U.PORTO
FEUP FACULDADE DE ENGENHARIA
UNIVERSIDADE DO PORTO

M 2020

ESTUDO DA SENSIBILIDADE DE EQUIPAMENTO DE TÉCNICA *BARKHAUSEN* E DA METODOLOGIA PARA O FABRICO DE BLOCOS-PADRÃO

RUI DIOGO GOMES RODRIGUES PEREIRARUI DIOGO GOMES RODRIGUES PEREIRA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO APRESENTADA À
FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO EM
ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS

MANUEL FERNANDO GONÇALVES VIEIRA
ORIENTADOR FEUP
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS

ANDRÉ ALVES FERREIRA
COORIENTADOR FEUP
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS

U.PORTO

FEUP FACULDADE DE ENGENHARIA
UNIVERSIDADE DO PORTO

CANDIDATO	Rui Diogo Gomes Rodrigues Pereira		**CÓDIGO** 201506575
TÍTULO	Estudo da sensibilidade de equipamento de técnica *Barkhausen* e da metodologia para o fabrico de blocos-padrão		
DATA	Setembro 2020		
LOCAL	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto		
JÚRI	Presidente	Prof. Doutor Fernando Jorge Mendes Monteiro	DEMM/FEUP
	Arguente	Prof. Doutor Francisco José Gomes da Silva	DEM/ISEP
	Orientador	Prof. Doutor Manuel F.G. Vieira	DEMM/FEUP

Resumo

Na produção de engrenagens é necessário avaliar a conformidade dos componentes antes de os expedir. Devido aos processos de fabrico a que os componentes estão sujeitos, dá-se a indução de tensões residuais que, em trabalho, podem diminuir o tempo útil de vida do componente sendo necessário testá-lo de forma não-destrutiva. Uma das técnicas promissoras nesta área trata-se da técnica de *Barkhausen*. Esta, por ser recente quando comparada com outras técnicas, não possui padronização de metodologias e de unidade, sendo necessário fabricar blocos-padrão que comparem os resultados desta técnica com os de técnicas tradicionais.

Foi neste contexto que a SERMEC GROUP procurou fabricar estes blocos para auxiliar o Departamento de Engenharia a avaliar a integridade dos componentes e na tomada de decisão de os expedir.

Neste trabalho foi realizado inicialmente um estudo com vista a compreender a sensibilidade do equipamento Rollscan 350 a vários níveis de tensão e, de seguida, a aproximação à metodologia de fabrico de blocos-padrão, comparando resultados da técnica de *Barkhausen* com ataque químico com Nital.

Foi possível verificar a influência do processo de maquinagem e dos tratamentos térmicos no resultado da técnica *Barkhausen*, bem como observar, em metalografia, a secção de zonas danificadas por estes processos. Por último foi abordada uma metodologia funcional para o fabrico de blocos-padrão a serem utilizados em ambiente industrial.

Palavras-chave:

Reparação; Ensaios não-destrutivos; Barkhausen; Engrenagem; Veios de Transmissão; Fiabilidade

Abstract

In gear manufacturing, these is a need of evaluate the final quality of the components before shipping them. Due to the manufacturing processes to which the components are subjected, there are induced stresses that may reduce the component lifetime. This way, there is a need to test them using non-destructive techniques. One promising technique in this area is the Barkhausen noise analysis. This, as it is recent when compared to other techniques, does not yet have standardization of procedures, making it necessary to manufacture calibers that compare the results of this technique with those of traditional ones.

In this context, SERMEC GROUP looker forward to manufacture these standard blocks to assist the Engineering Department in evaluating the integrity of the components and deciding to ship them.

In this dissertation, a study was initially carried out to understand the sensibility of the Rollscan 350 equipment to various levels of stress and then an approximation to the calibers manufacturing methodology, comparing the Barkhausen noise analysis with the Nital etch technique.

During this work, it was verified the influence of the machining process and heat treatments on the results of the Barkhausen technique and observe, in metallography, the microstructure of areas damaged. Finally, a functional methodology for the manufacture of standard blocks used in an industrial environment was addressed.

Keywords:

Repair; Non-destructive testing; Barkhausen; Gear; Main-shaft; Reliability

Agradecimentos

Esta dissertação está parcialmente integrada no projeto GEAR3D - Reconstrução 3D de dentes de engrenagens de grande dimensão via deposição direta por laser, através do Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (projeto POCI-01-0247-FEDER-039848), projeto apoiado pelo Programa Operacional Regional do Norte de Portugal (NORTE 2020).

Começo por agradecer à SERMEC GROUP, na pessoa do Engenheiro João Cruz por ter proporcionado as condições para que pudesse realizar o meu trabalho *in-situ*.

Ao Engenheiro André Ferreira, no papel de coorientador, gostaria de agradecer todo o apoio técnico, a abertura e a disponibilidade para me auxiliar no meu trabalho.

Gostaria de agradecer ainda ao professor Manuel Vieira pela oportunidade de trabalhar neste tema.

Aos meus pais que ao longo de toda a vida nunca deixaram que me faltasse nada para atingir os meus objetivos. À minha mãe em particular à qual estarei eternamente grato pela educação que me deu. Ao meu irmão Hugo que foi um modelo a seguir.

A toda a gente do BEST Porto, em particular à XXIV direção, coordenadores e mentores, que me deram o sentimento de pertença e de família no meio universitário.

Aos meus amigos de Barcelos que acreditam no meu sucesso desde o primeiro dia e me apoiam desde então.

Por último, à Cristiana, à Mariana, à Defne, ao Chico e a todos os outros que de uma maneira ou de outra marcaram o meu percurso.

Índice

Resumo ii
Abstract iii
Agradecimentos iv
Índice v
1 Introdução 1
2 Objetivos 2
3 Revisão da Literatura 1
3.1 Processo de fabrico e reparação de engrenagens 1
3.1.1 Tratamentos térmicos 1
3.2 Danos no processo de reparação de engrenagens 10
3.3 Técnicas de Ensaios Não Destrutivos 11
3.4 Ataque com Nital 12
2.4.1 Aparência visual 12
3.5 Efeito de *Barkhausen* 15
3.6 Técnica *Barkhausen* 18
3.6.1 Análise de resultados 19
3.6.2 Limitações da técnica 19
3.7 Calibres 20
4 Materiais e métodos 21
4.1 Metodologia idealizada 21
4.2 Metodologia executada 24
5 Discussão de resultados 28
6 Conclusão 39
7 Trabalhos Futuros 40
8 Bibliografia 41
9 Anexos 43
Anexo 1 43

1 Introdução

As técnicas não destrutivas são, na indústria atual, um recurso necessário para garantir a qualidade de peças antes de serem expedidas. Ao não comprometerem a integridade final do produto, atestam a fiabilidade em cada um dos componentes, ao invés de se retirar um componente de um lote para ser sujeito a ensaios destrutivos.

Este trabalho debruça-se especificamente sobre o seu uso na manutenção e reparação de componentes de grande porte, nomeadamente engrenagens para a indústria da produção de energia. Esta indústria caracteriza-se por lidar com peças por vezes únicas ou de problemática particular, sendo imperativo não comprometer a qualidade final das peças ensaiadas, que serão colocadas em serviço após a aprovação do controlo de qualidade.

Os componentes deste tipo requerem uma elevada resistência ao desgaste, uma vez que são componentes móveis de contacto. No entanto, problemas durante o processo de fabrico e a reparação podem pôr em causa o comportamento em serviço do componente, nomeadamente defeitos de retificação (*grinding burns*).

Assim, é necessário fazer o controlo destes componentes antes de serem expedidos, preferencialmente de forma rápida e não-destrutiva. É neste espaço que a técnica de *Barkhausen* mostra relevância, pois cumpre estes requisitos, mostrando ser alternativa ou complementar a outras técnicas usadas para o mesmo fim, como é o caso do ataque químico com Nital.

No entanto, a técnica *Barkhausen* não possui unidades SI nem calibres universais, devendo a empresa que utiliza o equipamento fabricar calibres adequados ao tipo de componentes que produzem. É importante que os calibres permitam estabelecer uma relação entre os resultados da técnica de *Barkhausen* com os de outra técnica, como o ataque com Nital.

2 Objetivos

Para cumprir os objetivos do trabalho foi necessária uma junção da revisão de materiais já estudados previamente, nomeadamente em trabalhos levados a cabo por Suvi Santa-aho, et al. [1-5], e do estudo de materiais utilizados nos produtos fabricados pela SERMEC GROUP, entidade que permitiu e disponibilizou os recursos para que fosse elaborado este trabalho.

Como objetivo geral procurou-se fabricar blocos-padrão funcionais para auxiliar a SERMEC GROUP na tomada de decisão de expedir componentes fabricados em aço 18CrNiMo6-7. Assim o trabalho consistiu em duas partes que pretendiam culminar no sucesso do objetivo geral.

A parte do trabalho tratava-se de compreender a sensibilidade do equipamento Rollscan 350, produzido pela empresa Stresstech Oy, a vários níveis de dano por maquinagem, Esta etapa foi particularmente importante na medida em que se tratava de um equipamento novo, sem muitos estudos publicados, sem uma unidade SI, que dificulta a comparação de valores com outros estudos e com a diminuta quantidade de estudos desenvolvidos com a técnica e o material a fabricar.

Procurou-se assim responder a questões como:

- É possível provocar e detetar *grinding burns* em componentes não cementados?
- Qual a influência na microestrutura de uma retificação não conforme em componentes não cementados?
- Qual a influência na dureza superficial de uma retificação não conforme em componentes não cementados?
- Qual a influência no resultado da técnica *Barkhausen* de uma retificação não conforme em componentes não cementados?

A segunda parte do trabalho foi focada no fabrico de calibres ou blocos-padrão com destino a auxiliar a SERMEC GROUP na tomada de decisão de expedir ou não engrenagens finalizadas. Estes calibres procuram ser uma comparação entre um valor numérico da técnica de *Barkhausen* e um resultado visual da técnica de Nital.

Ao objetivo de fabrico de blocos-padrão, foi feita uma alteração ao objetivo principal do trabalho. Ao invés de fabricar os calibres finais procurou-se, tanto quanto possível, aproximar a metodologia ao processo ideal de fabrico. Durante a etapa de fabrico procurava-se também conhecer:

- Qual a influência do tratamento térmico de cementação no resultado da técnica de *Barkhausen*?
- Qual a influência, no resultado da técnica de *Barkhausen*, da maquinagem não conforme em aços cementados e não cementados?

Em última instância, para este último objetivo procura-se uma associação entre um resultado cromático do ataque com Nital e o resultado numérico da técnica de *Barkhausen*.

3 Revisão da Literatura

3.1 Processo de fabrico e reparação de engrenagens

O fabrico de componentes móveis de contacto, como engrenagens, incluem vários processos de fabrico. Torna-se importante compreender estes processos para perceber a influência destes nos resultados da técnica *Barkhausen*.

O fabrico começa pela maquinagem a partir de um bloco maciço, recorrendo a processos tradicionais [6].

A engrenagem é então encaminhada para uma sequência de tratamentos térmicos com vista a endurecer a superfície do material, tipicamente uma sequência de cementação, têmpera e recozimento de alívio de tensões ou revenido, melhorando a resistência ao desgaste sem prejudicar a ductilidade do interior do componente. A engrenagem é, de seguida, sujeita a retificação, para acertar tolerâncias [6, 7].

3.1.1 Tratamentos térmicos

O design do processo de fabrico de componentes mecânicos tem em vista uma boa performance do componente e tempo de vida longo, traduzindo-se em propriedades como a resistência ao desgaste, dada pela dureza superficial, resistência à fadiga, dada por um interior do componente mais macio.

Para se atingir estas propriedades é necessário combinar opções de *design*, tais como a escolha do material e dos tratamentos de superfície apropriados à aplicação. No caso particular do fabrico de engrenagens para a indústria da energia utilizam-se predominantemente aços para cementação, sendo a composição e o tratamento adaptado a cada situação [6-10].

3.1.1.1 Cementação

O processo de cementação é, na sua essência, a adição de carbono através da superfície de um aço para que a dureza na superfície e próximo desta seja mais alta, mantendo a ductilidade dada pelo interior do componente. Alguns componentes que se encaixam nesta categoria são componentes móveis de contacto, tais como rolamentos e engrenagens [7, 10-12].

Este processo já conta com uma utilização industrial extensa, sendo um processo bem conhecido e com processos bem padronizados [7].

Durante o processo de cementação, o material é aquecido à temperatura de austenitização na presença de uma atmosfera rica em carbono. A escolha da temperatura é escolhida com objetivo de permitir a difusão para a superfície do material e facilitar a difusão para a camada sub-superficial. Pode-se controlar a profundidade de influência deste processo através do tempo na temperatura de austenitização, ou seja, mais tempo resultará numa maior penetração do carbono. O resultado será um perfil de concentração de carbono gradual, superior na superfície, diminuindo em direção ao interior do componente [7-9, 13].

Podendo fazer-se uma posterior têmpera, esta resultará numa martensite, particularmente na camada superficial com maior concentração de carbono. Em zonas mais profundas poderá existir microestruturas bainíticas, ferríticas e perlíticas, devido à diminuição do teor de carbono e também do arrefecimento mais lento [7, 12].

A dureza superficial, a profundidade de penetração do carbono e a dureza no interior do componente são, por norma, especificadas. Após cementação e têmpera pode ser feito um recozimento de alívio de tensões a temperaturas intermédias, facilitando processos de maquinação como retificação [7].

Devido ao mais elevado teor de carbono presente na camada superficial, existe uma probabilidade superior de existência de austenite residual. Não se sabe o efeito da presença de austenite residual na resistência à fadiga e há opiniões tanto a favor como contra para este tipo de aplicação. A presença de austenite,

devido à sua alta deformabilidade, pode ter diferentes efeitos dependendo da estrutura em que está inserida: a camada martensítica superficial ou do material não tratado [9].

Tabela 1 - Influência da temperatura de cementação no tempo de cementação. Adaptada [7]

Cementação em vácuo do aço 18CrNiMo7-6	Temperatura de cementação/°C		
Camada cementada: 1.5 mm	930	980	1030
Carga/h	0.25	0.25	0.25
Aquecimento/h	1.50	1.50	1.50
Tempo difusão/h	8.50	5.00	3.00
Arrefecimento até à temperatura de têmpera/h	0.75	1.00	1.25
Têmpera e descarga/h	0.50	0.50	0.50
Total/h	11.50	8.50	7.00

De acordo com a Tabela 1, pode-se obter, com algum nível de confiança, uma camada cementada de 1,5 mm a uma temperatura de 930 °C. É possível verificar também que temperaturas mais altas permitem estágios de cementação mais curtos para a mesma camada cementada. No entanto, temperaturas elevadas aumentam o risco de difusão desigual da atmosfera para a peça e no interior da peça, provocando um gradiente de concentrações [7, 11, 14].

3.1.1.1.1 Cementação em meio sólido

Pack carburizing, ou cementação em meio sólido, é uma cementação que recorre a um composto sólido que fornece carbono a uma atmosfera fechada formando monóxido de carbono que ao reagir com o composto irá formar dióxido de carbono, promovendo a difusão de carbono para o componente. Este composto sólido possui carvão vegetal como fonte de carbono e hulha para garantir a cinética da reação. Para além destes, existe a presença de ativadores e catalisadores, como o carbonato de Bário ($BaCO_3$), carbonato de cálcio ($CaCO_3$), carbonato de potássio (K_2CO_3) ou carbonato de sódio (Na_2CO_3). Os ativadores facilitam a redução do dióxido de carbono com o carbono para formar o monóxido de carbono [13, 15, 16].

Assim, o ar residual presente na atmosfera dentro da caixa, em contacto com o carvão, irá produzir monóxido de carbono. Devido à instabilidade deste gás, ao contactar com a superfície metálica irá decompor-se, o carbono resultante dessa decomposição irá entrar no material:

$$2CO = C + CO_2 \qquad \text{equação 1}$$

$$Fe + 2CO = Fe(C) + CO_2 \qquad \text{equação 2}$$

O Carbonato de Bário aumenta o efeito carburizante, pois decompõe o CO_2 em duas moléculas de CO ao reagir com o carvão:

$$C + CO_2 = 2CO \qquad \text{equação 3}$$

O potencial de carbono gerado pelo composto de cementação aumenta diretamente com o aumento do rácio CO/CO_2. Assim, mais carbono passa a estar disponível na superfície da peça através do uso de ativadores que promovem a formação de CO [11-13, 15].

Este processo já não é muito usado em contexto industrial, uma vez que requer muita mão de obra, requer mais tempo de processamento, tem um elevado volume de resíduos e não é indicado para fazer cementações com tolerâncias muito apertadas ou de pouca profundidade. No entanto, não requer equipamento especializado pois cria o seu próprio ambiente gasoso dentro da caixa, o que o torna indicado para este trabalho [15, 16].

A cementação em sólido é executada, por norma, a temperaturas entre os 815 ºC e os 955 ºC, podendo ir até aos 1095 ºC em alguns casos particulares. É preciso ter em conta que não se deseja o aumento do tamanho de grão durante o processo, sendo atualmente possível aproximarmo-nos dos 1040 ºC sem que o fenómeno ocorra [10, 13, 15, 16].

A velocidade de formação da camada cementada aumenta rapidamente com o aumento da temperatura, podendo passar de um fator de 1.0 a 815 ºC até um de 2.0 a 1095 ºC. É necessário ter em atenção que elevadas taxas de difusão, resultantes de altas temperaturas, podem provocar gradientes demasiado elevados de carbono na camada cementada. Estes gradientes podem criar uma superfície demasiado frágil, inutilizando o componente [15, 17].

A evolução da camada cementada a uma temperatura constante é proporcional à raiz quadrada do tempo, sendo a velocidade de cementação mais alta no início do ciclo e vai-se tornando mais lenta com o decorrer da operação, como se pode observar na figura 1 [13, 15].

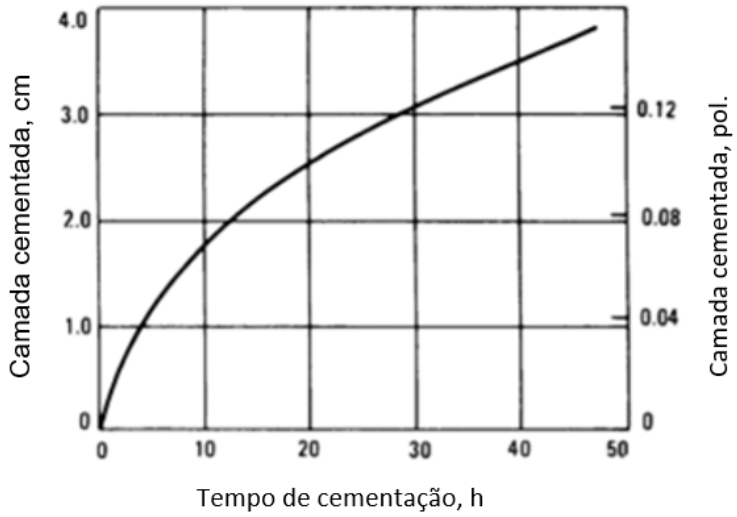


Figura 1 - Camada cementada vs.tempo de estágio de cementação a 925°C. Adaptado [15]

A composição do aço não possui grande influência na velocidade de difusão do carbono, no entanto este facto afeta o valor de saturação de carbono. Em teoria, praticamente todos os aços ao carbono ou ligados são cementáveis [15].

A profundidade cementada é algo difícil de controlar com precisão na cementação em sólido, sendo raro conseguir-se variações da camada de menos de 0,25 mm entre o máximo e o mínimo de profundidade para parâmetros padrão. As tolerâncias comerciais, por norma, vão desde os +/- 0,25 mm até aos +/- 0,8 mm. O uso de tempos de cementação mais longos e temperaturas mais baixas diminuem a variação da dimensão da camada cementada [15].

3.2.1.1.2 Difusão

Difusão, como termo geral, designa o transporte de átomos de um plano atómico 1 para um plano atómico 2 através da energia cinética proveniente da temperatura [18, 19].

Caso os dois planos possuam concentrações diferentes de soluto, a difusão ocorre preferencialmente do plano de maior concentração, para um de menor concentração. Este tipo de difusão denomina-se difusão estacionária. Este tipo de difusão ocorre quando um gás não-reativo se difunde através de uma folha metálica ou para o interior do material. Nessa situação, o fluxo é representado pela seguinte equação:

$$J = -D\frac{dC}{dX} \qquad \text{equação 4}$$

Em que J corresponde ao fluxo ou corrente global de átomos, D à constante de proporcionalidade designada por difusividade ou coeficiente de difusão e $\frac{dC}{dX}$ corresponde ao gradiente de concentração.

O sinal menos é utilizado, pois o transporte faz-se do plano de maior concentração para o de menor concentração, logo com um gradiente de difusão negativo [17, 18].

Esta equação designa-se 1ª Lei de Fick, nome do fisiologista alemão responsável por apresentar a difusão de forma quantitativa, e descreve como se dá a difusão em condições de difusão estacionária [17].

As condições em que este fenómeno ocorre irá influenciar intensamente o valor do coeficiente de difusão, nomeadamente o mecanismo de difusão (intersticial ou substitucional), o valor de temperatura, a estrutura da rede cristalina, os defeitos da estrutura e a concentração da espécie do soluto, ou seja, a espécie destinada a difundir [18].

No caso em que a concentração do soluto em qualquer ponto do material varia em ordem ao tempo já não é possível descrever o fenómeno através da primeira Lei de Fick, pois trata-se de uma difusão não-estacionária. Este caso ocorre,por exemplo, durante um processo de cementação, ou seja, difusão de carbono para a superfície de um aço, a concentração de carbono em qualquer ponto abaixo do plano da superfície varia com o tempo. Neste caso, em que o coeficiente de difusão é independente do tempo, utiliza-se a segunda Lei de Fick [13, 17]:

$$\frac{C_s - C_x}{C_s - C_0} = \mathrm{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right) \qquad \text{equação 5}$$

Em que C_s refere-se à concentração à superfície do elemento gasoso a difundir, C_0 à concentração inicial do elemento no solvente, C_x à concentração do elemento à distância x da superfície no instante t, x à distância à superfície, D ao coeficiente de difusão e, por último, t ao tempo [17].

A função de erro, erf, é uma função matemática, definida por convenção e usada em algumas soluções da 2ª Lei de Fick. A função de erro encontra-se tabelada [17, 18].

Podem surgir problemas na cementação caso a difusão estacionária do meio gasoso para a superfície do componente seja muito mais eficiente do que a difusão não-estacionária no interior do componente. Nesta situação irá criar-se um excesso de carbono na superfície, com um gradiente muito acentuado de concentração em direção ao interior, o que é indesejável, pois torna a superfície mais frágil do que o desejado, com uma camada sub-superficial com muito menos carbono do que a superficial, que poderá inutilizar o componente [17, 20].

Este efeito é mais acentuado quanto mais alta for a temperatura durante o processo. Assim, para amenizar este efeito privilegia-se o uso de temperaturas mais baixas durante um período mais longo de tempo [17, 20].

3.2.1.2 Têmpera

A têmpera trata-se de um processo destinado ao endurecimento de um componente através do arrefecimento rápido do material a partir da temperatura de austenitização até à têmpera ambiente num meio líquido ou gasoso. Uma têmpera bem-sucedida traduz-se na obtenção da dureza ou resistência mecânica desejadas [14, 16].

A seleção do meio de tempera depende da temperabilidade do aço, da espessura a temperar, da forma do componente e das taxas de arrefecimento necessárias para obter a microestrutura e propriedades desejadas. Alguns meios de têmpera mais comuns são o ar, hélio, árgon, azoto, óleo com aditivos, água, soluções aquosas poliméricas e água com sais ou aditivos cáusticos [12, 13, 16].

A dureza da martensite é altamente dependente do teor de carbono presente na estrutura. O objetivo da têmpera após cementação é obter uma estrutura completamente martensítica até uma profundidade mínima com um valor mínimo de dureza Vickers especificado [20]. Caso um aço não permita uma formação total de martensite deve então procurar-se um que possua maior temperabilidade. Entenda-se por temperabilidade a habilidade de uma liga ser endurecida pela formação de martensite [15].

A têmpera possui três fases em meio líquido, o utilizado no contexto deste trabalho.

A primeira denomina-se estágio de vapor em que a temperatura superficial é alta o suficiente para gerar vapor em toda a superfície do espécime. Assim o componente não se encontra em contacto com o meio líquido e o meio gasoso atua como uma camada isolante e a condução da temperatura atravessa essa camada. O tempo de duração desta fase depende de vários fatores, tais como a condição superficial (existência ou não de óxidos), o fluido usado na têmpera e o quão densas estão as peças durante o processo [17, 18].

A segunda chama-se estágio de ebulição e dá-se quando a temperatura superficial já não consegue suportar o lençol de vapor e o líquido passa a estar em contacto com o componente, mas evapora instantaneamente, transferindo eficientemente calor para o meio circundante [17, 18].

A terceira e última chama-se estágio de convecção. Dá-se quando a temperatura superficial é inferior à temperatura de ebulição do líquido e a transferência de calor dá-se com o contacto direto entre o espécime e o líquido. A taxa de arrefecimento é lenta e é influenciada primariamente pela viscosidade e pela taxa de convenção. Caso o componente não seja uniformemente arrefecido (quer seja por mau manuseamento quer seja por não ter uma temperatura inicial uniforme), este pode deformar-se. Por exemplo, se um bloco for arrefecido primeiro de um lado, esse mesmo lado irá encolher, enquanto o outro irá estender. [17, 18].

O impacto de existirem gradientes de arrefecimento é particularmente importante no tratamento térmico de engrenagens pois, devido à sua geometria, os flancos não arrefecem de forma uniforme. Isto pode provocar variações de tensões residuais e distorções num contexto que obedece a tolerâncias apertadas [13, 14].

3.2.1.3 Recozimento de alívio de tensões

Recozimento de alívio de tensões é um tratamento térmico que visa a atenuar tensões residuais num componente metálico através do aquecimento uniforme de uma estrutura a uma temperatura abaixo da gama de transformação (Ac1 em aços ferríticos), mantendo a temperatura durante um período determinado de tempo, seguido por um arrefecimento uniforme, tipicamente até à temperatura ambiente [7, 15, 18].

Os objetivos deste tratamento é reduzir tensões, aumentar a ductilidade ou produzir uma determinada microestrutura. Assim, é particularmente importante que o aquecimento e o arrefecimento sejam lentos, pois qualquer gradiente de temperatura pode ser origem de tensões residuais. Para programar esse tempo de aquecimento/arrefecimento é necessário ter em conta a área de secção do componente a tratar termicamente [7, 18].

3.2 Danos no processo de reparação de engrenagens

A etapa de acabamento do processo de reparação possui uma ou mais etapas de maquinagem que podem induzir alteração microestrutural.

Este efeito é notório em componentes que, ao serem retificados, podem conduzir a uma elevada energia transferida para o componente sob a forma de calor, o que pode induzir tensões ao material [20-22].

A estas alterações microestruturais dá-se o nome de *grinding* burns [1, 13, 23], dividindo-se em dois fenómenos principais. No primeiro, atingem-se temperaturas entre a temperatura de revenido e abaixo da temperatura de austenitização, induz-se um novo revenido, baixando a dureza localizada e provocando tensão residual na superfície do componente. Este amaciamento de material é denominado martensite sobrerevenida ou queimadura de amaciamento. No segundo caso, ao se atingir temperaturas acima do patamar de austenitização, irá produzir-se um material endurecido, uma martensite não-revenida, devido ao arrefecimento em contacto com o ar e/ou lubrificante. Este fenómeno denomina-se por *re-hardening burn* ou queimadura de endurecimento. Este defeito, por norma, encontra-se rodeado de uma zona sobrerevenida, tal como no fenómeno descrito anteriormente, que poderá provocar fissuração quando o componente entrar em serviço [21, 22, 24].

Ou seja, através de falhas no controlo da temperatura do componente durante a retificação pode-se induzir tanto um endurecimento como um amaciamento superficial. A diminuição do tempo de vida do componente e, em última instância, o potencial dano catastrófico do mesmo ao possuir estes defeitos reforça a necessidade de controlar tanto o processo de maquinagem como a do controlo da qualidade final do componente [21, 22].

Relativamente ao processo, coloca a preocupação nos parâmetros de lubrificação utilizados durante a retificação e na velocidade de rotação e avanço da ferramenta. Para a escolha destes parâmetros e outros deve-se ter em conta os tratamentos térmicos aplicados previamente à retificação e o material em questão [13, 21, 22].

Para controlar a qualidade final do componente, será útil avaliar as camadas superficial e subsuperficial passíveis de ser afetadas por processos de maquinagem, sem recorrer a métodos destrutivos, como a metalografia [25].

3.3 Técnicas de Ensaios Não Destrutivos

O estudo de alterações de microestrutura em aços utiliza por norma técnicas de caracterização destrutivas, tais como metalografia, ensaios de dureza ou testes mecânicos. Após a utilização de técnicas de caracterização destrutivas os componentes deixam de ter qualquer aplicação prática, sendo um entrave ao seu uso no controlo de qualidade de componentes [26].

Num contexto industrial faz sentido recorrer à via de técnicas não destrutivas, que permitem a deteção de alterações microestruturais sem comprometerem o destino final do componente tratado termicamente [26].

Tipicamente para deteção de *grinding burns* a técnica ulitizada é o ataque químico com Nital. Esta técnica utiliza o Nital como ataque químico num procedimento que visa a detetar a *grinding burn* através da mudança cromática da superfície do material durante o ataque. Apesar de cumprir o seu objetivo, apresenta várias desvantagens, tais como depender de consumíveis em grande quantidade, a necessidade de equipamento dispendioso (cubas, sistemas de exaustão e outros), ser difícil de automatizar, ser necessário tratar os resíduos após o processo e de a análise, por ser visual, ser subjetiva e sujeita a erro do operador/inspetor [26-29].

Como alternativa surgiu a técnica de deteção *Barkhausen*, que mostra ser uma técnica promissora para esta aplicação. O princípio da técnica baseia-se na indução de um sinal eletromagnético alternado que irá interagir com o componente. O equipamento utilizado na técnica, através de uma sonda, irá recolher o sinal alterado por esta. Esse sinal é filtrado e convertido num valor numérico, sendo depois analisado pelo operador que aprova o componente ou indica-o a posterior análise para ser reavaliado [21, 25, 30, 31].

3.4 Ataque com Nital

O ataque químico com Nital (também designado *Nital Etch* ou *temper etch*) é uma técnica que visa a avaliar e descrever o sobreaquecimento em superfícies retificadas [23, 32].

Segundo a norma ISO 14104-2017 [23], que normaliza o procedimento em aços destinados a engrenagens veios e outros, o procedimento da técnica inclui uma sequência de várias etapas de ataque químico e limpeza. O ataque é executado com uma fase em ácido nítrico em álcool ou água durante um período normalizado e outra em ácido hidrocloridrico em álcool ou água, também com tempo normalizado. Os dois ataques são separados por limpeza em água que deve ser retirada de seguida utilizando álcool etílico. Após os dois ataques deve-se neutralizar a superfície do espécime numa solução alcalina com agitação. A peça deve ser limpa com água e seca uma última vez. Finalmente, deve ser conservada com óleo, que para além de proteger contra a oxidação também melhora o contraste para a análise da cor [32].

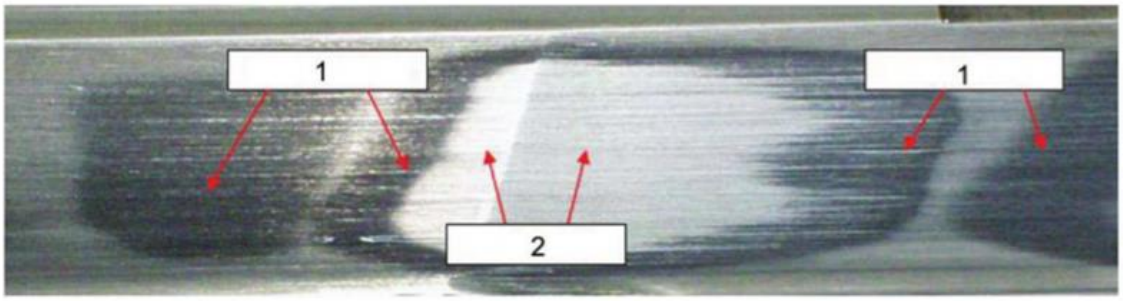
O estudo da cor superficial deve ser executado com um nível de luz mínimo indicado na norma e em comparação com uma escala de cinzentos, para que o ensaio seja mais reprodutível e seja mais fácil comparar resultados captados em circunstâncias diferentes [29].

2.4.1 Aparência visual

Componentes sem qualquer tipo de *grinding burn* após atacados e limpos devidamente não apresentam qualquer tipo de descontinuidade cromática, mostrando uma cor cinzenta uniforme [23, 32].

Na presença de *retempering burns* (indução de revenido), a peça atacada encontrar-se-á escurecida. Por norma, quanto mais severa for este tipo de *grinding burn*, mas intensa ou escura se irá apresentar a cor da zona afetada [33, 34].

Caso seja gerado calor suficiente durante a retificação, pode ser induzido rehardening burn (indução de nova têmpera). Esta apresentar-se-á, após ataque com uma zona de cor branca ou muito clara rodeada de uma zona escurecida, resultante do fenómeno descrito no parágrafo anterior, como se pode observar na Figura 2 [32, 34].



1 - Zona Sobre-revenida

2 - Zona endurecida

Figura 2 - Os dois tipos de dano durante a retificação. Adaptado [23]

Como resultado da inspeção, a *grinding burn* deve ser classificada com duas letras, a primeira (F ou N) referindo-se ao facto de se tratar uma superfície funcional (F) ou não funcional (N) e a segunda, de A a E, um indicativo da severidade da queimadura, seguidas de um número, referindo-se à área ocupada pela mesma, como se pode ver na Tabela 2. O cliente encarrega-se de informar quais classes é que são aceites e o fornecedor fica encarregue de as classificar [23, 29].

Tabela 2 - Sistema de classificação de dano segundo a norma ISO 14104-2017. Adaptado [23]

Prefix code		
F = Superfícies funcionais N = Superfícies Não-funcionais		
Class code		
Class	Description	Visual appearance, worst area
A	Sem revenido	Cor cinzenta uniforme
B	Revenido suave	Indicações de cor clara e finas
C (classe obsoleta)	(Revenido moderado)	(Não utilizado)
D	Revenido severo	Indicações escuras e largas
E	Endurecimento (aquecimento severo)	Área branca rodeada de indicações negras
Código Sufixo		
Nível	Máxima percentagem de área superficial afetada	
1	10%	
2	25%	
3	Sem restrição	

Uma boa prática trata-se de aplicar a técnica de líquidos penetrantes a superfícies com indicação de queimadura, particularmente as de classes D ou E, uma vez que são mais suscetíveis a fissuração [23].

É necessário ter em atenção também à possibilidade de indicações falsas, que podem provir de manchas, oxidação e outras diferenças cromáticas que possam existir na superfície do material. Também é necessário ter em conta que atacar repetidamente a mesma amostra pode resultar numa perda relevante de material, pelo que a técnica deve ser executada com cuidado e com posterior controlo dimensional [23].

Qualquer indicação de presença de *grinding burn* dada pela técnica pode afetar o tempo de vida do componente, mas o componente ainda ser funcional, cabendo então ao departamento de engenharia aprovar ou reprovar o componente (Anexo 1) [23].

Em almas situações, caso a camada cementada e desenho do componente permitam, a peça pode ser novamente trabalhada para retirar a zona afetada de maneira a estar conforme [13, 16].

3.5 Efeito de *Barkhausen*

O efeito *Barkhausen* foi descoberto por Heinrich *Barkhausen* ao observar um sinal elétrico induzido numa bobina colocada à volta de um bloco de aço, produzido ao sujeitar o material a um campo magnético externo. Ao amplificar esse sinal convertendo-o em ruído, foi possível ouvir esse sinal. Por esse motivo, a técnica *Barkhausen* é também denominada *Barkhausen Noise* ou ruído *Barkhausen* [35, 36].

Para explicar como este fenómeno ocorre é necessário definir o conceito de paredes de domínio magnético. Estas são as transições entre domínios magnéticos, zonas de magnetismo preferencial, dentro do material. Estas podem existir de duas formas, denominadas *Bloch Wall* (nome dado devido ao físico alemão Felix Bloch) e *Néel Wall* (nome dado devido ao físico francês Louis Néel), que se distinguem pela sua morfologia [37-39].

É do conhecimento comum que um material ferromagnético pode ser magnetizado, isto é, quando expostos a um campo magnético externo o material mantém essa magnetização mesmo após esse campo externo ser retirado. A forma mais comum de representar as propriedades magnéticas de um volume de material ferromagnético é um referencial de indução magnética (B) versus forças de campo (H). A aplicabilidade de um material num determinado contexto pode ser determinada principalmente pelas propriedades magnéticas demonstradas no seu ciclo de histerese [39].

O ciclo de Histerese (*Hysteresis loop*) ou ciclo B-H (*B-H loop*) trata-se do ciclo traçado pela magnetização de um material. Quando a corrente externa aumenta, o fluxo magnético aumenta também até atingir um ponto de saturação (a). Caso a corrente seja retirada o material vai permanecer magnetizado, no chamado ponto de retenção (b), ou seja, o valor de

magnetismo residual. Se a corrente for invertida, o fluxo irá inicialmente ser igualado a zero. Este ponto H negativo é chamado o ponto de coercividade (c). Continuando o aumento da corrente no sentido negativo irá chegar-se a um novo ponto de saturação (d) [1, 39].

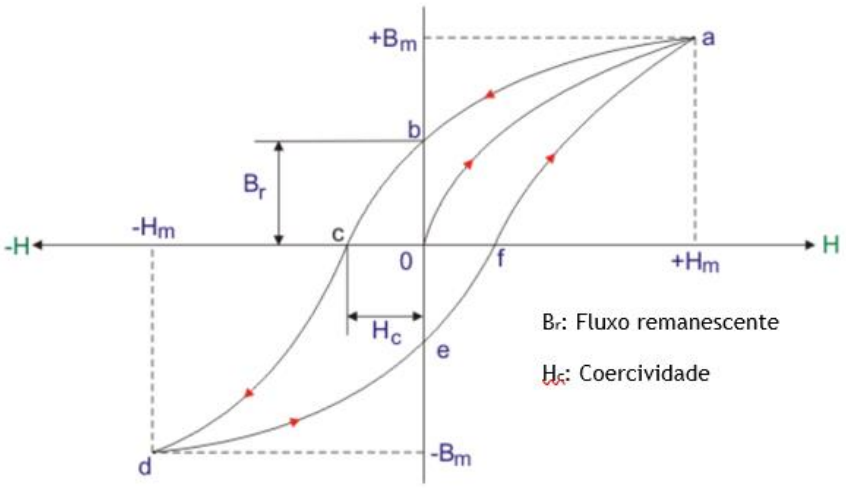


Figura 3 - Ciclo de Histerese. Adaptado [40]

Apesar da representação gráfica, na figura 3, do fenómeno, a densidade do fluxo magnético altera-se de forma descontínua, dito de forma grosseira "em degraus", ou seja, e forma abrupta, a que se deu o nome de "*Barkhausen jumps*". Os saltos devem-se aos movimentos dos domínios magnéticos, zonas magneticamente saturadas, que se deslocam. Materiais não magnetizados possuem estas zonas magnetizadas aleatoriamente, cuja soma resulta um campo magnético próximo ou igual a zero. Quando sujeitos a um campo magnético externo, os domínios afetados orientam-se preferencialmente na orientação do campo, aumentando o volume desse domínio em detrimento de orientações menos favoráveis [38, 39, 41].

Devido à interação magnetoelástica, a direção e a intensidade da tensão residual no material influenciam a distribuição dos domínios e as dinâmicas de movimentação das paredes dos mesmos, que por sua vez influencia o comportamento dos "*Barkhausen* jumps". Esta influência faz com que a técnica seja utilizada na deteção de tensões no material [15, 22, 41].

O resultado da técnica não é apenas dependente da intensidade do estado de tensões do material, mas também da direção. No caso de o campo magnético e as direções das tensões serem paralelos, a amplitude do *Barkhausen* aumenta com tensões trativas e diminui com tensões compressivas. No caso de serem perpendiculares o resultado é o oposto. Isto aliado ao facto de a dependência da tensão não ser linear pode indicar, segundo determinados autores, que não é possível distinguir tensões de tração e de compressão por *Barkhausen* [15, 22].

O sinal eletromagnético induzido ao material pelo equipamento é alternado, fazendo com o que as paredes se movimentem constantemente, permitindo que o sinal recolhido se mantenha para ser possível analisá-lo e não magnetizar o componente. Este sinal induzido tem como parâmetros mais importantes a frequência e a voltagem, podendo também ser escolhido o formato de onda [22, 42].

Estes parâmetros são escolhidos tendo em conta a informação que se pretende recolher, a permeabilidade do campo magnético e a condutividade elétrica do material a ser testado. O sinal induzido é atenuado de forma exponencial relativamente à distância entre a zona analisada e a superfície do material. Assim, os parâmetros devem ser escolhidos de acordo com a profundidade que se deseja analisar [30, 31, 36].

A equação que estima a penetração do campo de *Barkhausen* é:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi \mu \sigma f}} \qquad \text{equação 6}$$

Em que δ representa a penetração do campo magnético alternado, μ representa a permeabilidade do campo magnético, σ equivale à condutividade elétrica e f representa a frequência do campo magnético. Esta equação indica assim que a penetração do campo de *Barkhausen* é beneficiada por baixas frequências induzidas [36, 39].

Para além da influência da permeabilidade do campo magnético, tem ainda influência a coercividade do material (capacidade de um determinado metal manter as características magnéticas que lhe foram induzidas previamente), que irá exigir uma intensidade de sinal maior caso a coercividade também o seja. Isto torna-se particularmente importante quando se verifica uma tendência para aços temperados possuírem uma coercividade maior que aços não-temperados [39].

3.6 Técnica *Barkhausen*

A técnica *Barkhausen* trata-se de uma técnica não-destrutiva sensível à deteção de variações de dureza e dos estados de tensão superficial de um material metálico. Para além de ser uma técnica que apresenta resultados imediatos, com alguns equipamentos a apresentarem portabilidade, algo benéfico em utilização industrial [1, 4, 42].

Na técnica *Barkhausen* utiliza-se uma sonda que inclui um eletroíman e um sensor para fazer um varrimento de um componente, obtendo-se indicadores da dureza e das tensões induzidas na superfície. O eletroíman induz o sinal eletromagnético alternado externo ao componente, encarregando-se o sensor de recolher o sinal magnético do material. Este sinal é transmitido ao equipamento, sendo aí amplificado e filtrados os ruídos indesejáveis do sinal. Após esta etapa, o sinal obtido é apresentado num ecrã onde se pode observar a onda do sinal obtido e o valor relativo à amplitude de sinal mais alta no momento [41, 42].

O operador deve percorrer o comprimento do componente a estudar, devendo observar o monitor durante o processo. Os valores máximos e mínimos devem ser registados a cada uma das passagens. O número de passagens por zona do componente é descrito num procedimento interno da empresa (ver Anexo 1) e varia de componente para componente. Para facilitar o trabalho de análise do operador, o equipamento pode ser programado para emitir um indicador sonoro sempre que o sinal ultrapassar os limites de rejeição impostos [5, 25, 31].

3.6.1 Análise de resultados

Durante a medição deve ser tomado nota dos valores máximos e mínimos obtidos. O procedimento deve indicar limites máximos e/ou mínimos, bem como um limite máximo de variabilidade entre o maior e menor valor.

Os valores acima do normal podem ser associados a tensões compressivas ou a valores de dureza superior ao esperado. O mesmo acontece no sentido inverso, ou seja, a valores abaixo do normal podem ser associadas tensões trativas e/ou valores de dureza inferior ao esperado. É importante referir que esta interpretação não é direta, pois a influência de tensão residual no resultado não é linear, isto é, tensões compressivas e trativas não afetam o resultado na mesma magnitude, como é revelado pelos estudos experimentais de Kusanagi, et.al [32, 43].

Caso os valores obtidos não sejam aprovados, o componente não deve ser imediatamente rejeitado. Os valores devem ser analisados, deliberando a aprovação ou não do componente ainda que os valores possam encontrar-se fora dos limites de rejeição. Para suportar a decisão pode ser necessário recorrer ao ataque com Nital.

3.6.2 Limitações da técnica

Aquando da redação deste trabalho, não existe um padrão internacional para a técnica de *Barkhausen* relativamente a uma unidade SI ou à interpretação de resultados. Tipicamente os procedimentos possuem como unidade de resultado o valor mp (*magnetic parameter*) ou a RMS (*root mean square*), sendo que o primeiro varia de equipamento para equipamento, mesmo dentro do catálogo de um mesmo fabricante de equipamentos. A interpretação de resultados é descrita no procedimento industrial, mas para deliberação de componentes não aprovados numa primeira etapa do procedimento devem existir calibres. Estes calibres são blocos metálicos com material e processo de fabrico semelhante aos da empresa e dos seus produtos, mas com diferentes níveis de defeitos induzidos durante a retificação. A cada um deve ser atribuído um valor da

técnica de *Barkhausen* e uma cor superficial resultante do ataque com Nital, permitindo a associação entre os resultados das duas técnicas. Assim é possível interpretar melhor os resultados numéricos da técnica *Barkhausen* [15, 26].

A profundidade de análise da técnica é influenciada pela composição química do material e os tratamentos térmicos aplicados. Isto significa que não é possível comparar diretamente resultados de *Barkhausen* entre materiais diferentes no que diz respeito à composição química e ao processamento [26, 32].

O equipamento é também sensível à existência de interferências magnéticas externas, algo difícil de evitar em ambiente fabril. Por isso, este possui um sistema de ligação à terra para amenizar essa influência [31].

A inexistência de uma etapa de limpeza antes da medição pode influenciar o resultado, pois os resíduos de processamento prévio podem conter partículas de dureza diferente do material base [31].

Apesar de já existirem equipamentos automáticos de *Barkhausen*, é comum o uso de ensaios manuais. Estes induzem grande variabilidade, devido ângulo de contacto entre a sonda e o espécime ter influência no resultado obtido. Segundo H. Kwun [44], em 1985 estudos experimentais indicaram que para vários níveis de tensão, com um contacto entre a sonda e o espécime igual a 60º obteve-se resultados de ensaio semelhantes para todos os estados de tensão estudados para três aços diferentes, o que revela a dependência da aptidão e da experiência do operador para se executar o ensaio consistentemente.

3.7 Calibres

Com uma conjugação das técnicas de ataque químico com Nital e de *Barkhausen* é possível criar calibres comparativos para se utilizar em ambiente industrial. Estes permitem que aquando um resultado de *Barkhausen* que aponte para uma rejeição, possa ser feito uma comparação com calibres que relacionem valores numéricos com cores da técnica de Nital, auxiliando o departamento de engenharia na tomada de decisão de um componente estar ou não conforme.

Uma vez que os blocos-padrão ou calibres dependem do processo de fabrico da empresa em questão, estes têm de ser fabricados *in-situ* [5, 21, 31].

4 Materiais e métodos

No decorrer do trabalho, foi necessária uma adaptação dos materiais e métodos que procuram aproximar-se o mais possível às condições ideais para a execução do trabalho.

Este capítulo apresenta a metodologia a aplicar no fabrico dos calibres exatamente como os componentes a ser fabricados pela SERMEC GROUP e a metodologia executada, aproximando os tratamentos térmicos e os materiais ao cenário anteriormente referido.

4.1 Metodologia idealizada

Na primeira questão, procurava-se compreender a sensibilidade do equipamento à variação de dureza e tensões residuais introduzidas por maquinagem conforme e não-conforme, em blocos não-cementados. Esta etapa pretendia para além de compreender esta variação de propriedades, compreender a sensibilidade do equipamento a tensões induzidas exclusivamente por maquinagem. O aço 34CrNiMo6 foi escolhido com o intuito de ser um que fosse utilizado na produção de engrenagens e ser possível comparar com estudos já realizados no passado [5]. Durante o processo de maquinagem seriam aplicadas diferentes velocidades de avanço para cada bloco, para se obter variabilidade de dano provocado, num cenário de carência de lubrificante.

Após a produção do bloco, seria executada a técnica de *Barkhausen*, segundo o procedimento utilizado industrialmente (Anexo 1), e de seguida realizada análise metalográfica. A análise metalográfica seria realizada utilizando o reagente de Kalling II, cuja composição se encontra na Tabela 3. Com isto pretendia-se verificar a existência de martensite na zona superficial da peça,

resultante do arrefecimento ao ar após a maquinagem, e a influência desta no resultado da técnica *Barkhausen [45].*

Tabela 3 - Composição do reagente de Kalling II. Adaptado [45]

Reagente	**Kalling II**
Composição	100 ml Ácido clorídrico 5 g Cloreto de cobre (II) 100 ml Álcool etílico

A realização de ensaios de microdureza Vickers tornariam possível obter resultados de microdureza específicos para zonas afetada, não-afetada e material base. Finalmente seria feito um estudo comparativo entre a microestrutura, os valores de microdureza e os valores *Barkhausen*, procurando uma correlação.

A segunda etapa procurava fabricar blocos padrão de *BarkhausenI* a partir de aço 18CrNiMo6-7. Estes pretendem servir de comparação visual entre as técnicas de *Barkhausen* e Nital. Estes devem permitir um contacto de 90° entre a sonda e o bloco para evitar variabilidade do operador. Entre os vários blocos, cementados e não cementados, devem ser induzidos vários níveis de severidade de dano provocado por maquinagem. Estes blocos devem possuir uma composição química e tratamentos térmicos o mais próximo possível do procedimento de fabrico normal, para que a comparação visual em ambiente industrial dos blocos e dos componentes seja possível.

Neste contexto, o procedimento começa com a maquinagem dos componentes, em retificadoras CNC sendo de seguida sujeitos a tratamento termo-químico de cementação em meio gasoso, seguidos de têmpera em óleo e recozimento de alívio de tensões. Tendo em conta a suscetibilidade, devido ao tratamento termo-químico, de o componente sofrer distorções, é necessário retificar o componente após o tratamento, para que o toleranciamento esteja em conformidade com as tolerâncias exigidas. Para que isto seja possível, a cementação deve ser realizada de forma a que a profundidade de capa dura permita a remoção posterior de material durante a retificação sem colocar em causa a resistência ao desgaste do componente acabado.

Procurou-se fabricar, no mínimo, doze blocos para que fosse possível tirar conclusões relativamente a linearidade ou não linearidade da influência das variáveis no resultado de *Barkhausen*. Uma vez que o ataque com Nital iria inutilizar o componente para ser testado por *Barkhausen* no futuro, todos os blocos têm um par sujeito ao mesmo processamento, somando um total de doze blocos com seis procedimentos de fabrico diferentes. Objetivou-se que seis destes blocos fossem cementados de forma igual e os seis restantes iriam avançar à próxima etapa sem sofrer tratamento termo-químico.

Os blocos foram sujeitos, primeiramente, a retificação conforme e, de seguida, a uma nova retificação com graus decrescentes de fornecimento de lubrificante e/ou de velocidade de avanço da mó. A retificação destinada a provocar dano seria aplicada com o avanço de 0,1 mm/bloco para todos os blocos. Posteriormente foram identificados com uma letra de A a F, relativo aos parâmetros de processamento, e com números 1, caso tenha sido sujeito à técnica de Nital, e 2, caso tenha sido sujeito à técnica *Barkhausen*. Os mapeamentos dos blocos encontram-se na Tabela 4.

Tabela 4 - Identificação dos blocos com o seu processo de fabrico

Tipo de Processamento	**Nital**	***Barkhausen***
Cementados; Retificação conforme	Bloco A1	Bloco A2
Não-cementados; Retificação conforme	Bloco B1	Bloco B2
Cementados; Retificação com dano suave	Bloco C1	Bloco C2
Não-cementados; Retificação com dano suave	Bloco D1	Bloco D2
Cementados; Retificação com dano severo	Bloco E1	Bloco E2
Não-cementados; Retificação com dano severo	Bloco F1	Bloco F2

Na execução do ataque com Nital procurou-se que o ataque fosse realizado conforme a norma industrial utilizada [23]. No final a coloração seria comparada com uma escala de cinzentos, atribuindo-se uma identificação referente à intensidade da sua cor superficial.

O ensaio de *Barkhausen* seria realizado também conforme o procedimento indistrial (Anexo 1), registando os valores máximos e mínimos, no entanto sem a etapa de rejeição de resultados.

4.2 Metodologia executada

Relativamente à primeira etapa do trabalho prático, foi possível seguir o procedimento idealizado na medida em que houve acesso aos blocos metálicos necessários. Foram fabricados cinco blocos 200 x 50 x 20 [mm] de 35CrNiMo6.

Para se calcular a velocidade de avanço aplicada foi contado o tempo manualmente com recurso a um cronómetro. Para garantir a indução de dano, um dos blocos foi maquinado com a velocidade de avanço mais lenta e sem lubrificação. Os parâmetros de maquinagem aplicados a cada um dos blocos encontra-se na Tabela 5.

Tabela 5 - Condições de retificação dos blocos

	Avanço (mm/bloco)	Velocidade de avanço (mm/s)
Bloco 1	0,1	270
Bloco 2	0,1	143
Bloco 3	0,1	62,5
Bloco 4	0,1	17,4
Bloco 5*	0,03	17,4

*Bloco maquinado sem uso de lubrificante

Como se pode verificar, o avanço foi reduzido no último bloco devido ao risco agravado de danificar a ferramenta e para garantir a segurança do operador. Esta diminuição tem uma influência também negativa na carga aplicada ao bloco.

Durante o fabrico do Bloco 5 ocorreu um incidente resultante de um aumento do atrito entre a peça e a mó, que provocou a paragem da mesma. Assim foram retiradas duas amostras deste bloco, para se poder estudar isoladamente a área afetada por este incidente, identificando-se a amostra como “Bloco 5a”.

Após provocado o dano nos blocos foi realizada a técnica *Barkhausen*, segundo o procedimento fornecido pela SERMEC GROUP (Anexo 1), e foram registados os resultados desse ensaio, nomeadamente os valores para as amplitudes mínima e máxima de sinal. Para realização do ensaio não-destrutivo, utilizou-se o equipamento Rollscan 350 fabricado pela Stresstech Oy.

De seguida, foi realizada análise metalográfica, utilizando como reagente químico o reagente de Kalling II, em secções selecionadas dos blocos, refletindo os valores máximos e mínimos da técnica de *Barkhausen*. Destas amostras foram obtidas micrografias, recorrendo a um Microscópio Ótico Zeiss Axiotech 100 HD com recurso ao *software* LAS v4.4 e câmera Leica DFC420. Os ensaios de microdureza Vickers foram realizados utilizando um equipamento Struers Duramin. Finamente, foram comparadas a intensidade de presença de martensite e os valores de dureza das amostras com os valores de *Barkhausen*.

Referente à segunda etapa do trabalho, ao fabrico dos blocos-padrão, foi possível preparar o número de blocos idealizado inicialmente, ou seja, doze blocos com 200 x 50 x 20 mm, fabricados a partir de rejeitados industriais de um aço 18CrNiMo7-6. Todos os blocos possuíam um outro bloco fabricado exatamente nas mesmas condições, isto para salvaguardar a oxidação provocada pós o ataque com Nital. Foram fabricados doze blocos no total.

Em primeira instância, foi realizada retificação conforme em todos os blocos, para garantir a aplicação do mesmo avanço em todos blocos na etapa de retificação seguinte, com objetivo de provocar dano.

Devido à realização da retificação ter sido realizado numa retificadora hidráulica, o controlo do dano teve de ser realizado controlando o fluxo de lubrificante do equipamento. Quatro blocos foram retificados com 100% do caudal do lubrificante cedido pela retificadora, quatro blocos com 50% do caudal e os restantes quatro blocos com 0% do caudal, associando à Tabela 2 como “Retificação conforme”, “Retificação com dano suave” e “Retificação com dano severo”, respetivamente.

Não foi possível realizar cementação por meio gasoso, como foi idealizado inicialmente. Procurou-se então executar a técnica mais próxima

cientificamente que requeresse o mínimo de recursos, tendo sido optado por fazer cementação em meio sólido (*Pack Carburizing*). Devido à natureza da execução da técnica não foi possível realizar a posterior têmpera e revenido.

Para execução do tratamento térmico foram utilizadas caixas de cementação em ferro fundido isoladas do ambiente exterior com barro comum. No interior das caixas, foi colocado um composto de cementação, cuja composição se tratava de 0,1 kg de Carbonato de Bário, 0,1 kg de Hulha e o restante composto por carvão vegetal. A caixa foi colocada num forno de tratamentos térmicos e a temperatura na zona de cementação foi medida com um termopar durante o estágio de cementação. A cementação foi executada com um estágio de vinte e quatro horas a uma temperatura de 915°C com arrefecimento lento dentro do forno até à temperatura ambiente. Após o tratamento termo-químico, encontrava-se terminada a preparação dos blocos padrão e dos seus pares, identificados segundo a Tabela 4.

Tal como previsto e indicado na Tabela 4, foi realizado ataque com Nital aos blocos identificados com o número 1 e análise com a técnica *Barkhausen* ao bloco identificado com o número 2.

Para a execução da técnica de ataque químico com Nital utilizaram-se os reagentes indicados na norma ISO 14104 [23]. Os blocos não foram posteriormente comparados com uma escala de cinzentos, conforme o procedimento, pois o facto de os provetes terem sido cementados em sólido altera a sua coloração base, não sendo possível comparar com os blocos não-cementados.

A técnica de *Barkhausen* foi executada como indicado pelo procedimento industrial, registando o valor máximo e mínimo para cada um dos blocos sem aplicação da etapa de rejeição presente no documento. Como parâmetros de ensaio foram usados valores de utilização mais comum em meio industrial, explícitos na Tabela 6.

Tabela 6 - Parâmetros da execução da técnica Barkhausen

Tipo de onda	Sinusoidal
Voltagem de corrente (Vpp)	5.0
Frequência de magnetização (Hz)	125
Voltage range (Vpp)	0.00-16.0
Filtro de frequências (kHz)	10.0-1000.0

A variabilidade do resultado devido ao manuseamento da sonda por parte do operador, foi observada e comprovada com os dados obtidos por Kwun [44], que demonstra a dependência que o ângulo entre a sonda e o componente têm no resultado do ensaio. Por isso, foi garantido um contacto de 90° entre os dois durante a execução da técnica.

Finalmente, as fotos retiradas dos blocos atacados com Nital foram comparadas com os valores do resultado de *Barkhausen*.

5 Discussão de resultados

Relativamente à primeira etapa, referente ao estudo da sensibilidade do equipamento Rollscan 350, foram obtidos os seguintes valores na técnica de *Barkhausen*, de acordo com a Tabela 7.

Tabela 7 – Resultados da técnica Barkhausen das amostras de aço 34CrNiMo6 (mp)

	Mínimo	Máximo
Amostra 1	140	207
Amostra 2	136	500
Amostra 3	223	492
Amostra 4	167	273
Amostra 5	339	500
Amostra 5a	23	500

Os resultados apresentados na Tabela 7 cujos valores numéricos são iguais a 500, que se refere ao valor máximo lido pelo equipamento, ou seja, o material indicou, através da técnica, um baixo nível de tensões e/ou um material relativamente macio quando comparado com amostras de valor de *Barkhausen* mais baixo.

Recorrendo ao microscópio ótico, foi possível observar as amostras recorrendo ao microscópio ótico. O reagente utilizado, Kalling II, ataca agressivamente a martensite e, de forma mais suave, a ferrite e a austenite, não atacando carbonetos.

As micrografias da amostra 1 não revelam a presença de martensite devido à retificação na microestrutura. É possível observar-se alguns carbonetos, assinalados com setas a vermelho. A ferrite apresenta, na Figura 4, a cor mais escurecida, sendo a fase predominante na estrutura.

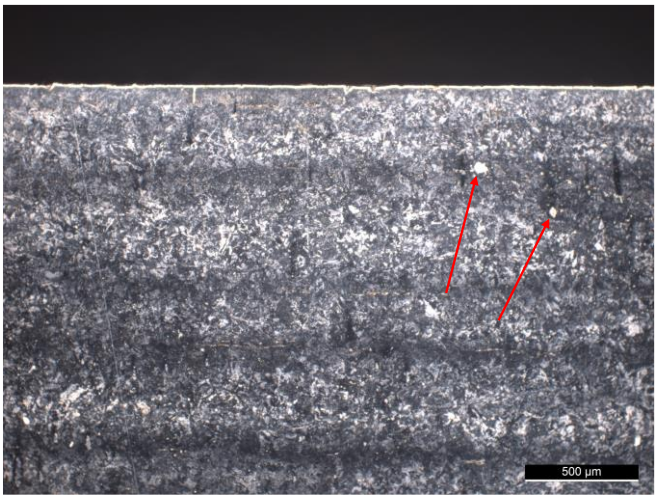


Figura 4 - Microestrutura da amostra 1. Carbonetos identificados com setas vermelhas

De acordo com a figura 5, a amostra 2 revela a existência de uma camada de deformação intensa na superfície, cujo nome atribuído por alguns autores é *White Etched Layer* (WEL) [46, 47]. Esta camada encontra-se assinalada na figura 5 (B). A restante microestrutura é ferrítica.

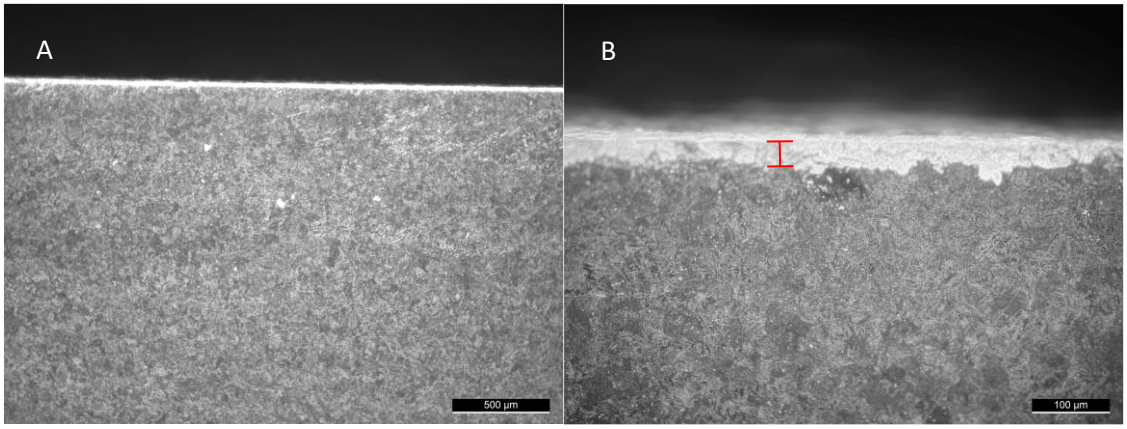


Figura 5- (A) Microestrutura da amostra 2 (B) Microestrutura da amostra 2 com destaque para a WEL

A amostra 3, apresentada na figura 6, revela a existência WEL e de martensite numa zona muito próxima à superfície, assinalada a vermelho. Na zona de material base apresenta uma estrutura ferrítica, com a existência de alguns carbonetos.

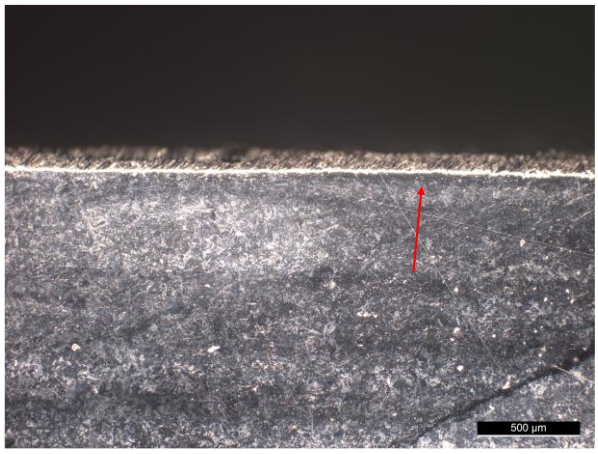


Figura 6- Microestrutura da amostra 3. Martensite assinalada a vermelho

No caso da amostra 4, apresentado na figura 7, pode-se observar uma zona superficial notoriamente afetada. Revela uma WEL pouco regular, na figura 7 (B), fruto de sobreaquecimento na superfície.

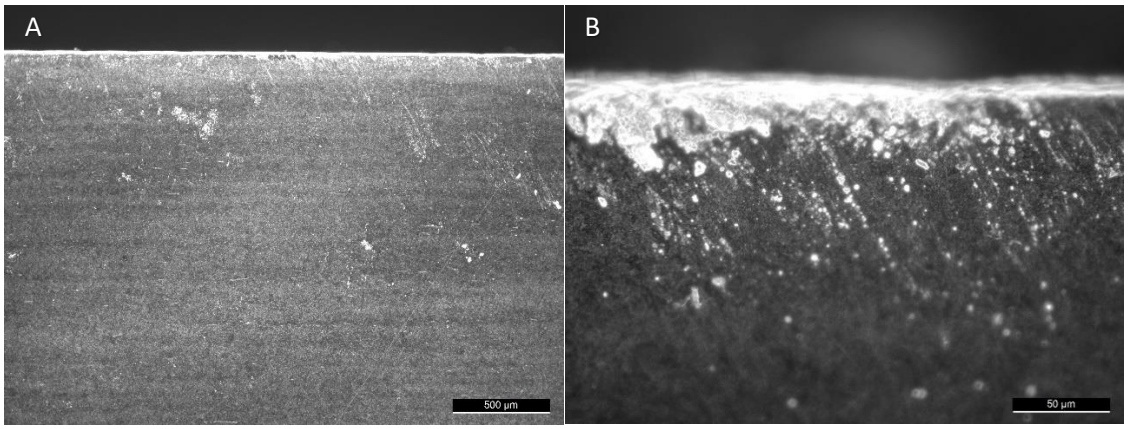


Figura 7- (A) Microestrutura da amostra 4 (B) WEL

A amostra 5 apresenta também WEL na camada superficial, com alguns apontamentos de martensite na camada superficial e subsuperficial. A presença da martensite justifica-se com um sobrearrefecimento rápido da amostra em contacto com o ar.

Por último, na figura 8 pode-se observar a micrografia da amostra 5a, recolhida após um incidente resultante de elevado atrito com a mó de retificação. Revela a maior presença de WEL na primeira camada superficial de todas as amostras

e, na camada seguinte, de forma muito notória, martensite representada pela fase mais escura. Dado os parâmetros de retificação aplicados a este bloco e o incidente ocorrido, o resultado foi o esperado.

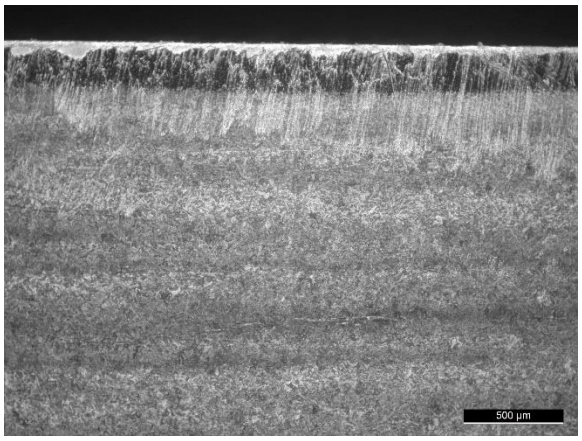


Figura 8- Microestrutura da amostra 5a

A presença de WEL na zona mais superficial de várias amostras reforça as altas temperaturas atingidas durante o processo de retificação e alertam para o impacto que estas podem ter nas propriedades superficiais dos componentes. Segundo Lin, et.al [47], a ocorrência desta camada foi observada em carris ferroviários quando a temperatura de retificação ultrapassava os 600 °C. A WEL poderá ter uma influência na penetração do campo magnético, que por sua vez pode influenciar o resultado da técnica.

Para interpretar os resultados do ensaio de microdureza Vickers, realizou-se uma correlação entre os valores mais altos de cada um dos ensaios de dureza aos valores mais baixos de *Barkhausen* para cada uma das amostras e vice-versa. Valores mais baixos do ensaio de Vickers associados aos valores mais altos da técnica de *Barkhausen*, uma vez que a dureza influencia diretamente o resultado da técnica de *Barkhausen*. Esta correlação é indicada por diversos autores, bem como o fabricante do equipamento [25, 30, 32].

Na figura 9 pode-se observar uma representação gráfica associando os valores de microdureza Vickers mínimos na zona superficial e do valor máximo obtido pela técnica de *Barkhausen*.

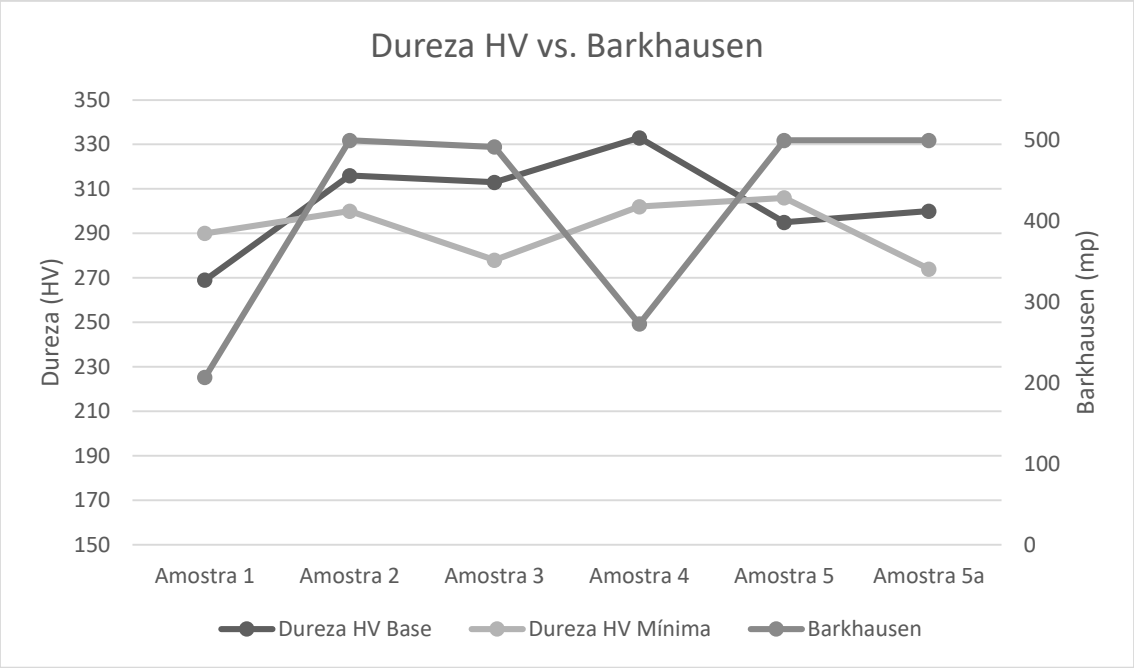


Figura 9 - Gráfico Dureza HV vs. Barkhausen para valores de dureza mínimos

Nesta primeira comparação, seria esperada uma tendência inversa entre o valor de dureza mínima para cada amostra e o valor máximo de *Barkhausen*, o que não parece ser observável, particularmente devido aos resultados fora de escala. Os resultados de *Barkhausen* para as amostras 2, 5 e 5a representam o valor máximo lido pelo equipamento Rollscan 350. As restantes amostras não apresentam qualquer tipo de correlação entre si.
Para aços não cementados são esperados valores altos na técnica *Barkhausen*. Na fase seguinte do trabalho procurou-se estudar também a influência do tratamento termo-químico nos resultados da técnica.

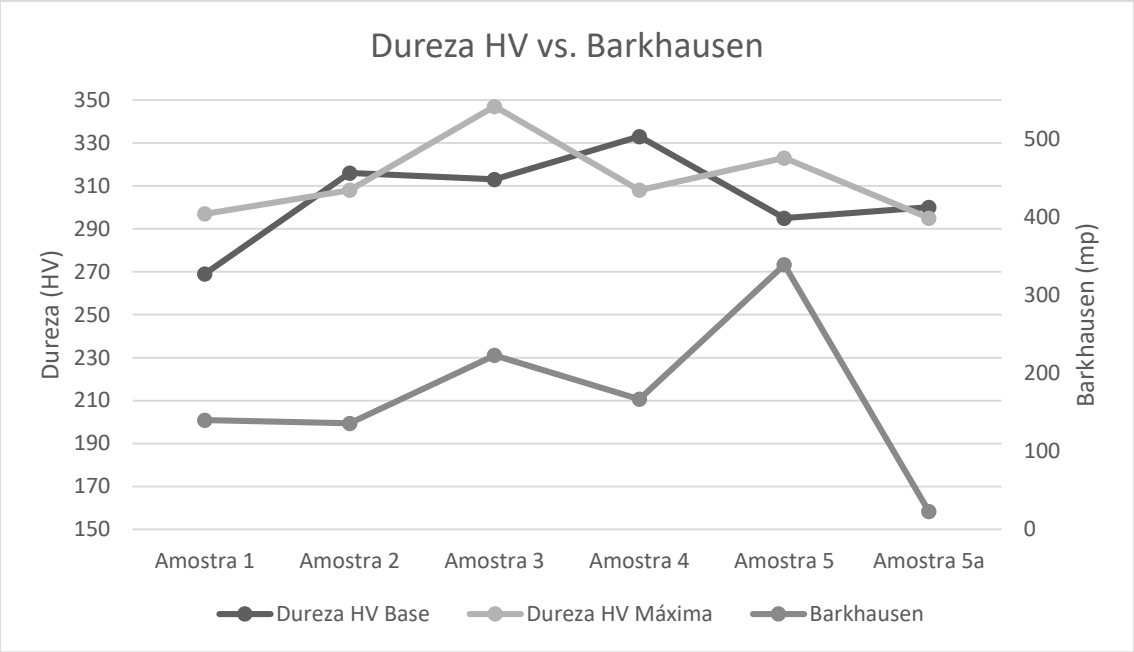


Figura 10- Gráfico Dureza HV vs. Barkhausen para valores de dureza máximos

Na figura 10, seria novamente esperado uma correlação inversa entre os valores máximos de dureza HV e o os valores de *Barkhausen*, o que não ocorreu. É importante referir que a ausência de relação entre o valor de *Barkhausen* e de dureza na amostra 5a, uma vez que o valor de *Barkhausen* corresponde exatamente à zona onde ocorreu o incidente de paragem da mó de retificação. Esta zona, tal como esperado, apresenta uma indução elevada de tensões internas, o que explica tamanha variação de resultado. No entanto, não seria possível executar *Barkhausen* e seccionar a amostra na zona exata desse valor, pelo que o valor de dureza não acompanha a variação teorizada.

O ataque com Nital não revelou alteração cromática anormal em nenhuma das amostras, indicando que não existiu a formação de qualquer tipo de *grinding burn*.

É possível afirmar que existe tensão induzida durante a retificação e que esta é detetável por *Barkhausen*, mesmo em blocos não endurecidos.

Os procedimentos industriais para a aplicação da técnica de *Barkhausen* possuem como um dos fatores de rejeição a variação entre os valores máximos e mínimos do ensaio. É possível verificar uma dispersão de resultados elevada,

como no caso das amostras 2, 3 e 5a que apresentaram variação entre os valores máximos e mínimos superiores a 250 mp. Uma vez que não se verificou a existência de *grinding burn* apenas se pode atribuir esta variação às tensões induzidas durante a retificação.

Relativamente à execução da técnica nos blocos-padrão, foram obtidos os seguintes resultados da técnica de *Barkhausen*:

Tabela 8 - Resultados da técnica Barkhausen nos blocos-padrão (mp)

	Min.	Max.
A2 (0C)	380	457
C2 (50C)	400	432
E2 (100C)	500	500
B2 (0NC)	400	500
D2 (50NC)	457	500
F2 (100NC)	318	500

*Ler ([percentagem de lubrificante][C- cementado/NC- não-cementado])

Novamente encontra-se a problemática de os valores máximos ultrapassarem a capacidade de leitura do equipamento, o que pode ser explicado pela ausência de têmpera no processo termo-químico aplicado nesta situação, grande responsável pela diminuição do valor do ensaio de *Barkhausen*.

Foi possível notar um fenómeno interessante ao comparar as amostras A2 e C2, em que a amostra A2 possui um mínimo mais baixo que a amostra C2. O valor mínimo mais baixo na amostra A2 pode ser indicativo de encruamento e o valor máximo mais alto pode ser indicativo de *retempering burns* ou queimaduras de amaciamento.

No entanto não foi possível encontrar queimaduras em nenhum dos dois blocos, apresentados na figura 11, algo dificultado pela coloração adquirida aquando a cementação em sólido. Como resultado os blocos apresentam vários tons de cinzento, mas sem a morfologia das queimaduras, com um zonamento alongado na direção de rotação da mó de retificação. As várias intensidades da cor superficial são devido à existência de zonas de contacto com o cemento e outras

sem contacto, bem como uma distribuição não uniforme da mistura, uma vez que o processo foi manual. De acordo com a figura pode-se observar essa cor distribuída de uma forma aparentemente aleatória:

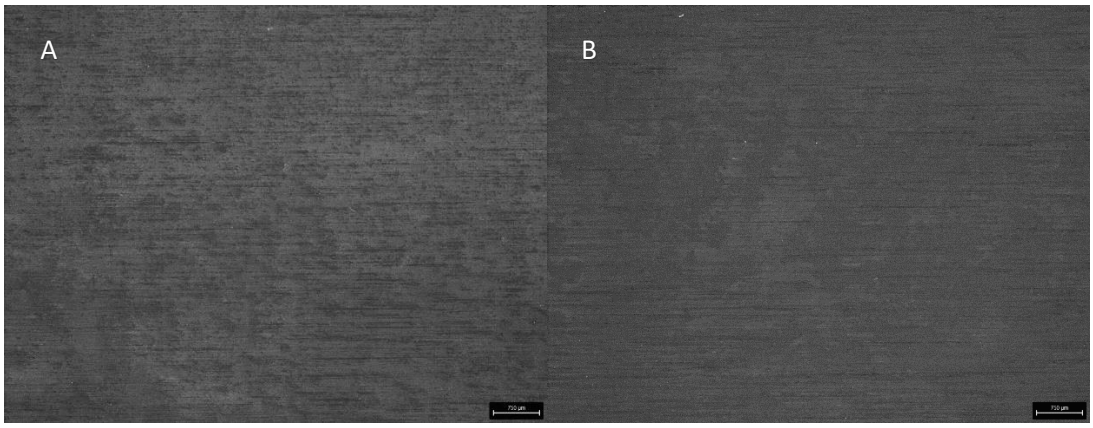


Figura 11- Fotografias do bloco A2 (A) e C2 (B), respetivamente

Apresentando uma tendência semelhante, no caso das amostras B2 e F2, em que a amostra F2 possui um mínimo mais baixo que a amostra B2, levanta-se a possibilidade de a amostra F2 ter sofrido um encruamento anormal durante o processo de retificação. Tendo em conta que algumas medições ultrapassaram o valor lido pelo equipamento, seria interessante poder ter acesso ao valor de *Barkhausen* máximo real das amostras, pois caso este fosse superior ao da amostra B2 poderia ser indicativo da existência de *retempering burn* noutras áreas.

Observando as micrografias apresentadas na figura 12 (A e B), pode-se verificar essa mesma existência de *retempering burn* no bloco A2. Pode-se afirmar a queimadura ser de amaciamento, uma vez que a cor apresentada é mais escura que o material base [23].

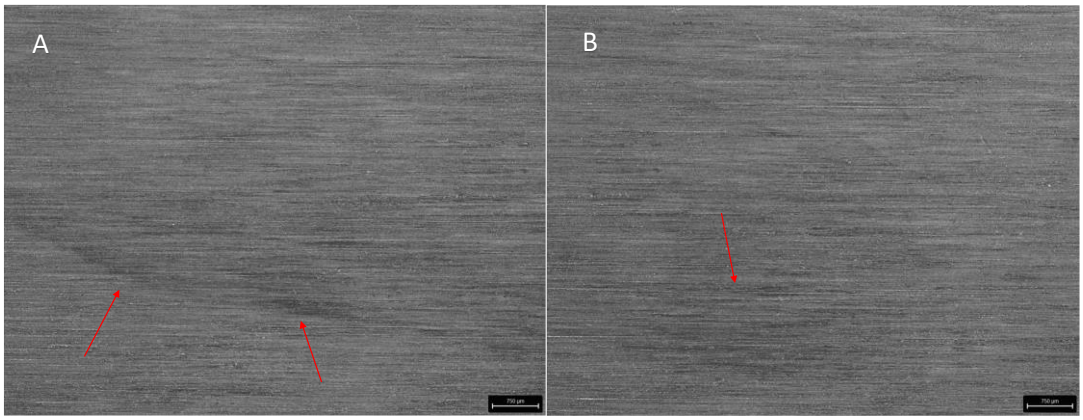


Figura 12- (A e B) Fotografias do bloco A2 com destaque para grinding burns

As restantes imagens, com *retempering burns* assinaladas podem ser acedidas no Anexo 1 do presente documento. O facto de existirem queimaduras, significa que noutras áreas existiu retificação não-conforme que, não apresentando sinais de queimadura, sofreram encruamento, assim diminuindo o valor mínimo de *Barkhausen*.

O bloco E2, na figura 13, apresentou ambos os valores mínimos e máximos acima da leitura do equipamento, o que por comparação com os outros blocos é anómalo, principalmente se se tiver em conta que, em teoria, foi maquinado com a mesma velocidade de avanço e avanço que os restantes blocos e com o caudal total dispendido pela retificadora. No entanto, ao observar as fotografias da superfície é possível verificar uma dispersão de queimaduras finas por toda a extensão do bloco.

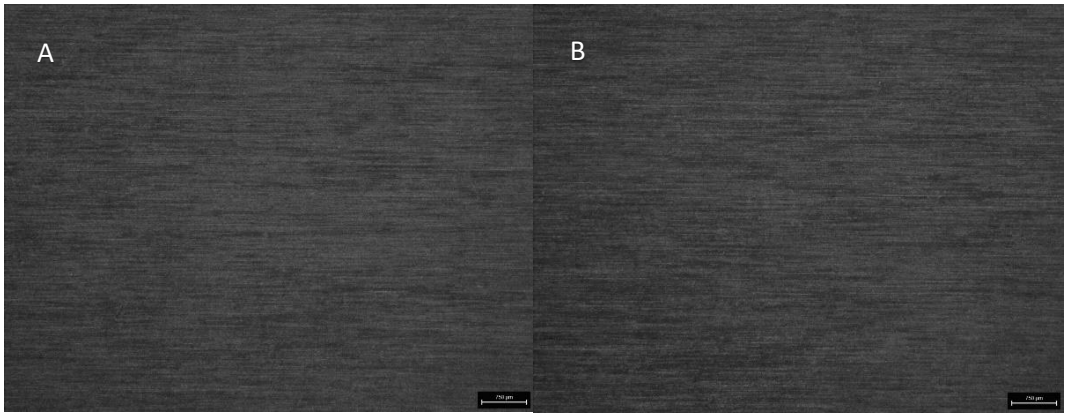


Figura 13- (A e B) Fotografias do bloco E2

Uma vez que a maquinagem foi executada nas mesmas condições de velocidade de avanço, avanço e carga que nos outros blocos e o ciclo térmico utilizado também foi o mesmo, a única variável que pode explicar o fenómeno seria uma possível cementação com defeito, o que faz com que haja aquecimento da amostra sem a mesma adsorção de carbono, aliviando as tensões adquiridas durante a retificação.

Finalmente, na figura 14, é possível verificar queimaduras de baixa intensidade no bloco F2, o que pode explicar um valor máximo fora da escala. Esta queimadura trata-se também de uma *retempering burn* ou queimadura de amaciamento, o que explica o alto valor na técnica de *Barkhausen*.

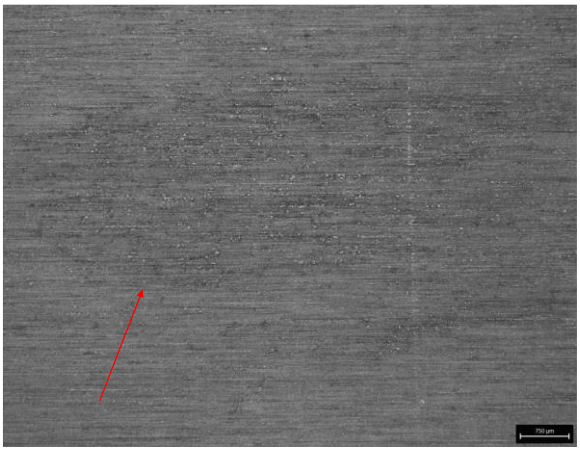


Figura 14- Fotografia da superfície do bloco F2 com destaque para grinding burn

O valor mínimo para o bloco F2 mostra ser o mais baixo de todos ou blocos, o que é precisamente o oposto do esperado, uma vez que o material não era endurecido e foi retificado nas melhores condições de lubrificação de todos os blocos.

6 Conclusão

Verifica-se a técnica não-destrutiva de Barkhausen como uma técnica sensível à variação de dureza e estados de tensão em metais ferromagnéticos.

Como resposta ao objetivo da primeira etapa, não foi possível observar uma correlação entre a dureza superficial das amostras e do ensaio Barkhausen. Esta não-correlação dependeu do método de fabrico pouco controlado e ao tornar-se impossível fazer um estudo numérico no caso de amostras cujo resultado do ensaio de Barkhausen apresentou-se fora de escala.

Foi possível verificar resultados, particularmente através da metalografia, que permitiram compreender a influência da retificação não-conforme nas propriedades de componentes metálicos, nomeadamente a existência de áreas termicamente afetadas e com WEL na zona superficial e sub-superficial dos vários blocos e amostras analisados. A presença de WEL pode ser explicada por um aumento elevado da taxa de aquecimento do componente na zona superficial durante a retificação.

Como resposta à segunda etapa, foi possível verificar, de forma visível, zonas superficiais sobre-revenidas em amostras não cementadas, algo que não foi possível nas amostras cementadas devido à alteração cromática dada pela cementação em sólido.

No entanto, foi possível encontrar alguma correlação entre os parâmetros de retificação, o resultado do ataque de Nital e da técnica Barkhausen em amostras não-cementadas.

Foram observáveis indicadores de uma cementação mal-executada, fruto de o processo ter sido realizado por via manual.

Como objetivo geral, o de fabricar calibres da técnica de Barkhausen, não foi conseguido devido à impossibilidade de recriar com critério o processo de fabrico fabril. No entanto, acredita-se que a estrutura desta metodologia possa ser aplicada, num contexto mais indicado, para obter blocos-padrão funcionais.

7 Trabalhos Futuros

A execução da metodologia presente no trabalho foi um bom ponto de partida para chegar ao objetivo final. Seria relevante realizá-la num contexto com recurso a uma retificadora CNC, para controlo numérico do processo de retificação, e aos equipamentos de tratamentos térmicos utilizados em contexto industrial.

A composição e a microestrutura alteram a penetração de campo nos componentes, logo seria interessante que essa penetração estivesse tabelada para vários materiais-tipo. Com essa informação, o operador poderá ajustar os parâmetros de ensaio ao material que estiver a ensaiar.

8 Bibliografia

1. Santa-Aho, S., et al., *Development of Barkhausen noise calibration blocks for reliable grinding burn detection.* Journal of Materials Processing Technology, 2012. **212**(2): p. 408-416.
2. Sorsa, A., et al., *An efficient procedure for identifying the prediction model between residual stress and Barkhausen noise.* Journal of Nondestructive Evaluation, 2013. **32**(4): p. 341-349.
3. Santa-aho, S., et al., *Optimized laser processing of calibration blocks for grinding burn detection with Barkhausen noise.* Journal of Materials Processing Technology, 2012. **212**(11): p. 2282-2293.
4. Sorsa, A., et al., *Quantitative prediction of residual stress and hardness in case-hardened steel based on the Barkhausen noise measurement.* Ndt & E International, 2012. **46**: p. 100-106.
5. Santa-aho, S., et al., *Utilization of Barkhausen noise magnetizing sweeps for case-depth detection from hardened steel.* NDT & E International, 2012. **52**: p. 95-102.
6. Dehner, E. and F. Weber, *Experience with Large, High-Speed Load Gears, Gear Technology*. 2007, Randall Publications LLC Elk Grove Village, IL.
7. Mohrbacher, H., *Metallurgical concepts for optimized processing and properties of carburizing steel.* Advances in Manufacturing, 2016. **4**(2): p. 105-114.
8. Hamood, A.F., *Influence of annealing, normalizing hardening followed by tempering and laser treatments on some of the static and dynamic mechanical properties of medium carbon steel.* Engineering and Technology Journal, 2010. **28**(21): p. 6274-6287.
9. Boniardi, M., F. D'Errico, and C. Tagliabue, *Influence of carburizing and nitriding on failure of gears–A case study.* Engineering Failure Analysis, 2006. **13**(3): p. 312-339.
10. Alias, S.K., et al., *Mechanical properties of paste carburized ASTM A516 steel.* Procedia Engineering, 2013. **68**: p. 525-530.
11. Bonde, N.A.A.A.S., *Effects of Carburizing on Wear Properties of Steels.* International Journal of Engineering Research and Development, 2013. **9**(3): p. 49-51.
12. Krauss, G., *Steels - Processing, Structure, and Performance*. 2005, ASM International.
13. Davis, J.R., *Gear Materials, Properties, and Manufacture*. 2005, ASM International.
14. Jalaska, D., *Gears and Gear Drives*. 2012: John Wiley & Sons.
15. Committee, A.S.M.I.H., *ASM Handbook, Volume 04 - Heat Treating*. 2018, ASM International.
16. Verhoeven, J.D., *Steel Metallurgy for the Non-Metallurgist*. 2007, ASM International.
17. Smith, W.F., *Principles of materials science and engineering.* 1986.
18. William D. Callister Jr., D.R., *Materials Science and Engineering*. 1985: John Wiley & Sons, Inc.
19. Mehrer, H., *Diffusion in Solids*. Solid-state Sciences, ed. P.F. Manuel Cardona, Klaus von Klitzing, Hans-Joachim Queisser, Roderto Merlin, Horst Störmer. 2007: Springer
20. Samuels, L.E., *Light Microscopy of Carbon Steels*. 1999, ASM International.
21. Deveci, M., *Stresstech Bulletin 4: Grinding damages*, Stresstech, Editor.
22. Čilliková, M., et al., *Nondestructive magnetic monitoring of grinding damage.* Procedia Materials Science, 2016. **12**: p. 54-59.
23. ISO, *ISO 14104 Gears - Surface temper etch inspection after grinding, chemical method*. 2017.
24. Becker, W.T. and R.J. Shipley, *ASM Handbook, Volume 11 - Failure Analysis and Prevention*. 2002, ASM International.
25. Deveci, M., *Stresstech Bulletin 5: Grinding quality control of camshafts*, Stresstech, Editor.

26. He, B., S. Ding, and Z. Shi, *A survey of methods for detecting metallic grinding burn.* Measurement, 2019. **134**: p. 426-439.
27. Ghanei, S., M. Kashefi, and M. Mazinani, *Comparative study of eddy current and Barkhausen noise nondestructive testing methods in microstructural examination of ferrite–martensite dual-phase steel.* Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2014. **356**: p. 103-110.
28. Karpuschewski, B., O. Bleicher, and M. Beutner, *Surface Integrity Inspection on Gears Using Barkhausen Noise Analysis.* Procedia Engineering, 2011. **19**: p. 162-171.
29. Rakhit, A.K., *Heat Treatment of Gears - A Practical Guide for Engineers*. 2000, ASM International.
30. Deveci, M., *Stresstech Bulletin 2: The Properties of Berkhausen Noise*, Stresstech, Editor.
31. Deveci, M., *Stresstech Bulletin 3: Detection methods of grinding damages cover*, Stresstech, Editor.
32. Committee, A.S.M.I.H., *ASM Handbook, Volume 17 - Non Destructive Evaluation of Materials*. 2018: ASM International.
33. Canale, L.C.F.M.R.A.T.G.E., *Failure Analysis of Heat Treated Steel Components*. 2008, ASM International.
34. Makhlouf, A.S.H. and M. Aliofkhazraei, *Handbook of Materials Failure Analysis with Case Studies from the Aerospace and Automotive Industries*. 2016, Elsevier.
35. Kypris, O., I.C. Nlebedim, and D.C. Jiles, *Measuring stress variation with depth using Barkhausen signals.* Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2016. **407**: p. 377-395.
36. Gianfranco Durin, S.Z., *The Barkhausen Effect*, in *The Science of Hysteresis*, I.D.M. Giorgio Berlotti, Editor. 2006, Academic Press.
37. Altpeter, I., R. Tschuncky, and K. Szielasko, *Electromagnetic techniques for materials characterization*, in *Materials Characterization Using Nondestructive Evaluation (NDE) Methods*. 2016, Elsevier. p. 225-262.
38. Tatara, G., H. Kohno, and J. Shibata, *Microscopic approach to current-driven domain wall dynamics.* Physics Reports, 2008. **468**(6): p. 213-301.
39. Jiles, D., *Introduction to Magnetism and Magnetic Materials*. 1991: Springer-Science+Business Media, B.V.
40. Magnets, V. *What is the hysteresis loop?* 2019 23/08/2020]; Available from: http://www.vectormagnets.com/n1849177/What-is-Hysteresis-Loop.htm.
41. Layer, J., *Non Destructive Evaluation*. ASM Handbook, ed. A. International. Vol. 17. 2002: ASM International.
42. Silva, G.R., *Caracterização magnética de aço com a superfície endurecida*. 2010, Universidade de Caxias do Sul.
43. Kusanagi, H., H. Kimura, and H. Sasaki, *Acoustic emission characteristics during magnetization of ferromagnetic materials.* The Journal of the Acoustical Society of America, 1978. **64**(S1): p. S175-S175.
44. Kwun, H., *Investigation of the dependence of Barkhausen noise on stress and the angle between the stress and magnetization directions.* Journal of magnetism and magnetic materials, 1985. **49**(3): p. 235-240.
45. Petzow, G., *Metallographic etching: techniques for metallography, ceramography, plastography*. 1999: ASM international.
46. Wu, Y., et al., *An experimental investigation on surface layer damage in high-efficiency and low-damage grinding of rail by slotted CBN grinding wheel.* The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019. **105**(7): p. 2833-2841.
47. Lin, B., et al., *Influence of grinding parameters on surface temperature and burn behaviors of grinding rail.* Tribology International, 2018. **122**: p. 151-162.

9 Anexos

Anexo 1

Deteção de queimaduras
em superfícies dentadas, depois de retificação

SERMEC GROUP

Deteção de queimaduras na retificação

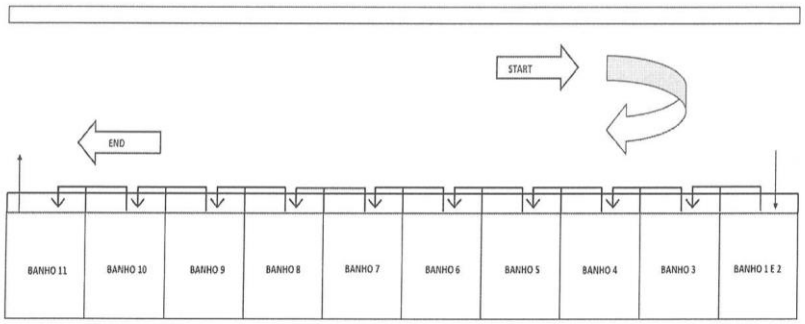
1 Ensaio por ataque de Nital

1.1. *Processo de verificação de queimaduras durante o processo de retificação*

Para a deteção de defeitos devido ao processo de retificação em peças cementadas, utilizar-se-á o tratamento corrosivo com nital. Esta verificação realizar-se-á de acordo com a norma ANSI/AGMA 2007-B92 (ou, ISO 14104) através de banho corrosivo (tipo 2).

1.2 Desenho da alínea de ensaio e procedimento

O desenho da alínea de ensaio para a verificação, por banhos de nital, segue o exemplo da figura 1. A verificação realiza-se submergindo as peças em diferentes banhos de acordo com o procedimento que é descrito na tabela 1. Essa tabela indica a ordem, a composição química dos diferentes banhos e os tempos de *imersão*. Os ensaios deverão ser realizados apenas por pessoal especializado.



Exemplo de uma linha para ensaios de nital

Edição nº 01 Data: 14/10/2019 Pág. 2 de 6

Etapa	Banho	Processo	Composição Química	Tempo
1(**)	1	Desengorduramento a Quente	Solução de sais alcalinos (3-6%)	
2(***)	2	Branqueamento morno	Banho de agua (>25ºC) >ph 8	
3(*)	3	Banho Corrosivo	Acido Nítrico de 2-2.5% (HNO3)	
4(***)	4	Branqueamento a frio	Banho com água a tempª ambiente > ph 10	
5(*)	5	Banho Corrosivo	Acido clorídrico de 2.5-3.5% (HCL)	
6(***)	6	Branqueamento a frio	Banho com água a tempª ambiente > ph 10	
7(***)	7	Neutralização	Banho com carbonato sódico > ph 10	
8(***)	8	Branqueamento a frio	Banho com água a tempª ambiente > ph 10	
9	9	Limpeza	Eliminação com água antioxidante	
10		Escorrimento	Nenhum	
11		Verificação	Avaliação do nível de ataque segundo ponto 1.4 A avaliação será realizada usando antioxidante	

Notas:

(*) Os tempos de imersão, assim como as concentrações dos banhos corrosivos serão comprovados semanalmente mediante teste. As densidades dos banhos corrosivos e do banho 1 (desengordurante) serão medidos seguindo os seguintes passos:

- Pega-se na amostra e mistura-se com tri-sódio de fosfato (0.6N em ml)
- Adiciona-se um indicador Fenolftaleína e comprova-se segundo o indicado na instrução técnica controlo de banhos e sistema de filtração.
- Será mantido um registo semanal das leituras de verificação realizadas.

Diariamente, será verificado o estado correto dos banhos mediante a medição dos padrões existentes para o efeito.

O controlado semanal das cubas incluí o controlo da limpeza da cuba de HNO3 (sem óleo). O responsável pela inspeção deverá notificar ao responsável da qualidade a necessidade da limpeza das cubas sempre que necessário. No geral não será excedido o prazo de 2 meses entre limpezas.

(***) O pH dos banhos 2-4-6-7-8 será medido diariamente.

(***) Recomendação: Rustilo 230. A verificação segundo os passos 7 e 12 deve ser possível uma vez aplicado o conservante anticorrosivo.

1.3 Âmbito do ensaio

As indicações referem-se a cada lote de produção, ou seja, a quantidade de peças previstas dentro da planificação de trabalho e que são revistas conjuntamente.

1.4 Avaliação, autorização e documentação dos ensaios de nital

Terão de se verificar todos os flancos retificados em ambos os lados. Principalmente, a avaliação irá realizar-se em conformidade com a fase FB2/NB2 da norma ANSI/AGMA 2007-B92, distinguindo-se as seguintes

classes:

Classe A:

Sem sobreaquecimento durante o processo de retificado.

Classe B y C

Ligeiro sobreaquecimento durante o retificado, o sobreaquecimento durante o retificado apresenta áreas interrompidas e translúcidas. Este nível de sobreaquecimento não reduz a dureza superficial significativamente.

Classe D:

Sobreaquecimento severo. Apresenta áreas claramente visíveis e opacas. Este nível de sobreaquecimento reduz a dureza superficial em 10HV e mais.

Classe E:

Endurecimento repetido. As áreas endurecidas apresentam-se como zonas brancas rodeadas de áreas negras de classe D. Trata-se de martensite temperada que não reage com banhos corrosivos.

A avaliação e autorização realizar-se-á de acordo com o esquema da avaliação indicado na tabela 2. A avaliação realizar-se-á sempre no dente mais afetado da peça. As percentagens referem-se sempre à parte afetada da superfície completa do dente.

A avaliação dentro das classes estabelecidas deve ser realizada por pessoal qualificado.

Classe	Descrição	Avaliação
A	Sem sobreaquecimento	
B1	Ligeiro sobreaquecimento <10% da superfície	
B2	Ligeiro sobreaquecimento 10 - 25% da superfície	
B3 e C	Sobreaquecimento grave	
D	Endurecimento repetido	
E	Endurecimento repetido	

2 Ensaio Barkhausen

2.1 Limpeza de peças

Os componentes para inspeção devem estes limpos e livres de qualquer género de resíduos ou poeiras. O procedimento deve ser realizado por meio de uma máquina de lavar ou com o líquido e pano de limpeza.

2.2 Ajuste do trabalho da peça para o posto correto

Ajustar o suporte para adequar a altura de trabalho. Sempre que possível imobilizar o componente antes dos trabalhos de inspeção.

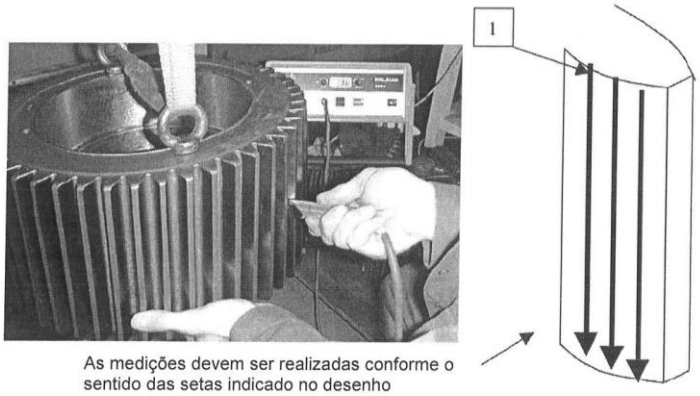
2.3 Número de peças de trabalho

Cada quinto dente deve ser marcado com o número corrido correto com caneta de tinta branca.

2.4 Medição da peça de trabalho

Ambos os flancos de todos os dentes devem ser inspecionados. Durante a medição, o sensor deve ser ajustado à superfície do dente no local onde a leitura é mais alta.

Modulo	Nº Medições
<7	2
≥ 7	3



As medições devem ser realizadas conforme o sentido das setas indicado no desenho

A medição deve ser realizada num local diferente do perfil, dependendo do módulo. O resultado em que o Mpreading é mais alto deve ser gravado no computador. O número de medições por flanco está relacionado ao módulo de engrenagens

2.5 Gravação dos dados de medição

Os resultados da medição devem ser guardados, de acordo com o número de série da peça. Os resultados da medição dos flancos esquerdo e direito devem ser arquivados em separado.

2.6 Interpretação dos resultados de medição de Barkhausen

Se todas as leituras obtidas forem inferiores a , a peça inspecionada encontra-se aprovada.

Se a diferença entre as leituras obtidas diferirem em mais de , ou se os valores máximos estiverem acima de , é necessária a aprovação por parte do departamento de engenharia. Nestas circunstancias uma inspeção com Nital e a medição da dureza superficial poderá ser requerida para suportar a decisão final.