelo José Rodrigues Castanheira Sousa**

Relatório de estágio e projecto para a obtenção do grau de Mestre em:

**Engenharia Industrial**

**Ramo Engenharia Mecânica**

Orientador: João Eduardo Ribeiro (Instituto Politécnico de Bragança)

Supervisor na empresa: Luís Sousa (A. Brito – Indústria Portuguesa de Engrenagens, S.A.)

**Dezembro de 2010**

# Agradecimentos

Os primeiros agradecimentos são direccionados ao Prof. Dr. João Eduardo Ribeiro pela orientação exercida ao longo deste período, pelos momentos de discussões e desafios crescentes e enriquecidos com os seus conhecimentos que permitiram a conclusão deste trabalho de forma clara e objectiva.

Agradeço à empresa “A. Brito Indústria Portuguesa de Engrenagens S.A.” do Porto e especial ao Eng.º Álvaro Brito e Dr. Afonso Brito pela oportunidade de estágio oferecida.

Agradeço ao Prof. Dr. Hernani Lopes, pela inestimável partilha de conhecimentos e apoio na componente experimental do trabalho, bem como, nas incedíveis e valiosas sugestões para a elaboração deste relatório.

Ao departamento técnico da empresa, Eng.º Vaz, Eng.º Vicente, Sr. Sérgio Sousa, Sr. Fábio Cruz e Sr. Hugo Mendes, por toda a disponibilidade prestada. Agradeço também ao responsável pelo Departamento da Produção, Eng.º Duarte Reis, e ao Departamento da Qualidade, Sr. André Cardoso, pelos ensinamentos e sua disponibilidade.

Um agradecimento especial ao Eng.º Luís Sousa pela sua amabilidade, ajuda na integração na empresa, disponibilidade e orientação ao longo do período de estágio na empresa. Ao Sr. Francisco Barbosa pelos sábios ensinamentos decorrentes da sua longa experiência, disponibilidade e companheirismo.

Aos colegas de estágio Daniel Coelho e Paulo Pereira pela troca de conhecimentos. Finalmente, a todo o pessoal da empresa pelo acolhimento, simpatia e ensinamentos transmitidos.

Agradeço também a todos os docentes do curso de Engenharia Mecânica da ESTiG, que contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao técnico do LOM (Laboratório de Oficinas Mecânicas) pelos serviços prestados durante este projecto.

Aos meus pais José Carlos e Maria Felisbina por serem simplesmente a razão de todos os meus esforços, sempre me dando carinho, atenção e apoio para enfrentar todas as dificuldades para além do imprescindível apoio financeiro.

A toda a minha família pelo incentivo, confiança e atenção demonstrados ao longo de todos os anos da minha vida académica.

À Elsa pela atenção e carinho demonstrados e compreensão nos inúmeros momentos de ausência ao longo deste período.

A todos os meus amigos que sempre me deram força para continuar a lutar à procura deste objectivo, mesmo nos momentos mais difíceis, em especial ao amigo e companheiro, Manuel Dias, pela inscrição no ensino superior e incentivo a frequentar o curso de Engenharia Mecânica.

A todos aqueles que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho e que por descuido eu tenha esquecido de citar, os meus sinceros agradecimentos.

A Deus por me proporcionar mais esta conquista.

## Resumo

Este relatório tem como principal objectivo apresentar o trabalho desenvolvido no estágio efectuado na empresa “A. Brito Indústria Portuguesa de Engrenagens S.A.” localizada na cidade do Porto.

A principal actividade da empresa está relacionada com o projecto e fabrico de engrenagens e elementos de transmissão para alfaías agrícolas, sendo um dos principais clientes a empresa “Herculano Alfaías Agrícolas S.A.”. Nos últimos anos, a empresa tem apostado na vertente do fabrico de pequenas séries e no acondicionamento de peças usadas nas barragens e centrais hidroeléctricas, absorvendo grande parte dos recursos da empresa.

Durante este estágio tive a oportunidade de colaborar nas principais secções e departamentos desta empresa. Neste âmbito, foram desenvolvidas diversas actividades que envolveram a realização de trabalhos nos domínios do controlo da qualidade, na produção peças, no desenvolvimento de novos produtos, na elaboração de propostas fornecimento de equipamento e projecto de assistido por computador.

Na passagem pelo departamento da qualidade foi-me proposto a análise da fractura sistemática dos dentes numa série de rodas dentadas, utilizadas em alfaías agrícolas. Para a análise das prováveis causas da falha nas engrenagens foi necessário realizar um estudo pormenorizado de todo o seu processo de fabrico, bem como, das técnicas de avaliação das tensões residuais.

Por falta de equipamento laboratorial na empresa, o estudo foi realizado no Instituto Politécnico de Bragança e envolveu simulações numéricas, pelo método dos elementos finitos, análise experimental da distribuição das tensões residuais nas engrenagens provocadas pelo processo de fabrico e/ou durante o serviço.

O estudo numérico teve como objectivo determinar as regiões críticas da concentração de tensões. A partir destes dados procedeu-se à medição experimental das tensões residuais utilizando as técnicas do furo e o método do seccionamento. Em paralelo foi também realizado uma análise metalográfica no sentido de identificar eventuais defeitos microscópicos ou micro-fissuras causadoras da fractura dos dentes por fadiga.

Os resultados comparativos entre as engrenagens antes e após serviços permitiram identificar um significativo aumento nos valores das tensões residuais. Estes devem-se provavelmente a solicitações muito superiores ao valor de projecto, as quais conduzem a esforços elevados na raiz dos dentes, originando a sua ruptura.

**Palavras-chave:** engrenagem, tensões residuais, extensometria com o método do furo, método do seccionamento.

## Abstract

The main objective of this report is to present the work performed on stage at the company "A. Brito Portuguese Industry Gears, S.A. " located in the city of Oporto.

The core business of this company is related to the design and manufacture of gears and transmission elements for agricultural, been is a major enterprise customers "Herculano Alfaias Agrícolas S.A.". In recent years, the company has focused on aspects of small-scale manufacturing and reconditioning of parts used in dams and hydroelectric power, consuming a large capacity of company resources.

During this stage I had the opportunity to collaborate in the main sections and departments of this company. In this context, were developed several activities such as carrying out work in the areas of quality control, production parts, the development of new products, and development of proposals and provision of equipment for computer-aided design.

During my work in the quality department, it was proposed to perform the analysis of defects found in one series of sprockets, used in agricultural industry. For the analysis of the probable causes of failure in gears was necessary to make a detailed study of its entire manufacturing process, as well as the techniques for the evaluation of residual stresses.

The lack of laboratory equipment in the company, the study was carryout in the Polytechnic Institute of Bragança and involved the numerical simulations by finite element method, experimental analysis of the distribution of residual stresses in the gears caused by the manufacturing process and /or during service.

The numerical study aimed to determine the critical regions of stress concentration. From these data we proceeded to the experimental measurement of residual stresses using the hole-drilling and sectioning methods. In parallel was also carried out a metallographic analysis to identify any microscopic defects or micro-cracks that could be the probable cause of tooth fracture caused by fatigue.

The comparative results between the gears before and after services allow identifying a significant increase in the values of the residual stresses. These are probably resulting from forces higher than the design value, which leads to high stresses at the root of the teeth, causing its rupture.

**Keywords:** gear, residual stress, strain gage, strain gages with the hole-drilling method, sectioning method, metallographic analysis.

# Índice

<b>Capítulo 1</b>	<b>Enquadramento .....</b>	<b>12</b>
1.1.	Introdução .....	12
1.1.1.	Contextualização do problema .....	13
1.1.2.	Relacionamento entre empresas e universidades.....	13
<b>Capítulo 2</b>	<b>Descrição da empresa.....</b>	<b>14</b>
2.1.	Apresentação do local de estágio .....	14
2.1.1.	Descrição das instalações .....	16
2.1.2.	Organização do processo produtivo .....	16
<b>Capítulo 3</b>	<b>Trabalhos realizados na empresa.....</b>	<b>18</b>
3.1.	Introdução .....	18
3.2.	Departamento Técnico .....	18
3.2.1.	Propostas de fornecimento .....	18
3.2.2.	Orçamentação.....	20
3.2.3.	Desenhos de definição.....	20
3.2.4.	Desenvolvimento de ferramentas .....	21
3.2.5.	Estudos e projecto .....	23
3.2.6.	Permutadores de calor .....	26
3.3.	Departamento da qualidade.....	26
<b>Capítulo 4</b>	<b>Caso de estudo.....</b>	<b>29</b>
4.1.	Introdução .....	29
4.2.	Contextualização da roda dentada.....	31
4.2.1.	Equipamento de serviço .....	31
4.2.2.	Geração da Roda Z44.....	31
4.2.3.	Estudo numérico.....	32
<b>Capítulo 5</b>	<b>Tensões Residuais .....</b>	<b>34</b>
5.1.	Fundamentos teóricos.....	34
5.1.1.	Tipos de Tensões Residuais .....	34
5.1.2.	Tensões Residuais Macroscópicas .....	35

5.1.3.	Tensões Residuais Microscópicas .....	35
5.1.4.	Tensões Residuais Submicroscópicas .....	35
5.1.5.	Processos e Mecanismos Geradores de Tensões Residuais.....	36
5.1.6.	Principais Técnicas de Medição de Tensões Residuais.....	37
5.1.7.	Método de seccionamento .....	38
5.1.8.	Técnica do Furo ( <i>Hole Drilling</i> ) .....	39
5.1.9.	Solução Analítica do Método do Furo .....	40
5.1.10.	Análise extensométrica para o furo cego.....	41
<b>Capítulo 6 Causas de falhas em engrenagens .....</b>		<b>44</b>
6.1.	Falhas em engrenagens devido a sobrecargas .....	44
6.2.	Defeitos de tratamentos térmicos .....	44
6.3.	Fadiga de contacto ou “Pitting” .....	44
6.4.	Fadiga por flexão.....	45
6.5.	Escolha de material .....	45
6.6.	Capacidade de carga.....	46
6.7.	Defeitos de rectificação .....	46
6.8.	Propriedades dos aços vs tratamentos termoquímicos .....	46
6.8.1.	Tenacidade .....	46
6.8.2.	Ductilidade .....	47
6.8.3.	Cementação .....	47
6.8.4.	Têmpera .....	47
6.8.5.	Revenido .....	47
<b>Capítulo 7 Procedimento experimental .....</b>		<b>49</b>
7.1.	Introdução .....	49
7.2.	Método do “furo cego” .....	49
7.2.1.	Alinhamento da guia de furação.....	51
7.2.2.	Execução do furo.....	53
7.3.	Método do seccionamento.....	55
7.4.	Análise metalográfica.....	56
<b>Capítulo 8 Discussão de resultados .....</b>		<b>60</b>

8.1. Introdução .....	60
8.2. Análise visual .....	60
8.3. Análise metalográfica.....	61
8.4. Análise pelo método do seccionamento .....	62
<b>Capítulo 9 Conclusões e Trabalhos futuros .....</b>	<b>63</b>
9.1. Conclusões .....	63
9.2. Propostas para trabalhos futuros .....	64
<b>Referências... ..</b>	<b>65</b>
<b>ANEXO A - Tecido produtivo da empresa A.Brito .....</b>	<b>68</b>
<b>ANEXO B - Certificação da empresa A. Brito.....</b>	<b>71</b>
<b>ANEXO C - Desenho de definição Roda Z44 .....</b>	<b>74</b>
<b>ANEXO D - Desenhos de definição (Trabalhos criados durante estágio).....</b>	<b>76</b>

# Índice de Figuras

Figura 1 - Instalações da empresa A. Brito.....	14
Figura 2 - Exemplos de peças produzidas na empresa A. Brito. ....	15
Figura 3 - Projecto de refrigerador.....	15
Figura 4 - Organigrama da empresa A. Brito. ....	16
Figura 5 - Conjunto cónico-recto com fracturas.....	21
Figura 6 - Esquadro.....	22
Figura 7 - Desenvolvimento de ferramentas.....	22
Figura 8 – Perspectiva isométrica da ferramenta usada na maquinagem.....	23
Figura 9 - Patim axial com posição do alvéolo.....	24
Figura 10 - Evolução da pressão alveolar com a temperatura.....	25
Figura 11 - Capacidade de carga do sistema com a evolução da temperatura.....	25
Figura 12 - Patins axiais após maquinagem.....	25
Figura 13 - Permutador de calor.....	26
Figura 14 - Máquina tridimensional de medição BROWN & SHARPE MISTRAL CNC.....	27
Figura 15 - Apalpador.....	27
Figura 16 - Êmbolo dos servomotores tóricos.....	28
Figura 17 - Flanges dos servomotores tóricos submetidos a controlo dimensional.....	28
Figura 18 - Roda devolvida fracturada.....	28
Figura 19 - Roda Z44 (SolidWorks®).....	29
Figura 20 - Fresa axial STK.....	31
Figura 21 - Mecanismo de geração do dentado.....	32
Figura 22 - Resultados obtidos em ANSYS Workbench.....	33
Figura 23 - Esquema do comportamento das tensões residuais nas vizinhanças de uma união por soldadura de chapas finas [2].....	35
Figura 24 - Representação esquemática do princípio da técnica de seccionamento. Os extensómetros estão posicionados na intersecção das linhas ponteadas.....	39
Figura 25 - Obtenção do estado de tensões resultante do alívio provocado pelo furo [5].....	40
Figura 26 - Estado de tensão num furo $P r, \theta$ : (a) antes; (b) depois da maquinagem de um furo passante [11]. .....	40
Figura 27 - Gráfico para determinação dos coeficientes <b>a</b> e <b>b</b> para furos maquinados numa única etapa para rosetas do tipo RE e UL [11].....	41
Figura 28 - Esquema de medição de tensões residuais através do método do furo.....	42
Figura 29 - Extensómetro triaxial (Vishay).....	43
Figura 30 - Limpeza da superfície antes da colagem.....	49
Figura 31 - Roseta de extensómetros, tipo MM CEA-06-062UM-120.....	50
Figura 32 - Posicionamento da roseta de extensómetros na engrenagem.....	50
Figura 33 - Roseta de extensómetros colada.....	50

Figura 34 - Representação da roseta de extensómetros soldados.....	51
Figura 35 - Guia para regulação da roseta com o tripé do RS-200.....	52
Figura 36 - Alinhamento do RS-200 com a estrutura em estudo.....	52
Figura 37 – Imagem obtida na lupa do centro da roseta concêntrico com o engenho de furar.....	53
Figura 38 - Fresa centrada para início das medições, sistema de furação, fresas usadas.....	53
Figura 39 - Equipamento de leitura e gravação de tensões.....	54
Figura 40 - Extensómetros utilizados para a medição de tensões residuais pelo método do seccionamento. .	55
Figura 41 – Montagem utilizada para efectuar o corte de uma secção.....	55
Figura 42 - Secção de material removido.....	55
Figura 43 – Serrote de disco.....	56
Figura 44 – Amostra analisada.....	56
Figura 45 - Equipamento de preparação das amostras (Struers LaboPress-1).....	57
Figura 46 - Equipamento de polimento (Struers RotoPol-21).....	57
Figura 47 - Pano de polimento.....	58
Figura 48 - Amostra polida pronta para se proceder ao ataque químico.....	58
Figura 49 - Vidro de relógio com Nital.....	58
Figura 50 - Passagem abundante de água corrente.....	59
Figura 51 - Superfície atacada.....	59
Figura 52 - Microscópio utilizado para observar as peças.....	59
Figura 53 - Roda Z44 devolvida.....	60
Figura 54 - Aparência do dentado da engrenagem devolvida.....	60
Figura 55 - Aparência da zona de ruptura de material.....	61
Figura 56 - Visualização da profundidade da camada de cementação.....	61

## Índice de tabelas

Tabela 1 – Estrutura de proposta de fornecimento. ....	19
Tabela 2 - Ferramenta de maquinagem 2ª operação de centro (material utilizado).....	23
Tabela 3 – Folha de cálculo das dimensões dos capilares e alvéolos. ....	24
Tabela 4 - Características da Roda Z44.....	29
Tabela 5 - Gama operatória utilizada no processo de geração da engrenagem para estudo. ....	32
Tabela 6 - Mecanismos de geração de tensões residuais em diferentes processos de fabrico [5].....	36
Tabela 7 - Principais métodos de medição de tensões residuais [5] e [6].....	37
Tabela 8 - Valores obtidos pelo método do seccionamento. ....	62

# Capítulo 1 Enquadramento

---

## 1.1. Introdução

Os avanços tecnológicos e ao aumento da competitividade no mercado global, obrigam as empresas a procurarem melhores equipamentos, processos de fabrico e materiais para aumentar a produtividade e a qualidade dos seus produtos. Neste sentido a empresa A. Brito S. A. resolveu apostar no fabrico de pequenas séries e na diversificação de produtos. Dentro desta estratégia, procedeu à modernização do parque de máquinas através de um forte investimento em máquinas de comando numérico CNC. As máquinas CNC apresentam uma elevada flexibilidade e permitem uma grande capacidade de produção a baixos custos com elevada qualidade de fabrico. Contudo, esta evolução de equipamentos é infrutífera se não for acompanhada pela utilização das matérias-primas de melhor qualidade, processos de fabrico e todos os restantes procedimentos envolvidos na concepção de componentes e estruturas na indústria metalomecânica. A apoiar o processo de fabrico, a empresa A. Brito possui um conjunto de departamentos e secções, as quais são responsáveis pelo desenvolvimento, acompanhamento e controlo dos produtos. Durante o meu estágio nesta empresa tive a oportunidade participar nas tarefas desenvolvidas nos diferentes departamentos da empresa, dos quais se destacam o desenvolvimento de novos produtos, a elaboração de propostas fornecimento de equipamento, projecto de assistido por computador e, com especial relevo para o controlo da qualidade. Neste, foi-me proposto estudo de duas engrenagens de dentado recto que sofreram ruptura prematura dos dentes. No sentido de averiguar as possíveis causas desta falha mecânica foi necessário conhecer o processo de fabrico destas engrenagens e condições de funcionamento.

Os processos de fabrico dos componentes devem-se realizar de modo a minimizar o estado de tensão do material. Estes introduzem sempre tensões residuais, as quais são normalmente prejudiciais ao desempenho dos componentes. Com a correcta selecção dos parâmetros e sequência maquinagem consegue-se minimizar o valor destas tensões.

As engrenagens, o principal componente produzido nesta fábrica, são realizadas por diferentes processos de maquinagem e posteriormente sofrem tratamentos termoquímicos. Estes têm por objectivo a melhorar a dureza e a resistência superficial sem comprometer a sua tenacidade. Contudo, estes tratamentos podem originar elevados valores de tensões residuais, como tal, devem ser executados em ambientes estáveis e controlados.

Toda esta conjugação de factores tem como propósito a obtenção de componentes com baixos valores de tensões residuais de modo a minimizar o risco da sua falha catastrófica, por um lado, resultante da conjugação das tensões produzidas em serviço e as tensões residuais, ou por outro, resultante da solicitação cíclica produzindo ruptura fadiga do material.

Neste trabalho é igualmente apresentada um caso de estudo da ruptura dos dentes ocorrida numa série de engrenagens, tendo sido analisado o nível de tensões residuais produzidas pelos processos de fabrico e pelos tratamentos termoquímicos. De igual forma, e no sentido de identificar as prováveis causas da falha, foram realizados no Instituto Politécnico de Bragança um conjunto de ensaios experimentais que envolveram a

medição das tensões residuais à superfície, realizadas com base nos métodos do furo e do seccionamento, e a análise metalográfica das engrenagens.

### **1.1.1. Contextualização do problema**

Numa situação ideal, as engrenagens utilizadas nas mais variadas situações e projectos estariam apenas sujeitas aos esforços decorrentes da sua utilização. Na realidade, os esforços a que as engrenagens estão sujeitas são apenas um dos factores geradores de tensões residuais. Acresce-se a estas as tensões provocadas por gradientes térmicos e por processos de maquinagem. Neste contexto, as tensões residuais, são especialmente perigosas pelo facto de se somarem às tensões de serviço. Esta combinação pode atingir valores próximos ou até superiores ao estado de tensão admissível pelo material, o qual pode levar ao colapso da estrutura ou do equipamento sem aviso prévio. Deste modo, é importante a determinação e a quantificação do estado de tensões instalada nas engrenagens.

Neste trabalho foram utilizadas duas rodas dentadas, uma nova e outra fracturada após utilização, material cedido pela empresa A. Brito, fabricante de engrenagens, também vocacionado para a produção e recondição de produtos relacionados com a indústria metalomecânica.

### **1.1.2. Relacionamento entre empresas e universidades**

Este trabalho tem uma vertente diferente no que diz respeito à base de realização, visto demonstrar a cooperação entre empresas e ensino superior na tentativa de identificar as causas prováveis da falha ocorrida numa série de engrenagens fabricadas pela empresa A. Brito S.A. No que diz respeito ao relacionamento entre empresas e o ensino superior em Portugal, deparamo-nos, basicamente, com uma fraca cooperação. Como o tecido produtivo de Portugal é caracterizado por pequenas e médias empresas, o volume de negócios dificulta a estreita cooperação com o ensino superior. Outra justificação para este reduzido relacionamento está no fraco investimento na investigação das empresas, onde se procura contornar as dificuldades, sem muitas vezes estudar a origem do problema. Normalmente, o contacto com as instituições de investigação associadas ao ensino superior ocorre quando se procura inovar, desenvolver novos produtos e/ou não se dispõem dos recursos necessários para solucionar os problemas graves. Neste domínio, a empresa A. Brito S.A. destaca-se do panorama nacional por apresentar uma forte componente de investigação aplicada, tendo participado em diversos projectos de investigação europeus associado ao INEGI (Instituto Nacional de Engenharia e Gestão Industrial), sendo os mais recentes os projectos Craft BE-S2-5389 e o CASAM.

# Capítulo 2 Descrição da empresa

---

## 2.1. Apresentação do local de estágio

A empresa “A. Brito – Indústria Portuguesa de Engrenagens, S.A.” pertence ao sector da metalomecânica e fica situada na cidade do Porto com a seguinte morada: Estrada Interior da Circunvalação, 5109 – 4350-119 Porto – Portugal.



**Figura 1 - Instalações da empresa A. Brito.**

Esta foi fundada em 1981 pelos irmãos Álvaro Brito e Augusto Brito, sob a designação de "A. Brito, Lda.", e iniciou a sua actividade na Rua do Freixo, na cidade do Porto, onde ocupava um espaço com a área de 87 m<sup>2</sup>, dedicando-se principalmente à reparação de peças e fabrico unitária de componentes mecânicos. No desenvolvimento da sua actividade industrial e para satisfazer novos clientes nas áreas de fabrico de equipamentos e de maquinaria agrícola, adquiriu a 1ª máquina CNC em 1984. Nos meados da década de 80, em 1985, foram adquiridas as actuais instalações, situadas na Estrada Interior da Circunvalação, cidade do Porto.

Com o aumento das encomendas dos clientes nacionais e estrangeiros, foram adquiridos em 1990 diversos equipamentos de comando numérico: centros de maquinagem horizontais CNC, tornos horizontais CNC e rectificadora CNC. Já em 2000 realizou-se a ampliação das instalações, com a construção de um novo edifício de 1.100 m<sup>2</sup>. Este edifício alberga hoje o sector administrativo, qualidade, gabinetes e zonas sociais. Actualmente, as instalações da empresa A. BRITO ocupam uma área coberta de 3000 m<sup>2</sup> implantada numa área total de 5000 m<sup>2</sup>.

Em 2005, a designação da empresa passou para “A. Brito – Indústria Portuguesa de Engrenagens, S.A.”.

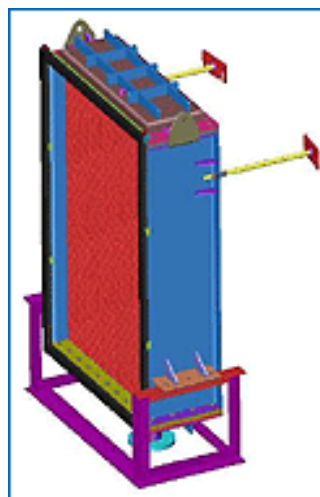
Hoje, a empresa é reconhecida em Portugal e no estrangeiro pela sua elevada qualidade no fabrico de componentes mecânicos, estando a sua produção vocacionada para componentes de precisão, equipamento de transmissão, manutenção e reparação de equipamentos para as barragens e centrais hidroeléctricas. Mas, o

seu ponto forte é a criação de praticamente todo o tipo de engrenagens, possuindo já um vasto conhecimento acumulado nesta área.



**Figura 2 - Exemplos de peças produzidas na empresa A. Brito.**

Em complemento ao serviço de reparação de equipamentos de centrais hidroeléctricas, a empresa tem a capacidade de fabricar permutadores de calor, utilizados em sistemas de refrigeração de alternadores existentes nestas centrais.



**Figura 3 - Projecto de refrigerador.**

### 2.1.1. Descrição das instalações

Os departamentos administrativos, da qualidade, gabinete técnico, de projecto e zonas sociais ocupam um edifício com uma área de 1100 m<sup>2</sup>. O sector de produção localiza-se num pavilhão anexo com aproximadamente uma área de 2000m<sup>2</sup>.

Ao nível organizacional, destacam-se os seguintes departamentos:

- Departamento de Produção;
- Departamento Comercial;
- Departamento Técnico;
- Departamento Técnico/Produção;
- Departamento de Higiene, Segurança e Ambiente;
- Departamento Administrativo e Financeiro;
- Departamento Qualidade / Produção; e
- Departamento Qualidade / HSA (Higiene e Segurança Ambiental).

Os vários sectores e departamentos na empresa regem-se segundo a hierarquia do organigrama apresentado na Figura 4.



Figura 4 - Organigrama da empresa A. Brito.

### 2.1.2. Organização do processo produtivo

O processo produtivo foi otimizado ao longo dos anos e apresenta hoje uma configuração que permite minimizar o tempo de espera e custos. A localização das máquinas e das matérias-primas, ferramentas, utensílios, bancadas permitem o fácil acesso em segurança a todos os sectores da produção.

Na empresa A. Brito S.A. todas as máquinas estão dispostas de acordo com a família a que pertencem e a função que desempenham, de modo uma melhor gestão de recursos e seguindo uma sequência lógica operações. As operações complementares ao fabrico, como a parte de fornos, pintura, serralharia, metrologia, etc, estão dispostas em divisões paralelas ao tecido produtivo.

O tecido produtivo da empresa é constituído pelos seguintes equipamentos:

- Centros de maquinagem CNC;
- Tornos CNC;
- Rectificadoras CNC;
- Máquinas-ferramentas convencionais e universais;
- Máquinas de rectificação;
- Máquinas de talhar engrenagens;
- Equipamento diverso;
- Prensa hidráulica de desempenho DUNKES HR25, Pressão 250 kN, curso 160mm;
- Equipamento de soldadura MIG-MAG;
- Serrote de fita automática dia. 250;
- Forno de normalização FULMINA 1000°, 1000x1000x800;
- Forno eléctrico de diâmetros 600mm e 1000 mm;
- Facejamento e centragem, diâmetro máximo de 90mm;
- Diverso equipamento de metrologia (durómetro, micrómetros, planos de granito, etc.); e
- BROWN & SHARPE MISTRAL CNC.

# Capítulo 3 Trabalhos realizados na empresa

---

## 3.1. Introdução

No período de estágio foram várias as actividades realizadas na empresa pelo autor, o qual teve a oportunidade de colaborar nos departamentos técnico e da qualidade. De entre as várias actividades realizadas apresentam-se as que tiveram maior destaque:

- Projecto;
- Desenvolvimento e estudo de produtos;
- Realização de propostas de fornecimento de equipamento;
- Produção;
- Serralharia; e
- Controlo de qualidade.

Em seguida far-se-á uma breve descrição destes departamentos, referindo as actividades realizadas.

## 3.2. Departamento Técnico

Neste departamento são realizados o estudo da viabilidade de projectos propostos ou desenvolvimento de novos projectos. Este departamento faz a ponte entre a capacidade produtiva da empresa e os requisitos impostos, procurando muitas das vezes a solução para os problemas a apresentados pelos clientes. Este departamento funciona em *open office* com computadores dotados de programas dedicados ao desenho assistido por computador, nomeadamente *AutoCad®* e *SolidWorks®*. É com base nestes programas que são os estudos e criados os desenhos de definição necessários à produção.

Para o fabrico de conjuntos de rodas dentadas, sem fins, etc., está disponível um algoritmo para o cálculo de engrenagens, onde são obtidas as dimensões de funcionamento da engrenagem e os parâmetros de preparação da máquina que vai produzir essas engrenagens.

### 3.2.1. Propostas de fornecimento

Grande parte do volume de negócios da empresa provém de trabalhos de produção e acondicionamento de componentes utilizados em centrais hidroeléctricas.

A formalização da candidatura da empresa a concursos envolve a elaboração de uma proposta de fornecimento de serviços e equipamentos. Esta segue um modelo previamente definido que passa por várias etapas, descritas em seguida:

- Chegada do concurso à empresa;
- Realização de estudos preliminares;
- Pedidos de cotação a fornecedores;

- Realização e entrega da proposta de fornecimento através de correio electrónico, fax, ou mais utilizado, por correio através de envelope lacrado;
- Possíveis esclarecimentos de dúvidas com o adjudicatário;
- Negociação;
- Adjudicação à empresa vencedora; e
- Realização da obra.

A realização de uma proposta de fornecimento é um processo moroso muito meticuloso, cuja complexidade está directamente relacionada com a dimensão e complexidade da obra, sendo seguida uma metodologia para a sua concretização.

Inicialmente faz-se uma leitura exaustiva das condições técnicas no sentido de avaliar a capacidade de cumprir com os requisitos da obra. Neste processo é realizado um procedimento de execução, contactando-se fornecedores para aquisição de componentes, prazos de entrega dos referidos componentes, verificação de existência na empresa de todas as ferramentas necessárias, prazo de conclusão da obra, etc. Para além destas, é necessário cumprir com as condições gerais e as condições especiais, as quais estão relacionadas com as exigências do adjudicatário relativamente às condições de segurança para os trabalhadores, procedimentos de segurança para o material, protecção do meio ambiente, etc.

Faz parte de uma proposta de concurso a seguinte lista definido na Tabela 1:

**Tabela 1 – Estrutura de proposta de fornecimento.**

<b>Separador</b>	<b>Conteúdo</b>
Declaração de Proposta	Concurso a que respeita, empresa em questão, valor da obra;
Mapa de Preços	Preços discriminados por cada operação, preço de transportes, etc.;
Plano de Pagamentos	Preço global da obra, prazo de pagamento, etc.;
Programa de Trabalhos	Indicação de cada operação realizada para a conclusão da obra com o respectivo prazo de realização correspondente a essa operação (adjudicação, aprovisionamento, ensaios, fabrico, montagem, transportes, etc.);
Plano de Qualidade	Certificados de material, consumíveis, controlos dimensionais, etc.;
Meios Humanos	Discriminação de todo o pessoal afecto à obra;
Memória Justificativa	Discricção pormenorizada de todas as operações a realizar (montagem, desmontagem, maquinagem, ensaios prévios e finais, soldadura, pintura);
Subcontratos	Indicação, se necessário, de empresas a contratar para execução de alguns serviços (soldaduras, electricidade, hidráulica, etc.);

Seguidamente estão apresentados alguns dos concursos onde o autor contribuiu para a sua realização:

- Central de France – Substituição dos refrigeradores do alternador;
- Central de France – Chumaceira Pivot;
- Central de Sines – Queimador de Fuel;
- Santa Luzia – Válvulas de admissão dos grupos 1,2 e 4;
- Central de Guilhofrei – Válvula da descarga de fundo;
- ETAR de Sobreiras – Reparação do Compressor;
- Águas do Porto – Turbo compressor; e
- Central de Nseque – Recondicionamento de servomotor tórico (República Democrática do Congo).

### **3.2.2. Orçamentação**

É também no departamento técnico que são feitos orçamentos para produtos e serviços prestados pela empresa. Para os efectuar é utilizado um modelo predefinido, uma folha de Excel, onde estão todos os passos necessários ao preenchimento do orçamento.

Nesta folha são inseridos valores dos custos do material e da mão-de-obra. Relativamente aos custos com mão-de-obra, este campo é preenchido em função das operações realizadas, O qual envolve a análise do tempo preparação das máquinas ferramenta, o tempo unitário de fabrico da peça e custos hora da máquina e funcionário.

Na orçamentação é também contabilizada a criação de ferramentas especiais, a contratação de serviços externos, ensaios prévios (líquidos penetrantes, vibrações, etc.), custos de transportes de peças, tratamentos térmicos ou tratamentos especiais (cromagem) e a certificação de qualidade realizados na empresa.

De referir que a estimativa de tempos de operação numa máquina ferramenta é baseado no histórico de peças semelhantes e é função do material, ferramenta utilizada, capacidade de desbaste, velocidade de corte e outros aspectos relacionados com a maquinagem.

Apresentam-se em seguida alguns dos trabalhos realizados na empresa:

- Santa Luzia – Válvulas de admissão dos grupos 1,2 e 4;
- Conjunto cónico-recto;
- Punzonatrice verticalle;
- Neves&Madeira – Roda Z28;
- Metalcértima – Roda Z154 M12; e
- EDP – Queimador de fuel óleo.

### **3.2.3. Desenhos de definição**

Na maioria dos casos o desenho de definição é realizado com base em *croquis*, os quais fornecem um registo gráfico das principais cotas referentes a um componente.

Uma outra situação comum na empresa é a reparação de componentes únicos degradados, para os quais não existe desenhos de definição. Nestes casos, recorre-se ao processo de engenharia inversa, que passa,

numa primeira fase, por levantar a forma do componente, para na fase seguinte realizar o desenho de definição. É de referir, que em muitos destes casos as peças estão fracturadas, trazendo enorme dificuldade ao levantamento correcto da sua forma inicial. Nestes casos, a informação é complementada recorrendo a normas ou elementos normalizados de forma a construir o desenho de definição da peça.

Na Figura 5 está representado um conjunto de engrenagens cónico-recto com desgaste elevado e arrancamento de material devido ao processo de fadiga, onde se realizou um *croquis* inicial de cada componente e se retiraram as cotas de funcionamento.



**Figura 5 - Conjunto cónico-recto com fracturas.**

Depois de efectuar o desenho de definição das peças é programada a gama operatória de produção e realizado o respectivo orçamento. Em seguida, é apresentado um orçamento ao cliente com a informação do custo de fabrico das peças.

### **3.2.4. Desenvolvimento de ferramentas**

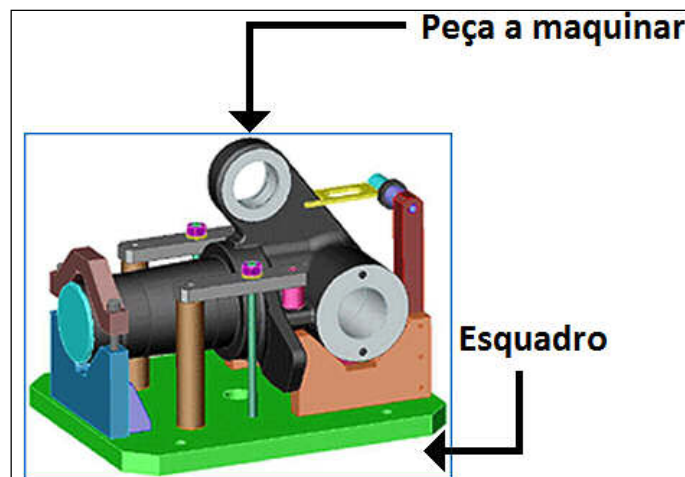
São designadas por ferramentas todos os elementos utilizados no suporte de uma peça que vai ser maquinada na máquina CNC. Esta deve apresentar elevada rigidez de forma a garantir o posicionamento da peça e realização de cotas de elevada precisão.

Estas ferramentas são formadas por vários elementos mecânicos, dispostos de forma a não interferirem com o processo de maquinagem. Os tirantes, parafusos, casquilhos, porcas, peças com desenhos especiais e cavilhas, usados neste tipo de ferramentas, são montados num esquadro que é fixo à bancada de trabalho do centro de maquinagem. Na Figura 6 apresenta-se um exemplo de uma ferramenta deste género.



**Figura 6 - Esquadro.**

Na Figura 7 pode observar-se o exemplo da peça a maquinar (cor preta) o esquadro de apoio (cor verde) e todo o conjunto de componentes necessários para efectuar a respectiva maquinagem.



**Figura 7 - Desenvolvimento de ferramentas.**

Durante o período de estágio na empresa, o autor participou no desenvolvimento de ferramentas de sustentação. Um destes casos foi uma encomenda por parte da Sopaco em que a peça a maquinar provinha de um bruto de fundição, sendo necessárias efectuar diferentes operações de maquinagem para se obter a peça final.

Para facilitar o trabalho, cada máquina CNC possui uma ou mais estruturas de suporte das peças e das ferramentas de sustentação, as quais são designadas de esquadros. Estes possuem dimensões que estão limitadas pelo espaço útil de maquinagem das máquinas CNC, sendo fixas na mesa por ligações *standard*.

O desenvolvimento das ferramentas tem por base as diferentes operações de maquinagem necessárias realizar na mesma máquina, sem que haja necessidade de reposicionar a peça.

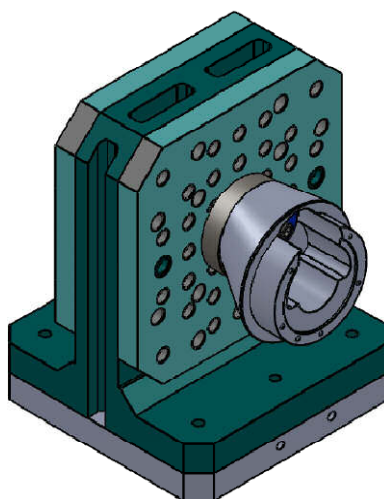
No caso apresentado, a peça necessitava de 3 operações distintas para ficar com as cotas finais.

Para efectuar a ferramenta de maquinagem da 2ª operação foram utilizados os seguintes elementos:

**Tabela 2 - Ferramenta de maquinagem 2ª operação de centro (material utilizado).**

Designação	Quantidade
Esquadro duplo	1
Cavilha	1
Casquilho de centramento	3
Anilha parafuso centro	1
Parafuso unbrako M16x50	3
Anilha furo menor	1
DIN 912 M16x70	2
Apoio	1

Por motivos de confidencialidade não são apresentadas as cotas e propriedades dos materiais definidos para estas ferramentas.



**Figura 8 – Perspectiva isométrica da ferramenta usada na maquinagem.**

### **3.2.5. Estudos e projecto**

Ambos os estudos foram efectuados para o mesmo cliente (EDP) e para a mesma Central Hidroelétrica (Central de France). O primeiro caso centrou-se no estudo da injeção de óleo lubrificante numa chumaceira em funcionamento.

A chumaceira de impulso tem actualmente uma lubrificação do tipo hidrodinâmica (formação da película de óleo com movimento relativo entre as superfícies), e pretende-se passar para uma lubrificação hidrostática (formação da película de óleo sob pressão).

O sistema a implementar deverá não só funcionar como injeção preliminar para provocar a descolagem inicial da parte rotórica, mas também, manter o fornecimento de óleo sob pressão durante o funcionamento do grupo gerador. Apesar de a injeção funcionar de forma permanente, a pressão de injeção deve variar, a qual é determinada com base na velocidade de rotação do grupo. Os níveis limite de pressão de funcionamento são designados por pressão baixa e pressão alta. Assim, quando o grupo iniciar o movimento a injeção do óleo deve-se realizar no modo de pressão alta, após a entrada em rotação e desde que atinja

uma rotação próxima dos 90% do valor nominal, o sistema passa para o modo de pressão baixa (a sustentação do grupo passa a ser feita pela velocidade de rotação e pela baixa pressão). O processo de funcionamento inverte-se quando existir ordem de paragem do grupo. O sistema de injeção preliminar da pressão é feito através de um parafuso fusível inserido nos patins axiais, onde foram criados dois capilares para passar o óleo e preencher o espaço criado na superfície do patim.

Características do capilar e do alvéolo estão representados na Figura 9:

- Diâmetro do alvéolo – 32mm;
- Capilares – 2 capilares com 1,2mm de diâmetro e 30mm de comprimento;

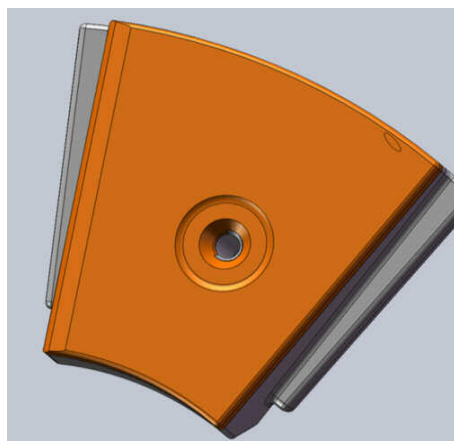


Figura 9 - Patim axial com posição do alvéolo.

Na Tabela 3 está representada a nomenclatura utilizada e as expressões que serviram de base ao cálculo do patim axial.

Tabela 3 – Folha de cálculo das dimensões dos capilares e alvéolos.

Nomenclatura	Designação	Unidades
<b>Carga</b>	<b>W</b>	<b>N</b>
Caudal da Bomba	Qb	m <sup>3</sup> /s
Comprimento do capilar	Lc	M
Diâmetro do capilar	Dc	M
<b>Espessura do filme lubrificante</b>	<b>H</b>	<b>M</b>
Número de alvéolos	Na	#
Número de capilares por alvéolo	Nc	#
<b>Pressão no alvéolo</b>	<b>Pa</b>	<b>N/m<sup>2</sup></b>
Pressão nominal ou Pressão na bomba	Pb	N/m <sup>2</sup>
Raio do alvéolo	Ra	M
Raio exterior	Re	M
Viscosidade dinâmica do óleo à temperatura de funcionamento	Vd	Pa.s
<b>Pressão no alvéolo – Pa</b>		
$Pa = Pb - \frac{128 \cdot Lc \cdot Vd \cdot Qb}{\pi \cdot Na \cdot Nc \cdot Dc^4}$		
<b>Espessura do filme lubrificante – H</b>		
$H = \sqrt[3]{\frac{6 \cdot Vd \cdot Qb \cdot \ln\left(\frac{Re}{Ra}\right)}{\pi \cdot Na \cdot Pa}}$		
<b>Carga – W</b>		

$$W = \frac{\pi \cdot Na \cdot Pa}{2} \cdot \frac{(Re^2 - Ra^2)}{\ln(Re/Ra)}$$

Para definir os parâmetros de funcionamento do sistema e da bomba foi necessário encontrar a concordância da evolução da pressão entre a geometria dos alvéolos e dos capilares. A partir desta análise obtiveram-se os gráficos que correlaciona a evolução da pressão com a temperatura e a capacidade de carga do sistema com a temperatura. Nas figuras 10-12, apresentam-se os gráficos e a peça realizada.

Parâmetros de funcionamento:

- n = 1500 rpm
- R1= 20mm
- Dc=1,2mm
- Caudal = 15litro/min

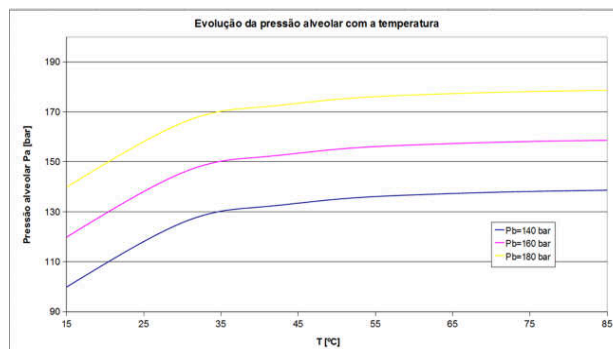


Figura 10 - Evolução da pressão alveolar com a temperatura.

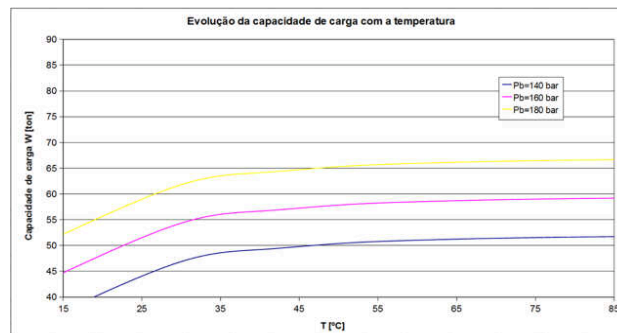


Figura 11 - Capacidade de carga do sistema com a evolução da temperatura.



Figura 12 - Patins axiais após maquinação.

### 3.2.6. Permutadores de calor

Outro estudo efectuado durante o estágio foi desenvolvimento de um sistema de refrigeração constituído por quatro refrigeradores. Este teve como base um modelo anterior, onde havia necessidade de se manterem as dimensões iniciais da estrutura exterior do refrigerador desde sistemas de suporte, espelhos, diâmetro da tubagem e flanges de união. Pretende-se neste novo modelo aumentar a eficiência em relação ao existente.

Para aumentar a eficiência foi necessária a substituição do material da tubagem alhetada por um material com maior capacidade de condução. Outro aspecto melhorado foi a alteração da disposição do feixe de tubos alhetados que ao invés de estar seguido actualmente, no novo projecto iria ficar com disposição em quincôncio, ou seja, uma disposição alternada. Para finalizar, foi introduzido um feixe tubular alhetado que possuía um maior número de alhetas por metro, permitindo aumentar o valor total da área de transferência de calor.



Figura 13 - Permutador de calor.

### 3.3. Departamento da qualidade

A certificação de todas as peças executadas na empresa é efectuada pelo departamento da qualidade. Este também executa o controlo das cotas dimensionais das peças que chegam para reprodução. Este departamento apresenta-se como uma mais-valia para a empresa, pois permite que esta se afirme no mercado ao realizar controlo dimensional e atestando a qualidade das peças.

Este departamento possui vários equipamentos de medição, paquímetros analógicos e digitais, alguns de grande envergadura, micrómetros para as mais variadas medidas, mesas de granito, rugosímetros, durómetro, etc.

Mas um dos maiores investimentos realizados pela empresa ao nível do controlo metrológico foi a aquisição de uma mesa de medida tridimensional. Esta permite o levantamento das mais variadas cotas de controlo com um rigor na ordem do  $1 \mu\text{m}$  em peças de geometria complexa, Figura 14.



**Figura 14 - Máquina tridimensional de medição BROWN & SHARPE MISTRAL CNC.**

As medições neste equipamento são efectuadas através de um apalpador, Figura 15, ligado a uma cabeça giratória com rotação de 360°. Essa cabeça está suspensa numa ponte que permite a deslocação em três eixos e efectuar medições tridimensionais. Pode ser manuseado de forma manual através de um *joystick*, ou depois de efectuada uma programação, pode medir peças automaticamente, por exemplo, para grandes séries de peças e variadas repetições.



**Figura 15 - Apalpador.**

O controlo ambiental da sala onde se efectuam a verificação das cotas é fundamental para conseguir elevada precisão nas medições. Todos estes equipamentos de metrologia estão situados nesta sala climatizada a uma temperatura constante.

O objectivo deste tipo de sala prende-se com o compromisso de entregar ao cliente um produto certificado de elevada qualidade, avaliando-se as peças de forma a garantir as rigorosas cotas. Para minimizar os erros de medição relacionados com a temperatura, inicialmente as peças são transportadas para essa sala climatizada onde aguardam um período de tempo até estabilizarem a sua temperatura e só depois são controladas dimensionalmente.

Alguns dos trabalhos realizados neste departamento foram:

- Controlo de êmbolos dos servomotores tóricos;
- Controlo de flanges dos servomotores tóricos;

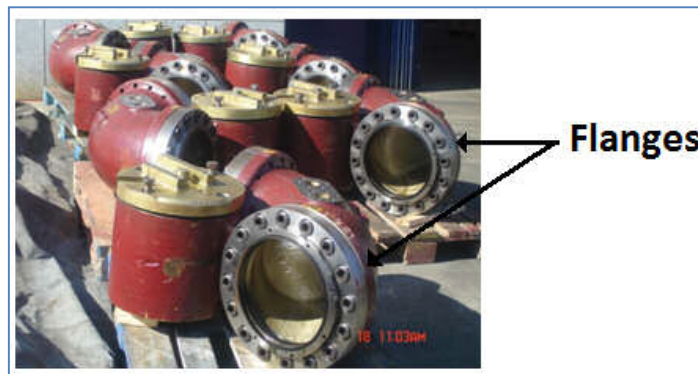
- Controlo das molas planas do anel de base;



**Figura 16 - Êmbolo dos servomotores tóricos.**

Por exemplo nos êmbolos dos servomotores tóricos eram efectuados controlos dimensionais ao nível do diâmetro dos furos, faces e raios de curvatura.

Nas flanges dos servomotores tóricos, Figura 17, as cotas controladas foram diâmetros dos furos dos parafusos e diâmetro interior e exterior das flanges.



**Figura 17 - Flanges dos servomotores tóricos submetidos a controlo dimensional.**

Foi neste departamento que foram devolvidas algumas rodas fabricadas na empresa, apresentando dentes fracturados durante o período de serviço.



**Figura 18 - Roda devolvida fracturada.**

# Capítulo 4 Caso de estudo

---

## 4.1. Introdução

Como referido anteriormente, durante o período de estágio e mesmo nos meses antecedentes ao estágio, surgiram no departamento de qualidade algumas reclamações relativamente a uma roda produzida na empresa.

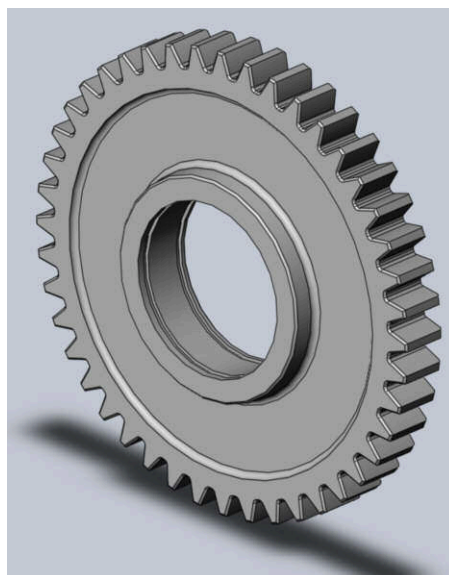


Figura 19 - Roda Z44 (SolidWorks®).

A roda representada na figura anterior tem as seguintes características dimensionais:

Tabela 4 - Características da Roda Z44.

Designação	Variável	Dados
Módulo	M	5
Nº de dentes	Z	44
Ângulo de pressão	$\alpha$	20°
Cota de controlo	EK (5)	68,22 <sup>-0,10</sup> <sub>-0,14</sub>
Acabamento	-	Talhagem

O material utilizado para o fabrico é o aço de referência DIN 16MnCr5. Para finalizar, a roda Z44, é sujeito a um tratamento termoquímico que se traduz por cementação, seguido de têmpera e revenido. Após os tratamentos termoquímicos, a peça apresenta uma dureza superficial entre 57 a 61 HRC com uma profundidade de cementação situado entre 0,6 a 0,8 mm.

A resistência à ruptura é uma das propriedades mais importantes nas rodas dentadas. Uma ruptura num dente ocorre de forma frágil e imprevisível, que pode ter repercussões catastróficas na aplicação.

São diversas as causas de ruptura de dentes das engrenagens. Estas rupturas podem ser classificadas em dois tipos: instantâneas devido a sobrecargas pontuais causadas por incidentes na sua utilização normal

(independentemente das horas de trabalho a que o sistema esteve sujeito), ou devido a defeitos intensificados com a fadiga. Este último caso ocorre em engrenagens com longo tempo de serviço e é provocado pelo processo de fadiga do material. Começam a intensificar-se após uma carga horária de serviço mais ou menos considerável podendo a ruptura iniciar-se por microfissuras resultantes de defeitos de rectificação (quando é o caso), tratamentos térmicos a que as engrenagens estão sujeitas, entre outras.

No intuito de se encontrar a razão principal de fractura dos dentes nas rodas dentadas foram feitas pesquisas a fim de se reunir informação suficiente sobre possíveis causas da ruptura dos dentes.

Dos vários motivos encontrados foram considerados os seguintes:

- Sobrecargas pontuais;
- Defeitos de rectificação;
- Tensões residuais;
- Capacidade de carga (mau dimensionamento);
- Defeitos de tratamento térmico;
- Ruptura por fadiga de contacto ou “pitting”;
- Ruptura por fadiga de flexão;
- Escolha do material;

Algumas destas causas foram excluídas à partida. Defeitos causados por rectificação são retirados do problema, visto as rodas não serem sujeitas a rectificação. Sendo já um projecto com muitos anos e com milhares de rodas produzidas, os problemas de dimensionamento e de escolha de material também são postos de parte. A ruptura por fadiga não é considerada, pois em algumas reclamações é indicada a ruptura dos dentes das engrenagens ocorre após algumas horas de funcionamento, sendo impossível a fractura dos dentes ter como causa provável ruptura por fadiga.

Utilizando recursos do Instituto Politécnico de Bragança realizou-se um estudo aprofundado no sentido de relacionar a causa da ruptura com as tensões residuais presentes nas peças. Desta forma, em cooperação com a empresa, o autor desenvolveu um conjunto de estudos para a determinação de possíveis causas para este problema.

Em primeiro lugar foram efectuadas simulações numéricas para se caracterizar o comportamento da roda dentada em situações de carga e identificar as zonas críticas. Para a determinação do valor das tensões residuais o foi utilizado o método do furo associado à extensometria.

Depois de várias tentativas verificou-se a impossibilidade de se realizar a medição com a técnica do furo cego, tendo sido necessário optar-se por outras técnicas experimentais alternativas para a medição de tensões residuais. A solução encontrada foi o método do seccionamento associado à extensometria.

O estudo foi complementado com uma análise metalográfica com o objectivo de verificar a existência de problemas relacionados com o tratamento térmico ou então com possíveis microfissuras existentes nos dentes da roda dentada.

## 4.2. Contextualização da roda dentada

### 4.2.1. Equipamento de serviço

Na Figura 20 está representado o equipamento onde a roda Z44 está em funcionamento. Trata-se de uma Fresa Axial STK.



Figura 20 - Fresa axial STK.

Principais Características:

- Transmissão lateral por carretos;
- Veio de facas desmontável;
- Protecção da chumaceira;
- Avental traseiro com duas molas;
- Suporte para parqueamento;
- Protecções de segurança de acordo com as normas da C.E.; e
- T.D.F. - 540 r.p.m..

### 4.2.2. Geração da Roda Z44

Existem vários processos de geração do dentado, recorrendo a vários tipos de ferramenta. Estas ferramentas vão desde as fresas com navalhões, fresa mãe, facas à fresa dentada. Neste capítulo é abordada a gama operatória de geração da roda Z44, para uma melhor compreensão das operações de fabrico responsáveis pela introdução de tensões residuais no produto.

Neste caso, dependendo da série de peças a produzir e mediante os custos de produção, a pré-forma pode ser obtida a partir de uma peça forjada ou então através do corte de um disco, obtido de um varão existente no mercado com as dimensões mais aproximadas no aço especificado.

Sendo a pré-forma obtida por forjamento, a roda dentada irá ser gerada a partir da seguinte gama operatória:

**Tabela 5 - Gama operatória utilizada no processo de geração da engrenagem para estudo.**

Nº de operação	Operação	Máquina de operação
1	Torneamento	Torno CNC
2	Talhagem	Talhadora
3	Tratamento térmico	Forno
4	Rectificação	Rectificadora CNC

A geração do dentado é realizada com uma ferramenta com as dimensões do dentado predefinido com um movimento oscilatório e de penetração, Figura 21. Esta é a última operação de maquinagem antes de a peça sofrer tratamento termoquímico. O tratamento térmico consiste no endurecimento superficial do dentado através da cementação, seguida de uma têmpera e, posteriormente, um revenido.



**Figura 21 - Mecanismo de geração do dentado.**

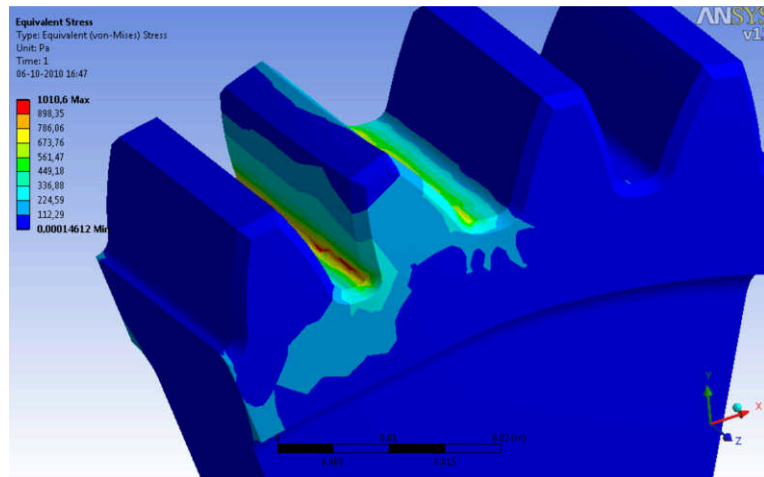
### **4.2.3. Estudo numérico**

Antes de se iniciarem os testes de medição de tensões residuais foi necessário identificar as regiões mais críticas, as quais correspondem às de maiores concentrações de tensões. Com esse intuito, foram realizadas várias simulações numéricas utilizando um programa comercial de elementos finitos Ansys 12®.

Inicialmente a geometria criada no programa de modelação geométrica SolidWorks®, de seguida foi importada para o programa de elementos finitos onde foi simulado diferentes tipos de carregamento sobre os dentes.

De modo a reduzir o esforço de cálculo, e como a geometria da roda apresenta uma disposição axisimétricas, foi apenas analisado uma secção da roda. Esta simplificação traduziu-se numa redução substancial do tempo de cálculo bem como uma optimização dos recursos utilizados.

A simulação permitiu identificar a zona mais crítica, correspondente à intensidade de tensões mais elevada.



**Figura 22 - Resultados obtidos em ANSYS Workbench.**

Na Figura 22 pode verificar-se que a maior tensão equivalente ocorre na raiz do dente, sendo esta a região crítica propensa à ruptura, a qual deverá ser analisada por via experimental para determinação das tensões residuais.

# Capítulo 5 Tensões Residuais

---

## 5.1. Fundamentos teóricos

Neste capítulo é feita uma abordagem de definições importantes para melhor compreensão dos ensaios experimentais realizados neste trabalho.

Um conceito que deveria estar na mente de engenheiros e projectistas de componentes e sistemas mecânicos são as tensões residuais. Peca por ser uma área pouco desenvolvida com poucos anos de estudo, podendo, no entanto, ser a causa de falhas catastróficas em alguns projectos mecânicos, por estarem presentes nos componentes e não terem sido levadas em consideração aquando do projecto.

Tensões residuais são as tensões elásticas presentes num corpo (estrutura ou componente mecânico) na ausência de carregamentos externos e/ou diferenças de temperatura e sobrepõe-se às cargas de serviço. Qualquer perturbação como remoção de material, aplicação de carregamentos térmicos ou mecânicos, altera o seu estado e causa a redistribuição de modo a que as tensões se equilibrem novamente.

As principais causas para o seu aparecimento são basicamente todos os processos de produção a que os componentes estão sujeitos e durante o período de vida da estrutura ou elemento, sobretudo se estiver sujeita a sobrecargas.

Na prática, não existe nenhum corpo livre de tensões residuais, sendo que estas tensões podem ter efeitos benéficos ou prejudiciais ao desempenho do componente (dependendo da sua magnitude, sinal e distribuição) quando sujeito a esforços mecânicos, térmicos ou químicos. Vários casos apontam as tensões residuais como a principal causa de falha de equipamentos, tendo como agravante o facto de, na maioria dos casos, permanecerem incógnitas, desde a produção do componente até a falha.

Este trabalho apresenta um esforço no sentido de identificar até que ponto as diferentes etapas de processos de fabrico intervêm no estado de tensões residuais resultantes num componente.

Actualmente, existem variados métodos para medir e determinar o valor das tensões residuais. Alguns são baseados na medição do relaxamento da deformação provocada pela remoção localizada de material (métodos destrutivos e semi-destrutivos). Outros são baseados na interacção entre o campo de tensões residuais e as propriedades físicas do material (métodos não – destrutivos).

No presente trabalho, as medições das tensões residuais foram realizadas recorrendo ao Método do Furo e do seccionamento.

### 5.1.1. Tipos de Tensões Residuais

A classificação mais comum das tensões residuais é quanto à área de abrangência, sendo estas tensões residuais macroscópicas, microscópicas e submicroscópicas.

### 5.1.2. Tensões Residuais Macroscópicas

Também chamadas por alguns autores de tensões residuais do Tipo I, são as tensões que se estendem sobre grandes porções volumétricas quando comparadas com o tamanho de grão do material. As deformações originadas são praticamente uniformes para muitos grãos [1]. Exemplos típicos apresentam-se em materiais deformados plasticamente de maneira não uniforme, como barras sujeitas a dobragem para além do limite elástico, processos de laminagem, gradientes térmicos e têmpera de um aço. Um padrão típico de tensões residuais longitudinais macroscópicas é encontrado em chapas finas soldadas, Figura 23. Neste caso específico tem-se um valor máximo de tensão de tracção no cordão de soldadura. A partir daí, ocorre uma redução deste à medida que se afasta do cordão até que a tensão se torne de compressão. Como resultante, mantém-se o equilíbrio dos carregamentos internos, considerando-se que as tensões são constantes ao longo da espessura [2].

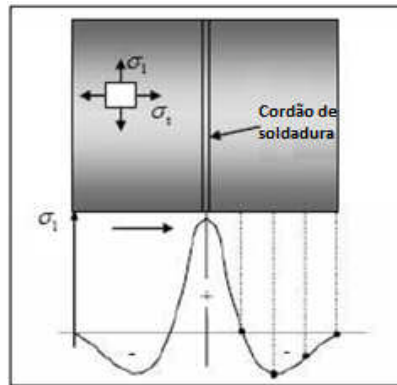


Figura 23 - Esquema do comportamento das tensões residuais nas vizinhanças de uma união por soldadura de chapas finas [2].

### 5.1.3. Tensões Residuais Microscópicas

As tensões residuais microscópicas ou do Tipo II são as que mantêm uma distribuição uniforme ao longo de um grão ou de boa parte dele. Podem ocorrer em interfaces entre fases e partículas precipitadas e a matriz. Desenvolvem-se durante a deformação elasto-plástica de um material policristalino com grãos aleatoriamente orientados e cuja resistência ao escoamento e ao encruamento depende da orientação cristalográfica [3].

### 5.1.4. Tensões Residuais Submicroscópicas

Conhecidas, também, como tensões residuais Tipo III ou micro tensões localizadas, as tensões residuais submicroscópicas abrangem distâncias interatômicas, dentro de uma pequena porção de um grão. Ocorrem nos materiais metálicos sujeitos aos processos que produzam descontinuidades na rede cristalina, como vazios, impurezas, falhas de empilhamento, entre outros [3].

### 5.1.5. Processos e Mecanismos Geradores de Tensões Residuais

Sob o ponto de vista do comportamento mecânico dos materiais, pode-se dizer que “as tensões residuais aparecem como uma resposta elástica do material a uma distribuição não homogénea de deformações não elásticas, tais como as deformações plásticas, precipitações, transformação de fase, deformação devido à expansão térmica, entre outros” [4].

Praticamente, todas as operações de fabrico contribuem para o aparecimento de tensões residuais:

- contracção no arrefecimento devido a regiões de diferente aquecimento nos processos de tratamento superficial, como têmpera ou carbonização;
- regiões plastificadas durante a operação de soldadura;
- arrefecimento após um processo de fundição para solidificação do material;
- contracção de moldes utilizados em injeccção de diversos materiais podendo resultar em fissuras a quente;
- processo de “shot peening” ou grenalhagem contra a superfície dos materiais;

Conforme transcrito no quadro abaixo indicado mostram-se alguns dos principais mecanismos geradores de tensões associados aos processos que os originam.

**Tabela 6 - Mecanismos de geração de tensões residuais em diferentes processos de fabrico [5].**

Mecanismos ↓ Processos	Deformação mecânica diferencial	Transformação de fase de material	Contracção ou expansão térmica diferencial	Microestrutura diferencial	Desigualdades estruturais
Conformação	Laminagem, estampagem, forjamento, extrusão, estiramento				
Conformação superficial	“Shot peening, martelamento”				
Maquinagem	Torneamento, aplainamento, fresagem, rectificação, furação, electroerosão				
Soldadura		Todos os processos	Todos os processos		
Tratamentos térmicos		Têmpera, normalização	Têmpera, normalização		
Fundição			Diferentes secções transversais, grandes dimensões		
Tratamentos térmicos superficiais			Cementação nitretação	Cementação nitretação	
Montagens mecânicas					Estruturas de grandes dimensões, desalinhamento de uniões

### 5.1.6. Principais Técnicas de Medição de Tensões Residuais

A medição de tensões residuais não pode ser feita pelos procedimentos tradicionais de análise experimental, dado que, os métodos de medição de tensões ou deformações (como extensometria, fotoelasticidade, etc.) não podem ser utilizados durante o processo de fabrico e montagem dos equipamentos, sendo os sensores instalados posteriormente. As técnicas dividem-se de acordo com o grau de dano no equipamento, quando de sua aplicação (Tabela 7), sendo:

- Não destrutivas - não provocam qualquer dano por não necessitarem de remoção de material;
- Destrutivas - são as técnicas que comprometem ou impossibilitam o uso da peça medida;
- Semi-destrutivas - são as técnicas que introduzem algum dano no equipamento, porém, não comprometem a sua integridade ou operacionalidade.

**Tabela 7 - Principais métodos de medição de tensões residuais [5] e [6].**

<b>Classificação</b>	<b>Principais técnicas</b>	<b>Observações</b>
<b>Não destrutivos</b>	Difracção de raios x	Variação das distâncias entre os planos atómicos.
	Difracção de neutrões	Semelhante ao método de Raios X, no entanto, com inspecção em todo o volume.
	Método de ultra-som	Variação da velocidade de ondas ultra-sónicas no interior do material.
	Método magnético	Relação entre propriedades magnéticas, permeabilidade, indução e efeito Barkhausen.
<b>Destrutivos</b>	Método do seccionamento	Cortes parciais longitudinais ou transversais ao eixo de peças assimétricas, ex: cilindros.
	Método da remoção de camadas ou deflexão	Camadas retiradas por ataque químico.
<b>Semi-destrutivos</b>	Método do furo	Execução de um furo, $\varnothing=0,8$ a 3,2 mm, Norma ASTM-E-837. [7]

Estas técnicas não são de aplicação universal a qualquer situação. Cada técnica tem as suas vantagens e restrições e cabe a quem vai analisar as tensões escolher aquela que corresponda às suas necessidades, levando-se em conta vários factores, como por exemplo:

- exactidão;
- complexidade;
- aplicabilidade no campo;
- custos;

- necessidade de mão-de-obra especializada;
- necessidade de repetição dos testes;
- tipo de intervenção: destrutiva ou não destrutiva;
- existência de gradiente de tensão;
- propriedades mecânicas do material;
- anisotropia;
- geometria dos componentes;
- tempo de análise.

Durante as últimas décadas foram utilizadas praticamente todas as técnicas de mecânica experimental, adaptando-as ao estudo das tensões residuais, tendo algumas sido especialmente desenvolvidas para esta aplicação. A maioria das técnicas de análise experimental de tensões é baseada na medição das deformações provocadas por cargas externas. Contudo, as tensões residuais existentes num material ou estrutura são internas e auto-equilibrantes. Na medição por métodos mecânicos provoca-se uma perturbação ao estado de equilíbrio inicial e estabelece-se um novo estado de equilíbrio.

As técnicas de relaxação necessitam sempre de uma medição das deformações superficiais após libertação das tensões instaladas. Recorre-se assim à extensometria.

### 5.1.7. Método de seccionamento

Os métodos de seccionamento são totalmente destrutivos. São frequentemente utilizados para determinar as tensões residuais tridimensionais em componentes de grandes dimensões, como é o caso de peças soldadas.

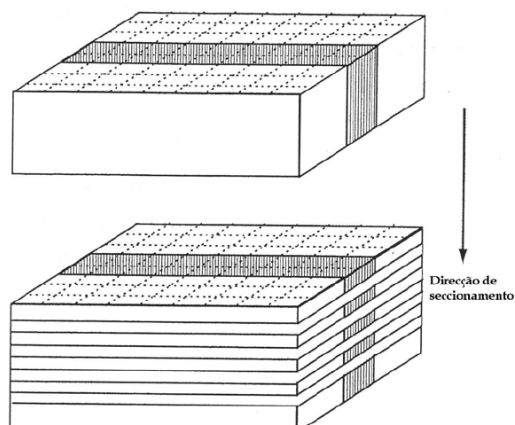
Num componente espesso a variação de curvatura por remoção duma camada é muito pequena e, por isso, de difícil medição. Assim sendo, a relaxação de tensões residuais pode ser determinada a partir da medição das deformações que ocorrem no plano que contém a superfície superior da camada removida.

Para medir tensões residuais, são colados extensómetros na superfície da peça antes de ser cortada. Durante o corte da peça as tensões residuais que actuam sobre a superfície cortada são libertadas e as correspondentes deformações elásticas relaxadas são medidas pelos extensómetros. A distribuição das tensões que actuam sobre as novas superfícies livres é estimada a partir das tensões relaxadas após o seccionamento. Esta distribuição de tensões é, geralmente, expressa por uma função contínua, podendo esta ser substituída por uma série finita (ou aproximação por discretização) para qualquer grau de precisão desejado, a qual contém um número de parâmetros  $\{F\} = [F_1 \ F_2 \ \dots \ F_q]^T$ , que pode ser expressa da seguinte forma:

$$\{\sigma^2\} = [f(\{X^S\})]\{F\} \quad \text{Equação 5.1}$$

onde  $\{\sigma^2\}$  é a matriz de tensões residuais que actuam sobre a nova superfície livre S,  $\{X^S\}$  é a matriz de coordenadas dos pontos correspondentes à superfície S,  $f(\{X^S\})$  é a função das tensões estimadas e  $\{F\}$  representa os parâmetros das tensões.

Na Figura 24, faz-se uma representação esquemática do posicionamento dos extensómetros na técnica do seccionamento.



**Figura 24 - Representação esquemática do princípio da técnica de seccionamento. Os extensómetros estão posicionados na intersecção das linhas ponteadas.**

Nos primeiros trabalhos com este método, a reconstrução das tensões residuais foi baseada em teorias simples [8]. Nos anos 70, com a utilização dos métodos de elementos finitos, a precisão deste método sofreu grandes melhorias.

Nos métodos tradicionais [9] de seccionamento as deformações intrínsecas (deformações plásticas no interior da peça) foram escolhidas em substituição das deformações residuais. As deformações intrínsecas, que não são afectadas pelo processo de seccionamento, são determinadas directamente a partir das medições da deformação à superfície. O campo de tensões residuais é, então, estimado a partir da determinação das deformações intrínsecas. Apesar da precisão deste método ser substancialmente inferior ao método de seccionamento convencional, apresenta a vantagem de simplificar consideravelmente o processo de corte.

### **5.1.8. Técnica do Furo (*Hole Drilling*)**

É a técnica mais utilizada para a medição de tensões residuais, por ser de fácil aplicação na maior parte dos casos, por ter uma boa relação custo/exactidão e por ter procedimentos de medição e tratamento de resultados normalizados [5]. É uma técnica considerada semidestrutiva, pois o dano causado pela execução do furo é muito localizado, não comprometendo, na maioria dos casos, o funcionamento do equipamento [7].

A maquinação de um furo na medição de tensões residuais pode ser associada a técnicas experimentais para determinação das redistribuições das deformações ou deslocamentos por ele causadas. Podem ser utilizadas técnicas discretas, como a extensometria eléctrica, ou de campo como as técnicas ópticas, nomeadamente a Fotoelasticidade por Reflexão, a Holografia e o Moiré Interferométrico. A técnica utilizada neste trabalho e descrita neste capítulo é a técnica do furo associada à extensometria eléctrica.

### 5.1.9. Solução Analítica do Método do Furo

O método do furo para determinação de tensões residuais tem como base teórica as equações de Kirsch [10] para a determinação do estado de tensões em torno de um furo passante existente numa placa infinita com carregamento conhecido.

O estado de tensões ( $\sigma'$ ) é medido através da maquinagem de um furo passante numa peça e pode ser representado pela subtracção do campo de concentração de tensões ( $\sigma''$ ), dado pela solução de Kirsch, pelo estado de tensões na placa sem furo ( $\sigma$ ). Na Figura encontra-se esquematicamente representado o estado de tensões que ocorre antes e após a furação numa placa.

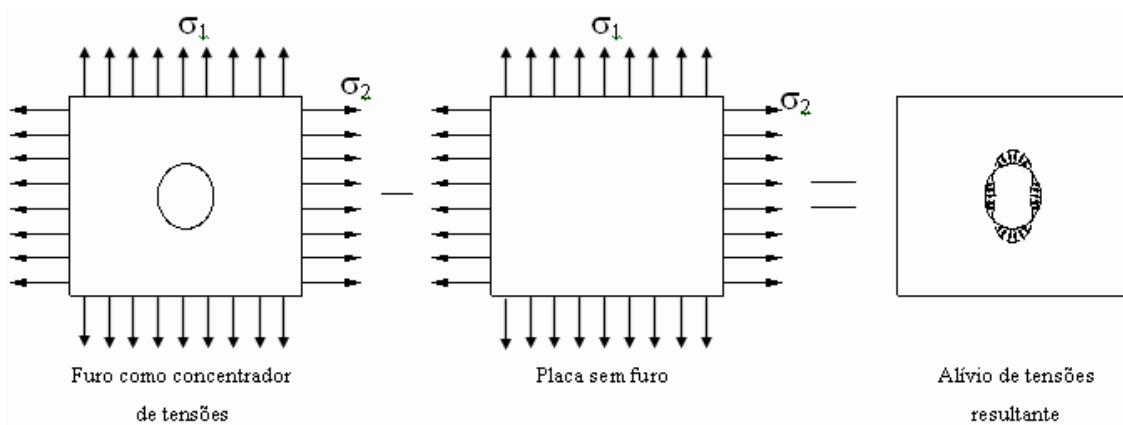


Figura 25 - Obtenção do estado de tensões resultante do alívio provocado pelo furo [5].

Baseando-nos na solução de Kirsch aplicada a placas com um carregamento unidireccional, verifica-se que as tensões que actuam em planos ortogonais  $r$  e  $\theta$  que passam por um ponto  $P(r, \theta)$  qualquer, numa placa submetida a um estado uniaxial de tensões, definido pelas tensões principais  $\sigma_1$  e  $\sigma_2$ , estão mostradas na Figura 26.

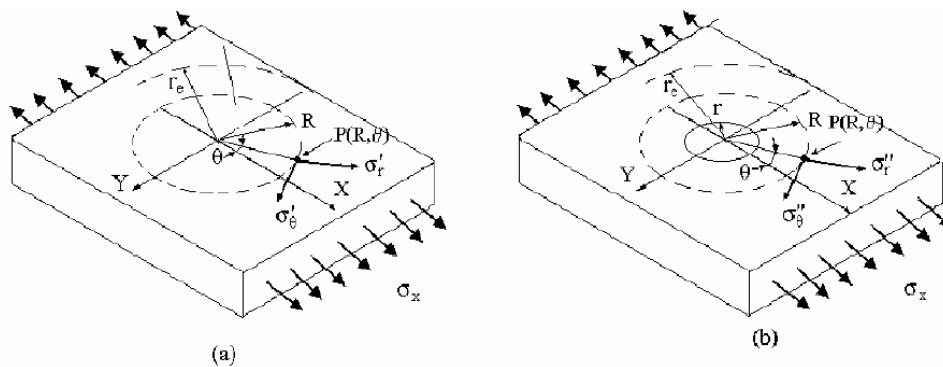


Figura 26 - Estado de tensão num furo  $P(r, \theta)$ : (a) antes; (b) depois da maquinagem de um furo passante [11].

O valor das deformações relaxadas, que ocorre após a realização de um furo numa placa sujeita a um carregamento unidireccional, pode ser descrito pela expressão:

$$\epsilon_r = (A + B \cos 2\theta)\sigma_1 + (A - B \cos 2\theta)\sigma_2 \quad \text{Equação 5.2}$$

As constantes  $A$  e  $B$  são conhecidas como coeficientes de calibração e assumem as seguintes expressões:

$$A = -\frac{1 - \nu}{2E} \left(\frac{R}{r}\right)^2 \quad \text{Equação 5.3}$$

$$B = -\frac{1 + \nu}{2E} \left[ \frac{4}{1 + \nu} \left(\frac{R}{r}\right)^2 - 3 \left(\frac{R}{r}\right)^4 \right] \quad \text{Equação 5.4}$$

### 5.1.10. Análise extensométrica para o furo cego

As equações e análises até aqui apresentadas referem-se à hipótese de um furo passante, o que é geralmente impraticável na grande maioria das medições, por isso a opção por um furo cego ser a mais realista para as medições realizadas.

A execução de um furo cego num componente sujeito a carregamento gera um campo de tensões complexo, que não possui solução exacta na teoria da elasticidade. Estudos demonstraram que a deformação relaxada, após a execução de um furo cego varia de forma sinusoidal ao longo de um círculo concêntrico ao furo. Isto significa que as equações definidas para o método do furo passante podem ser usadas para o furo cego, no entanto é necessária a utilização de coeficientes de calibração adequados [12].

A Norma ASTM E837 [7] apresenta um gráfico (Figura 27) e uma tabela com valores dos coeficientes de calibração  $\bar{a}$  e  $\bar{b}$  determinados numericamente para os três tipos de roseta apresentados pelo documento, mostrando a variação dos coeficientes  $\bar{a}$  e  $\bar{b}$  com a profundidade do furo normalizada pelo raio médio da roseta ( $z/r_m$ ).

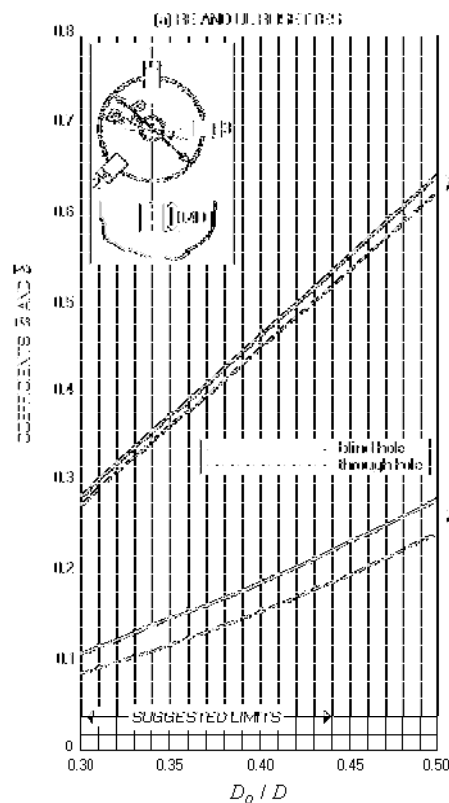


Figura 27 - Gráfico para determinação dos coeficientes  $\bar{a}$  e  $\bar{b}$  para furos maquinados numa única etapa para rosetas do tipo RE e UL [11].

No presente trabalho não houve necessidade de calcular o valor destes coeficientes de calibração pois existe um programa denominado de H-DRILL da Vishay que permite a determinação das tensões residuais a partir dos valores do relaxamento de deformações medidos pela roseta de extensómetros, isto é, a partir dos valores das deformações em três direcções (0°, 45° e 90°) que determina as tensões principais e respectivas direcções. Os coeficientes de calibração determinados por este programa baseiam-se nos princípios e equações descritas anteriormente.

A realização das medições de tensões residuais executadas no âmbito deste trabalho, recorrendo à técnica do furo, envolveu a utilização dos seguintes equipamentos representados na Figura 28:

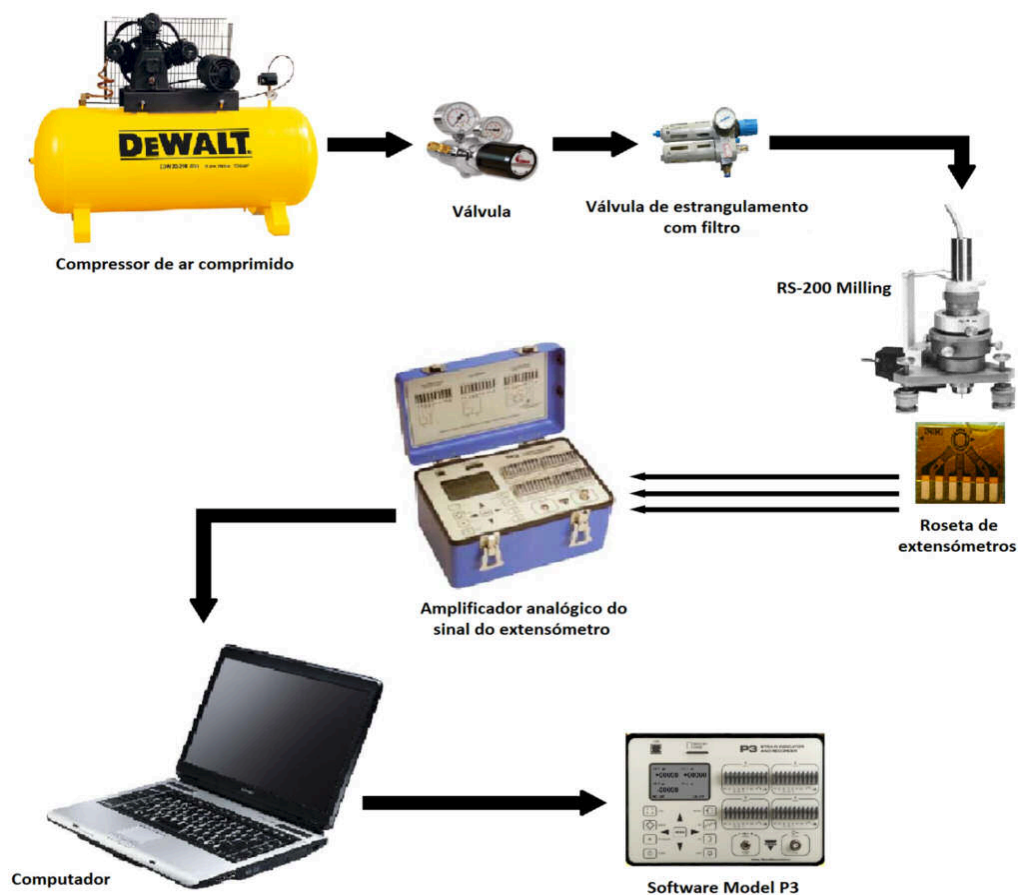


Figura 28 - Esquema de medição de tensões residuais através do método do furo.

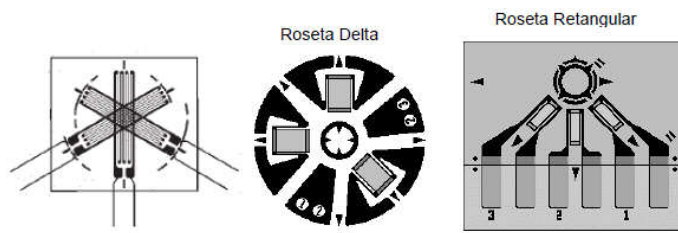
Como referido anteriormente, as medições das tensões residuais com técnica do furo, utilizaram como sensor para medir o relaxamento de deformações após furação, o extensómetro eléctrico.

Trata-se de um extensómetro de resistência eléctrica (“strain gage”) ligado a um indicador de deformações que informa as diferenças de potencial geradas pelas variações das resistências eléctricas em função das variações de seus comprimentos.

Para a medida das deformações na superfície da maioria dos materiais estruturais, são consideradas as seguintes características [13]:

- Neste trabalho foram utilizados extensómetros de 120Ω (roseta) e 350Ω (uniaxial);
- constante do extensómetro (“gage factor”), K= 2;
- comprimento da grade de medida de 5 mm.

Para a medição de tensões residuais são utilizadas rosetas de extensômetros específicas para este tipo de medição e que dispõem de uma disposição geométrica que envolve sempre uma região para a realização do furo. Estas rosetas podem ser de três tipos, conforme está apresentado na Figura 29.



**Figura 29 - Extensômetro triaxial (Vishay).**

Neste trabalho foram utilizadas as rosetas tipo delta e rectangular.

# Capítulo 6 Causas de falhas em engrenagens

---

## 6.1. Falhas em engrenagens devido a sobrecargas

Quando os dentes das engrenagens se partem em consequência de sobrecargas ou choques repentinos, essa o aspecto visual da ruptura assemelha-se a fibras de material plástico arrancado.

As engrenagens são dimensionadas considerando o valor do binário máximo e médio do equipamento onde vão ser aplicados. No entanto, podem acontecer de oscilações momentâneas do binário que excedem as condições operacionais originalmente especificadas, o que produz uma sobrecarga no sistema de engrenagens.

O erro de transmissão ou erro na correção de dentado podem também desencadear uma sobrecarga. Imperfeições nos perfis dos dentes podem originar erros de transmissão entre dentes em contacto, consequentemente, levam a diferenças de velocidade entre a engrenagem motora e a engrenagem movida, originando também sobrecargas momentâneas [14].

Se um impulso causado por um erro de transmissão for suficientemente elevado, os dentes em contacto podem separar-se num determinado instante e voltarem a entrar em contacto novamente com impacto. Nota-se que para velocidades altas, onde a energia cinética é bastante elevada, os erros de transmissão não alteram tanto as velocidades entre as engrenagens e os impactos acabam por ser menores. Contudo, durante o período de arranque ou paragem ocorre o processo inverso, aumentando a probabilidade de ocorrência de impacto e consequente sobrecarga nas engrenagens.

## 6.2. Defeitos de tratamentos térmicos

O processo para reduzir os defeitos provocados pelos tratamentos térmicos em engrenagens consegue-se pelo controlo rigoroso de todos procedimentos necessários para este tipo de tratamentos.

É necessário garantir que o aquecimento seja homogéneo em toda a peça, de modo a reduzir tensões internas, originadas nos gradientes térmicos induzidos durante o processo e que podem produzir grandes deformações.

Deve-se evitar a oxidação superficial, devido à atmosfera oxidante do forno, podendo ocorrer a oxidação do ferro (Fe) dos aços.

Controlar rigorosamente as temperaturas bem como a duração dos períodos de estágio a que as peças estão sujeitas durante o aquecimento e arrefecimento. [20]

## 6.3. Fadiga de contacto

Segundo Dudley [15], a fadiga de contacto é a grande responsável por falhas em engrenagens industriais. Contudo, os estudos realizados por Alban [16] indicam que o modo de falha mais comum em engrenagens é a fadiga de flexão.

Na realidade esta dicotomia acontece pois a frequência de falha está relacionada com os critérios de cálculo e os factores de segurança utilizados que favorecem apenas um dos tipos de fadiga, fadiga por contacto ou fadiga de flexão.

Como o próprio nome indica, a falha por fadiga de contacto ocorre como consequência de solicitações cíclicas (teoria da falha por fadiga). Portanto, este modo de falha acontece a partir de um certo número de ciclos.

A fadiga de contacto pode ser identificada quando são encontradas cavidades (provocadas pela falta de material) na superfície dos dentes. [15]

A fadiga de contacto na maioria dos casos ocorre no pinhão de um par engrenado.

A direcção de escorregamento acontece da linha primitiva da engrenagem motora para a linha primitiva da engrenagem movida. Movimentos de escorregamento na engrenagem motora (pinhão) tendem a extrair metal na região da linha primitiva, enquanto na engrenagem movida o escorregamento tende a comprimir o metal na região da linha primitiva.

Como os pinhões têm um diâmetro menor que as rodas movidas, os mesmos apresentam maiores ciclos de operação. Por esta razão, quanto maior o número de ciclos de operação, mais sujeito fica o componente a apresentar fadiga de contacto.

Pinhões com baixo ou médio endurecimento podem minimizar os problemas na região próxima ao círculo base. Os desgastes ocorridos pela fadiga de contacto podem remover metal suficiente que acabam por corrigir as tensões anormais, o que leva a um ajuste do engrenamento.

É importante destacar que, frequentemente, engrenagens que têm problemas com fadiga de contacto têm também problemas de lubrificação. Estes problemas acontecem quando não existe um filme de óleo ideal entre os dentes em contacto, seja por o óleo estar muito fino ou pelas superfícies terem uma rugosidade elevada que não permite uma condição favorável para a aderência do óleo.

## **6.4. Fadiga por flexão**

Alban [16] defende que a fadiga de flexão no pé do dente é a causa principal das falhas em engrenagens.

As engrenagens, quando em serviço, são submetidas a esforços de flexão cíclicos e atingem valores máximos em regiões próximas às da base dos dentes, podendo resultar nessas regiões condições críticas para fractura por fadiga.

## **6.5. Selecção de material**

Em certas aplicações, onde o funcionamento do equipamento origina choques intensos entre o pinhão e a roda, é conveniente escolher um material com resiliência (capacidade de voltar ao estado de equilíbrio após sofrer uma deformação) [17]. Sendo fundamental a selecção do material que tenha essas características, normalmente alguns tipos de aços escolhidos como material para engrenagens devido à sua elevada resiliência, como é o caso de alguns aços ligados, nomeadamente, os maraging.

## **6.6. Capacidade de carga**

Em aplicações onde a segurança é primordial, deve optar-se por engrenagens de módulo elevado para garantir uma boa relação entre a capacidade de carga de ruptura e a pressão à superfície. Deve fazer-se um estudo exaustivo das correcções do dentado, tendo sempre em consideração o factor de concentração de tensões. Mesmo com a escolha de um módulo adequado podem ocorrer casos de baixa capacidade à ruptura [17].

## **6.7. Defeitos de rectificação**

A rectificação das superfícies de trabalho das engrenagens é, geralmente, a última operação do seu processo de fabrico e é efectuada após o tratamento de têmpera e revenido.

A grande quantidade de calor gerada durante a rectificação é responsável por modificações micro-estruturais das peças rectificadas, as quais no local de contacto com a mó chegam a atingir entre 1100 e 1600 °C.

A reduzida quantidade de material sujeito a esta elevação de temperatura tenderá a dilatar sendo contrariado pelo restante material envolvente que se encontra a temperatura mais baixa. Este aquecimento brusco origina uma deformação plástica de contracção.

Segue-se um arrefecimento muito rápido que irá induzir no final um estado de tensões residuais de tracção no material. Este estado de tensões residuais de tracção pode ser parcialmente aliviado pela dilatação de transformação da austenite em martensite (nas regiões da peça onde foi atingida uma temperatura suficiente para austenitizar o material). As tensões internas criadas originam fissuras superficiais de rectificação que se apresentam tipicamente como muito finas e estendendo-se até profundidades relativamente reduzidas. [20]

## **6.8. Propriedades dos aços vs tratamentos termoquímicos**

Nesta secção do capítulo 6, são abordadas, muito sucintamente, as propriedades mecânicas inerentes aos aços e os tratamentos térmicos a que as engrenagens utilizadas nesta análise são submetidas para obedecerem aos parâmetros do projecto.

Características como a tenacidade e a ductilidade de um aço são alteradas mediante os tratamentos termoquímicos a que o material é sujeito, para além dos campos de deformações e tensões residuais criadas.

### **6.8.1. Tenacidade**

Tenacidade é a energia mecânica, ou seja, o impacto necessário para levar um material à ruptura. Se um material é tenaz ele pode sofrer um alto grau de deformação sem romper. Por outras palavras, tenacidade é uma medida de quantidade de energia que um material pode absorver antes de fracturar. [21]

## 6.8.2. Ductilidade

A ductilidade é a propriedade mecânica referente à capacidade dos materiais sofrerem deformações plásticas sem fracturarem.

Pode ser medida por meio da estricção (redução na área da secção transversal de um corpo de prova), ou por meio do alongamento. Quanto mais dúctil o material, maior será a redução da área da secção transversal e maior será o alongamento antes da ruptura. Logo, a ductilidade é uma medida da extensão da deformação que ocorre até a fractura. O oposto de dúctil é frágil, quando o material se rompe sem sofrer grande deformação. [21]

## 6.8.3. Cementação

Cementação é a introdução de carbono na superfície de um aço, o qual se difunde fazendo ligação com o ferro, através de uma reacção química. Após têmpera e revenido, esta camada apresenta uma dureza mais elevada do que a do núcleo. Por outras palavras, a cementação em si, não endurece a superfície do aço, mas aumenta o teor de carbono dessa superfície favorecendo o endurecimento superficial após o processo de têmpera, deixando o núcleo com uma dureza que conserva as propriedades mecânicas do aço.

A peça é aquecida num forno abaixo do ponto de fusão do aço.

A cementação comporta muitas variações conforme o objectivo ou o trabalho que a peça vai desempenhar. As variações são de temperatura, profundidade de carbonização, tempo do processo, e controlo da atmosfera. O tempo do processo vai depender da profundidade da cementação desejada - quanto mais tempo durar a cementação, mais profundamente teremos a presença do carbono difundido. [19]

As peças assim tratadas por cementação seguida de têmpera apresentam elevada dureza na superfície e grande maleabilidade no núcleo (dependendo do tipo de aço). Estas características tornam o processo recomendado a certas peças que requerem muito esforço superficial, como é o caso das engrenagens.

## 6.8.4. Têmpera

Têmpera consiste no aquecimento do aço até sua transformação austenítica, seguido de grande velocidade de arrefecimento, ou seja, arrefecido na velocidade crítica da têmpera, visando a obtenção de uma estrutura martensítica.

A obtenção da estrutura martensítica visa o aumento do limite de resistência à tracção e da dureza do aço. [21]

## 6.8.5. Revenido

O revenido é o tratamento térmico complementar da têmpera. Consiste no aquecimento do aço previamente temperado (estrutura martensítica) a temperaturas inferiores à zona crítica, durante um determinado tempo, seguido de velocidades de arrefecimento controladas.

O revenido provoca uma evolução do material para um estado mais próximo do estado de equilíbrio sem atingi-lo completamente.

É necessário garantir um aquecimento uniforme ao longo de toda a peça com vista a reduzir as tensões internas (devidas a gradientes térmicos) e consequentes deformações.

Os aços temperados são revenidos para a obtenção de propriedades mecânicas específicas (aumento de ductilidade e tenacidade), características perdidas aquando da têmpera. Para além destes dois aspectos a melhorar, o alívio de tensões internas e a garantia de estabilidade dimensional da peça também são objectivos a alcançar (o revenido é acompanhado geralmente por uma redução de volume). [19]

# Capítulo 7 Procedimento experimental

---

## 7.1. Introdução

Conforme referido no capítulo 1 deste trabalho, foi necessário realizar um conjunto de ensaios experimentais com o objectivo de medir as tensões residuais nas engrenagens e analisar a sua microestrutura.

Neste capítulo são referidas as etapas necessárias para a medição de valores de tensões residuais através do método do furo e do seccionamento, bem como o procedimento para se efectuar a análise metalográfica para estudar a microestrutura do material utilizado nas engrenagens em análise.

## 7.2. Método do furo cego

O procedimento realizado para este método está de acordo com a Norma ASTM E-837 [7]. Para a medição das deformações criadas pelo furo são utilizadas rosetas de extensómetros com uma configuração particular [7].

A preparação da superfície, colagem da roseta de extensómetros, bem como a montagem do equipamento para efectuar o furo é um processo moroso e minucioso, pois qualquer procedimento menos cuidado poderá incorrer erros de medição elevados e que inviabilizam os resultados obtidos.

Para preparação da superfície da engrenagem, na zona em estudo, foi retirada da camada superficial possíveis vestígios de óxidos com uma lixa de rugosidade mais elevada (120) e posteriormente mais baixa (220), permitindo uma área de aderência mais elevada para o extensómetro. Teve-se um cuidado especial com a espessura da camada removida com a lixa de modo a minimizar alterações do estado de tensão superficial da região a medir e, deste modo, garantir que a influência da preparação da superfície seja negligenciável nos resultados das medições.

Foram utilizados para limpeza panos em vez do tradicional algodão. Estes panos de limpeza têm como vantagem ter fibras entrelaçadas o que evita a sua deposição nos locais de limpeza que podem interferir na colagem das rosetas. Sendo assim, os panos foram embebidos em acetona para retirar gorduras presentes no material, poeira e óxidos. Na Figura 30, apresenta-se um pormenor do processo de preparação da superfície para a colagem posterior das rosetas.



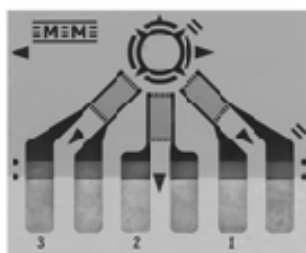
**Figura 30 - Limpeza da superfície antes da colagem.**

O processo de colagem da roseta deve ter em consideração o seu manuseamento, sendo necessário evitar qualquer deformação do sensor e que este entre em contacto com superfícies com sujidade.

A roseta de extensómetros é retirada da embalagem com uma pinça e é colocada sobre uma superfície previamente limpa com acetona, de seguida é colada uma película de fita adesiva transparente por cima do próprio sensor para facilitar a sua colagem e facilitar o seu posicionamento no local de medição.

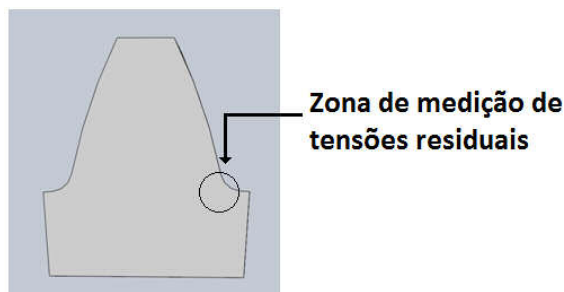
A colagem da roseta de extensómetros na superfície a medir, que foi previamente limpa, deve ter-se em consideração o alinhamento dos extensómetros. Para colar a roseta é utilizado um adesivo adequado, neste caso optou-se pelo adesivo com a designação de Loctite®, e deve ser utilizada uma pequena quantidade de adesivo, tipicamente uma gota que se espalha ligeiramente por todo o sensor. A cura do adesivo processa-se por efeito da pressão a temperatura. Deve pressionar-se durante aproximadamente 4 a 5 minutos para garantir uma boa colagem. Após este tempo pode-se retirar a fita adesiva.

Na figura 31 encontra-se apresentado uma das rosetas utilizadas neste trabalho:

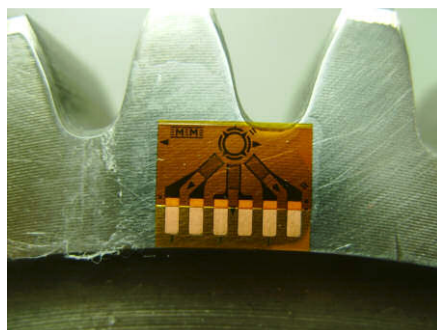


**Figura 31 - Roseta de extensómetros, tipo MM CEA-06-062UM-120.**

Na Figura 32 indica-se, esquematicamente, a posição onde a roseta será colocada, este posicionamento foi determinado com base nos resultados das simulações numéricas e corresponde à zona da raiz do dente, local de maior concentração de tensões nas engrenagens.



**Figura 32 - Posicionamento da roseta de extensómetros na engrenagem.**



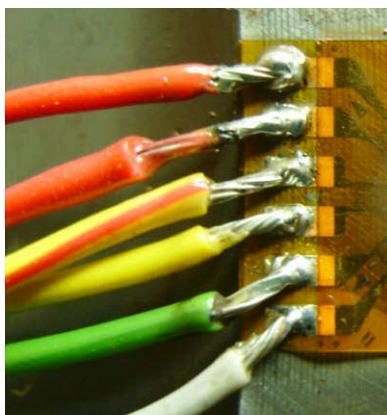
**Figura 33 - Roseta de extensómetros colada.**

Após a colagem da roseta e do tempo de cura do adesivo, o passo seguinte foi o da soldagem dos fios eléctricos, para alimentação e leitura dos extensómetros.

Os fios também requerem alguma atenção. Devem ter baixa condutância para interferir o mínimo possível nos resultados obtidos. Cortam-se à medida, são despídos da sua película protectora cerca de 5mm, são mergulhados num ácido para facilitar a aderência da solda ao fio e ficam com um novo revestimento. Efectuar este processo nas duas extremidades.

Nos extensómetros com o auxílio de um objecto de ponta afiada, retira-se a película protectora no local onde será efectuada a soldadura bem como alguns óxidos que se possam ter formado. Com o ferro de soldar coloca-se uma gota de solda em cada ponto de soldagem do extensómetro. Soldando, de seguida, os fios aos extensómetros, conforme de pode ver na Figura 34.

Para finalizar todo este processo de colagem e soldagem deve proceder-se à protecção da montagem, tanto na zona onde não tem o revestimento plástico, bem como a zona da união soldada entre o sensor e o fio eléctrico. Para esta protecção foi utilizado um verniz que protege a montagem do contacto com o ar e a humidade nele presente, evitando a formação de óxidos.



**Figura 34 - Representação da roseta de extensómetros soldados.**

Antes de se iniciar os ensaios procedeu-se à implementação de testes estáticos nas rosetas. Estes testes estão relacionados com a resistência medida nos extensómetros. Através de um multímetro foi medida a resistência dos 3 extensómetros da roseta para verificar se estavam em conformidade com a especificação do fabricante, bem como a sua condutância para certificar a ausência de corrente entre os fios presentes na ligação como um possível contacto dos fios com a superfície de medição. Neste caso, e dependendo dos extensómetros utilizados, as resistências resultantes eram de  $120\Omega$  e  $350\Omega$ . Estes testes ajudaram a avaliar se o processo de colagem e soldadura foram efectuados correctamente.

### **7.2.1. Alinhamento da guia de furação**

Depois do processo de preparação das amostras, fez-se a instalação do equipamento para a execução do furo e que tem de ficar devidamente centrado com a roseta. Este processo é muito importante, pois os valores das deformações sofrem uma grande variação nos pontos próximos do furo, sendo muito sensíveis à distância da borda do furo. Assim, qualquer excentricidade na furação poderia ter conduzido a erros consideráveis nas deformações medidas. De acordo com alguns estudos [18] o efeito de excentricidade em medições com furo cego, usando rosetas do tipo EA-09-062-RE-120, similares às usadas nestas medições, foi verificado que para excentricidades de cerca de 10% do raio do furo, pode-se chegar a erros de até 50% no cálculo das tensões.

O equipamento de furação (RS-200) foi acoplado à estrutura. O eixo da turbina de furação faz um ângulo de 90° com o plano de medição, para evitar alterações nos resultados e que as fresas não fracturem com forças laterais geradas da possível inclinação. No caso em estudo a solução encontrada para suportar o equipamento RS-200 foi colocar duas engrenagens com as mesmas dimensões lado a lado, como mostra na Figura 35. A fixação deve ser feita tendo em atenção a posição da roseta. Foi utilizada uma guia já com as dimensões correctas fornecida nos acessórios do RS-200, também presente na Figura 36.



**Figura 35 - Guia para regulação da roseta com o tripé do RS-200.**

A fixação é feita através de um cimento especial para o efeito. O cimento é obtido pela junção de um pó cerâmico e uma resina epóxida, originando uma mistura pastosa. A proporção utilizada é de 12 gotas da resina para duas colheres de pó cerâmico (o conta gotas e a colher são fornecidas pelo fabricante).

Depois de seco o cimento procedeu-se à continuação da montagem do sistema RS-200. Com a ajuda de um nível, Figura 36, fez-se o ajuste do equipamento de furar, de modo a que o seu eixo se posicione na perpendicular à superfície de medição, neste caso à roda dentada. Esse ajuste é efectuado recorrendo a uns parafusos presentes nos pernos de fixação. Antes de se colocar o engenho de furar, com o auxílio de uma lupa fixa a um suporte de translação acoplado ao tripé foi possível orientar a guia de furação concêntrica com o local onde se pretende realizar o furo na roseta. O movimento de translação em torno dos eixos de x e y é feito recorrendo a quatro parafusos micrométricos, presentes nesse suporte da lupa.



**Figura 36 - Alinhamento do RS-200 com a estrutura em estudo.**

Na Figura 37 é apresentada uma imagem obtida através da lupa graduada. A imagem mostra a escala graduada para alinhamento do engenho de furar, podendo verificar-se que o engenho de furar ficará

concêntrico com a roseta. A lupa apresenta uma guia graduada, podendo medir-se no final o diâmetro do furo efectuado com a fresa e observar-se com mais precisão pormenores do furo.



**Figura 37 – Imagem obtida na lupa do centro da roseta concêntrico com o engenho de furar.**

Como os testes com a roseta mostraram a adequação de sua instalação, os três extensómetros foram ligados às pontes de Wheatstone do indicador de deformações. As pontes foram balanceadas para fazer um zero de valores de micro deformações que poderão surgir no início, colocando os valores a zero e deixando a montagem estabilizar durante aproximadamente duas horas para se chegarem a valores estáveis.

### **7.2.2. Execução do furo**

Após a guia de furação estar devidamente centrada a luneta é retirada para dar lugar ao engenho de furar, tal como se pode ver na Figura 38.

O processo de furação pode introduzir tensões residuais, embora, na maioria dos casos estas possam ser negligenciáveis, dado o seu baixo valor, quando comparadas com as tensões residuais instaladas na estrutura ou peça a medir.

Segundo RODAKOSKI [5], a região de influência para o aparecimento das tensões residuais varia de 0,15 a 0,4 mm. De entre os principais parâmetros visando a redução de tensões geradas pela execução do furo estão a qualidade da geometria do furo cilíndrico maquinado e a velocidade de rotação na furação.

A ferramenta utilizada foi a fresa de topo do tipo cónica invertida com diâmetro de 1,6 mm, Figura 38.



**Figura 38 - Fresa centrada para início das medições, sistema de furação, fresas usadas.**

Para terminar a cadeia de medição das tensões residuais através do método do furo foi necessário utilizar um amplificador analógico do sinal da roseta de extensómetros para obtenção das micro-deformações. Neste trabalho foi utilizado um equipamento da marca Vishay modelo Model P3. Este equipamento permite a leitura e gravação dos valores obtidos ao longo do tempo decorrido nas medições.



**Figura 39 - Equipamento de leitura e gravação de tensões.**

Os resultados obtidos neste equipamento podem ser gravados em cartão de memória, mas no caso em questão foi utilizado um cabo USB de conexão ao computador. Através de um software previamente instalado é executada a interface e controlo do equipamento através do computador, bem como a gravação dos dados para posteriormente serem tratados e determinarem-se os valores das tensões residuais a partir das micro-deformações medidas.

Como já referido anteriormente no decorrer deste trabalho são calibrados diversos parâmetros neste equipamento de leitura, nomeadamente o tipo de ponte escolhida. Neste caso foi escolhida para medição uma instalação do tipo quarto de ponte.

Todos os resultados foram tratados segundo a norma ASTM E837 [7]. Antes de se iniciar a furação efectuou-se uma parametrização do amplificador analógico Vishay Model P3, onde realizados testes de extensometria, tendo sido lidos e registados alguns valores. Nessas parametrizações estão incluídas a medição em 3 canais, um para cada sensor. A ponte de Wheatstone foi utilizada com arranjo de  $\frac{1}{4}$  de ponte, 2 fios, para cada sensor.

Após este a realização deste conjunto de procedimentos, foi iniciado o processo de furação, tendo-se verificado que o avanço em profundidade foi muito pequeno. Foram trocadas as fresas ao longo do processo de furação mas concluiu-se que não era possível efectuar o furo com a profundidade necessária para obtenção de valores que depois de tratados indicassem o valor de tensões residuais presentes na peça.

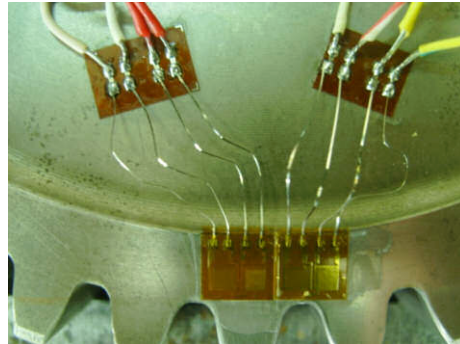
Realizaram-se vários ensaios deste tipo, na roda nova e na roda de serviço, mas a elevada dureza das rodas impediu a realização do furo com a profundidade necessária.

Por esta razão não foi possível obter valores de tensões residuais, de acordo com a norma ASTM E837 [7], através do método do furo nas peças estudadas neste trabalho.

### 7.3. Método do seccionamento

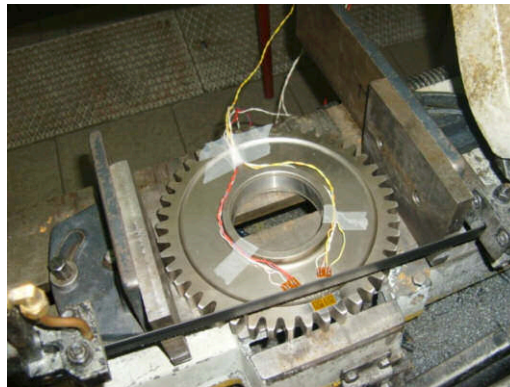
Para se efectuar o método do seccionamento e de acordo com os meios disponíveis para o efectuar houve necessidade de se encontrar uma solução o mais expedita possível.

O processo de colagem de extensómetro foi realizado de acordo com os procedimentos anteriormente expostos. Foram utilizadas rosetas de extensómetros biaxiais, como se pode observar na Figura 40.



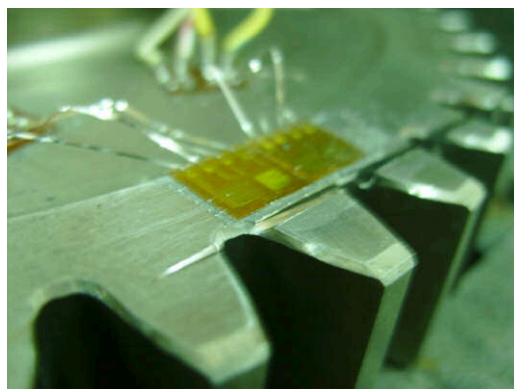
**Figura 40 - Extensómetros utilizados para a medição de tensões residuais pelo método do seccionamento.**

Para efectuar o corte de uma secção na engrenagem foi utilizado um serrote de fita para remover o material próximo da zona de medição dos extensómetros e provocar o relaxamento de deformações. Ver Figura 41.



**Figura 41 - Montagem utilizada para efectuar o corte de uma secção.**

Na Figura 42 pode observar-se a secção removida de material para medição dos valores de tensões residuais presentes no material.



**Figura 42 - Secção de material removido.**

## 7.4. Análise metalográfica

Este tipo de análise insere-se no trabalho com a finalidade de verificar a existência de defeitos de material ou possíveis micro-fissuras presentes na roda dentada provocadas pelas condições de serviço. Para isso, foi retirada uma amostra de uma roda dentada nova e de outra de serviço para análise.

As amostras foram cortadas recorrendo ao equipamento de corte da marca Struers, modelo Labotom, ver Figura 43. Este equipamento de corte foi utilizado pois permitia um elevado rigor no corte e assim prepararam-se as amostras com as dimensões finais para serem utilizados posteriormente.



Figura 43 – Serrote de disco.

Este equipamento permite cortar as peças com tamanhos mais pequenos com cortes regulares (é fundamental ter a noção do tamanho visto as dimensões máximas do equipamento que vai cobrir as peças com resina acrílica), seleccionando-se também apenas o local de interesse a ser estudado pela análise metalográfica.

Na Figura 44 está representada uma das amostras utilizadas neste trabalho.



Figura 44 – Amostra analisada.

O equipamento, mostrado na Figura 45, de marca Struers, modelo LaboPress-1 é utilizado para preparar as amostras com a resina, de modo a facilitar o seu manuseamento no polimento e observação no microscópio.



**Figura 45 - Equipamento de preparação das amostras (Struers LaboPress-1).**

Antes de colocar a peça no equipamento de solidificação da resina é preciso limpar as superfícies do orifício onde se coloca a peça visto que é um equipamento que trabalha com tolerâncias apertadas. Para isso utiliza-se um produto desengordurante que permite também uma fácil desmoldagem da peça final.

Em seguida coloca-se a peça no espaço para o efeito numa zona central e cobre-se com resina acrílica em pó.

Dependendo do tamanho da peça serão colocadas aproximadamente 3 colheres de resina em pó e a tampa é colocada verificando se fica bem apertada.

Regula-se o equipamento para que a peça fique sujeita a uma pressão de 30 a 35 kN a fim de compactar a resina em pó e evitar a formação de bolhas de ar no interior da amostra.

O passo seguinte é o de regular para uma temperatura de 180 °C durante aproximadamente 15 minutos. Para arrefecer e solidificar a resina que é utilizado um sistema de refrigeração a água.

O resultado final está representado na Figura 48, onde a peça está inserida no interior de resina transparente solidificada.

O processo de preparação da amostra para a observação no microscópio óptico é necessário proceder-se a um processo de polimento, este envolve várias fases, iniciando-se uma operação de desbaste recorrendo a lixas de elevada rugosidade, que vai diminuindo progressivamente até a um polimento no qual a amostra fique totalmente espelhada e na qual não se observe qualquer tipo de risco Este polimento será efectuado no equipamento Struers modelo LaboPol-25 que pode ser observado na Figura 46.



**Figura 46 - Equipamento de polimento (Struers RotoPol-21).**

No equipamento de polir foram utilizadas lixas com 250 mm de diâmetro com vários tipos de rugosidades.

Iniciou-se o processo com a lixa de 120 com uma rugosidade elevada alterando-se para lixas com números maiores e rugosidades mais baixas como são exemplo as lixas número 320, 500 e 1000.

Durante o processo de lixar a peça deve ser polida apenas em duas direcções, formando um ângulo aproximado de 90° entre elas e sendo alternada essa direcção a cada mudança de lixa para assim facilitar a remoção das imperfeições evitando riscos em outras direcções difíceis de retirar pela lixa.

Para finalizar fez-se o polimento utilizando-se um pano onde era colocado um spray com pó de diamante de tamanho de 3µm e de 1µm, como se pode observar na Figura 47.



**Figura 47 - Pano de polimento.**

Depois de finalizado o polimento o resultado que se deve obter é o presente na Figura 48.

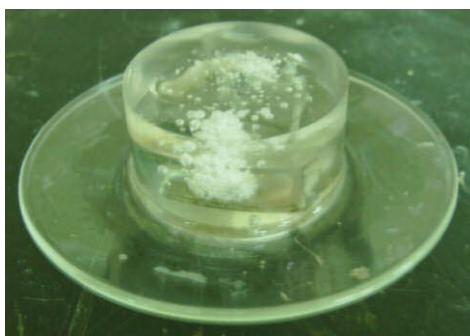


**Figura 48 - Amostra polida pronta para se proceder ao ataque químico.**

Após esta fase de polimento, a amostra será sujeita a um ataque químico utilizando um reagente designado de Nital para se poder visualizar a microestrutura ao microscópio, caso contrário não seria possível evidenciar as diferentes microestruturas presentes na peça.

Ao efectuar o ataque ter em atenção o tempo em que a peça está mergulhada no Nital porque se não estiver tempo suficiente a microestrutura não irá sobressair e se estiver tempo a mais pode queimar a peça e voltar a ser necessário voltar a efectuar o processo de polimento.

No caso em questão para se obterem os resultados desejáveis bastou estar com a peça mergulhada entre 10 segundos e 15 segundos no máximo. Na Figura pode observar-se o processo de ataque químico com Nital.



**Figura 49 - Vidro de relógio com Nital.**

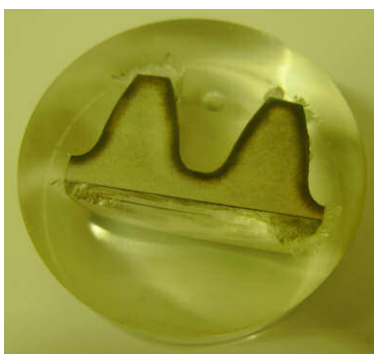
Na peça em questão e com as características adjacentes do aço, aproximadamente 8 segundos são suficientes para realçar as diversas zonas da amostra.

Depois de se retirar a peça do contacto com o Nital passou-se a superfície atacada por água abundante para limpar a peça, Figura 50.



**Figura 50 - Passagem abundante de água corrente.**

No caso em estudo, a amostra em questão como possui um tratamento superficial, sendo possível observar-se a olho nu a profundidade do tratamento que diferencia as diferentes zonas do dente, tal como se pode verificar na Figura 51.



**Figura 51 - Superfície atacada.**

No microscópio foram utilizadas 2 objectivas de 10x e 50x. Para facilitar a utilização do microscópio para focar foi utilizado um ecrã adicional conectado com o microscópio facilitando a visualização. Ver Figura 52.



**Figura 52 - Microscópio utilizado para observar as peças.**

Para se conseguir captar as imagens e guarda-las posteriormente para análise utilizou-se um software designado de Pinnacle Studio 8.

# Capítulo 8 Discussão de resultados

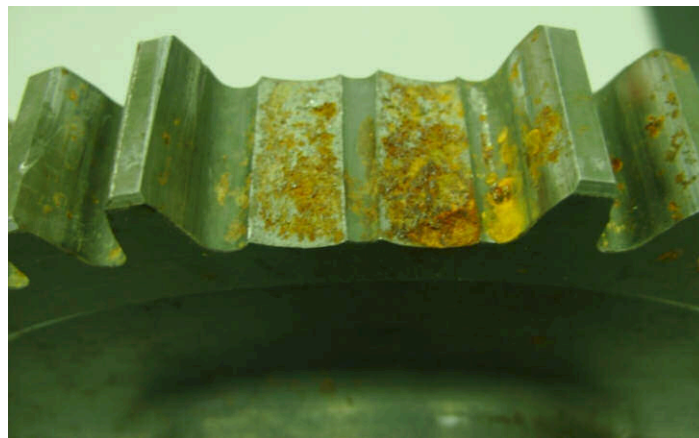
---

## 8.1. Introdução

Foi efectuada uma inspecção visual da roda Z44 para verificar o seu estado após serviço e observação de indícios de mau uso ou defeitos de fabrico. Foram, também, feitas medições de tensões residuais por dois métodos distintos e por fim foi realizada uma análise metalográfica para visualização de possíveis defeitos microscópicos e de tratamento térmico.

## 8.2. Análise visual

Após análise da roda devolvida constatou-se a existência de dois dentes partidos, arrancados pela raiz do dente, tal como se pode verificar na Figura 53.



**Figura 53 - Roda Z44 devolvida.**

Após análise visual mais profunda não se assinalam indícios de fissuras nos restantes dentes a nível da raiz. Não existem evidências de possíveis alterações à estrutura decorrentes muitas vezes dos processos de tratamento térmico superficial, ver Figura 54.



**Figura 54 - Aparência do dentado da engrenagem devolvida.**

Verifica-se que na zona do dentado da roda existe algum polimento, o que evidencia que a roda esteve sujeita a bastantes horas de trabalho, contrariamente ao referido pelo cliente aquando da sua reclamação.



**Figura 55 - Aparência da zona de ruptura de material.**

A observação da aparência da zona onde faltam os dentes aponta como causa provável da ruptura o arrancamento como se observa na Figura 55, visto não ser uma ruptura homogênea com a propagação de uma microfissura inicial que, associada aos ciclos contínuos de trabalho, que conduzissem à propagação de uma fissura, característica de uma ruptura por fadiga.

A exemplo de situações semelhantes e para o caso em particular, há inclinação que a possível causa de ruptura brusca da raiz do dente (arrancamento) tenha acontecido após choque brusco (pedras, raízes, abaixamento brusco da fresa no solo, etc.).

### **8.3. Análise metalográfica**

Após ensaio metalográfico, examinando a olho nu ou com ajuda de uma ampliação reduzida o aspecto da superfície após polimento e ataque químico, permite observar-se a homogeneidade do material, a distribuição de possíveis falhas, impurezas e profundidade de tratamentos térmicos. Ver Figura 56.



**Figura 56 - Visualização da profundidade da camada de cementação.**

Os corpos de prova escolhidos para pesquisa em metalografia, neste caso os dentes da roda Z44, foram escolhidos aleatoriamente.

Analisando as imagens obtidas em metalografia verifica-se que não se observaram microfissuras em toda a zona do dentado, tanto nos flancos como na raiz dos dentes, o que indicia um arranque de alguns dentes por um excesso de carga pontual sem que existam indícios de uma anterior formação de microfissuras através de fadiga ou outros defeitos.

Foi também possível verificar que a espessura da camada de cementação cumpre os requisitos de projecto permitindo atestar que o procedimento de tratamento térmico é o correcto.

## 8.4. Análise pelo método do seccionamento

Para uma posterior comparação de resultados, este método foi executado em duas rodas. Ambas as rodas foram cedidas pela empresa A. Brito, sendo uma usada, que foi devolvida pelo cliente ao departamento de qualidade já tendo estado em serviço e fracturado e a outra roda era completamente nova, nunca tendo estado ao serviço.

Após obtenção das medições, foi efectuado o tratamento dos valores obtidos com a extensometria. Na Tabela 8 apresentam-se os valores de tensões residuais determinados:

**Tabela 8 - Valores obtidos pelo método do seccionamento.**

	Extensómetro 1		Extensómetro 2	
	Canal 1	Canal 2	Canal 3	Canal 4
Roda nova	8,2 MPa	7,3 MPa	7,9 MPa	-8 MPa
Roda usada	73,8 MPa	17,7 MPa	3,03 MPa	12,6 MPa

Da análise dos resultados permite observar-se que ocorre tendência para o aumento dos valores de tensões residuais após a roda entrar em serviço, praticamente todos os valores obtidos mostram um aumento do nível de tensões residuais na roda que já tinha estado ao serviço. Contudo, estes resultados são insuficientes para tirarmos uma conclusão mais generalizada, para isso seria necessário um maior número de medições com outras rodas novas e após serviço.

Observando o Extensómetro 1 existe um claro aumento do valor da tensão residual medida nas duas direcções na roda usada. No caso do Extensómetro 2 não é muito consensual os valores obtidos, chegando um a diminuir numa direcção e o outro a trocar o seu estado de tensão, passando do estado de compressão na roda nova para um estado de tracção na roda usada.

Pode verificar-se que as rodas, após processo de fabrico, têm níveis de tensões residuais muito baixos, apesar de sofrerem tratamentos térmicos bastante violentos. Podendo concluir-se, que o tratamento térmico de relaxamento de tensões (revenido) é bastante eficiente.

Apesar do valor das tensões residuais não ser a causa principal da ruptura das peças, existindo um aumento quando o equipamento está em serviço, estando associado a outras causas como fadiga, sobrecargas durante alguns ciclos de utilização, poderá levar a uma falha prematura dos equipamentos em questão.

# Capítulo 9 Conclusões e Trabalhos futuros

---

## 9.1. Conclusões

A realização deste trabalho permitiu concluir que o método do furo utilizado não foi o mais adequado para a medição de tensões residuais em peças que sofreram tratamento térmico de endurecimento, dado que a elevada dureza do material provocava um desgaste prematuro da fresa.

Foram efectuadas análises metalográficas para verificar a presença de fissuras microscópicas no dente e na raiz do dente. Não foram observadas quaisquer micro-fissuras das secções analisadas. A análise metalográfica permitiu ainda verificar a profundidade da camada de cementação, estando os valores compreendidos no intervalo definido pela norma.

Examinando os valores obtidos para as tensões residuais através do método do seccionamento, verifica-se que o seu valor é menor que a tensão limite de cedência do material, concluindo-se que esta poderá não ser a causa directa da falha do componente. Deste modo, a empresa A. Brito não pode assumir a responsabilidade dos prejuízos provocados pela falha das engrenagens.

O estudo das tensões residuais nas engrenagens que sofreram ruptura dos dentes, permitiram verificar que o seu nível é superior ao das engrenagens após fabrico. Este resultado indicia que foram introduzidas tensões residuais durante a curta vida de serviço, o que associado a outros factores como excessos de cargas cíclicas e fadiga podem desencadear a falha das engrenagens.

A literatura da especialidade apontam que a falha seja provocada por sobrecargas súbitas dada a inexistência de propagação de microfissuras iniciais, tendo os dentes em falta sido arrancados.

Atendendo a todas as questões levantadas, em reuniões entre a firma A. Brito e o cliente, afastando a possibilidade do problema estar na qualidade do material, concluiu-se que o projecto da engrenagem utilizado pelo cliente (onde a roda Z44 estava inserida) não seria adequado para o tipo de aplicação desejado. O modelo desta engrenagem tem sido utilizada nos últimos 30 anos nas alfaias agrícolas, e que não tinha sofrido qualquer evolução. Significa pois que a potência transmitida pelas máquinas actuais é muito superior à inicialmente prevista para a sua utilização.

No intuito de evitar a alteração total de equipamentos, dos projectos e dos processos produtivos, o cliente optou pela introdução de uma embraiagem no cardan no sentido de limitar o binário transmitido ao equipamento, evitando, excessos de binário que possam provocar ruptura dos mais variados elementos utilizados no projecto.

Para finalizar, a realização deste trabalho permitiu sensibilizar para a importância de monitorização desta grandeza (tensões residuais), pois o conhecimento dos seus valores e sua distribuição permite otimizar os intervalos de manutenção de sistemas mecânicos, em áreas como a agricultura.

## **9.2. Propostas para trabalhos futuros**

Como complemento e desenvolvimento do presente trabalho podem realizar-se alguns trabalhos futuros na área da medição das tensões residuais de componentes mecânicos. Em particular, teria interesse o desenvolvimento de um sistema expedito e direccionado para medição de tensões residuais em engrenagens que possa ser montado no departamento de qualidade da empresa, evitando assim, o recurso às instituições de ensino superior, com o evidente atraso na execução do trabalho.

No sentido de contornar as dificuldades encontradas na medição das tensões pelo método do furo, propõem-se que a execução do furo seja realizada por outras técnicas que substituam a fresa, isto é, eletroerosão ou jacto de ar com abrasivo.

Uma outra proposta vai no sentido de redimensionar as engrenagens para as potências envolvidas, permitindo simplificar o sistema de transmissão de potência.

## Referências

- [1] KESAVAN, K.; RAVISANKAR, K.; PARIVALLAL, S.; SRESHYLAM, P.; **“Non Destructive Evaluation of Residual Stresses in Welded Plates Using the Barkhausen Noise Technique”**; Experimental Techniques; 2005.
- [2] LU, J; JAMES, M. R. and Others; **“Handbook of Measurement of Residual Stresses”**; Society for Experimental, Inc.; Edited by Jian Lu; 1996.
- [3] MACHERAUCH, E.; **“Introduction to Residual Stress”**; Advanced in Surface Treatments; Vol. 4; International Guide Book on Residual Stress; 1986.
- [4] FERNANDES, J. L.; **“Análise e Modelagem de Tensões Residuais em Juntas Soldadas”**; Tese de Doutorado; Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro; 2002.
- [5] RODAKOSKI, M. R.; **“Medição de Tensões Residuais com Holografia Eletrônica”**; Tese de Doutorado; Universidade Federal de Santa Catarina; 1997.
- [6] BOETTGER, J.; **“Desenvolvimento de um Sistema Portátil para a Medição de Tensões Residuais em campo utilizando Holografia Eletrônica e o Método do Furo”**; Dissertação de Mestrado; UFSC - Universidade Federal de Santa Catarina; 1998.
- [7] ASTM; **“Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method”**; ASTM Standard E387-01; American Society for Testing and Materials; 2002.
- [8] Rosenthal, D.; Norton, J. T.; **“A Method of Measuring Triaxial Residual Stresses in Plates”**; The Welding Journal; Vol. 24; 1945.
- [9] Ueda, Y.; Fukuda, K.; **“New Measuring Method of Three Dimensional Welding Residual Stresses Based on Newly Proposed Principle of Inherent Strain”**; Naval Architecture and Engineering (Japan); Vol. 18; 1980.
- [10] Kirsch, G.; **“Theory of Elasticity and Application in Strength of Materials”**; Zeitschrift Vevein Deutscher Ingenieure, 42; No. 29; 1898.
- [11] SOARES, A. C. C.; **“Avaliação dos efeitos da plasticidade na medição de tensões residuais pelo método do furo-cego”**; Tese Doutorado em Engenharia Mecânica; Centro Técnico Científico da PUC-Rio; 2003.

- [12] RENDLER, N. J.; VIGNESS, I.; **“Hole-drilling Strain-gages Method of Measuring Residual Stresses”**; Experimental Mechanics; Vol. 1; Number 12; December 1966.
- [13] DALLY, J. W. & RILEY; WILLIAM F.; **“Experimental stress analysis”**; 3ªed.; Singapore; McGraw-Hill Book Co.; International Edition - Engineering Mechanics Series; 1991.
- [14] BUCKINGHAM, E.; **“Analytical Mechanics of Gears”**; New York; Dover Publications; 1988.
- [15] DUDLEY, D. W.; **“Handbook of Practical Gear Design”**; Lancaster; Technomic; 1994.
- [16] ALBAN, L. E.; **“Failures of Gears”**; 9th ed.; v. 11; Metals Park; Ohio; American Society for Metals; 1988.
- [17] HENRIOT, G.; **“Traité Théorique et Pratique des Engrenages”**; Vol. 1 e 2; 5ª Edição; Dunod; 1975.
- [18] WANG, H. P.; **“The alignment Error of the Hole-Drilling Method”**; Experimental Mechanics; January 1979.
- [19] ALVES, F.; Apontamentos de Aula; Materiais de Construção Mecânica I; **“Tratamentos Térmicos dos Aços”**; Faculdade de Engenharia Universidade do Porto; 1º Semestre; 2005/2006.
- [20] <http://bf.no.sapo.pt/ttm/ttool4-1.pdf>; Fernandes F.; Universidade Nova de Lisboa; disponível em [www.bf.no.sapo.pt](http://www.bf.no.sapo.pt), acessado a 20 de Setembro de 2010.
- [21] <http://pt.wikipedia.org>; acessado a 21 de Setembro de 2010.
- VISHAY - VISHAY MEASUREMENTS GROUP; **“Strain Gages and Accessories”**; disponível em: [www.vishay.com](http://www.vishay.com), acessado a 07 de Setembro de 2010.
- SOARES, Pinto; **“Aços – características e tratamentos”**; Editado pela Livraria Livroluz; 5ª Edição; 1992.
- MORAIS, S.; **“Desenho Técnico Básico 3”**; Porto Editora; 24ª Edição; 2007.
- BATISTA, A.C.; DIAS, A. M.; **“Contact fatigue of carbonitred and shot-peened gears effects of residual stresses”**; Tese de Doutoramento, Faculdade de Engenharia do Porto; 2003.
- MARTINS, C. O.; Rocha A.S.; **“Análise de Tensões Residuais em Anéis para Rolamentos de Aço ABNT 52100 Através do Método do Furo Cego”**; Revista Matéria V.9; 2004.

JUNIOR, J. R.; **“Análise de Tensões Residuais, Integridade Superficial e Forças de Usinagem no Fresamento de Topo de Aço SAG 4340 Endurecido”**; Tese de Mestrado; Centro Universitário da FEI, 2009.

KUDRYARTSEV, Y. F.; **“Springer Handbook of Experimental Solid Mechanics, Sharp (Ed.)”**; Residual Stress; Springer 2008.

RIBEIRO, J.E.; **“Caracterização Experimental e Numérica de Campos de Tensões Residuais Provocadas por Processos de Maquinagem”**; Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto; 2006.

AMOROS, R.T.; **“Avaliação de Tensões Residuais em Chapas planas de Aço Carbono, Destinadas a Processos de Corte a Laser, Pelo Método da Anisotropia Planar”**; Tese de Mestrado; Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento – Lactec; Curitiba; 2008.

HOFFMANN, Karl; **“An Introduction To Measurements Using Strain Gages”**; Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Darmstadt; 1989.

GRANT, P.V.; LORD, J. D.; WHITEHEAD, P. S.; **“The Measurement of Residual Stresses by the Incremental Hole Drilling Technique”**; Stresscraft Ltd..

ARAI, T. and others; **“ASM Handbook – Heat Treating”**; ASM Handbook Committee; Volume 4; 1991.

BRENT, A. and others; **“ASM Handbook – Metallography and Microstructures”**; ASM Handbook Committee; Volume 9; 2004.

ANDRESSEN, P. and others; **“ASM Handbook – Fatigue and Fracture”**; ASM Handbook Committee; Volume 19; 1996.

ANEXO A - Tecido produtivo da empresa A.Brito

O tecido produtivo da empresa é caracterizado pelos seguintes equipamentos:

#### **Centros de maquinagem CNC**

- 1 un. MITSUI-SEIKI HS3A horizontal palete 400x400
- 1 un. MITSUI-SEIKI HS3A horizontal palete 400x400 com 4 eixos
- 1 un. MORI-SEIKI M-25FV vertical palete 420x350
- 2 un. OKUMA MX-50HB horizontal palete 500x500
- 1 un. MITSUI-SEIKI HS5A horizontal palete 630x630

#### **Tornos CNC**

- 1 un. HITACHI-SEIKI 20G, horizontal dia. 210 L600 entre centros
- 1 un. HITACHI-SEIKI 25G, horizontal dia. 300 L600 e. c.
- 1 un. NAKAMURA TMC30, horizontal dia. 300 L500 e. c.
- 1 un. CINCINNATI 850, horizontal dia. 300 L1000 e. c.
- 1 un. CINCINNATI 900, horizontal dia. 300 L600 e. c.
- 1 un. MORI-SEIKI SL3, Horizontal dia. 300 L500 e. c.
- 1 un. MORI-SEIKI VL55, Vertical CNC dia. 550

#### **Rectificação CNC**

- 1 un. SCHIGIYA 300-600, cilíndrica exterior dia. 300 L 600 e. c.
- 1 un. SCHIGIYA 300-1000, cilíndrica exterior dia. 300 L 1000 e. c.

#### **Maquinaria convencional universal**

- 1 un. INDUMA, frezadora 1500x1000x800, DRO 3 eixos
- 1 un. JORACIN, frezadora 900x350x200, DRO 3 eixos
- 1 un. LILIAN, frezadora 900x300x300
- 1 un. HECKERT, frezadora 750x350x250
- 1 un. TOS W100A, mandriladora 1250x1250x800, DRO 3 eixos

#### **Tornos convencionais**

- 1 un. torno horizontal PONAR dia. 300 L1500 entre centros
- 1 un. torno horizontal PONAR dia. 300 L1000 e. c.
- 1 un. torno horizontal PONAR dia. 300 L800 e. c.
- 1 un. torno horizontal CAZENEUVE dia. 350 L1500 e. c.
- 1 un. torno vertical DORRIES dia. 1200 H 700
- 1 un. torno vertical BERTHIEZ dia. 1000 H 600
- 1 un. torno vertical BERTHIEZ dia. 4500 H 1800

#### **Máquinas de rectificação**

- 1 un. CHURCHILL, máq. rect. interior dia. 250 L150
- 1 un. PONAR, máq. rect. interior dia. 120 L150

- 1 un. HIDRO-PRECIS, máq. rect. interior dia. 250 L150
- 1 un. PRINCE, rectificaco excêntricos g. m. dia. 100 L 1400 b. c.
- 1 MATRIX, exterior dia. 300 L 600 e. c., equipada com MARPOSS
- 1 MATRIX EP, exterior dia. 300 L1000 e. c., equipada c/ MARPOSS
- 1 un. WICKMAN, sem centros dia. 120x200
- 1 un. DELAPENA SUPER HOONE, horizontal honning
- 1 un. MATRIX rectificaco de estrias, até 14 estrias L 1000 b. c.

#### **Máquinas de talhar engrenagens**

- 1 Talhadora freza-mãe PFAUTER P630, Mmax=8 dia. max= 630
- 1 Talhadora freza-mãe PFAUTER P251, Mmax=5 dia. max= 250
- 1 Talhadora freza-mãe ZFWZ 250x5, Mmax=5 dia. max= 300
- 1 Talhadora freza-mãe 1000x10 MODUL, Mmax=10 dia. max= 1000
- 2 Talhadora freza-mãe MIKRON 9, Mmax=1 dia. max= 30
- 1 Talhadora freza-mãe KOEPFER 110, Mmax=1,5 dia. max= 30
- 2 Talhadora SYKES V10B, Mmax=6 dia. max= 300
- 1 Talhadora SYKES V10B, engrenagens interiores helicoidais
- 1 Talhadora Rollette Sunderland 5 A
- 2 Talhadora cnico-recta GLEASON 14
- 1 Talhadora espiral cnica OERLIKON SK II, Mmax=10 dia. max= 400
- 1 Máquina de rodagem OERLIKON SKL
- 1 Talhadora freza-mãe para estrias HECKERT ZFWVG250, Mmax=6 dia. max= 250 L1500 b. c.
- 1 Gear grinder REISHAUER NZA, Mmax=5 dia. max= 300

#### **Equipamento diverso**

- 1 un. Prensa hidráulica de desempenho DUNKES HR25, Pressão 250 kN, curso 160mm
- 1 un. equipamento de soldadura MIG
- 1 un. serrote de fita automática dia. 250
- 1 un. forno de normalizao FULMINA 1000°, 1000x1000x800
- 1 un. Forno eléctrico dia. 600, 1000°
- 1 un. facejamento e centragem, dia. max=90

#### **Equipamento de medio**

- 1 un. BROWN & SHARPE MISTRAL CNC
- Diverso equipamento de medio (durmetro, micrmetros, planos de granito, etc.)

## ANEXO B - Certificação da empresa A. Brito



# CERTIFICATE

The TÜV CERT Certification Body  
of TÜV Rheinland Industrie Service GmbH

TÜV Rheinland Group

hereby certifies in accordance with  
TÜV CERT procedures that

**A. Brito, Indústria Portuguesa de  
Engrenagens, S.A.**

**Estrada Interior da Circunvalação, 5109  
4350-119 Porto (Portugal)**

has established and applies a quality system for

**Manufacture, machining and repair  
of mechanical components**

An audit was performed,

Report No. **058125**

Proof has been furnished that the requirements according to

**DIN EN ISO 9001:2000**

are fulfilled.

The certificate is valid until **2011-08-07**

Certificate Registration No. **01 100 058125**



Madrid, 2008-07-31



**TÜV Rheinland**

TÜV CERT Certification Body of  
TÜV Rheinland Industrie Service GmbH

ZERTIFIKAT CERTIFICADO CERTIFICATE CERTIFICAT

**L'Organisme de Certification TÜV Rheinland Portugal, Lda.**

Certifie que la société

**A. Brito, Indústria Portuguesa de Engrenagens, S.A**  
**Estrada Interior da Circunvalação, N° 5109**  
**4350-119 Porto**

a établi et entretient un système gestion de la qualité pour le domaine de validité suivant

**Fabrication, usinage et reparation de composants  
mécaniques.**

Par l'audit qualité consigné dans le rapport n° 0 01 05099 en 28/03/2008

la conformité aux exigences de la norme

**NP EN ISO 9001:2000**

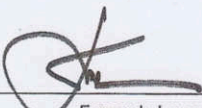
a été démontrée.

Ce certificat est valable jusqu'en 23/06/2008 until 22/06/2011

et a été enregistré sous le n° 0 01 05099



Lisbonne, 23-06-2008  
Localité, Date



Fernando Lames  
Administrateur, TÜV Rheinland Portugal, Lda.

La validité de ce certificate peut être confirmé par la consultation du site [www.tuv.pt](http://www.tuv.pt)

TÜV Rheinland Portugal  
Edifício Zenith (Arquiparque)  
R. Dr. Ant.º Loureiro Borges, 9, 3º  
1495-131 Algés  
Portugal

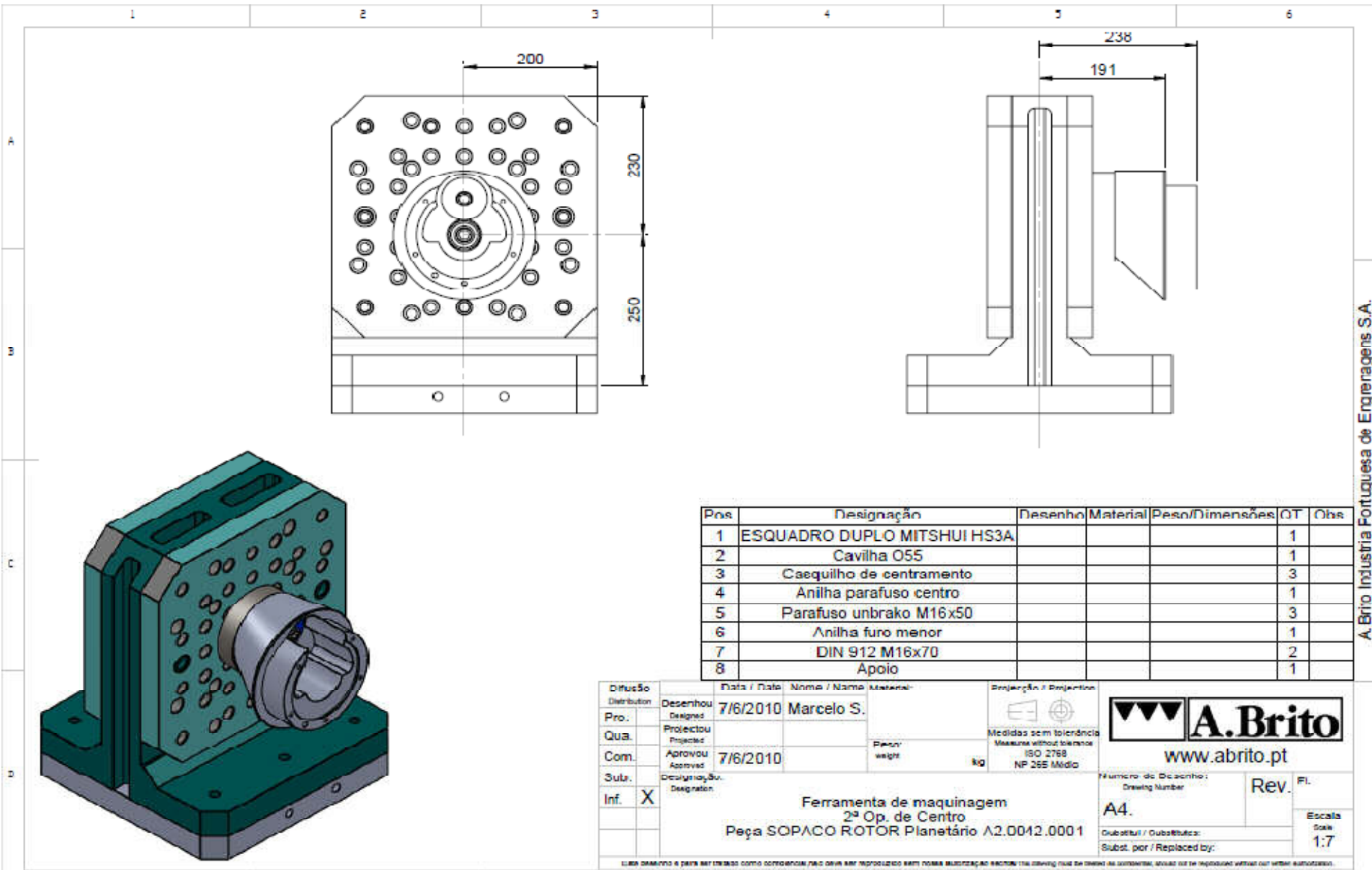
Tel. : +351 21 413 70 40  
Fax: +351 21 413 70 45 / 46  
e-mail: [geral@tuv.pt](mailto:geral@tuv.pt)

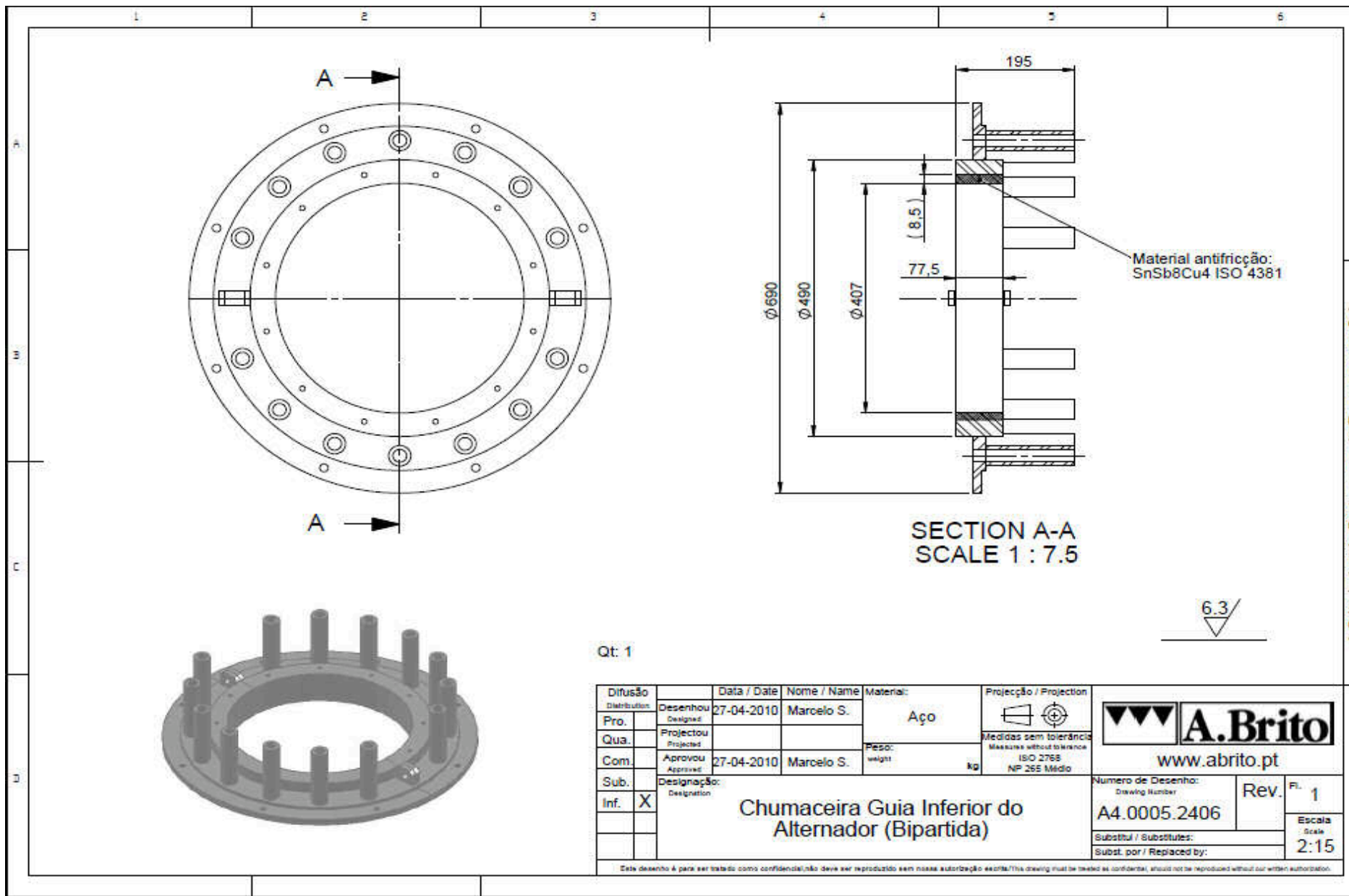
[www.tuv.pt](http://www.tuv.pt)

## ANEXO C - Desenho de definição Roda Z44



ANEXO D - Desenhos de definição (Trabalhos criados durante estágio)

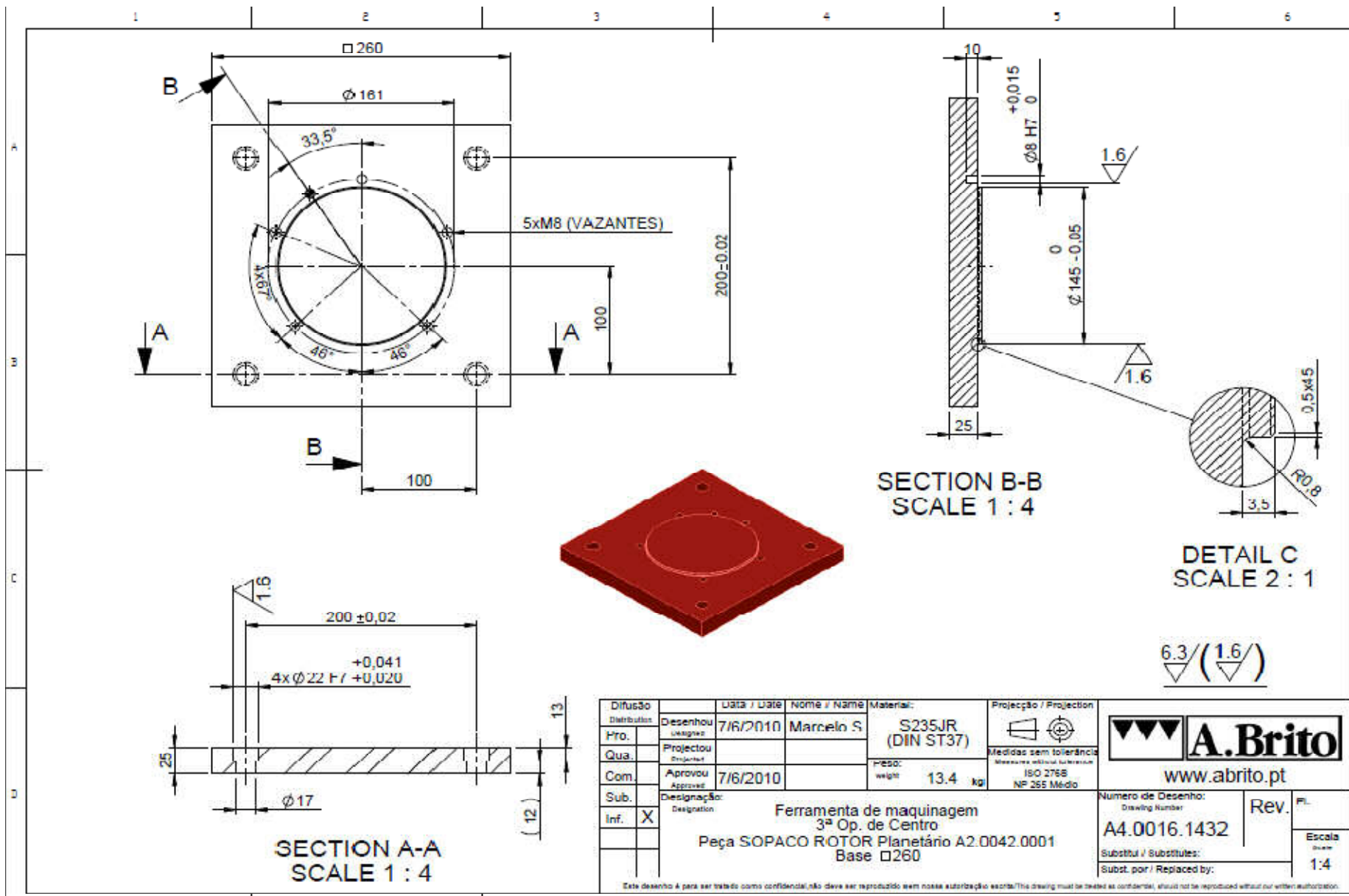




Qt: 1

Difusão Distribution	Desenhou Designed	Data / Date	Nome / Name	Material:	Projecção / Projection	 www.abrito.pt
Pro.	Projectou Projected	27-04-2010	Marcelo S.	Aço	 Medidas sem tolerância Measures without tolerance ISO 2768 NP 255 Médio	
Com.	Aprovou Approved	27-04-2010	Marcelo S.	Peso: weight	kg	Numero de Desenho: Drawing Number
Sub.	Designação: Designation	<b>Chumaceira Guia Inferior do Alternador (Bipartida)</b>			A4.0005.2406	
Inf.	X				Rev. 1	
Substitui / Substitutes: Subst. por / Replaced by:						
<small>Este desenho é para ser tratado como confidencial;não deve ser reproduzido sem nossa autorização escrita/This drawing must be treated as confidential, should not be reproduced without our written authorization.</small>						

A Brito Industria Portuguesa de Engenharia S.A.



SECTION B-B  
SCALE 1 : 4

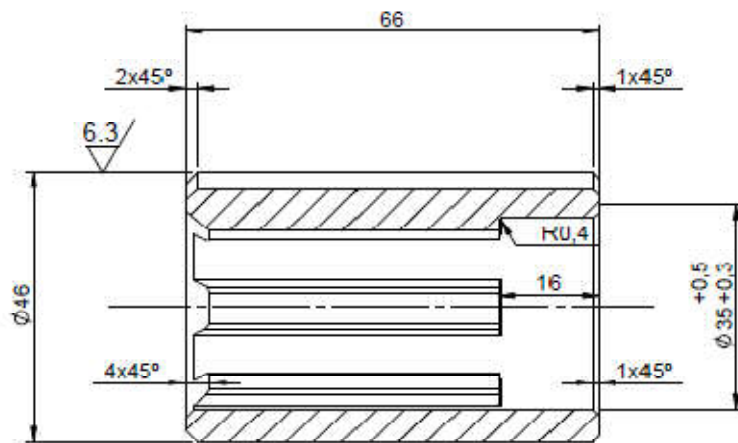
DETAIL C  
SCALE 2 : 1

SECTION A-A  
SCALE 1 : 4

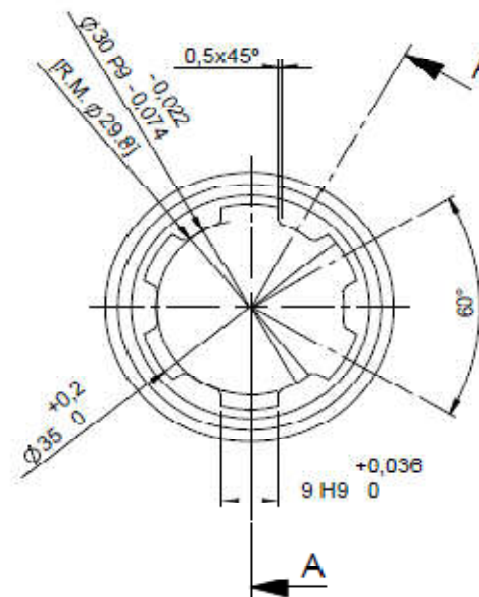
Difusão / Distribution	Lista / List	Nome / Name	Material:	Projecção / Projection	 www.abrito.pt
Hto. / Designer	7/6/2010	Marcelo S.	S235JR (DIN ST37)	 Medidas sem tolerância / Measures without tolerances	
Com. / Approved	7/6/2010		PESO: weight 13.4 kg	ISO 2768 NP 265 Médio	Numero de Desenho: Drawing Number
Sub. / Designação: Designation					A4.0016.1432
Inf. / X					Rev. / Escala / Scale
					1:4

Este desenho é para ser tratado como confidencial, não deve ser reproduzido sem nossa autorização escrita. / This drawing must be treated as confidential, should not be reproduced without our written authorization.

A. Brito Indústria Portuguesa de Engenharia S.A.



SECTION A-A



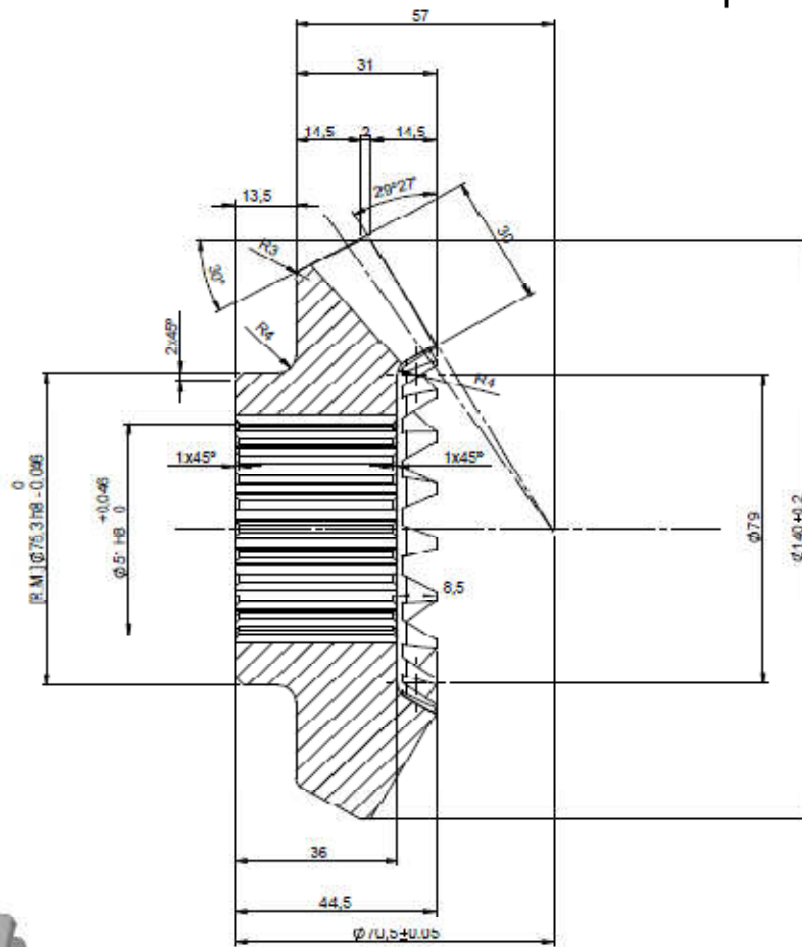
3.2 / (6.3)



Difusão Distribution	Data / Date	Nome / Name	Material:	Projecção / Projection	 www.abrito.pt
Pro. Design	22/6/2010	Marcelo S.	DIN 32 CrNiMo4	 Mensuras sem tolerância Measure without tolerance	
Qua. Projected			Peso: weight 0.10 kg	ISO 2768 NP 255 Médio	Numero de Desenho: Drawing Number
Com. Approved	22/6/2010				A4.01.0084
Sub. Designação: Designation					Rev. 1
Inf. X					Escala Scale 1:1
					Substitui / Substitutes: subst. por / replaced by:

Adaptação do espalhador  
Elemento de ligação

Este desenho é para ser tratado como confidencial, não deve ser reproduzido sem nossa autorização escrita/This drawing must be treated as confidential, should not be reproduced without our written authorization.



Designação	Variável	Dados
Módulo	m	0,5
Nº de Dentes	z	21
Ângulo de Pressão	α	20
Acabamento		Rectificação

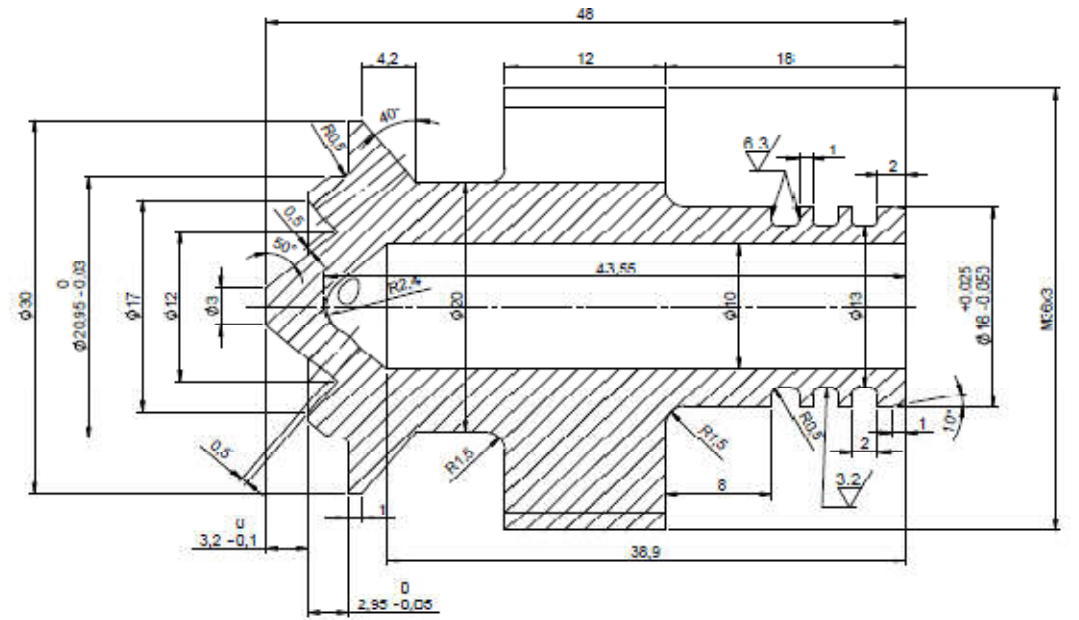
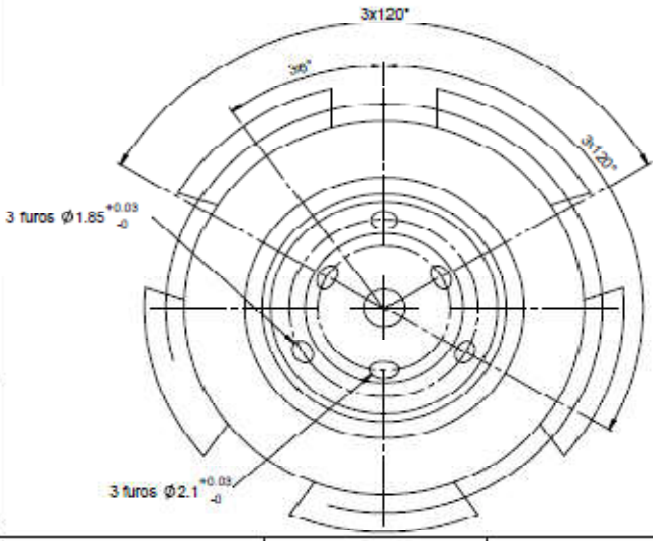
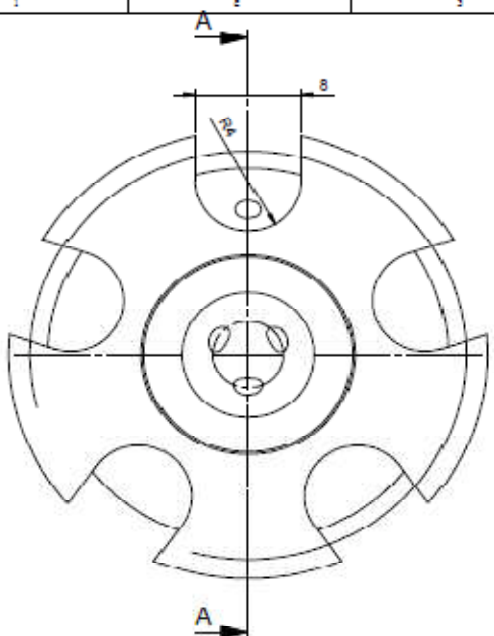
Designação	Variável	Dados
Módulo	m	2
Nº de Dentes	z	21
Ângulo de Pressão	α	20
Distância entre - câmbios	Δf	67,25
Correção do Dente	δ	-0,616
Coifa de Controlo	EK (9)	38,6 <sup>0</sup> <sub>-0,03</sub>
Acabamento	Talhagem	

TRATAMENTO TERMOQUIMICO  
Cementar, temperar e revenir  
Prof. Camada Cementada: 0,16 a 0,8mm  
Dureza superficial: 57 - 61 HRC

3.2/



Desenho	Data / Data	Nome / Nome	Materia:	Projecção / Projectio	 www.abrito.pt
Pro. Desenhador	0-/-2010	MARCELO S.	Aço RC645	1º	
Quil. Projectista				2º	
Com. Aprov. Técnico	6-7-2010			3º	
Sub. Inf. Designação	FRESA STR e STK Roda Z=21			Rev. n.º 1	
				Escala 1:1	



SECTION A-A  
SCALE 3 : 1



TRATAMENTOS TÉRMICOS:  
 Témpera e duplo revenido - Dureza 46-50 HRC;  
 Nitruração (camada 0,1-0,2 mm) - Dureza 65 HRC

Qt. = 20

1,6 / ( 3,2 / 8,3 )

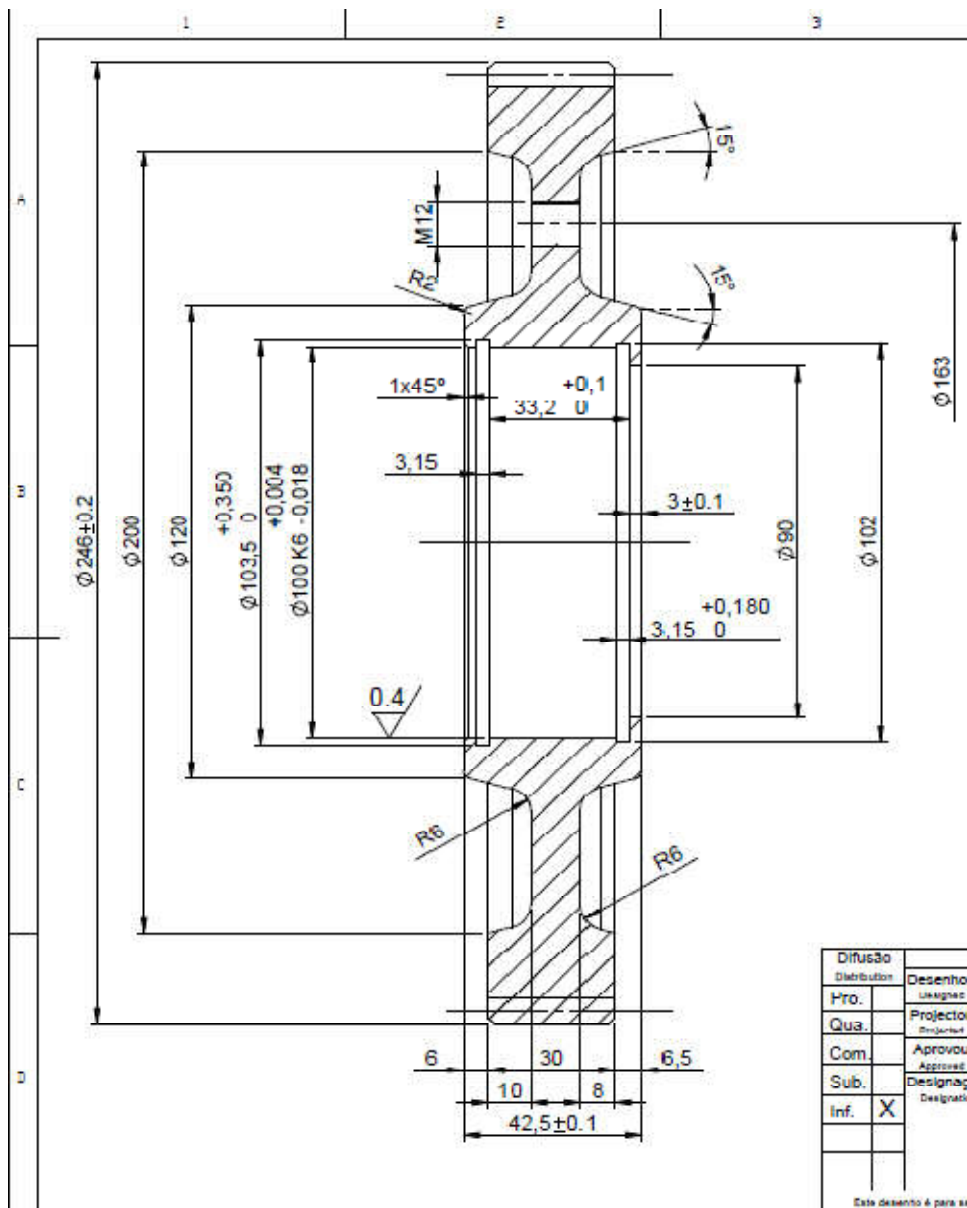
Proj. / Projector	Projeto / Projector
Pro. / Designer	29-6-2010 / Marcelo S.
Qtd. / Quantity	Projeto / Projector
Com. / Comment	29-6-2010 / Marcelo S.
Sub. / Submitter	Designação / Designation
Int. / Interfer	X

Material: Din X40CrMoV5.1  
 Massa: 0.11 kg

www.abrito.pt

Placa atomizadora traseira para queimador de fuel oleo

Rev. 1 Escala 3:1



Designação	Variável	Dados
Módulo	m	6
Nº de Dentes	z	39
Ângulo de Pressão	$\alpha$	20
Distância entre - centros	$\Delta f$	
Correção do Dente	$\delta$	
Cota de Controlo	EK (5)	R7 R5 <sup>0</sup> <sub>-0.05</sub>
Acabamento		Talhagem



TRATAMENTO TERMOQUIMICO  
 Cementar, temperar e revenir  
 Prof. Camada Cementada: 0.6 a 0.8mm  
 Dureza superficial: 57 - 61 HRC

6.3 / (0.4)

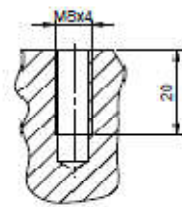
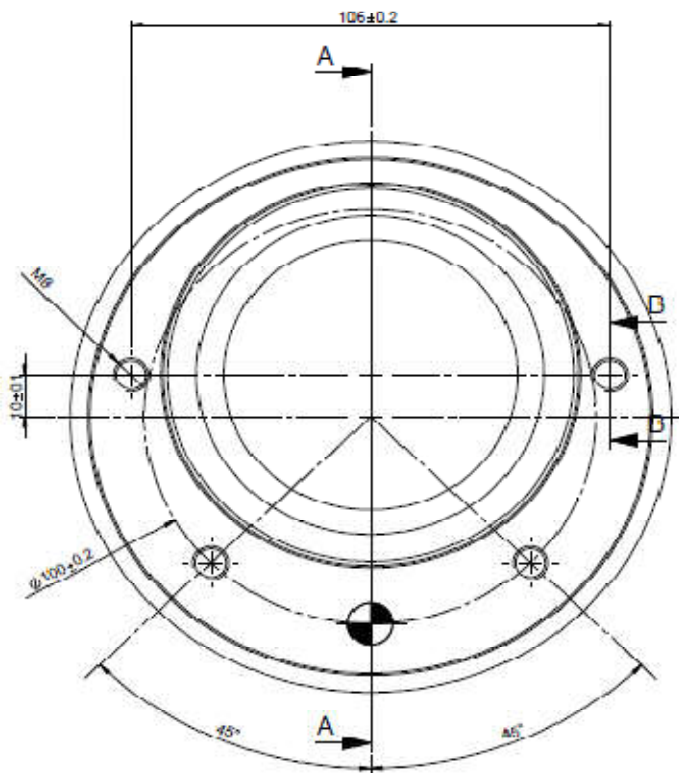
Difusão Distribution	Desenhou Designed	Data / Date 9-7-2010	Nome / Name Marcelo S.	Material: DIN 16MnCr15	Projeção / Projection 
Pro.	Projectou Projected			Peso: weight	Medidas sem tolerância Measurements without tolerances
Com.	Aprovou Approved	9-7-2010		kg	ISO 2768 NF 265 Médio
Sub.	Designação: Designation				
Inf.	X				

**FRESA S.T.K.**  
RODA z=39

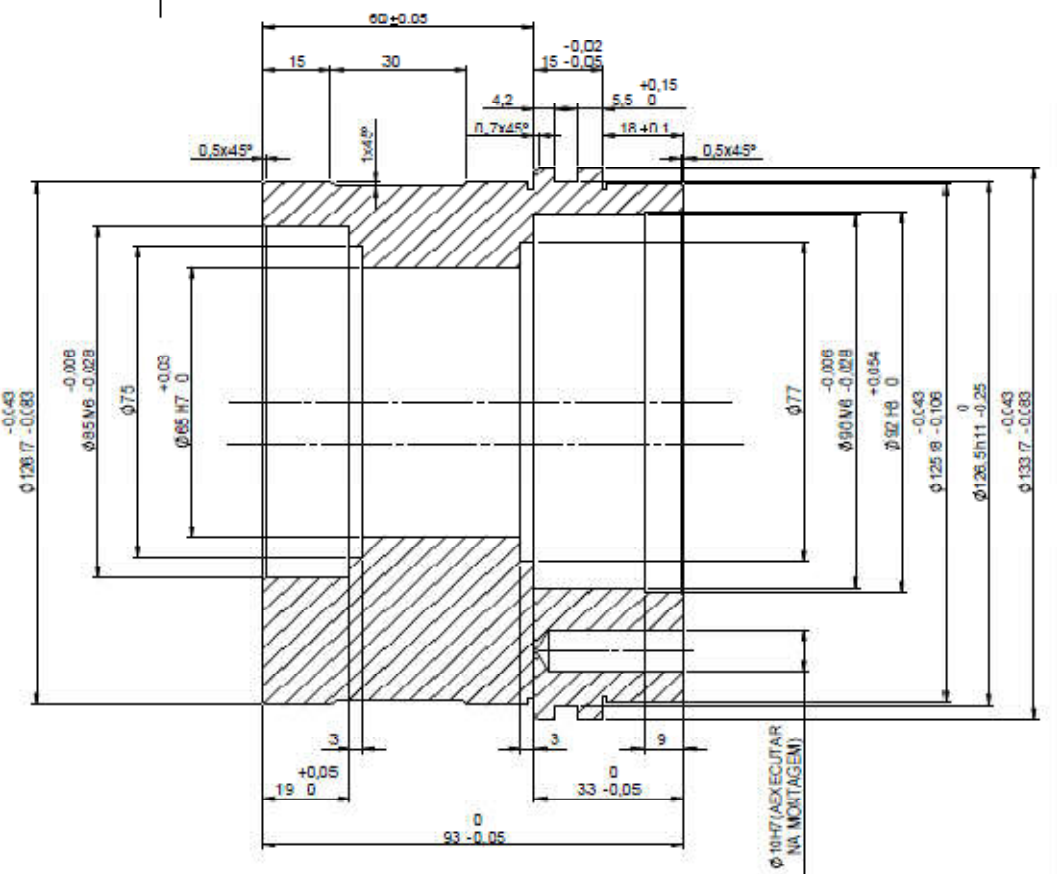
 www.abrito.pt	
Numero de Desenho: Drawing Number <b>A4.01.0205</b>	Rev. <b>1</b> Escala Scale <b>1:1.5</b>
Substit. / Substitutes: Subst. por / Replaced by:	

Este desenho é para ser tratado como confidencial, não deve ser reproduzido sem nossa autorização escrita / This drawing must be treated as confidential, should not be reproduced without our written authorization.

A. Brito Indústria Portuguesa de Engenharia S.A.

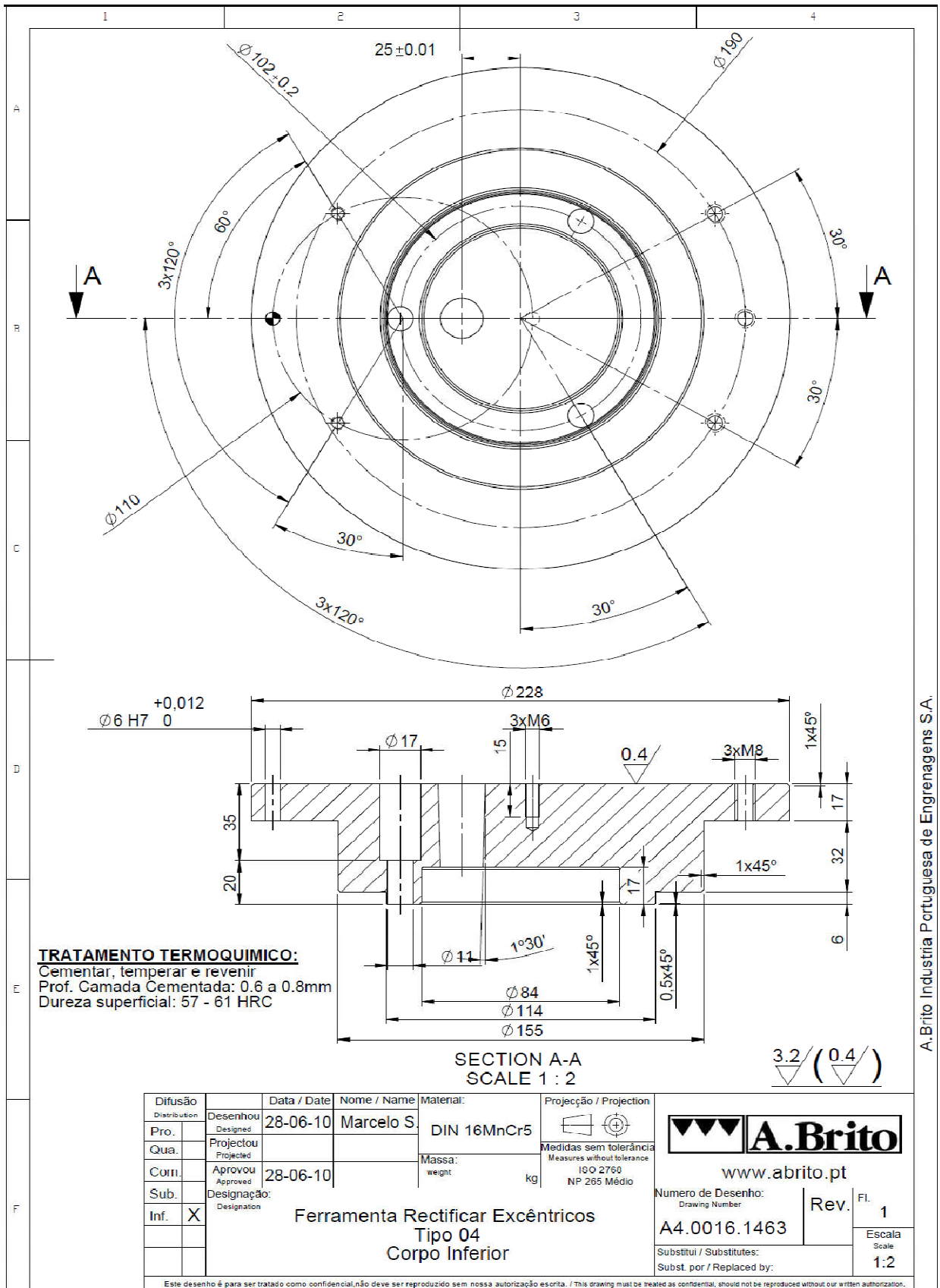


SECTION B-B  
SCALE 1 : 1



SECTION A-A  
SCALE 1 : 1

Elaborado / Desenhado	3-7-2010	Marcelo S.	Grafite cofcrolidal	Projecção / Projection	 www.abrito.pt
Projeção / Projection	3-7-2010				
Subst. / Substituído					Número de Desenho / Drawing Number: <b>A3.U1.UU04</b>
Inf. X					Rev. n.º 1 Escala / Scale: 1:1





INDÚSTRIA PORTUGUESA DE ENGRENAGENS, SA

Web: www.abrito.pt  
E-mail: abrito@abrito.pt

FICHA DE CONTROLO  
CONTROL REPORT

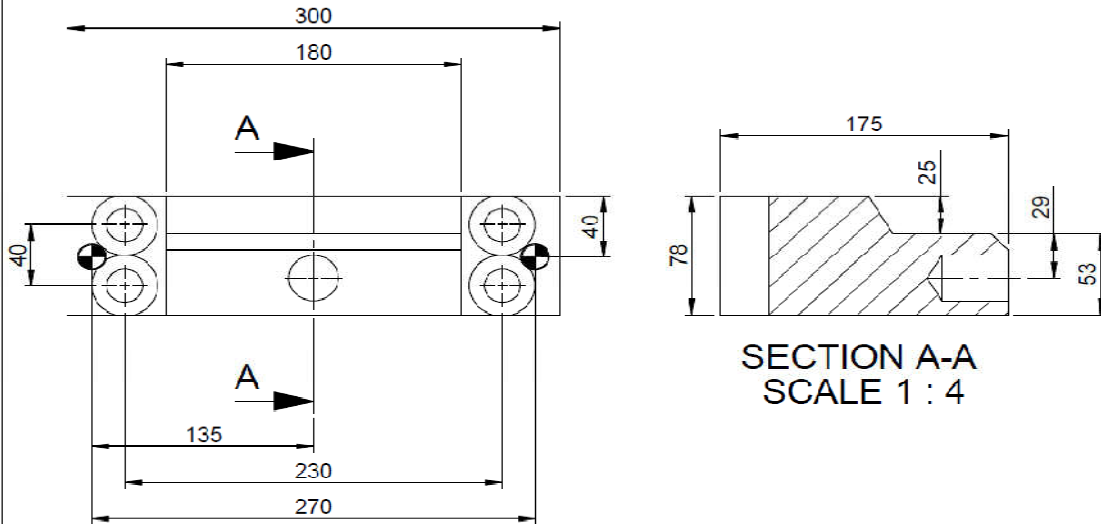


Cliente/Cient: Alstom  
Assunto/Subject: Central da Aguieira  
Equip./Equipment: Anel de Base

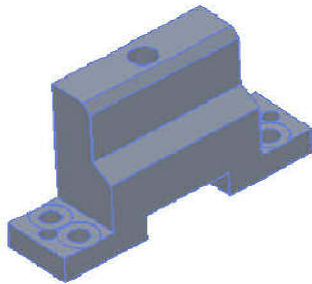
PEÇA CONTROLADA  
PART NAME  
Suporte Frontal

Cert. nº:  
Enc./Order.:  
Obra/Work:  
Desenho/Drawing:

ESQUEMA DE DEFINIÇÃO DOS PONTOS A MEDIR  
SCHEME OF MEASUREMENT



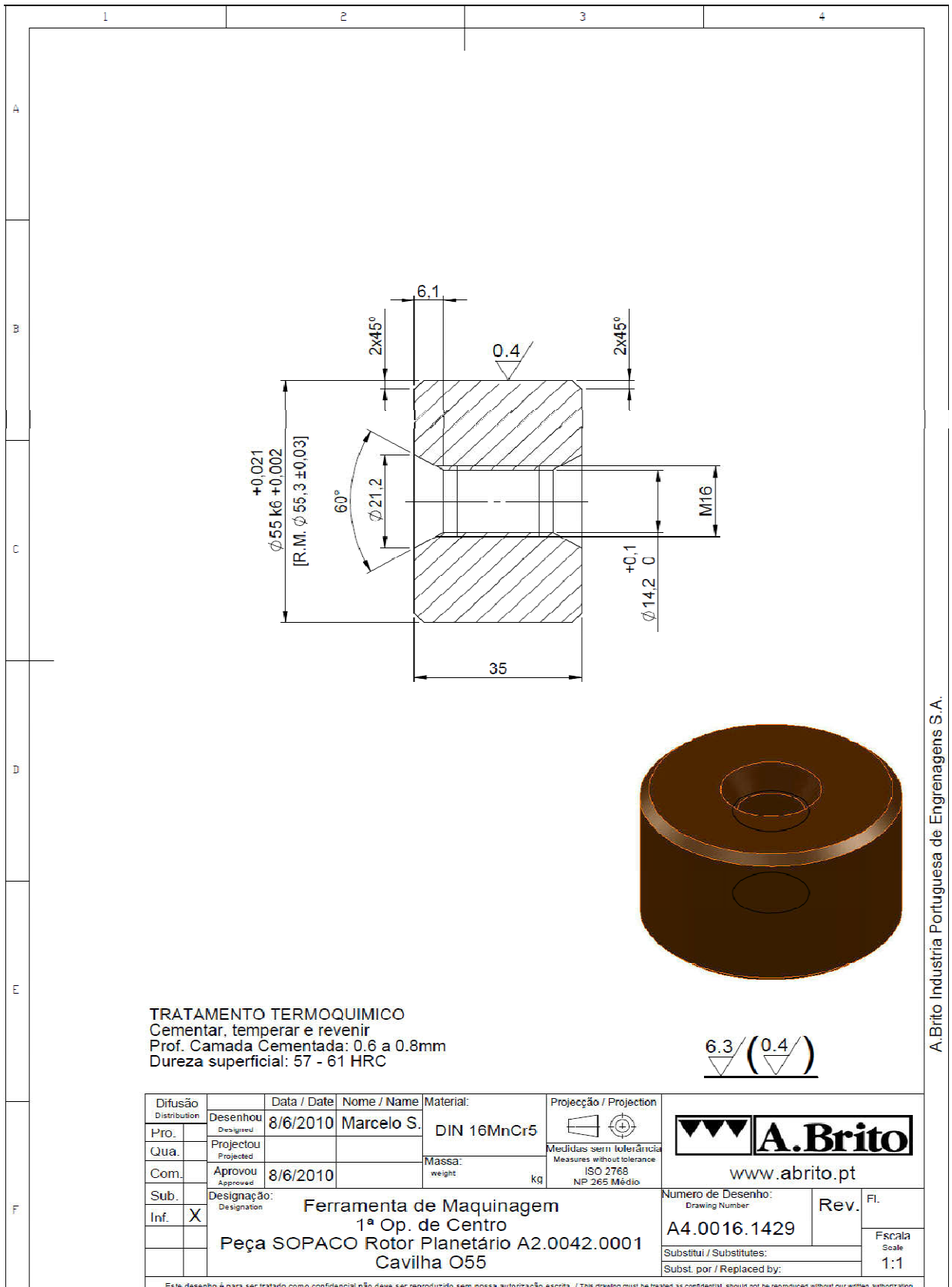
SECTION A-A  
SCALE 1 : 4

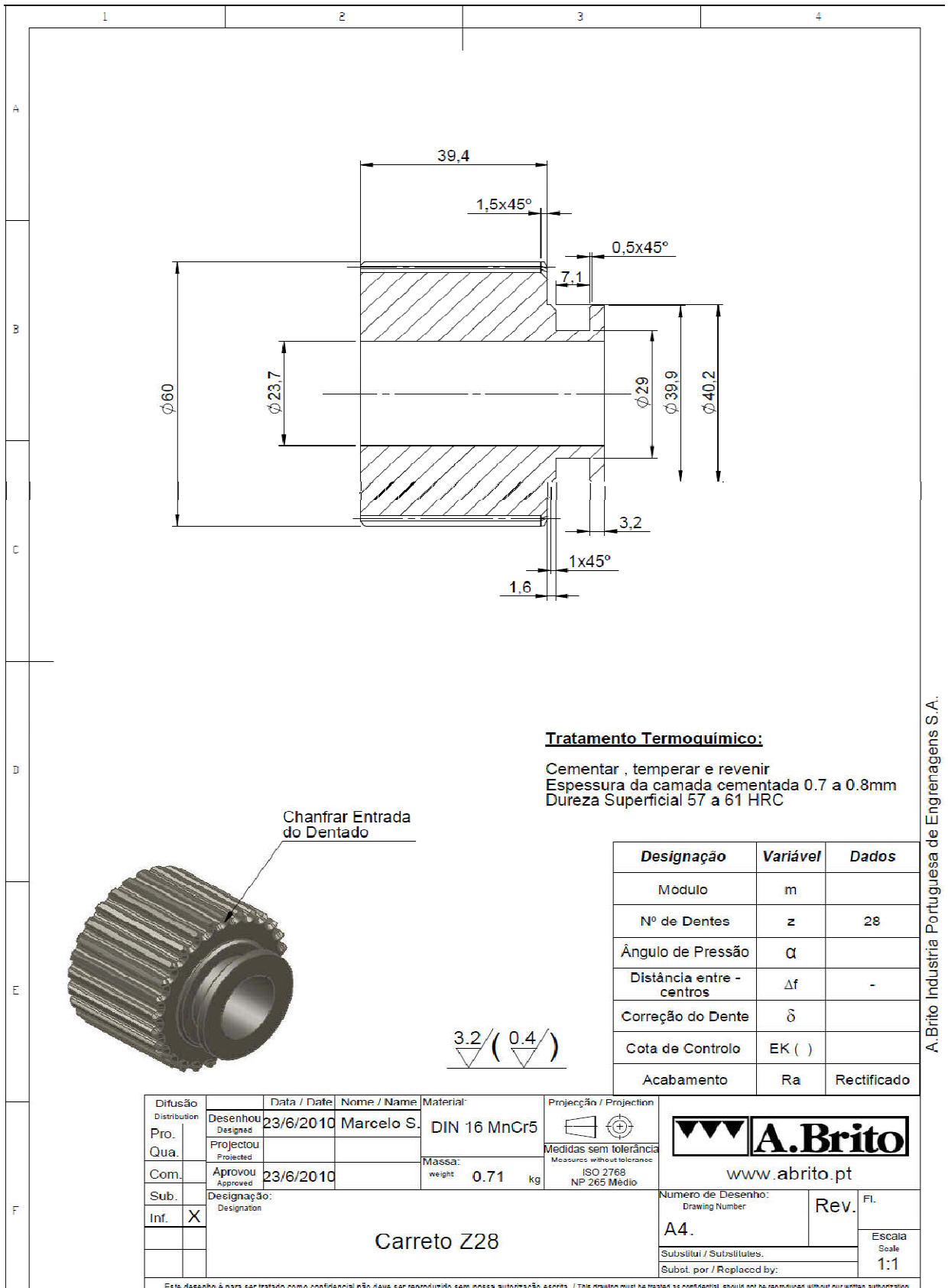


Valor Nominal	1	2	3	4	5	6
300						
270						
230						
180						
40						
25						
29						
175						
78						
40						
135						
53						

Meios utilizados / Measure means	Condições de medição / Measurement parameters
Paquímetros e Micrómetros	20°C
Feito por / Made by:	Visto / Verified by:
Data / Date:	Data / Date:

A. Brito, Indústria Portuguesa de Engrenagens S.A.

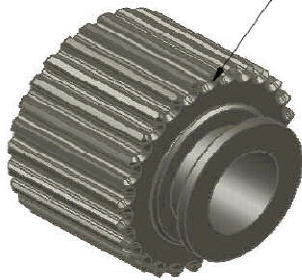




**Tratamento Termoquímico:**

Cementar , temperar e revenir  
 Espessura da camada cementada 0.7 a 0.8mm  
 Dureza Superficial 57 a 61 HRC

Chanfrar Entrada do Dentado



3.2 / ( 0.4 )

Designação	Variável	Dados
Modulo	m	
Nº de Dentes	z	28
Ângulo de Pressão	$\alpha$	
Distância entre - centros	$\Delta f$	-
Correção do Dente	$\delta$	
Cota de Controlo	EK ( )	
Acabamento	Ra	Rectificado

Difusão Distribution	Desenhou Designed	Data / Date	Nome / Name	Material	Projeção / Projection
Pro. Qua.	Projectou Projected	23/6/2010	Marcelo S.	DIN 16 MnCr5	 Medidas sem tolerância Measures without tolerance ISO 2768 NP 265 Médio
Com. Sub. Inf.	Aprovou Approved	23/6/2010		Massa: weight 0.71 kg	
Designação: Designation		<b>Carreto Z28</b>			
Inf. X					



www.abrito.pt

Numero de Desenho: Drawing Number	Rev.	Fl.
A4.		
Substitui / Substitutes:	Escala Scale 1:1	
Subst. por / Replaced by:		

Este desenho é para ser tratado como confidencial, não deve ser reproduzido sem a devida autorização escrita / This drawing must be treated as confidential, should not be reproduced without our written authorization

A. Brito Industria Portuguesa de Engrenagens S.A.