

**ESTUDO DA RESISTÊNCIA AO DESGASTE DE UM
FERRO FUNDIDO BRANCO DE ALTO CRÓMIO**

André Filipe Afonso

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Orientador:

Prof. Doutor C. A. Silva Ribeiro
(Faculdade de Engenharia da
Universidade do Porto)

Orientador da empresa:

Engenheiro Carlos Dias (Cruz
Martins & Wahl, Lda.)

setembro de 2012

<i>Candidato</i>	André Filipe Martins Afonso	Código – 070508033
<i>Título</i>	Estudo da Resistência ao Desgaste de um Ferro Fundido Branco de Alto Crómio	
<i>Data</i>	29 de outubro de 2012	
<i>Local</i>	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto – Sala F 103 – 16h	
<i>Júri</i>	Presidente – Professora Doutora Maria Ascensão Lopes	DEMM/FEUP
	Arguente – Professor Doutor J. Joaquim C. Barbosa	U. Minho
	Orientador - Professor Doutor Carlos Silva Ribeiro	DEMM/FEUP

“Não existe ensino que se compare ao exemplo.”

Robert Baden-Powell

Agradecimentos

Em primeiro lugar à empresa Cruz Martins & Whal Lda, na pessoa do Eng. Carlos Dias, ao disponibilizar-se para me receber e responder a todas as dúvidas ao longo do trabalho e pela cedência de material para o estudo realizado.

Ao meu orientador, o Professor Doutor Carlos Silva Ribeiro, pela transmissão de conhecimentos e orientação ao longo de todo o meu percurso, em especial nestes últimos meses. Aos restantes Professores do Departamento, pela transmissão assertiva de conhecimentos durante todo o curso.

Ao Professor Doutor Jorge Seabra, ao Eng. André Gama e ao Eng. Carlos Fernandes, do Departamento de Engenharia Mecânica da FEUP, pela ajuda na avaliação do desgaste. Ao CINFU, pela possibilidade de desenvolver inúmeros trabalhos durante todo o curso e em particular durante o desenvolvimento da dissertação.

À minha família pelo apoio incondicional durante estes 5 anos e por me darem a oportunidade de experienciar a vida académica. Aos meus Padrinhos e Afilhados, pelas conversas, pelo apoio, pelo acompanhamento e por se cruzarem na minha Vida.

Ao pessoal de M&B, por todos os ensinamentos que me transmitiram ao longo destes anos, e por todos os amigos que ganhei. Aos anteriores a 07*, por todas as “aulas” que me deram. Aos 07, os quais formamos um grupo excelente e que passamos muitos bons momentos juntos e continuaremos certamente. Aos a seguir a 07, por me ensinarem por vezes a ver o outro lado das coisas. A todos os outros que durante o meu percurso académico ajudaram das mais diversas formas.

Ao pessoal do OUP, que tanto me deu ao longo deste anos e que certamente continuará a dar; por todos os espetáculos, por todas as ceias, as Sra^s do Almurtão, as Digressões, os ensaios...enfim, por tudo. Para aquele grupo de pessoas (vocês sabem quem são!) por me deixarem ser parte das vossas Vidas e todas as palavras de fortalecimento e incentivo! Aos que aceitaram um ano de Direção, pela persistência e pelo que nos fez crescer em vários sentidos.

Para todos e “para os ausentes sempre presentes”, por me guiarem nos melhores caminhos, desbravando vales e montanhas, um sincero obrigado, uma palavra de apreço...

Resumo

O desgaste é um dos problemas industriais mais frequentes e para o qual vários estudos são efetuados. Este tem a agravante de poder ser minimizado e controlado, não podendo no entanto ser eliminado. Deste modo é importante o estudo das consequências que este pode ter em serviço, com estudos em laboratório.

A presente dissertação teve início com uma parceria com a empresa de fundição Cruz Martins & Wahl, Lda, que desenvolve entre outros, rolos para laminagem de cerâmicos em ferro fundido branco de alto crómio. Assim foi sugerido o estudo das propriedades deste tipo de ferro fundido, com incidência na resistência ao desgaste. Foram efetuados testes de dureza e análise da microestrutura para completar o estudo da resistência ao desgaste que foi efetuado com recurso à técnica de pino no disco, com uma esfera de alumina. De seguida, procedeu-se à avaliação das superfícies onde se realizaram os testes. A análise foi efetuada com várias técnicas para que os resultados fossem o mais corretos possível, destacando-se a por avaliação do perfil topográfico.

Os resultados obtidos demonstraram que a dureza do material é uma propriedade fundamental no estudo da resistência ao desgaste, já que esta é maior, tanto maior seja a dureza do material. Também, e transportando o caso estudado para a realidade da utilização deste material, o raio dos rolos de laminagem é um pormenor fundamental, uma vez que quanto maior for o raio dos rolos (dentro de dimensões aceitáveis para não ser necessário modificar o modo de fabrico), menor será o desgaste, pela minimização do número de voltas para uma mesma distância de deslizamento.

Palavras-chave - White Cast Irons; Wear; Pin on disc test

Abstract

The wear is one of the most common industrial problems and for which various studies are performed. Even though this problem cannot be eliminated, it can be minimized and/or controlled. Thus laboratory tests are important in order to better understand the consequences of the wear in service

This work began with a partnership with foundry Cruz Martins & Wahl, Ltd, which develops, among others, rolls for rolling ceramic in high chromium white cast irons. The main goal of this study was to understand the properties of this type of cast iron, with a focus on wear resistance. Microstructure was analyzed and hardness tests were performed to complete the wear resistance study, which was made using the technique pin on disc with a ball of alumina. Then, the evaluation of the surfaces was done. The analysis was performed with several techniques so that the results were as correct as possible, especially for the evaluation of the topographic profile.

The results showed that the hardness of the material is a fundamental property to study the wear resistance, since it is as high as higher the hardness of the material. Also, taking this results to the reality of use of this material, the radius of the rolling mills is also an important detail, since the greater the radius of the rolls is (within acceptable dimensions that do not imply the change of the manufacturing method), the lower will be the wear by minimizing the number of turns for the same sliding distance.

Keywords - White Cast Irons; Wear; Pin on disc test

Índice

1. Introdução	1
2. Revisão Bibliográfica.....	3
2.1. Ferros fundidos brancos de alto crómio	3
2.1.1. Composição química típica	5
2.1.2. Carbonetos.....	7
2.1.3. Tratamentos Térmicos.....	7
2.1.4. Principais propriedades e aplicações.....	8
2.2. Desgaste.....	9
2.2.1. Rugosidade	9
2.2.2. Mecanismos de Desgaste	10
2.2.2.1.Desgaste adesivo	10
2.2.3. Ensaio de desgaste pino no disco	12
2.2.4. Coeficiente de atrito	14
3. Materiais e Métodos	15
3.1. Rugosidade superficial dos discos.....	16
3.2. Ensaio de desgaste pino no disco.....	17
3.3. Análise Microestrutural	19
3.4. Durezas	20
3.5. Análise das superfícies de desgaste, rugosidades e topografias	21
4. Resultados experimentais e análise.....	23
4.1. Rugosidade superficial dos discos.....	23
4.2. Análise Microestrutural	23
4.3. Durezas	27
4.4. Análise das superfícies de desgaste, rugosidades e topografias	28
5. Conclusões	35
6. Trabalhos Futuros.....	37

7. Referências Bibliográficas	39
-------------------------------------	----

Índice de Figuras

FIGURA 1 – ESQUEMA ILUSTRANDO O FENÓMENO DE DESGASTE ADESIVO. SÃO CRIADAS LOCALMENTE LIGAÇÕES DEVIDO À CARGA USADA, QUE SÃO ROMPIDAS DE SEGUIDA, DEVIDO AO MOVIMENTO RELATIVO ENTRE AS DUAS SUPERFÍCIES, HAVENDO DESGASTE DAS SUPERFÍCIES ENVOLVIDAS	11
FIGURA 2 - IMAGEM ILUSTRATIVA DO EQUIPAMENTO DE DESGASTE PINO NO DISCO USADO PARA REALIZAR OS ENSAIOS DE DESGASTE	13
FIGURA 3 – IMAGEM EXEMPLIFICATIVA DOS DISCOS CEDIDOS PELA CM&W PARA A REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS DE DESGASTE.	16
FIGURA 4 – RUGOSÍMETRO MITUTOYO SJ 201.	17
FIGURA 5 - IMAGEM COTADA COM A EXPLICAÇÃO DOS CORTES EFETUADOS NOS DISCOS.....	17
FIGURA 6 – EQUIPAMENTO PARA ENSAIOS DE DESGASTE PINO NO DISCO PRESENTE NO DEMM.	18
FIGURA 7 – ESQUEMA EXEMPLIFICATIVO DAS INDENTAÇÕES REALIZADAS NA SUPERFÍCIE DO DISCO.....	20
FIGURA 8 – EXEMPLO DO GRÁFICO GERADO APÓS A MEDIÇÃO DA TOPOGRAFIA DA SUPERFÍCIE DESGASTADA; A ÁREA A VERMELHO CORRESPONDE À ZONA DA PISTA DE DESGASTE, ONDE O EIXO DOS XX CORRESPONDE À LARGURA DA PISTA E O EIXO DOS YY À PROFUNDIDADE DA MESMA.	21
FIGURA 9 – MICROESTRUTURAS DA AMOSTRA RETIRADA DA PEÇA, TRATADA TERMICAMENTE COM UMA TÊMPERA E UM REVENIDO (W7 P – C/TT), ATACADO COM UMA SOLUÇÃO DE NITAL; A) IMAGEM COM BAIXA AMPLIAÇÃO; B) IMAGEM COM ALTA AMPLIAÇÃO.....	24
FIGURA 10 - MICROESTRUTURAS DA AMOSTRA RETIRADA DO DISCO DE DESGASTE, TRATADA TERMICAMENTE COM UMA TÊMPERA E UM REVENIDO (W7 D - 2 – C/ TT), ATACADO COM UMA SOLUÇÃO DE NITAL; A) IMAGEM COM BAIXA AMPLIAÇÃO; B) IMAGEM COM ALTA AMPLIAÇÃO.	25
FIGURA 11 - MICROESTRUTURAS DA AMOSTRA RETIRADA DO DISCO DE DESGASTE, TRATADA TERMICAMENTE COM UMA TÊMPERA E UM REVENIDO (W7 D - 1 – SEMI TRATADA), ATACADO COM UMA SOLUÇÃO DE NITAL; A) IMAGEM COM BAIXA AMPLIAÇÃO; B) IMAGEM COM ALTA AMPLIAÇÃO.	26
FIGURA 12 - MICROESTRUTURAS DA AMOSTRA RETIRADA DO DISCO DE DESGASTE, NO ESTADO AS-CAST (W6 D - 1 – S/ TT), ATACADO COM UMA SOLUÇÃO DE NITAL; A) IMAGEM COM BAIXA AMPLIAÇÃO; B) IMAGEM COM ALTA AMPLIAÇÃO.	26
FIGURA 13 – GRÁFICO ONDE SE ILUSTRA A DUREZA DOS DISCOS UTILIZADOS NOS ENSAIOS DE DESGASTE, EXPRESSO NO SISTEMA DE MEDIDA DE DUREZA DE ROCKWELL C.....	27
FIGURA 14 – LARGURA DAS PISTAS DE DESGASTE EM MICRÓMETROS, PARA UM RAIOS DA PISTA DE 21 MM E 7580 VOLTAS, COM RECURSO AO MICROSCÓPIO ÓTICO E PELA AVALIAÇÃO DA TOPOGRAFIA.....	30
FIGURA 15 - LARGURA DAS PISTAS DE DESGASTE EM MICRÓMETROS, PARA UM RAIOS DA PISTA DE 24 MM E 6635 VOLTAS, COM RECURSO AO MICROSCÓPIO ÓTICO E PELA AVALIAÇÃO DA TOPOGRAFIA.....	31
FIGURA 16 – VOLUME DESGASTADO EM MILÍMETROS CÚBICOS, PARA UM RAIOS DA PISTA DE 21 MM E 7580 VOLTAS, PELA AVALIAÇÃO DA MASSA E PELA ÁREA DESGASTADA.	31
FIGURA 17 - VOLUME DESGASTADO EM MILÍMETROS CÚBICOS, PARA UM RAIOS DA PISTA DE 24 MM E 6635 VOLTAS, PELA AVALIAÇÃO DA MASSA E PELA ÁREA DESGASTADA.	32
FIGURA 18 – PERFIL TOPOGRÁFICO DA AMOSTRA W6 D - 1 APÓS O ENSAIO COM UM RAIOS DA PISTA DE 21 MM E 7580 VOLTAS.	33
FIGURA 19 - PERFIL TOPOGRÁFICO DA AMOSTRA W7 D - 1 APÓS O ENSAIO COM UM RAIOS DA PISTA DE 21 MM E 7580 VOLTAS.	34

FIGURA 20 - PERFIL TOPOGRÁFICO DA AMOSTRA W7 D - 2 APÓS O ENSAIO COM UM RAIOS DA PISTA DE 21 MM E 7580 VOLTAS.34

Índice de Tabelas

TABELA I – VALORES DE DUREZA APRESENTADOS PELA NORMA ASTM A 532, PARA AS CLASSES II E III NO ESTADO AS-CAST E TRATADO TERMICAMENTE	8
TABELA II – DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS DE RUGOSIDADE	9
TABELA III – COMPOSIÇÃO QUÍMICA DA LIGA EM ESTUDO.	15
TABELA IV – PARÂMETROS USADOS DURANTE OS ENSAIOS DE DESGASTE PINO NO DISCO.	19
TABELA V – ATAQUES QUÍMICOS E TEMPOS DE ATAQUE UTILIZADOS PARA REVELAÇÃO DA MICROESTRUTURA DAS AMOSTRAS DE FERRO FUNDIDO RETIRADAS DIRETAMENTE DA PEÇA E DOS DISCOS DE DESGASTE.....	20
TABELA VI – RUGOSIDADE SUPERFICIAL DE CADA UMA DAS AMOSTRAS; PARA CADA AMOSTRA, A LINHA A CINZENTO REPRESENTA A MEDIÇÃO A PARTIR DO CENTRO DO DISCO, ENQUANTO QUE A LINHA A BRANCO A MEDIÇÃO A PARTIR DO PONTO FINAL DA ANTERIOR.	23
TABELA VII – VALORES DA DUREZA DA AMOSTRA RETIRADA DA PEÇA, NO SISTEMA DE ROCKWELL C, COM UMA CARGA DE 1471 N E A UTILIZAÇÃO DE UM CONE DE DIAMANTE.	28
TABELA VIII – RESULTADOS POR PERDA DE MASSA APÓS OS ENSAIOS DE DESGASTE PINO NO DISCO.	28

Abreviaturas

U. PORTO – Universidade do Porto

FEUP – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

CM&W – Cruz Martins & Wahl, Lda

C – Carbono

Si – Silício

Mn – Manganês

P – Fósforo

S – Enxofre

Cr – Crómio

Ms – *Martensite start*

W – Tungsténio

Pt – Platina

Nb – Nióbio

Ti – Titânio

CINFU - Centro de Formação Profissional da Indústria de Fundição

DEMM – Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais

SiC – Carboneto de Silício

DEM – Departamento de Engenharia Mecânica

MO – Microscópio Ótico



1. Introdução

A Cruz Martins & Whal Lda (CM&W) é uma fundição de aços e ferros ligados em que uma das principais metas é o alcance de materiais com alta resistência ao desgaste. As peças produzidas são incluídas em diversos equipamentos, trabalhando nas mais extremas condições de desgaste, causado por abrasão, corrosão, elevadas temperaturas ou uma combinação destas formas de desgaste.

Na CM&W são produzidos, em ferro fundido branco de alto crómio, as camisas para rolos laminadores de cerâmica. Com o processo de laminagem é possível obter o barro em espessuras compatíveis com a produção dos mais diversos materiais, como por exemplo tijolo, telhas, ou outros elementos cerâmicos. Dependendo das características mineralógicas do barro, a abrasão que os rolos sofrem é diferente, sendo sempre, no entanto, elevada. Devido a este problema da abrasão é cada vez mais crucial o estudo dos materiais envolvidos no processo de desgaste, para que se possa otimizar a laminagem das pastas cerâmicas, minimizando assim o desgaste nos rolos. Na CM&W é usado o processo clássico de vazamento em moldação de areia. O processo compreende a fusão da carga, em fornos de indução, ou fornos de indução mais forno de arco (quando a carga é superior a 7 toneladas de metal). O vazamento é efetuado em moldações de areia auto-secativa, sendo as caixas mais altas, normalmente, vazadas em fossas. Os moldes são em madeira e moldados manualmente. Após a solidificação os ferros fundidos brancos de alto crómio são sujeitos a um tratamento de têmpera com arrefecimento ao ar calmo (ventilado) e um revenido. As temperaturas relativas a este tratamento não podem ser divulgadas a pedido da empresa. Devido à massividade das peças produzidas, é difícil a obtenção de um tratamento térmico homogéneo em toda a peça. Deste modo surgem zonas onde a dureza é mais elevada e outras onde pelo contrário é mais baixa. Importa estudar a resistência ao desgaste nestas zonas para que se possa minimizar o desgaste das peças envolvidas nos processos de laminagem de cerâmicos.

Numa parte inicial da dissertação é apresentada uma síntese bibliográfica que pretende ser uma base de lançamento para o trabalho prático efetuado. Funciona assim como um sustento ao que foi feito e aos resultados obtidos.

Nos materiais e métodos é possível constatar todo o método desenvolvido na procura das soluções para o problema/questão formulado. Pretende-se portanto que fique claro quais os métodos utilizados para alcançar os resultados obtidos.



Numa terceira parte da dissertação foram discutidos e procuradas soluções, pela análise dos resultados obtidos com recurso ao método apresentado. É ainda de seguida efetuada uma conclusão do trabalho, resumizando os pontos fortes e fracos que foram discutidos na discussão de resultados e apresentadas sugestões para trabalhos futuros.

Globalmente esta dissertação pretende de uma forma precisa, caracterizar o material em estudo quanto ao seu comportamento ao desgaste, assim como estudar a sua dureza e microestrutura. Este tipo de estudos é de extrema importância, já que ao colocar um material em serviço, por exemplo em rolos para laminagem de cerâmicos, deve-se ter em atenção qual dos dois materiais é mais duro, para que o desgaste dos rolos seja o menor possível.



2. Revisão Bibliográfica

2.1. Ferros fundidos brancos de alto crômio

Os ferros fundidos apresentam características típicas das ligas ferrosas que são conformadas com a sua forma final, não sendo normalmente alvo de maquinagem após a sua solidificação. Ao contrário dos aços, os ferros fundidos, apresentam na sua microestrutura uma fase rica em carbono, constituindo esta uma percentagem superior a 2%. O facto de solidificarem sob a reação estável ou metaestável relaciona-se com o potencial de nucleação do banho metálico, da composição química e da taxa de arrefecimento. O potencial de grafitação de um ferro pode ser elevado ou baixo, sendo este influenciado pela composição química e pelo potencial de nucleação. Assim se o potencial de grafitação for elevado, o carbono apresentar-se-á sob a forma de grafite, solidificando segundo a versão estável; pelo contrário, se for baixo, a fase rica de carbono estará combinada sob a forma de carbonetos, sendo assim a solidificação segundo a versão metaestável. Deste modo, as propriedades mecânicas dos ferros fundidos são influenciadas pela forma como o carbono se apresenta na microestrutura [1, 2].

Quanto à classificação dos ferros fundidos estes podem ser divididos tendo por base diversas características. Tendo em conta a coloração da sua fratura (em brancos e cinzentos), quanto às suas características microestruturais (tendo como base a forma da grafite e a matriz da mesma). Uma outra classificação tem por base quatro tipos: os brancos, os cinzentos, os dúcteis e os maleáveis. Esta é uma das classificações base que é mais frequentemente usada, por englobar os quatro tipos mais representativos de ferros fundidos.

Os ferros fundidos brancos solidificam segundo a versão metastável do diagrama Fe-C, no qual todo o carbono se encontra na forma de carbonetos. Não existe grafite no estado *as-cast*, apresentando uma superfície de fratura de coloração branca. Os ferros fundidos brancos podem ainda ser divididos em três classes:

- Ferro fundido branco normal – este tipo contém apenas C, Si, Mn, P e S, não apresentando outros elementos de liga;
- Ferro fundido branco com baixa liga – a fração total de elementos ligados não ultrapassa os 5%;
- Ferro fundido branco com alta liga – a fração total dos elementos ligados excede os 5% [3].

As três classes de ferros fundidos brancos apresentam um comportamento em solidificação semelhante, exibindo no final estruturas *as-cast* idênticas. Estas têm uma



estrutura composta por uma grande quantidade de carbonetos, o que faz com que estes ferros fundidos tenham uma dureza elevada, embora sejam frágeis e de difícil maquinagem. Os mesmos apresentam uma aptidão para aplicações em que seja exigido elevada resistência ao desgaste e à abrasão, uma vez que devido à sua elevada dureza suportam solicitações elevadas deste tipo [3]. Os ferros fundidos brancos de alta liga, contêm crômio para prevenir a formação de grafite durante a solidificação e para que se formem os carbonetos. É normal encontrar-se também outros elementos de liga, tais como níquel, molibdénio, cobre, ou a combinação destes, prevenindo assim a formação de perlite na microestrutura [2].

Os ferros fundidos brancos podem ainda, e segundo a norma ASTM A 532 ser definidos por três classes. Os da classe I, sendo denominados por níquel-crômio, ou *Ni-hard*, a classe II, representando os de crômio-molibdénio e os da classe III, os de alto crômio. A norma define ainda as composições químicas base destas classes, no entanto é possível encontrar outros ferros brancos com diferentes composições, tendo em conta uma aplicação específica. Para que as características de cada ferro fundido branco sejam adequadas a cada utilização é recomendado que toda a cadeia de produção esteja em perfeita sintonia, desenvolvendo cada material para uma aplicação específica e não se cingindo às composições químicas e tratamentos térmicos referidos na norma [2, 4]. As classes de ferros fundidos brancos II e III da norma ASTM A 532 são as que apresentam uma percentagem de crômio mais elevada, e as que no final possuem uma dureza superior. No entanto, essa dureza, nos da classe II, é alcançada com a adição de mais elementos de liga que potenciem esse efeito, uma vez que uma grande parte do crômio adicionado é conjugada para formar carbonetos, também eles de elevada dureza. Nas ligas pertencentes à classe III, devido à elevada percentagem de crômio, este fica ainda dissolvido na matriz metálica, não sendo necessário a adição de elementos de liga para potenciar esse efeito [5].

Os ferros fundidos brancos podem ser produzidos menos frágeis para suportarem cargas por impacto, ou então com maior dureza para melhorar a resistência ao desgaste. Assim a microestrutura pode-se apresentar perlítica, austenítica, ou martensítica, ou uma combinação destas. Das matrizes antes referidas, as que apresentam uma predominância de martensite fornecem a maior resistência ao desgaste, ao passo que as austeníticas, apesar de exibirem uma menor dureza, podem ser usadas para este tipo de aplicações. Já as ligas que apresentem uma matriz predominantemente perlítica têm uma resistência à abrasão não muito elevada, não sendo desejável para as aplicações onde este tipo de solicitações mecânicas seja uma constante [2, 5].



2.1.1. Composição química típica

A composição química dos ferros fundidos e em especial a combinação das composições de cada elemento e as relações que estes têm ditam as propriedades finais da liga metálica que se está a produzir, em especial a quantidade e a forma como se apresenta o carbono grafítico. Assim, é de extrema importância conhecer o efeito de cada um dos elementos que compõem o material em estudo, para que se possa prever de uma forma precisa e concisa o seu comportamento em serviço. Nos ferros fundidos brancos com alta resistência ao desgaste e à abrasão, a presença de crômio estabelece uma condição fundamental para este desempenho, uma vez que faz com que sejam produzidos ferros fundidos com uma alta percentagem de carbonetos. A adição de crômio promove a formação de carbonetos em vez de grafite, sendo esta a fase eutética rica em carbono, durante a solidificação. Dependendo da percentagem adicionada vão-se formar diferentes carbonetos, que originam comportamentos e propriedades também diferentes [2].

Carbono – O carbono em ferros fundidos pode-se apresentar sob a forma de grafite ou de carbonetos. Neste tipo de ferros fundidos brancos de alto crômio é normal a fase rica em carbono estar sob a forma de carbonetos, podendo estes ser de diversos tipos, como é demonstrado mais à frente. A percentagem de carbono nos ferros fundidos brancos de alto crômio é de 2,2%, numa composição eutética. Tipicamente, estabelecendo uma relação entre o crômio e o carbono, pode-se sugerir uma adição de 3,5% de C para 15% de Cr e 2,7% de C para 27% de Cr. Nos ferros fundidos brancos a adição de carbono aumenta a dureza do material [2].

Silício – O silício está presente em todos os ferros fundidos, sendo este que determina a percentagem de carbono da fase eutética. Nos ferros fundidos altamente ligados, o silício tem um efeito negativo, diminuindo a dureza dos mesmos. Este efeito é possível devido à formação de perlite, nos ferros fundidos martensíticos. Contudo, e para suprimir este efeito podem ser adicionados elementos, como por exemplo molibdénio, níquel, manganês ou crômio, que irão suprimir a presença de perlite, podendo-se aumentar a percentagem de silício. Desta forma a temperatura M_s irá baixar. Com esta mudança é possível aumentar a percentagem de martensite e a dureza final da liga [2, 3].



Manganês – O manganês quando em excesso pode atuar como um supressor da formação de perlite, ao mesmo tempo que minimiza a presença de enxofre, pela formação de sulfureto de manganês. O manganês é um elemento potenciador da estabilização da austenite, não sendo recomendado uma percentagem acima de 1,3% em ferros fundidos brancos martensíticos, uma vez que deteriora as propriedades da liga metálica, já que retêm a austenite na microestrutura. É recomendada uma percentagem igual ou inferior a 0,7% [2].

Fósforo – O fósforo é um elemento que pode atuar como grafitizante em ferros não-ligados. Em ferros ligados o efeito do fósforo ainda não é claro. No entanto há algumas provas de que este elemento diminui a tenacidade dos ferros fundidos brancos martensíticos, não tendo sido provado qualquer efeito na resistência ao desgaste. É recomendado que o teor em fósforo neste tipo de ligas metálicas não ultrapasse os 0,3%, sendo por vezes sugerido um valor máximo de 0,1% [2].

Enxofre – O enxofre é um elemento que deve ser considerado em muito baixas percentagens, nunca superiores a 0,03%, quando o objetivo do ferro fundido é uma elevada resistência ao desgaste e abrasão. Devido à presença deste elemento são produzidos sulfuretos que degradam a estrutura e consequentemente pioram a aptidão do ferro fundido para aplicações onde é exigida uma dureza e resistências ao desgaste elevadas[2].

Crômio – O crômio é um dos elementos principais deste tipo de ferros fundidos. Genericamente, quando presente nos ferros fundidos, este elemento promove a formação de carbonetos, o aumento da resistência à corrosão e a estabilização da estrutura, tendo como meta a sua utilização a altas temperaturas. As estruturas formadas e as propriedades finais que se relacionam com a adição de crômio são diferentes tendo em conta a percentagem de adição. Quando a quantidade de crômio ultrapassa os 10%, são formados carbonetos eutéticos do tipo M_7C_3 , em detrimento dos carbonetos do tipo M_3C , que se encontram mais nos ferros fundidos com quantidade de crômio abaixo do valor especificado em cima. Devido a este valor elevado de crômio, é forçada uma alteração na estrutura final, obtendo-se os carbonetos de M_7C_3 , rodeados por uma matriz de austenite. É vantajoso, a obtenção deste tipo de carbonetos se o objetivo final for a produção de ferros fundidos que apresentem elevada resistência à abrasão e ao desgaste, uma vez que, comparativamente com os ferros fundidos enriquecidos com M_3C , possibilitam uma maior dureza e resistência[2].



Para obter um ferro fundido branco com boa resistência à abrasão e à corrosão, são normalmente usados ferros fundidos martensíticos ou austeníticos, com uma percentagem de crómio entre 12 e 28% [2].

2.1.2. Carbonetos

Neste tipo de ferros fundidos, a fase correspondente aos carbonetos pode chegar a 40% do volume total de todos os constituintes, tendo assim influência nas características finais da liga [2, 3]. Os carbonetos são formados à custa dos elementos de transição, como por exemplo o Fe, Mn, Cr, W, Pt, Nb, Ti, etc, uma vez que estes apresentam uma camada eletrónica de átomos incompleta, apresentando assim uma maior tendência para formar carbonetos, preenchendo essa última camada. A tendência para formar carbonetos é tanto maior, quanto mais incompleta estiver a camada eletrónica dos elementos de transição, sendo também os que formam os carbonetos mais estáveis [3].

Por este estudo se centrar nos ferros fundidos brancos de alto crómio, apenas se explorará os carbonetos do tipo M_7C_3 , já que são estes os que são formados em ferros fundidos com teores de crómio acima de 10%. A dureza deste tipo de carbonetos é elevada, no entanto pode existir alguma variação, em função do teor em crómio presente no carboneto e da secção em que é efetuada a medição. Enquanto os carbonetos possibilitam à liga onde estão inseridos uma elevada dureza, fazem com que a mesma adquira um comportamento frágil. A resistência ao desgaste é melhorada pelo aumento dos carbonetos, ou seja pelo aumento do teor em carbono. Já a tenacidade é melhorada com a diminuição do teor de carbono, pelo aumento da fração de matriz metálica [2, 6, 7].

2.1.3. Tratamentos Térmicos

Os ferros fundidos brancos com uma percentagem de crómio igual ou superior a 12% podem ser submetidos a tratamentos térmicos com recurso a altas temperaturas, podendo-se obter durezas superiores às dos *as-cast*. Estes podem ser recozidos, melhorando assim a sua aptidão para a maquinagem e, com outro tratamento, endurecidos para que a sua resistência ao desgaste e abrasão sejam melhoradas pelo aumento da dureza. Um ponto a favor é o facto de devido à alta percentagem de crómio não existir a probabilidade de grafitização, mesmo que os fundidos sejam submetidos a temperaturas iguais ou superiores à temperatura de re-austenitização [2].

A temperatura de re-austenitização é variável e para ferros fundidos com 27% Cr, é recomendada a temperatura de 1065 °C e um tempo de residência de 3 a 4 horas, no mínimo, que será certamente influenciado pela massividade das peças submetidas ao tratamento.



Durante este tempo decorre a precipitação dos carbonetos secundários na austenite. É recomendada uma duração do estágio que seja compatível com a precipitação dos carbonetos secundários na austenite. Desta forma, a quantidade de carbono dissolvido na austenite baixa, permitindo assim a formação da martensite durante o arrefecimento até à temperatura ambiente. É normalmente usada uma têmpera ao ar, podendo em pequenas peças ser usada também têmpera com óleo, ou com banhos de sais, sem a criação de fendas resultantes da têmpera nestes meios arrefecedores. Recomenda-se a realização de um revenido, para alívio de tensões, entre os 205 °C e os 260 °C [2].

2.1.4. Principais propriedades e aplicações

Os ferros fundidos brancos apresentam uma elevada dureza, sendo esta uma das suas características principais. Como consequência, exibem uma resistência ao desgaste e abrasão elevadas, assim como uma resistência à compressão e ao choque superior aos restantes ferros fundidos. Além da dureza, por ser um teste que se pode fazer diretamente no material, por vezes são difíceis de ser realizados outros testes, por necessitarem de provetes com dimensões e formas, por vezes complexas, não sendo fácil realizá-los com clareza. No que diz respeito à resistência ao choque, esta é medida sem entalhe, apresentando valores de 200 J para um ferro-molibdénio, ao passo que para um ferro de alto crômio situa-se nos 175 J [2]. A norma estabelece os valores de dureza compatíveis com cada um dos estados do material e composição química, apresentando-se de seguida os correspondentes aos ferros fundidos de alto crômio (Tabela I).

Tabela I – Valores de dureza apresentados pela Norma ASTM A 532, para as classes II e III no estado As-cast e tratado termicamente [4].

Classe	Tipo	Designação	As-cast (HRC)	Após tratamento térmico (HRC)
II	A	12 %Cr	53	56 -59
II	B	15 %Cr-Mo	46	56 -59
II	D	20 % Cr-Mo	46	56 -59
III	A	25 % Cr	46	56 -59

Em termos de aplicações, este tipo de ferros fundidos é empregue em equipamentos onde seja exigido um comportamento da liga compatível com uma alta resistência ao desgaste e abrasão. Assim, são utilizados em equipamentos para a movimentação de terras e minérios, laminagem quente, fabrico de produtos derivados de cerâmicos, equipamentos de granalhagem, rolamentos, partes de bombas, entre outras [2, 5].



2.2. Desgaste

2.2.1. Rugosidade

Antes de nos debruçarmos nos mecanismos de desgaste e em todos os pormenores relacionados com estes, é necessário um conhecimento mais profundo sobre as superfícies e o estado superficial dos componentes de equipamento ou de amostras. A tribologia é a ciência e a tecnologia que relaciona as superfícies em movimento relativo, incluindo o atrito, a lubrificação, o desgaste e a erosão das superfícies. O estudo do estado geométrico das superfícies é fundamental, uma vez que a forma como as superfícies se contactam e o resultado do mesmo é muitas vezes consequência do estado superficial inicial. Existem fundamentalmente dois tipos de critérios para avaliar o estado das superfícies: os físicos, obtidos geralmente por avaliação gráfica, e os critérios estatísticos, obtidos principalmente por avaliação eletrónica. No que concerne aos critérios físicos, destaca-se o parâmetro R_t , que diz respeito à profundidade total ou amplitude total da rugosidade. Nos critérios estatísticos, podem-se destacar essencialmente três, o R_p , o R_a e o R_q . Cada um destes três parâmetros apresenta especificidades diferentes, apresentadas na *Tabela II*. Pode ainda ser igualmente, nos critérios estatísticos, equacionado a Curva de Abbott ou curva de área de suporte, que têm tido bastante divulgação [8, 9].

Tabela II – Definição dos parâmetros de rugosidade [8].

Parâmetro de medição de rugosidade	Breve explicação
R_p	Profundidade de aplainamento ou linha média de rugosidade.
R_a	Amplitude média aritmética em relação à linha média da rugosidade ou de aplainamento
R_q	Amplitude média geométrica em relação à linha média da rugosidade ou de aplainamento

Os aparelhos de medida mais usados são os rugosímetros eletrónicos de apalpador. A sua base de funcionamento assenta nos deslocamentos verticais do apalpador ao percorrer uma superfície, sendo estas variações transformadas em impulsos de tensão elétrica, posteriormente amplificadas, transmitidas a um registador e a um calculador [8].



2.2.2. Mecanismos de Desgaste

A tribologia, antes referida, engloba entre outros o estudo do desgaste, sendo este definido como uma perda progressiva de matéria de um ou vários corpos que interatuam entre si, devido a um movimento relativo entre os mesmos. Também a definição pela norma ASTM G 40 – 99 está de acordo com o enunciado acima, sendo esta a que define alguns dos termos relacionados com o desgaste e a erosão. O desgaste e a forma como cada superfície é desgastada envolve diversos mecanismos, desde a fratura de partes do material, até a reações químicas, podendo vários mecanismos estarem a atuar em simultâneo, aumentando desta forma a taxa de desgaste. Um dos maiores problemas industriais é o facto de o desgaste não poder ser eliminado, procurando-se controlar e minimizar as suas consequências [8, 9].

Ao longo da vida dos equipamentos, o desgaste é normalmente dividido em três fases. A primeira fase é considerada de desgaste rápido, sendo esta uma fase de rodagem. É usualmente benéfica para os equipamentos, uma vez que possibilita uma maior área de contacto, dividindo assim as cargas que possam efetuar-se nessa superfície. A segunda fase é considerada de desgaste lento, sendo a fase mais longa, que condiz com grande parte da vida útil do equipamento. A terceira e última fase do desgaste assume uma importância vital, uma vez que a taxa de desgaste aumenta comparativamente à que a precede, podendo conduzir de uma forma catastrófica à falha do equipamento, não sendo este capaz de desempenhar as condições operatórias, como até esse momento [8].

Para de uma forma expedita caracterizar o desgaste existem diversas classificações que se podem usar. Essas classificações têm em conta o(s) mecanismo(s) básico(s) que atuam. Como exemplos dos mecanismos de desgaste temos a interpenetração de rugosidade e sua deformação plástica, o corte de material, a formação e rotura de juntas adesivas, ou o desgaste devido a um terceiro corpo, entre outros. Os cinco principais processos de desgaste são a abrasão, adesão, erosão, fadiga e corrosão [8].

2.2.2.1.Desgaste adesivo

O desgaste adesivo acontece sempre que haja um contacto entre duas superfícies, sendo desenvolvidas forças análogas às existentes nas moléculas e átomos (intermoleculares e interatómicas). Neste tipo de desgaste é habitual a transferência mútua de material de ambas as superfícies e/ou a perda de massa pelo desgaste de um corpo contra outro corpo. A força de



contacto, ou seja, a intensidade com que as superfícies se contactam, será tanto mais intensa quanto mais limpa e isenta de partículas contaminantes estiverem as superfícies, já que é exercida uma pressão de contacto mais elevada. Esta pressão é motivada devido à existência de protuberâncias na superfície que fazem com que a área de contacto real das duas superfícies seja muito menor do que a área de cada uma das superfícies, aumentando a pressão pela diminuição da área [8, 10].

Aquando do deslizamento de uma superfície relativamente à outra, as ligações estabelecidas por forças de adesão são rompidas (Figura 1). Esta rutura pode, ou não, influir desgaste ao material, consoante a rutura se dá apenas na interface, ou se pelo contrário e devido à elevada resistência da interface relativamente à das superfícies, se dá num plano próximo da interface. Esta última situação ocorre sempre que não existem contaminantes [8].

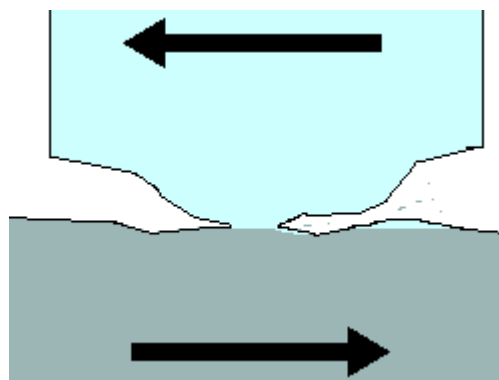


Figura 1 – Esquema ilustrando o fenómeno de desgaste adesivo. São criadas localmente ligações devido à carga usada, que são rompidas de seguida, devido ao movimento relativo entre as duas superfícies, havendo desgaste das superfícies envolvidas [7].

A equação de Archard foi sempre referenciada como estando ligada aos processos de desgaste, sendo mais adequada para definir o desgaste adesivo, podendo assim inferir-se sobre a constante de Archard, ou o coeficiente de desgaste. A equação de Archard permite assim, de uma forma expedita caracterizar a severidade do desgaste que um material sofreu, ou irá sofrer, uma vez que quanto menor o coeficiente de desgaste, menor será o desgaste que o sistema (conjunto de materiais a serem testados) irá sofrer:

$$W = k \frac{L \cdot P}{H} \quad (1)$$

Na equação (1), W refere-se à taxa de desgaste, em volume/tempo ou distância; k o coeficiente de desgast sendo este adimensional; L à distância de escorregamento em metros; P à carga aplicada em Newtons e H à dureza em N/m² [10].



2.2.3. Ensaios de desgaste pino no disco

Os ensaios de desgaste permitem inferir sobre a resistência dos materiais ao desgaste, de uma forma simulada e em formato laboratorial. Este testa não apenas um material, mas o conjunto dos materiais que se contactam aquando do processo de desgaste. Assim, e como forma de estudar mais pormenorizadamente os ensaios de desgaste, em especial os de pino no disco, apresentam-se as variáveis dos ensaios, que podem influenciar o resultado final. Os resultados dos ensaios de desgaste, com recurso ao equipamento de pino no disco podem ser analisados com base no volume perdido, em milímetros cúbicos, de ambas as partes envolvidas no processo de desgaste (o disco e o pino – esfera), ou então com recurso à perfilação, pelo estudo da topografia das superfícies de desgaste. O primeiro é o método mais rápido, mas no entanto é também o mais grosseiro. Devem ser tomados em conta, caso seja usado este método de avaliação, a presença, ou não, de elementos que possam falsear os resultados, como é o caso de poeiras, lubrificantes, ou mesmo produtos do desgaste. Pelo contrário, o segundo método é mais preciso, sendo um método mais adequado sempre que o resultado previsto do desgaste seja diminuto, podendo-se assim avaliar de uma forma mais correta o desgaste infligido após o ensaio de desgaste [11, 12] .

O desgaste dos materiais acontece sempre que haja movimento relativo entre duas superfícies, resultando em perda progressiva de massa das mesmas. Assim as superfícies dos equipamentos ficam danificadas, podendo, quando em fabricação de novos produtos, levar à produção de material não conforme, acarretando necessariamente despesas extra na produção. Neste sentido, têm sido desenvolvidos esforços com vista a caracterizar o comportamento dos materiais, maximizando o seu desempenho, em condições compatíveis com os níveis exigidos em serviço [13].

Existem diversos testes de microabrasão que tentam simular diferentes condições de desgaste, pelo uso de abrasivos com propriedades distintas, como é o caso do tamanho e forma: roda de borracha, roda de aço, pino no disco e de microabrasão por esfera rotativa (*ball cratering*) [13].

A norma ASTM G 99 – 05 define os parâmetros para os ensaios de desgaste pino no disco (Figura 2), assim como os meios para alcançar os melhores resultados. Este tipo de ensaios caracteriza não só um material, mas sim a conjugação dos dois, ou seja, a relação que um tem com o outro no que diz respeito ao desgaste. Um dos materiais, o pino é composto por uma esfera e um suporte para a mesma, sendo a esfera um dos materiais envolvidos diretamente no processo de desgaste, já que é esta que vai contactar com o disco. Este

conjunto é colocado num braço de suporte que é posicionado perpendicularmente ao disco. Este é normalmente de forma circular e aparafusado a um prato de suporte. Durante o ensaio, uma das partes fica imóvel enquanto a outra gira em torno do centro do disco, provocando a formação de uma pista circular no disco. Antes de iniciado o ensaio, deve ter-se em conta a rugosidade de ambas as superfícies, que deve ser igual ou inferior a $0,8\mu\text{m}$, e ter-se em conta a necessidade de assegurar o paralelismo das duas superfícies do disco, para que o ensaio possa decorrer nas condições ótimas. Durante o ensaio, devem ser controlados diversos parâmetros, para que se possa ter alguma reprodutibilidade e fiabilidade nos ensaios. Assim devem ser controladas a força (pelos pesos colocados), a velocidade de rotação, a distância (n° de voltas, sabendo o perímetro de uma volta), a temperatura, e a atmosfera (relaciona tanto a natureza do ensaio, se é com abrasivo ou não, como o ar circundante no laboratório, ou local de realização dos ensaios) [11].

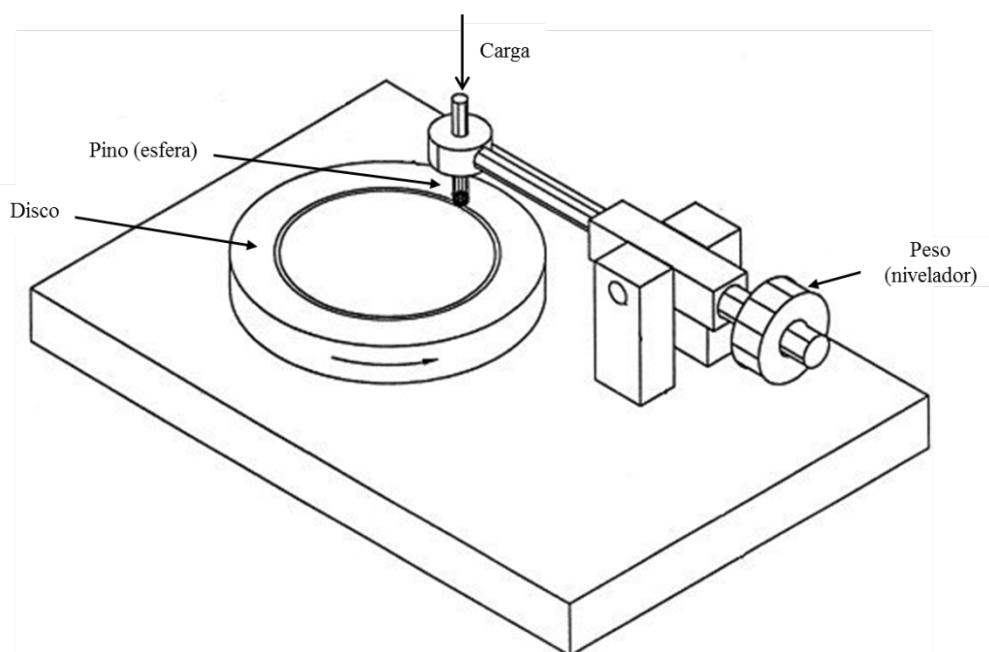


Figura 2 - Imagem ilustrativa do equipamento de desgaste pino no disco usado para realizar os ensaios de desgaste [14].

A Norma ASTM G 99 – 05 define ainda uma forma de avaliar o desgaste dos materiais. Assim, e considerando desprezável o desgaste do pino (esfera), centrar-nos-emos apenas no desgaste do disco. Na Norma é sugerida a avaliação pelo estudo da perda de massa do disco; é possível também avaliar o volume desgastado segundo a equação abaixo descrita, onde o volume é obtido em mm^3 , o R_{pista} , a L_{pista} e o R_{esfera} em mm:



$$V = \frac{\pi \cdot R_{pista} \cdot (L_{pista})^3}{6 \cdot Resfera} \quad (2)$$

De acordo com a norma acima referida, o desgaste num equipamento deste tipo ocorre normalmente numa condição de deslizamento não abrasivo. Assim, o principal processo de desgaste que atua nestes ensaios é o desgaste adesivo. Este caracteriza-se por ser um desgaste a dois corpos, onde se fundem e rompem as ligações criadas. No entanto, e devido a esta rutura, é possível a transformação do desgaste a dois corpos para desgaste a três corpos, pela residência de alguns produtos de desgaste na pista de desgaste. Se este fenómeno acontecer a taxa de desgaste final será influenciada [11].

2.2.4. Coeficiente de atrito

O atrito é a resistência que dois corpos sofrem, quando se encontram em movimento relativo um relativamente ao outro. Este é tanto maior quanto menos lubrificada estão as superfícies que se contactam. No entanto, por vezes é necessário que estas tenham um coeficiente de atrito elevado, como por exemplo nos travões de um automóvel, em que o objetivo é maximizar o atrito, para que o veículo pare no mais curto espaço de tempo. Por outro lado, em outras aplicações pode ser necessário minimizar o atrito, como por exemplo em sistemas de rodas dentadas, onde uma minimização do atrito pode significar economia de tempo e menos desgaste dos materiais envolvidos no mecanismo.

O coeficiente de atrito não é uma propriedade do material, dependendo de vários fatores, como por exemplo a geometria superficial, as condições de serviço, como seja a presença de lubrificante ou não, a força envolvida, a velocidade de escorregamento, entre outras. O coeficiente de atrito é geralmente designada por μ , que é estabelecido como sendo a relação entre a força de atrito, F , e a carga, N [15]:

$$\mu = \frac{F}{N} \quad (3)$$

Os valores tipo de coeficiente de atrito compreendem, por exemplo, cerca de 0,03 para uma superfície bem lubrificada, entre 0,5 e 0,7 para superfícies em escorregamento puro e valores superiores a 5 para superfícies metálicas limpas e em vácuo.



3. Materiais e Métodos

Como forma de testar a aplicabilidade dos ferros fundidos brancos às condições de serviço, foram testados pares de amostras que se aproximassem o mais possível às condições de serviço. É apresentada de seguida, de uma forma mais descritiva, uma contextualização dos procedimentos e materiais usados para a realização dos testes necessários.

Tendo como base os rolos para laminagem de pastas cerâmicas produzidos pela CM&W, foram produzidas alguns provetes com dimensões específicas que pudessem ser comportadas pelo equipamento onde se realizaram os ensaios de desgaste pino no disco, existente no Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

A liga utilizada para a produção destes rolos para laminagem de cerâmicos é um ferro fundido branco de alto crómio, que pode ser fornecido no estado *as-cast*, ou então tratado termicamente com recurso a uma têmpera seguindo-se um revenido para alívio de tensões. Como é indicada pela designação comercial do material, este apresenta uma percentagem de crómio elevada, sendo esta uma das suas características que lhe imprimem as propriedades desejadas para as aplicações em que é exigido o tipo de solicitações acima descritas (Tabela III).

Tabela III – Composição química da liga em estudo.

Liga	%C	%Si	%Mn	%P	%S	% Cr
	2,60 – 2,80	0,50 – 0,70	0,80 – 1,20	< 0,030	< 0,030	19,0 – 21,0

Na CM&W foram fundidas amostras com forma circular (discos), tendo estas 70 mm de diâmetro, e uma espessura aproximada de 10 mm, estando estas medidas coincidentes com a gama de valores indicados na Norma ASTM G99 – 05. Os discos tinham ainda de ter no centro um furo compatível com um parafuso do tipo M6, para que o mesmo pudesse ser fixado ao prato do equipamento de desgaste pino no disco (Figura 3).

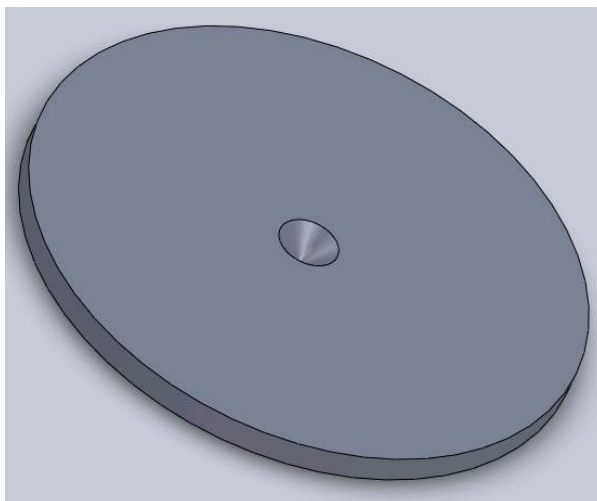


Figura 3 – Imagem exemplificativa dos discos cedidos pela CM&W para a realização dos ensaios de desgaste.

3.1. Rugosidade superficial dos discos

Imposto pela mesma norma citada acima, a rugosidade superficial, tanto do disco, como do pino, não devem exceder os $0,8\ \mu\text{m}$. Assim, os discos, que apresentavam uma superfície rugosa, característica do vazamento e solidificação, foram retificados num equipamento do CINFU, que desbastou as superfícies dos discos, ficando estes com uma rugosidade compatível com a realização dos ensaios. Com esta retificação garantiu-se também que as duas superfícies dos discos fossem paralelas, condição fundamental para a correta execução dos ensaios de desgaste pino no disco.

De seguida, como forma de avaliar a rugosidade da superfície, usou-se um rugosímetro (Mitutoyo – SJ201, Figura 4), em que o comprimento da medição foi de $0,8\ \text{mm} \times 3$ e o parâmetro de medição R_a . A medição foi feita em linha, ou seja, como de uma vez não se conseguiria atingir todo o raio do disco, foi inicialmente efetuada uma medição a partir do centro continuando-se a medição a partir do ponto onde tinha terminado a anterior, até à extremidade da amostra. O equipamento, no percurso de medição, faz uma média dos valores de rugosidade medidos, apresentando o valor médio dessa medição. Deste modo o valor obtido reflete não apenas uma medição, mas sim um conjunto de medições.



Figura 4 – Rugosímetro Mitutoyo SJ 201.

3.2. Ensaio de desgaste pino no disco

Antes ainda de iniciar o ensaio, foi necessário, devido ao facto de a Norma ASTM G99 - 05 impor que todas as medições de perda de massa sejam feitas em equipamentos onde se apresente quatro casas decimais, proceder ao corte dos discos, de modo a que a gama de massas a pesar estivesse no intervalo permitido pelas balanças disponíveis. Assim foram efetuados quatro cortes em cada disco, como demonstrado na Figura 5, de modo a que a amostra não ficasse descompensada, tendo os quatro cortes iguais dimensões.

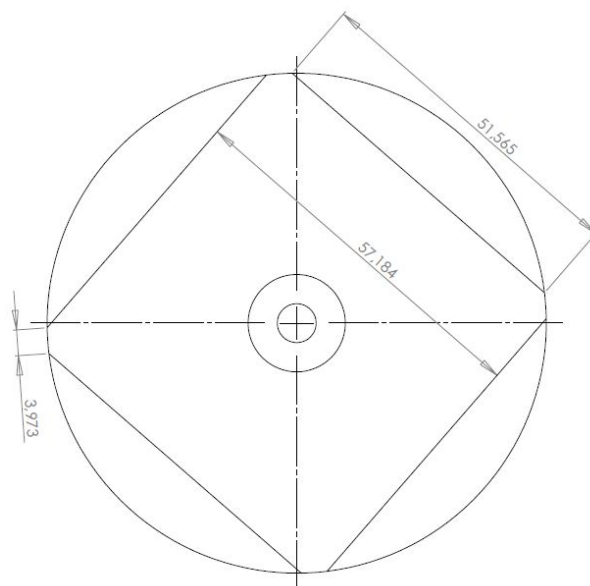


Figura 5 - Imagem cotada com a explicação dos cortes efetuados nos discos.

No que diz respeito ao pino, foi usada uma esfera de alumina (Al_2O_3) com 10 mm de diâmetro, apresentando uma superfície com uma rugosidade superficial compatível com o exigido na Norma.

O equipamento de ensaios de desgaste pino no disco presente no DEMM, pertence à classe dos equipamentos com vista a testarem as propriedades tribológicas dos materiais ensaiados (Figura 6)

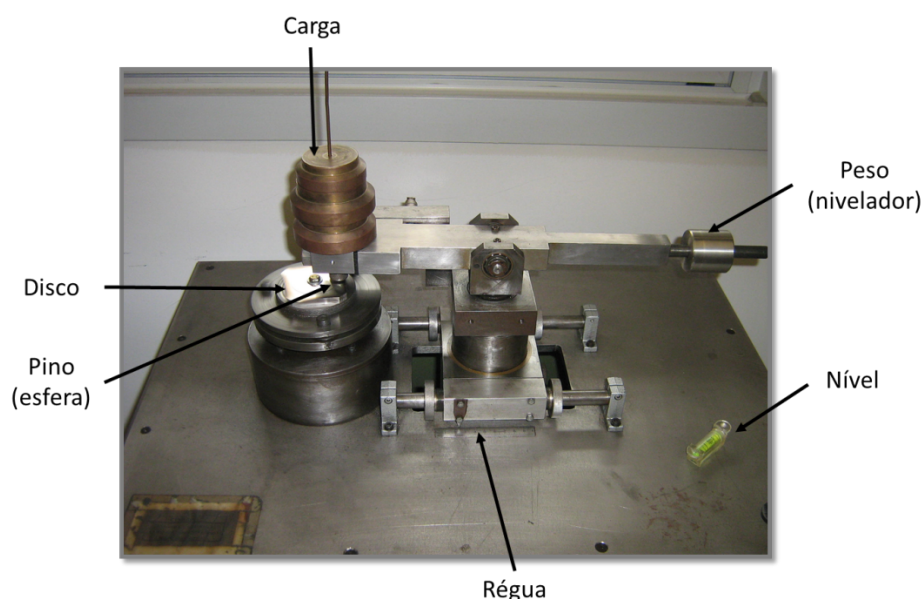


Figura 6 – Equipamento para ensaios de desgaste pino no disco presente no DEMM.

Na totalidade dos ensaios, foram usadas duas distâncias de deslizamento diferentes, tendo sido feitos dois ensaios em cada um dos discos. Assim, foram realizados seis ensaios agrupados em duas classes: a primeira em que o raio da pista era de 24mm e uma outra onde era de 21mm. Este estudo, com a mesma distância de deslizamento em todos os ensaios, mas variando o raio da pista e o número de voltas, visa testar se o facto de se efetuarem mais passagens numa mesma superfície influenciaria de forma substancial o desgaste final, ou se pelo contrário este não seria muito afetado pelo número de passagens, mas sim pela distância final. Assim usou-se a régua do equipamento para regular o diâmetro da pista. O nível presente na máquina era essencial para garantir a correta horizontalidade do braço de suporte do pino e do peso nivelador. Os materiais foram testados em três estados, com vista a fazer uma análise comparativa entre os três estados do mesmo material (Tabela IV).

Tabela IV – Parâmetros usados durante os ensaios de desgaste pino no disco.

Estado das amostras	S/ TT		Semi Tratada		C/ TT	
Amostras	W6 D – 1		W7 D - 1		W7 D – 2	
Perímetro de uma volta (mm)	131,9	150,8	131,9	150,8	131,9	150,8
Raio da pista (mm)	21	24	21	24	21	24
Nº de voltas	7580	6635	7580	6635	7580	6635
Distância percorrida (mm)	1000157	1000534	1000157	1000534	1000157	1000534
Carga (kg)	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
Velocidade média (rpm)	185	187	194	187	191	195
Velocidade média (m/s)	0,203	0,235	0,213	0,235	0,210	0,245

3.3. Análise Microestrutural

No que concerne à análise microestrutural foram realizadas análises em amostras provenientes da peça, e em outras retiradas dos discos de desgaste.

Para as amostras retiradas da peça, após serem fundidas peças na CM&W, foram retiradas, por corte, dois tarugos metálicos, para posteriormente serem cortadas amostras para a medição da dureza e análise de microestrutura. Estas peças foram retiradas de zonas que não interferiam com a sanidade da peça, tendo estas no entanto sofrido um tratamento concomitante com a restante peça.

As amostras para a caracterização da microestrutura dos discos, foram obtidas por corte direto dos discos. Foram usadas as zonas que foram cortadas antecipadamente dos discos, como explicado no capítulo 3.2, figura 5, não havendo desta forma, necessidade de retirar novas amostras dos discos.

Para ambos os casos descritos, a sucessão de lixas abrasivas de SiC usada foi de 120, 320, 400, 600, 1000 mesh, e os panos de pelo curto e pelo comprido, respetivamente, para suspensões com partículas de diamante de 6 e 1 μm . Como forma de revelar a microestrutura do material em estudo, foi efetuado um ataque com recurso a uma solução de Nital; foi variado o tempo de exposição da amostra à solução, com vista a atacar de forma conveniente cada amostra (Tabela V).

Foram observadas ao microscópio ótico as amostras anteriormente atacadas, com recurso a várias objetivas, de forma a que se pudessem observar as várias estruturas presentes na microestrutura das amostras.

Tabela V – Ataques químicos e tempos de ataque utilizados para revelação da microestrutura das amostras de ferro fundido retiradas diretamente da peça e dos discos de desgaste.

Estado das amostras	Proveniência	Amostras	Ataque	Tempo de ataque (min)
S/ TT	Disco de desgaste	W6 D - 1	Nital 7%	02:15
Semi tratada	Disco de desgaste	W7 D - 1	Nital 7%	02:30
C/ TT	Disco de desgaste	W7 D - 2	Nital 7%	02:00
W7 – C/ TT	Peça	1	Nital 7%	02:00

3.4. Durezas

No que diz respeito à avaliação da dureza dos materiais em estudo, foram realizados testes de dureza nas amostras provenientes da peça e nas amostras retiradas dos discos de desgaste.

Nas amostras retiradas da peça foram realizados cinco indentações em cada amostra, podendo-se assim inferir de uma forma mais precisa a dureza do material em estudo. No que concerne aos discos de desgaste, foram realizadas 10 indentações, compreendendo no total o diâmetro do disco. Desta forma consegue-se abarcar toda a superfície do disco, podendo-se inferir se a dureza deste varia ou é igual em todas as partes (Figura 7).

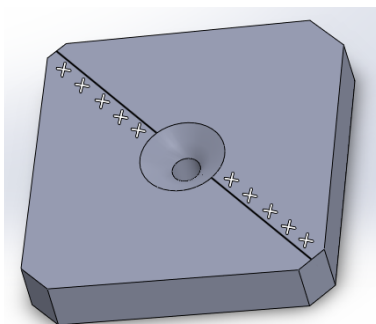


Figura 7 – Esquema exemplificativo das indentações realizadas na superfície do disco

Os testes de dureza foram realizados num durômetro da marca Wolpert HT 2001, com um penetrador de cone de diamante e a aplicação de 1471 N de força. O sistema de medida de dureza adotado foi o de Rockwell C, não podendo a dureza estar acima de 70 HRC nem a abaixo de 20 HRC, uma vez que estes valores são, respetivamente, o máximo e mínimo permitidos por este sistema de medida [16].

3.5. Análise das superfícies de desgaste, rugosidades e topografias

A análise das superfícies de desgaste foi realizada em três etapas. Uma primeira foi realizada por perda de massa, registrando-se a massa do disco de ferro fundido branco e da esfera de alumina antes e depois do ensaio. A segunda foi com recurso ao microscópio ótico, podendo-se obter a largura das pistas de desgaste. As pistas de desgaste compreendem as zonas no disco de desgaste de ferro fundido branco onde, por ação do deslizamento da esfera de alumina, se produz uma região desgastada e por consequência, com um aspeto diferente das regiões contíguas. Foi ainda efetuada, no DEM da FEUP, com recurso ao equipamento HOMMEL WERKE LV 50, com uma ponteira TKL 100 e uma velocidade de leitura de 0,15 mm/s, medições da rugosidade das superfícies desgastadas, com o objetivo de avaliar o perfil topográfico e rugosidades das pistas de desgaste. Os testes foram realizados paralelamente às marcas de retificação presentes na superfície dos discos, uma vez que são assim obtidos os resultados mais fidedignos.

Uma medição consiste na passagem do palpador, em linha reta, num comprimento suficientemente grande para englobar a pista de desgaste e a zona imediatamente a seguir e antes da mesma, obtendo-se a leitura da rugosidade dessa zona.

Na medição da rugosidade, é gerado um gráfico semelhante ao apresentado na Figura 8, sendo possível a partir do mesmo inferir diversas informações e pormenores relativos ao desgaste, como por exemplo a quantidade de zonas de maior desgaste, a profundidade máxima atingida e a área total desgastada no local onde foi retirado o perfil, com coloração vermelha. Como forma de obter o volume total desgastado, em todo o disco, multiplica-se a área pelo perímetro da pista.

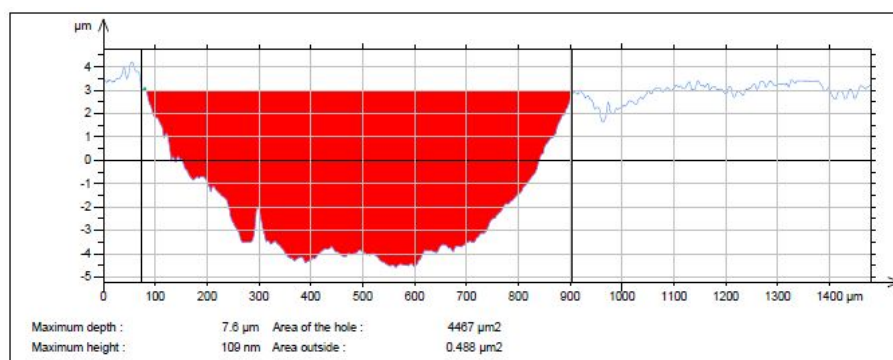


Figura 8 – Exemplo do gráfico gerado após a medição da topografia da superfície desgastada; a área a vermelho corresponde à zona da pista de desgaste, onde o eixo dos XX corresponde à largura da pista e o eixo dos YY à profundidade da mesma.





4. Resultados experimentais e análise

Após a realização dos ensaios, é necessária a correta estruturação e análise dos mesmos, para corroborar, ou não, a sua utilização em determinado fim específico. Deste modo, apresentam-se de seguida os resultados obtidos que, seguindo um fio condutor, levarão a um conhecimento mais profundo do comportamento do par de materiais envolvidos no processo de desgaste.

4.1. Rugosidade superficial dos discos

A rugosidade máxima dos discos, como explicado acima, apresenta-se como uma condição fundamental que deve ser satisfeita para que os ensaios possam ser considerados válidos. A Tabela VI apresenta os valores das rugosidades obtidas nas medições efetuadas nos discos.

Tabela VI – Rugosidade superficial de cada uma das amostras; para cada amostra, a linha a cinzento representa a medição a partir do centro do disco, enquanto que a linha a branco a medição a partir do ponto final da anterior.

Estado das Amostras	Amostras	Primeiras medições (μm)	Segundas medições (μm)
S/ TT	W6 D - 1	0,19	0,21
		0,11	0,16
Semi Tratada	W7 D - 1	0,57	0,67
		0,28	0,64
C/ TT	W7 D - 2	0,63	0,59
		0,37	0,40

Após a análise destes valores, pode-se constatar que o processo de retificação das amostras conduziu a resultados compatíveis com o exigido pela Norma ASTM G99 – 05, uma vez que todos os valores de rugosidade medidos são inferiores a $0,8 \mu\text{m}$.

4.2. Análise Microestrutural

Antes de se efetuar uma análise das microestruturas obtidas pela revelação a partir do ataque químico empregue, convém salientar que se está em presença de dois tipos de amostras: as retiradas diretamente da peça, sofrendo todas as reações que a restante peça; e outras que embora tenham sofrido as mesmas leis de aquecimento e arrefecimento e todos os tratamentos posteriores que a peça, podem ter propriedades e microestruturas diferentes. Não era possível realizar os ensaios de desgaste em discos retirados da peça, devido à elevada dureza e dificuldade em maquinar na forma conveniente para a realização dos ensaios, ou não

fossem as ligas de ferros fundidos próprias para serem vazadas no seu estado final, ou quase final. Assim, será feita uma comparação entre a microestrutura dos tipos de amostras com proveniências diferentes (da peça e dos discos de desgaste), bem como do cruzamento de dados das amostras no estado *As-cast* e das com tratamento térmico, antes designadas por W6 D - 1, W7 D - 1 e W7 D - 2, respetivamente.

No que concerne às amostras retiradas da peça, estas apresentam-se unicamente no estado tratado termicamente, uma vez que a empresa apenas comercializa este tipo de ferros fundidos neste estado. As estruturas presentes nesta microestrutura (Figura 9) condizem com uma estrutura com tratamento térmico de têmpera e revenido, apresentando os carbonetos eutéticos do tipo M_7C_3 , bem desenvolvidos, provavelmente devido ao arrefecimento ao ar calmo, o que terá possibilitado o seu crescimento [17]. Apresenta igualmente uma matriz martensítica, resultante da re-austenitização (pela elevada temperatura de tempera), o que conjugado com a presença de carbonetos, acima referidos, faz com que este material apresente uma elevada dureza e resistência ao desgaste e abrasão. A amarelo estão apresentados os carbonetos eutéticos do tipo M_7C_3 e a escuro a matriz de martensite. Os carbonetos tanto tomam a forma de lamelas, como a forma de grãos.

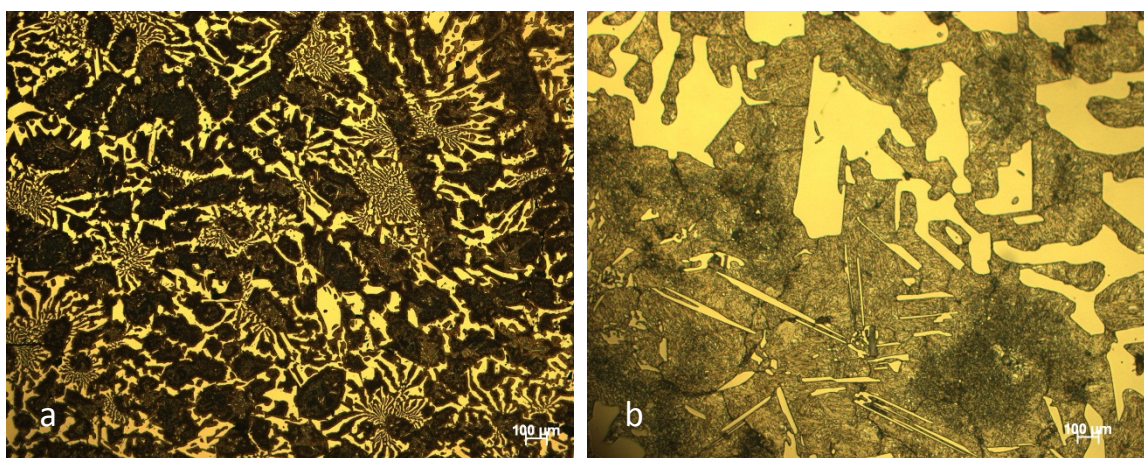


Figura 9 – Microestruturas da amostra retirada da peça, tratada termicamente com uma têmpera e um revenido (W7 P – C/TT), atacado com uma solução de Nital; a) imagem com baixa ampliação; b) imagem com alta ampliação.

As amostras que estão identificadas como pertencentes aos discos de desgaste estão em três estados diferentes, podendo-se assim comparar as diferentes microestruturas e a sua influência no resultado final do desgaste. De seguida apresenta-se a microestrutura da amostra retirada do disco que sofreu o tratamento térmico igual ao referente à figura anterior.

A microestrutura apresentada é condizente com o estado em que este ferro fundido é apresentado, uma vez que já sofreu tratamento térmico. É possível a observação de uma

matriz martensítica com a incidência de inúmeras colônias de carbonetos, o que faz com que este material esteja apto para cumprir todas as solicitações já anteriormente definidas. Por comparação das Figura 9 e Figura 10, é evidente uma diferença no grau de desenvolvimento de todas as estruturas presentes, que poderá derivar da velocidade de arrefecimento, após têmpera. Apesar de o patamar inicial ser o mesmo, a velocidade e consequentemente os tempos de arrefecimento são diferentes, dependendo estes da massividade da peça. Esta amostra, como sendo parte do disco de desgaste que tem uma espessura de 10mm, terá sofrido um arrefecimento mais rápido, não sendo assim possível o crescimento das várias estruturas presentes, tal como acontecido na microestrutura presente na amostra da Figura 9.

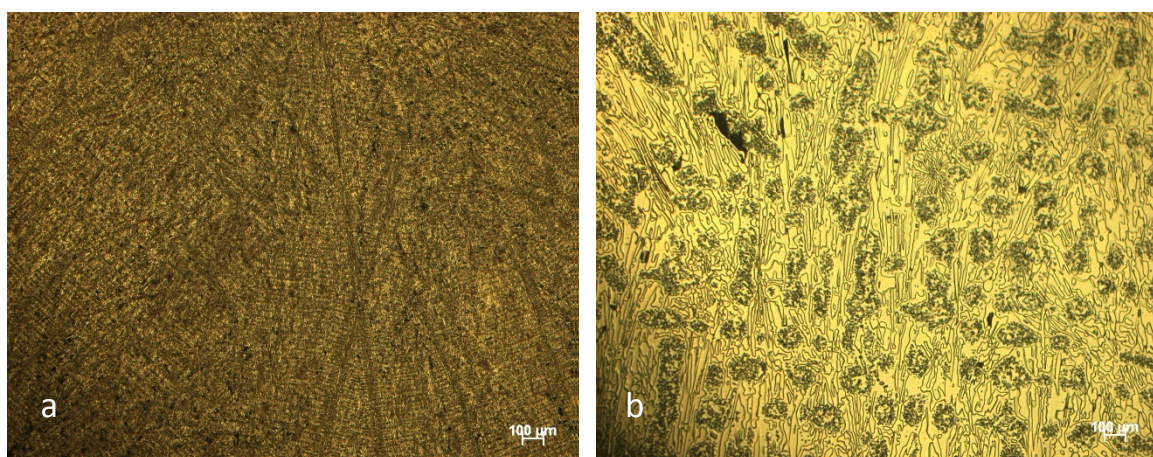


Figura 10 - Microestruturas da amostra retirada do disco de desgaste, tratada termicamente com uma têmpera e um revenido (W7 D - 2 - C/ TT), atacado com uma solução de Nital; a) imagem com baixa ampliação; b) imagem com alta ampliação.

Por analogia com a figura acima apresentada a que se encontra abaixo (Figura 11) exhibe estruturas semelhantes com as de cima. No entanto é de notar uma ligeira diminuição da martensite presente, já que não sofreu o tratamento térmico completo, não tendo assim a possibilidade do desenvolvimento da mesma. O facto de não termos tantas zonas com predominância de martensite leva a inferir sobre a possibilidade de existir austenite residual, dissolvida na matriz martensítica. Devido à existência de austenite, as propriedades finais da liga serão certamente afetadas, tanto em termos de dureza, como do seu comportamento relativamente ao desgaste e abrasão, que será alvo de análise posterior, no capítulo 4.3 e 4.4.

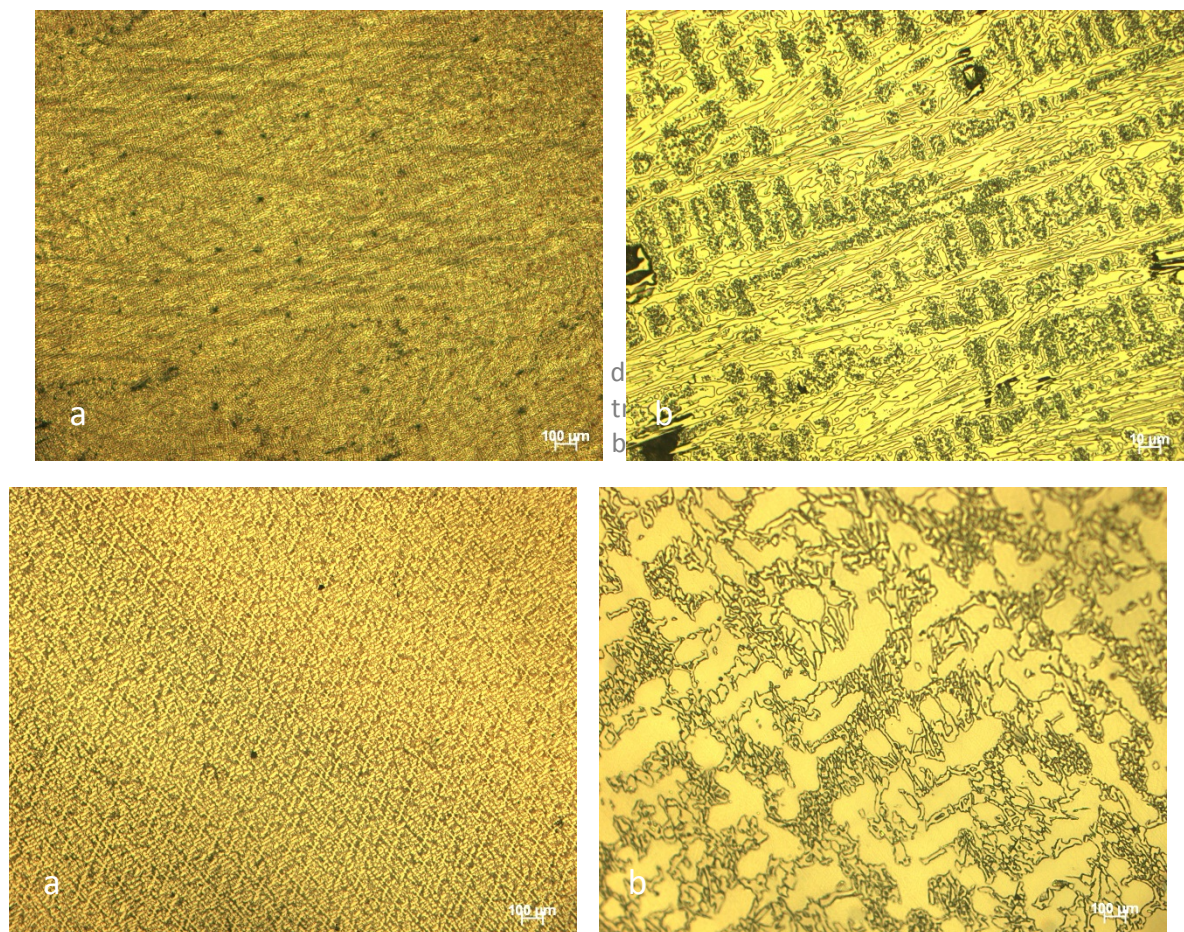


Figura 12 - Microestruturas da amostra retirada do disco de desgaste, no estado *As-cast* (W6 D - 1 – S/ TT), atacado com uma solução de Nital; a) imagem com baixa ampliação; b) imagem com alta ampliação.

Na Figura 12 apresenta-se a microestrutura de um ferro fundido branco de alto crômio, no estado *as-cast*. Quando comparada a microestrutura das Figura 11 e Figura 12, pode-se inferir que em ambas os carbonetos estão evidentes, sendo estes do tipo M_7C_3 . No entanto, e no que diz respeito à matriz, estas são diferentes. Na imagem pertencente à amostra W7 D – 1, a matriz tem predominância martensítica, devido ao tratamento térmico de têmpera e revenido sofrido. Terá também a presença de austenite residual, uma vez que o tratamento térmico não foi completo. Já na imagem relativa à amostra W6 D – 1, a matriz é do tipo austenítica, já que esta amostra está no estado *as-cast*.

A presença de carbonetos na amostra *as-cast* é devido à presença de elementos potenciadores da formação de carbonetos, como é o caso do crômio, que estando presente num teor superior a 10%, promove a formação de carbonetos do tipo M_7C_3 . Apesar de

estarmos em presença de uma matriz austenítica, pela presença de carbonetos na microestrutura, poderá obter-se um ferro fundido com uma aptidão ao desgaste e à abrasão dentro dos parâmetros recomendados para este tipo de ferros. Esta possível aptidão será analisada mais abaixo, no capítulo 4.4.

4.3.Durezas

Tendo por base a informação veiculada pela empresa no que diz respeito à dureza do material em estudo, tanto do *as-cast* como do tratado termicamente, a dureza esperada situava-se entre 40 e 50 HRC para o material no estado *as-cast* e entre 55 e 62 HRC para as amostras que sofreram tratamento térmico.

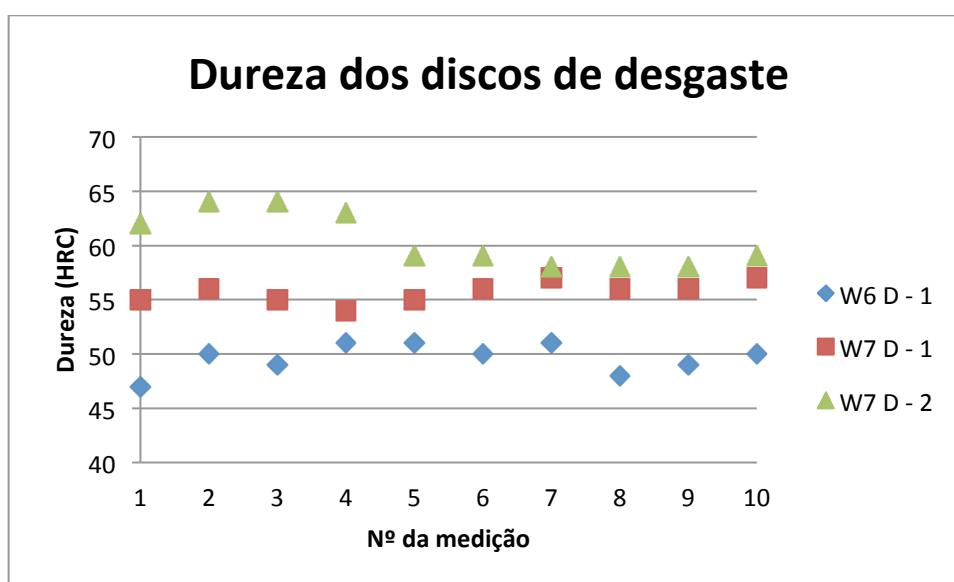


Figura 13 – Gráfico onde se ilustra a dureza dos discos utilizados nos ensaios de desgaste, expresso no sistema de medida de dureza de Rockwell C.

Após a análise da microestrutura e constatação de algumas diferenças nas microestruturas das várias amostras, era de esperar um comportamento em termos de dureza também diferente, situação que se veio a verificar. Por análise direta do gráfico ilustrado na Figura 13, verifica-se que a amostra em que se obteve uma maior dureza era simultaneamente a que apresentava uma fração de martensite maior, situação condizente com uma maior dureza. A amostra identificada como sendo a W7 D - 1 apresenta uma dureza compreendida entre a que se encontra no estado *as-cast* e a que está completamente tratada termicamente, adequando-se assim a sua dureza, já que também a sua microestrutura está compreendida neste intervalo. No que diz respeito à dureza da amostra W6 D - 1, esta está abaixo dos valores anteriores, situação que era de esperar uma vez que a amostra está no estado *as-cast*,



onde a matriz metálica é preenchida por austenite, caracterizada por ter uma dureza inferior à martensite (microestrutura típica dos ferros fundidos tratados termicamente).

Efetuada-se uma comparação entre os valores da Tabela VII e da Figura 13, para as amostras tratadas termicamente, verifica-se que são da mesma magnitude. Assim e apesar de a microestrutura se apresentar algo diferente, a dureza é semelhante, podendo-se assim utilizar as amostras que foram vazadas separadamente da peça para caracterizar o desgaste que os rolos de laminagem sofrem em serviço.

Tabela VII – Valores da dureza da amostra retirada da peça, no sistema de Rockwell C, com uma carga de 1471 N e a utilização de um cone de diamante.

Proveniência	Estado da amostra	1	2	3
Retirado da peça	W7 P – C/ TT	63	64	65

4.4. Análise das superfícies de desgaste, rugosidades e topografias

Como forma de avaliar o desgaste provocado pela esfera de alumina na superfície do disco, antes do ensaio foi avaliada a massa do disco e da esfera. Após o ensaio procedeu-se a novo registo. Com a medição da massa do pino pretendia-se saber se teria havido transferência de matéria do disco para o pino, o que objetivamente não se verifica, uma vez que os valores de variação da massa, positivos ou negativos são diminutos (Tabela VIII).

Este não era o elemento principal, uma vez que em serviço, como explicado acima, os rolos são para laminagem de cerâmicos, não sendo, desta forma, crucial caracterizar o desgaste do cerâmico mas sim do disco, por ser este o material dos rolos de laminagem. Nos valores de massa retirada da esfera é possível verificar que por vezes terá havido a transferência de material proveniente do desgaste do disco para a superfície da esfera, já que a diferença entre a massa inicial e a final era negativa. No que diz respeito à perda de massa dos discos de desgaste, esta foi diminuta, sendo da mesma magnitude do erro da balança usada para a medição. Este valor diminuto não indica no entanto que não houve desgaste, indicando sim que o material do disco tem uma resistência ao desgaste elevada, como já era de esperar sabendo a sua composição e a classe a que pertence.

Tabela VIII – Resultados por perda de massa após os ensaios de desgaste pino no disco.

Estado das Amostras	S/ TT	Semi tratada	C/ TT	S/ TT	Semi tratada	C/ TT
Amostras	W6 D -	W7 D -	W7 D -	W6 D -	W7 D -	W7 D -

		1	1	2	1	1	2
Raio da pista e nº de voltas		21 mm e 7580 voltas			24 mm e 6635 voltas		
Massa esfera (g)	Antes do ensaio	2,0448	2,0446	2,0446	2,0443	2,0443	2,0448
	Após o ensaio	2,0446	2,0447	2,0449	2,0448	2,0444	2,0446
	Retirada	0,0002	-0,0001	-0,0003	-0,0005	-0,0001	0,0002
Massa disco (g)	Antes do ensaio	202,9848	182,8950	176,8226	202,9893	182,9005	158,6498
	Após o ensaio	202,9826	182,8933	176,8213	202,9877	182,8977	158,6462
	Retirada	0,0022	0,0017	0,0013	0,0016	0,0028	0,0036

Antes de recorrer à técnica da perfilação e avaliação das topografias dos discos, foi mapeada, com recurso ao microscópio ótico, a largura da calote de desgaste, uma vez que com recurso a esta técnica é possível, inferir o desgaste efetuado em cada uma das amostras. Quanto mais larga seja a pista de desgaste, mais profunda será a calote esférica provocada pela esfera de alumina.

As pistas de desgaste foram avaliadas por observação e medição através do microscópio ótico (MO) e pela avaliação das topografias, onde foi considerada a pista de desgaste a zona onde a rugosidade da superfície indiciava a criação de um sulco na superfície da amostra que tinha sido retificada antes de iniciados os ensaios. Efetuando uma comparação genérica dos gráficos presentes nas Figura 14 e na Figura 15, observa-se que a largura das pistas dos ensaios com 21 mm de raio da pista e 7580 voltas é maior do que nos ensaios com 24 mm de raio da pista e 6635 voltas o que indicará um desgaste mais elevado no primeiro caso. Uma vez que foi utilizada a mesma distância de deslizamento e tendo em conta que estamos na presença de um raio da pista diferente e consequentemente de um número de voltas diferente, que o número de passes numa mesma superfície influenciará no valor do desgaste final, sendo maior de cada vez que se diminua o raio da pista e se aumente o número de voltas.

Pela avaliação da largura das pistas com recurso ao microscópio ótico é possível a obtenção de resultados de uma forma mais rápida (Anexo A). No entanto, este método afigura-se pouco preciso, já que com os resultados obtidos na Figura 14, o disco que teria sofrido mais desgaste, teria sido o que apresenta uma maior dureza (W7 D - 2), uma vez que a largura da pista é maior. Também na Figura 15 os resultados não condizem com o esperado,



já que a amostra W7 D - 1 deveria apresentar uma largura da pista de desgaste entre o que o antecede e que o precede no gráfico da Figura 15, o que não se verifica.

No método em que é utilizada a avaliação da topografia para a obtenção da largura das pistas os resultados entre as amostras que sofreram o mesmo número de voltas e um raio da pista igual é bastante consistente, o que poderá indiciar que apesar de as amostras terem uma dureza e microestrutura diferentes, tiveram um comportamento semelhante durante o ensaio de desgaste. Esta situação será explorada mais à frente aquando da análise das topografias de desgaste.

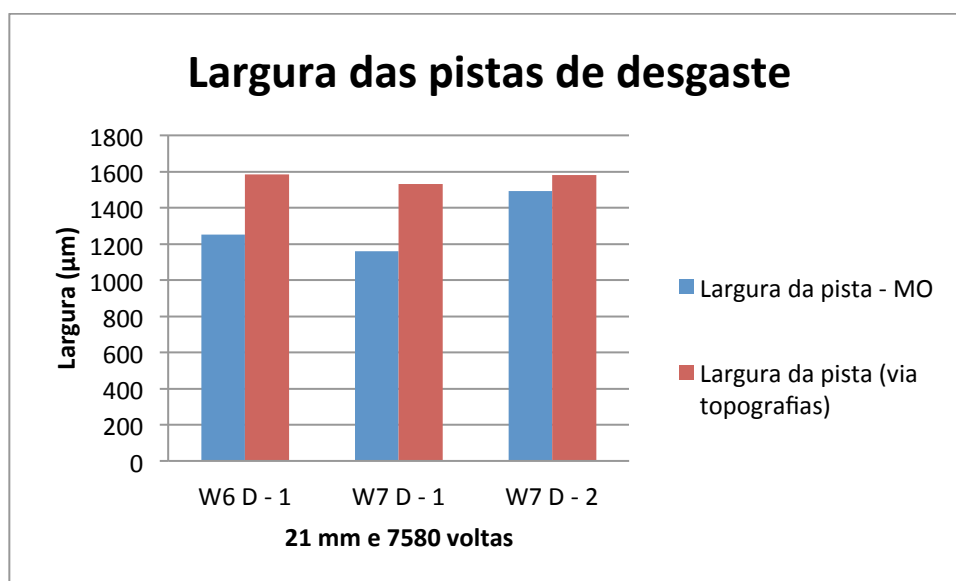


Figura 14 – Largura das pistas de desgaste em micrómetros, para um raio da pista de 21 mm e 7580 voltas, com recurso ao microscópio ótico e pela avaliação da topografia.

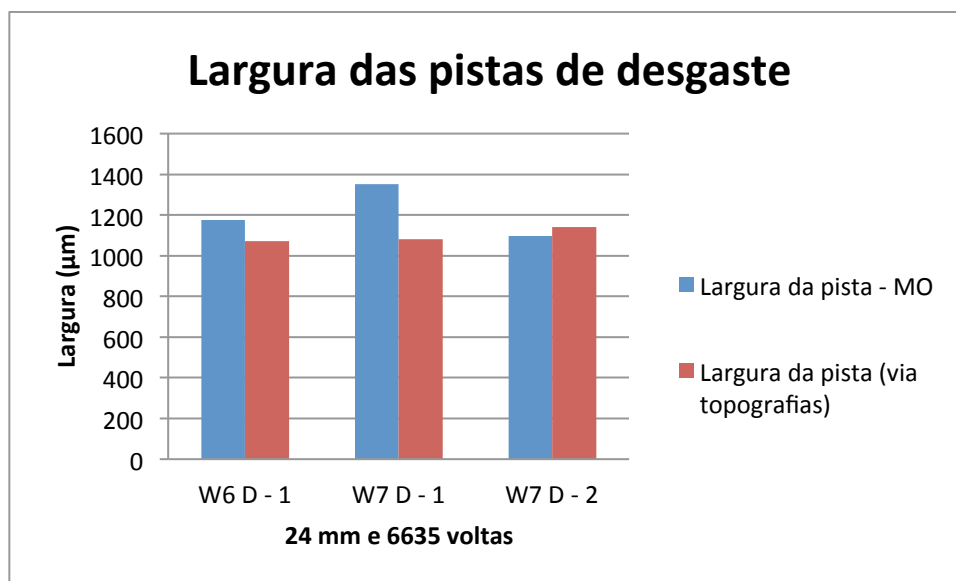


Figura 15 - Largura das pistas de desgaste em micrómetros, para um raio da pista de 24 mm e 6635 voltas, com recurso ao microscópio ótico e pela avaliação da topografia.

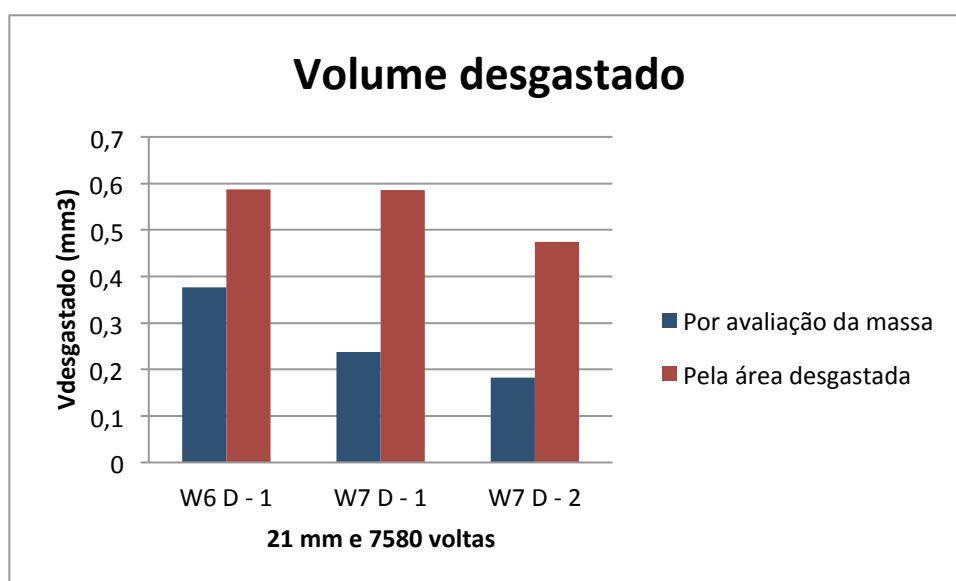


Figura 16 – Volume desgastado em milímetros cúbicos, para um raio da pista de 21 mm e 7580 voltas, pela avaliação da massa e pela área desgastada.

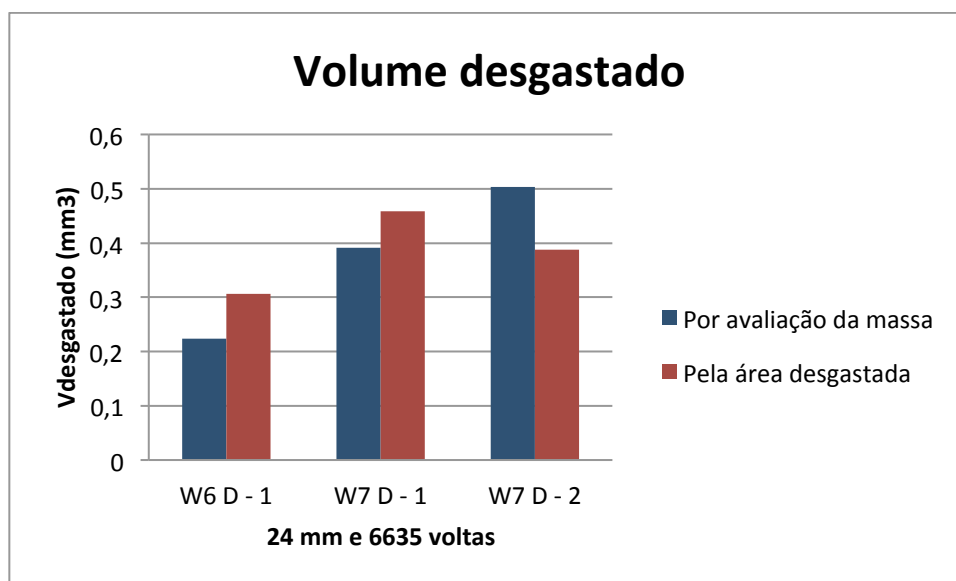


Figura 17 - Volume desgastado em milímetros cúbicos, para um raio da pista de 24 mm e 6635 volts, pela avaliação da massa e pela área desgastada.

Como anteriormente referido, os resultados por perda de massa não eram conclusivos, uma vez que os resultados obtidos eram da mesma ordem de grandeza que o do erro da balança. No entanto optou-se por colocá-los neste capítulo para funcionarem como elemento comparativo com os resultados obtidos pela análise da topografia da superfície do disco. É possível verificar, tal como aquando da análise da largura das pistas, que os ensaios com o raio de 21 mm e 7580 volts conduziram a um desgaste maior do que os ensaios com 24 mm e 6635 volts. Como já foi referido acima, é vantajoso ter raios das pistas de desgaste maiores, para minimizar o desgaste do material, já que o número de voltas que são necessárias para completar a mesma distância de deslizamento é menor.

Analisando o volume desgastado com base na área (Anexo B) obtida pela avaliação da topografia, na Figura 16 é possível verificar que o desgaste das duas primeiras amostras (W6 D - 1 e W7 D - 1) apresenta um valor semelhante, apesar de o da segunda ser ligeiramente inferior. Já o desgaste da amostra W7 D - 2 é mais baixo, o que seria o resultado esperado, tendo como base esta premissa na microestrutura e na dureza anteriormente avaliadas. Os resultados apresentados na Figura 17, obtidos com os ensaios com 24 mm de raio da pista e 6635 volts, conduzem a que tenha existido a ocorrência de alguma dissimilitude durante a realização dos ensaios, o que terá motivado a discrepância dos resultados obtidos em relação ao esperado.



Na Figura 16 é possível verificar que os valores obtidos pela avaliação da massa, embora não se possa tomar como muito certos devido ao explicitado acima, refletem um comportamento análogo ao obtido pela área desgastado.

Uma vez que o ensaio com 24 mm e 6635 voltas (Anexo C), quando analisado o desgaste não é conclusivo, de seguida será analisada a topografia da superfície, mas apenas dos ensaios com 21 mm e 7580 voltas.

Comparando as três figuras referidas (Figura 18, Figura 19 e Figura 20) onde se apresentam os resultados da avaliação da topografia, pode-se constatar que no disco com menor dureza (*as-cast*) a calote de desgaste criada é mais profunda e com uma forma bem definida. O disco de maior dureza (W7 D - 2, Figura 20), apresenta uma zona de desgaste menor e com uma calote bem menos definida. Esta situação poderá ter origem na diferença de durezas apresentada, originando assim um comportamento distinto quando confrontadas com as mesmas condições de ensaio. A Figura 19 apresenta os resultados obtidos na amostra W7 D - 1, onde é evidente uma profundidade de desgaste maior, do que na Figura 20, situação previsível, tendo por base a microestrutura e dureza do material em estudo. Quanto maior a dureza, menor o desgaste sofrido pelo material.

Analisando os resultados da amostra W7 D - 2, pode-se justificar a zona com coloração azul escura, sinónimo de maior profundidade de desgaste, pelas características do desgaste adesivo. Neste é característico a criação e rotura de ligações, sendo por vezes arrastadas pequenas partes dos elementos envolvidos no processo de desgaste e assim é provável que tenha acontecido este fenómeno, passando o desgaste de dois corpos para três corpos. Com este fenómeno a severidade do desgaste é aumentada, mesmo que em zonas localizadas.

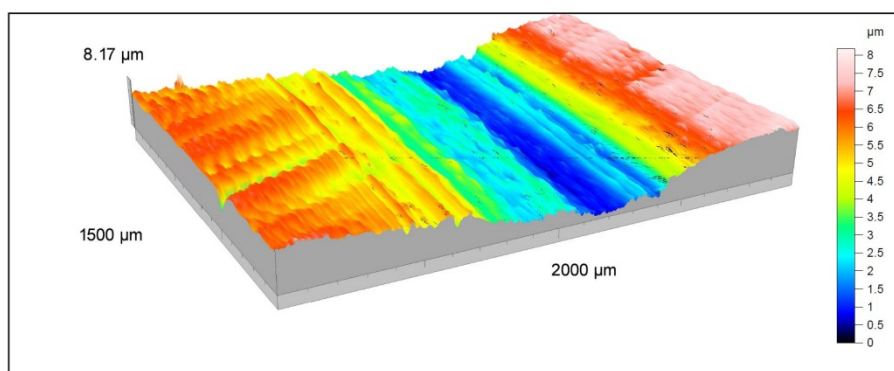


Figura 18 – Perfil topográfico da amostra W6 D - 1 após o ensaio com um raio da pista de 21 mm e 7580 voltas.

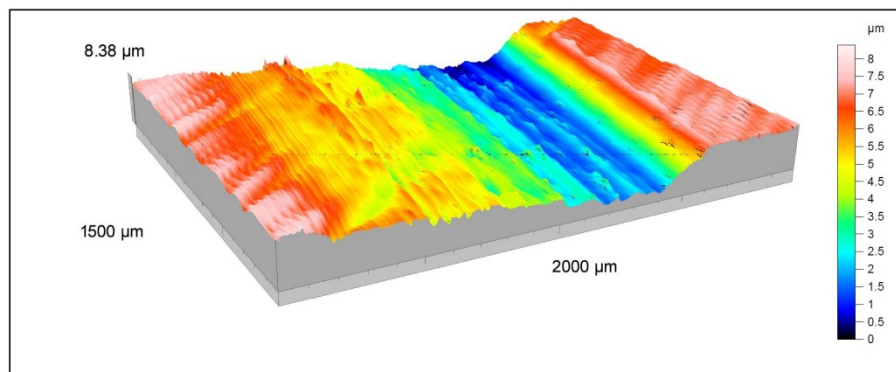


Figura 19 - Perfil topográfico da amostra W7 D - 1 após o ensaio com um raio da pista de 21 mm e 7580 voltas.

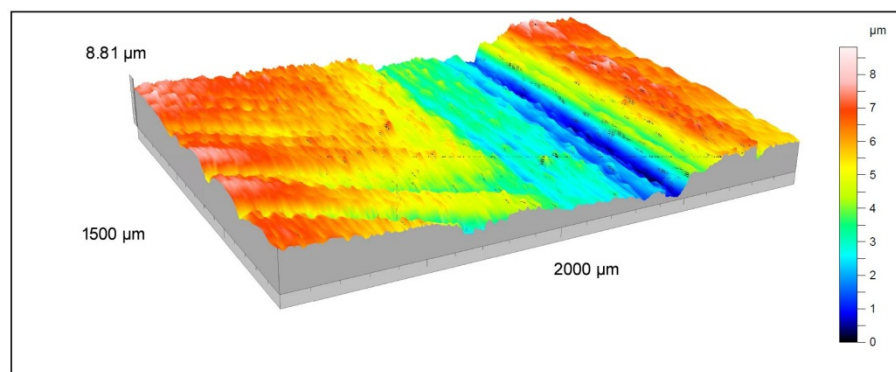


Figura 20 - Perfil topográfico da amostra W7 D - 2 após o ensaio com um raio da pista de 21 mm e 7580 voltas.



5. Conclusões

Após a exposição e análise dos resultados de acordo com os objetivos delineados para esta dissertação pode-se concluir que, de uma forma genérica, um material com uma dureza maior obtém um desgaste menor. Deste modo e realçando o sucedido no caso de estudo da dissertação, pode-se concluir que os materiais no estado *as-cast* sofrem um maior desgaste do que os tratados termicamente e o material que apresentou um melhor comportamento ao desgaste foi o W7 D – 2 que apresenta simultaneamente a dureza mais elevada.

Os ensaios de desgaste sugerem que quanto menor o raio da pista, para a mesma distância de deslizamento, maior será o desgaste pelo maior número de voltas necessárias. Logo é de referir a importância do raio dos rolos de laminagem para caracterizar o desgaste.

Para os resultados da avaliação da topografia, é possível concluir que a calote de desgaste criada na amostra é tanto mais perfeita e mais profunda, quanto menos duro é o material. É possível ainda dizer que nas amostras com maior dureza, terá ocorrido desgaste a três corpos, ao passo que nas com menor dureza terá sido a dois corpos.

No que diz respeito aos resultados obtidos pelo estudo da perda de massa, pode-se concluir para este tipo de materiais com alta resistência ao desgaste e abrasão se revelaram pouco precisos, uma vez que o desgaste dos materiais é diminuto





6. Trabalhos Futuros

Após a realização de todo o trabalho experimental salientam-se algumas sugestões para que em trabalhos futuros questões que tenham ficado pouco esclarecidas possam de uma forma expedita ser explicitadas.

Quando realizados testes de desgaste pino no disco devem ser empregues cargas maiores do que as utilizadas, para que se possam obter resultados mais expressivos e que de uma forma mais precisa se retirem todas as ilações desses resultados.

Para que a caracterização do desgaste dos rolos de laminagem seja mais fidedigna é aconselhável o uso de discos para os testes de desgaste, retirados diretamente da peça. Desta forma limita-se a possibilidade de o material, embora tenha a composição química igual e sofra o mesmo tipo de operações, tanto durante o processo de fundição, como posteriormente, ter um comportamento diferente, por ter sido vazado separadamente da restante peça.





7. Referências Bibliográficas

1. Smith, W.F., *Principles of materials science and engineering* 1990: McGraw-Hill, Inc.
2. Davis, J., *Cast Irons, ASM Specialty Handbook*. ASM International, Materials Park, OH, USA 1996.
3. Zhou, J., *Colour metallography of cast iron*. China Foundry, 2009. **6**(1): p. 57-69.
4. International, A., *Standard Specification for Abrasion-Resistant Cast Irons*, 1993.
5. Laird, G., R. Gundlach, and K. Röhrig, *Abrasion-resistant cast iron handbook* 2005: AFS, American Foundry Society.
6. Santos, J.F.M.d., *Caracterização e estudo do amaciamento e endurecimento de ferros fundidos brancos de alto crômio*, in *Faculdade de Engenharia, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais* 2009, Universidade do Porto.
7. Barbosa, A.S.O.Q.F., *Efeito do crômio na microestrutura e no comportamento ao desgaste abrasivo de ferros fundidos*, in *Faculdade de Engenharia, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais* 2008, Universidade do Porto.
8. Ferreira, L.A., *Tribologia - Notas de Curso: Lubrificação e Lubrificantes* 2000: Publindústria, Edições Técnicas. 19-23, 27, 28, ...
9. International, A., *Standard terminology relating to wear and erosion*, 1999.
10. Budinski, K.G., *Surface engineering for wear resistance* 1988: Prentice Hall. 16.
11. International, A., *Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus*, 2008, ASTM International, West Conshohocken, PA, California, EE. UU.
12. Claro, A.R.N., *Estudo da resistência ao desgaste do aço 16MnCr5 cementado sujeito a tratamentos criogénicos*, in *Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Faculdade de Engenharia* 2011, Universidade do Porto.
13. Ribeiro, L., et al., *Abrasion wear behaviour of alloyed and chilled cast irons*. *Wear*, 2011.
14. Blau, P.J. and K.G. Budinski, *Development and use of ASTM standards for wear testing I*, in *Wear* 1999. p. 1159-1170.
15. Atabaki, M.M., S. Jafari, and H. Abdollah-pour, *Abrasive Wear Behavior of High Chromium Cast Iron and Hadfield Steel—A Comparison*. *Journal of Iron and Steel Research, International*, 2012. **19**(4): p. 43-50.
16. Qualidade, I.P.d., *Materiais Metálicos, Ensaios de Dureza Rockwell, Parte I: Metodo de Ensaio (escalas A, B, C, D, E, F, G, H, K, N, T)*, 2011.
17. Radzikowska, J.M., *Metallography and microstructures of cast iron*. Materials Park, OH: ASM International, 2004., 2004: p. 565-587.





Anexos

Anexo A – Medição da largura das pistas de desgaste ao microscópio ótico

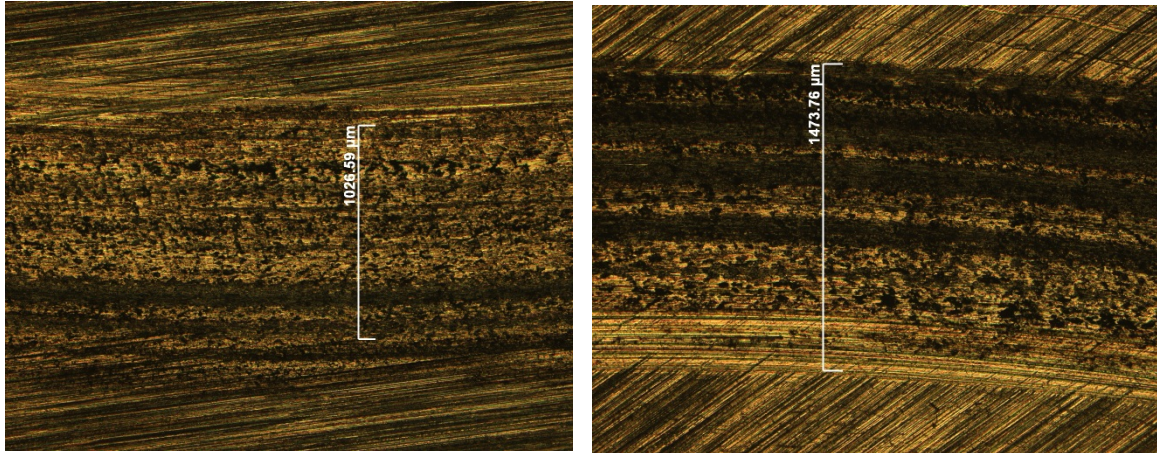


Figura 1 – Largura das pistas (21 mm de raio) de desgaste efetuada em dois locais distintos, da amostra W6 D - 1.

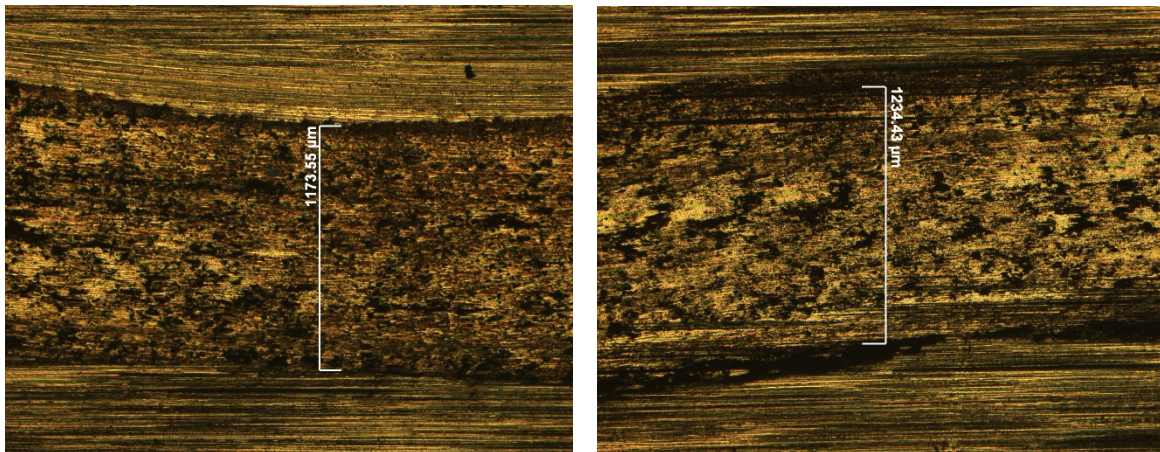


Figura 2 - Largura das pistas (21 mm de raio) de desgaste efetuada em dois locais distintos, da amostra W7 D - 1.

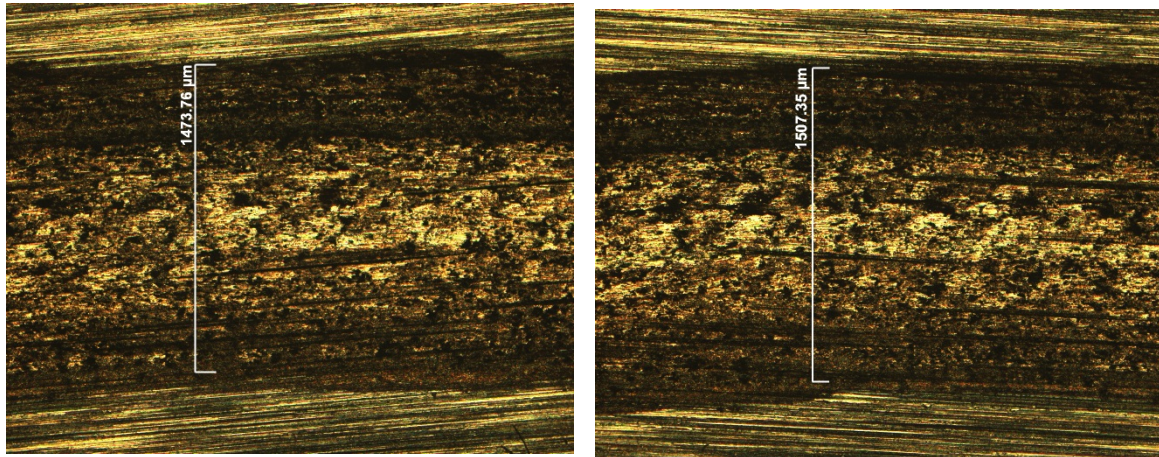


Figura 3 - Largura das pistas (21 mm de raio) de desgaste efetuada em dois locais distintos, da amostra W7 D - 2.

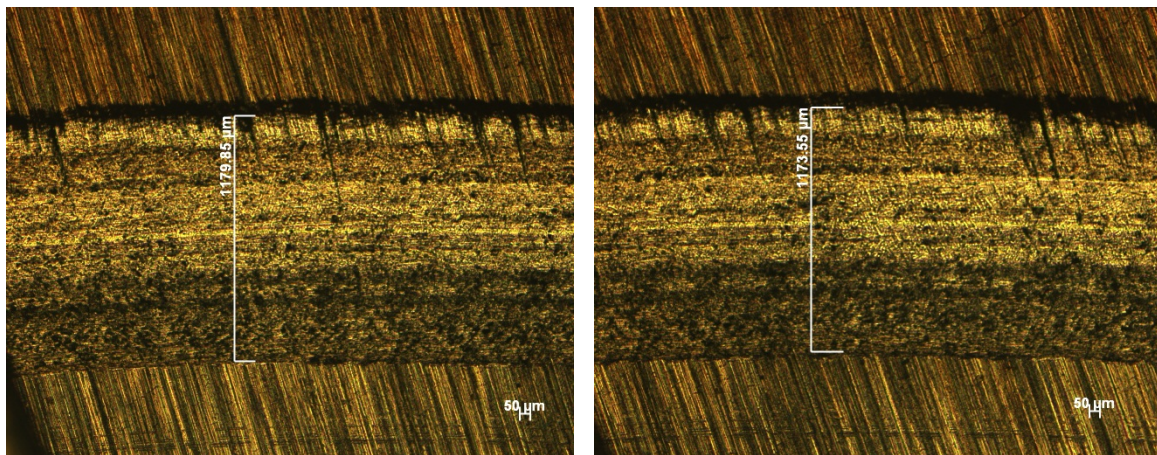


Figura 4- Largura das pistas (24 mm de raio) de desgaste efetuada em dois locais distintos, da amostra W6 D - 1.

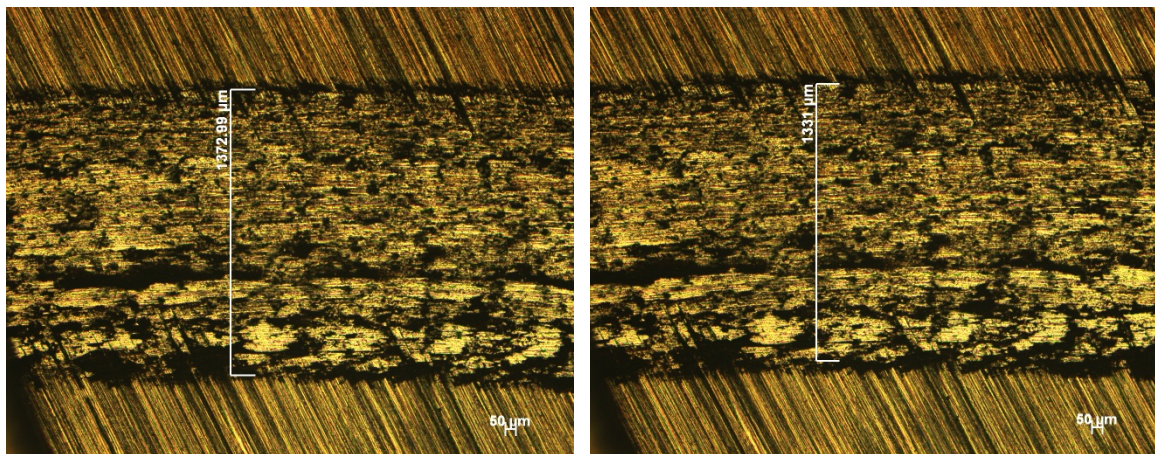


Figura 5 - Largura das pistas (24 mm de raio) de desgaste efetuada em dois locais distintos, da amostra W7 D - 1.

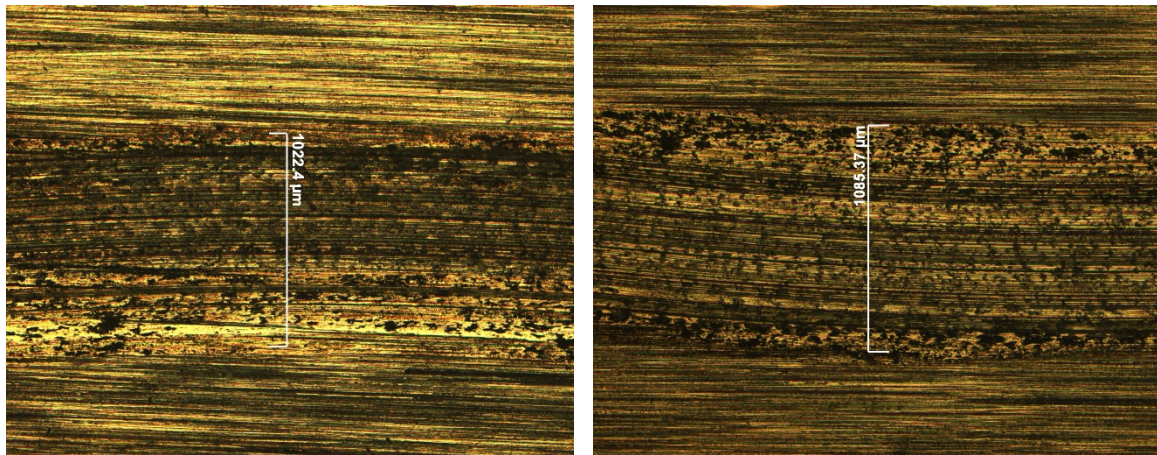


Figura 6 - Largura das pistas (24 mm de raio) de desgaste efetuada em dois locais distintos, da amostra W7 D - 2.

Anexo B – Áreas desgastadas (com recurso ao perfil topográfico)

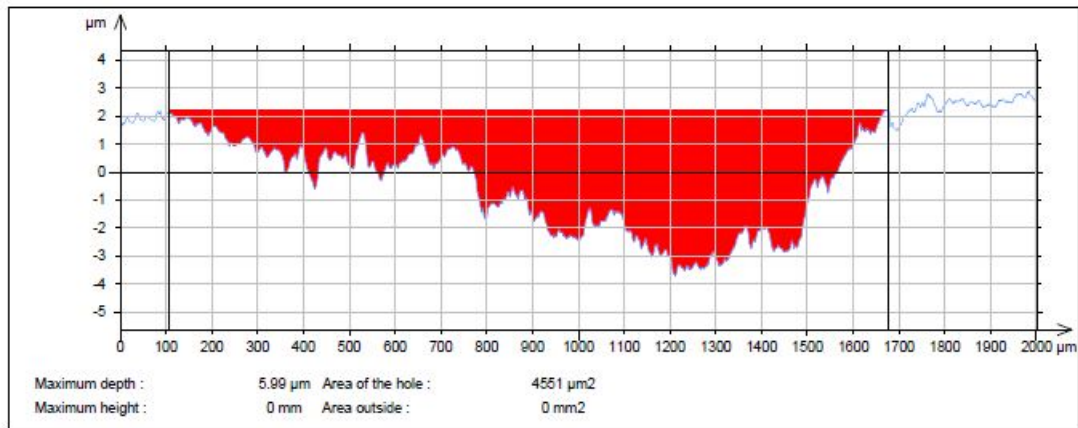


Figura 7 – Área desgastada (coloração a vermelho) da amostra W6 D - 1, com um raio da pista de 21mm.

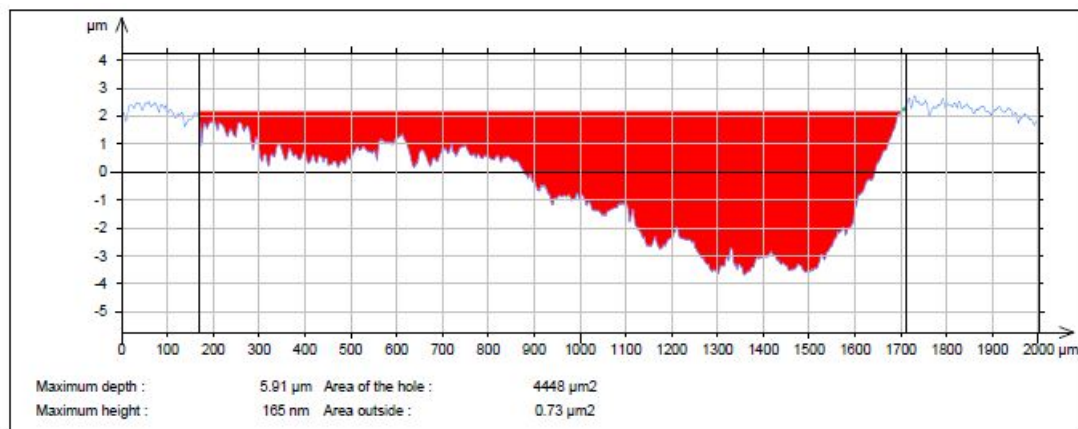


Figura 8 - Área desgastada (coloração a vermelho) da amostra W7 D - 1, com um raio da pista de 21mm

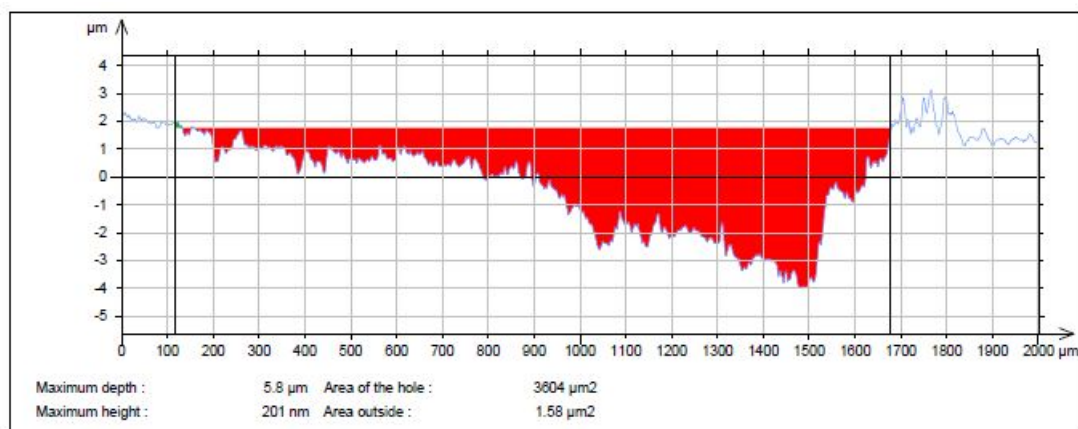


Figura 9 - Área desgastada (coloração a vermelho) da amostra W7 D - 2, com um raio da pista de 21mm.

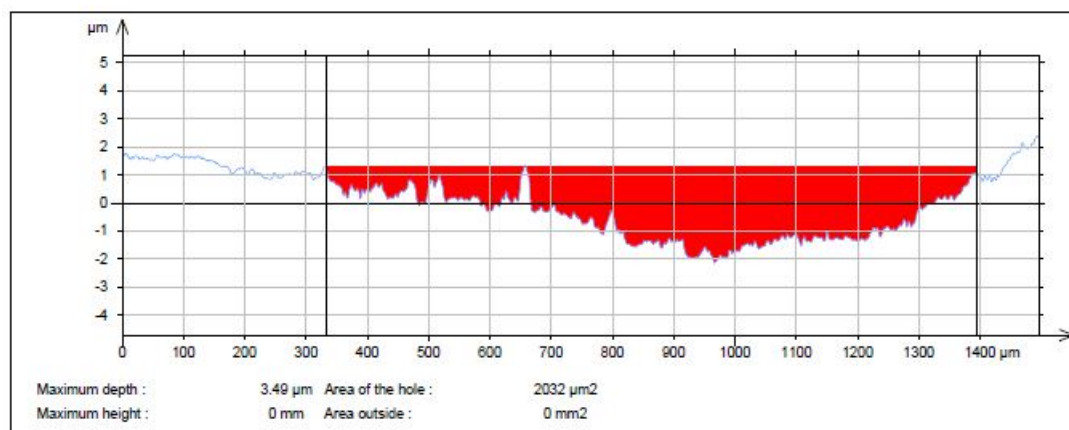


Figura 10 - Área desgastada (coloração a vermelho) da amostra W6 D - 1, com um raio da pista de 24mm.

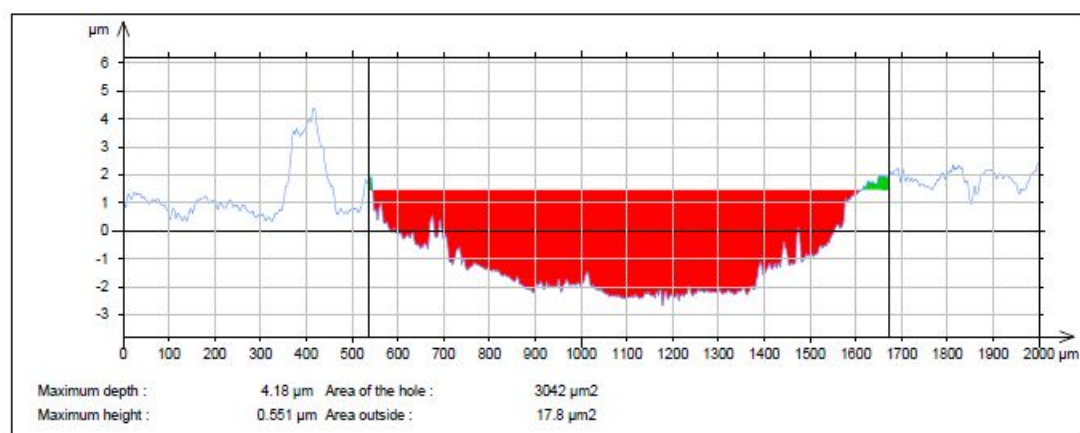


Figura 11 - Área desgastada (coloração a vermelho) da amostra W7 D - 1, com um raio da pista de 24mm.

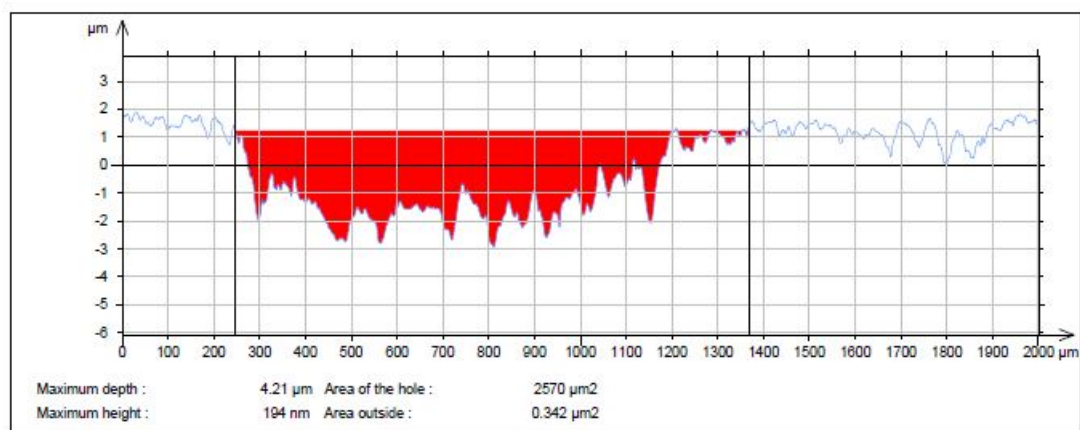


Figura 12 - Área desgastada (coloração a vermelho) da amostra W7 D - 2, com um raio da pista de 24mm.

Anexo C – Topografias das pistas de desgaste

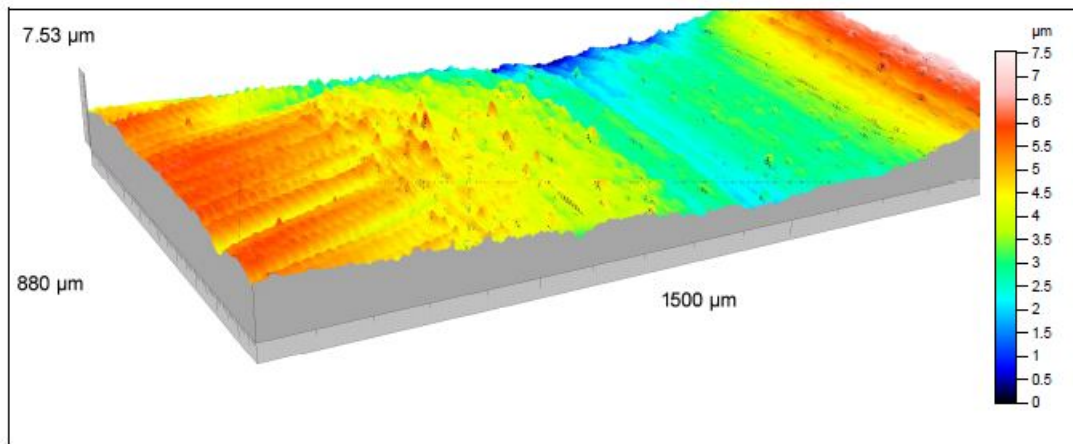


Figura 13 – Perfil topográfico da amostra W6 D - 1, com um raio da pista de 24 mm.

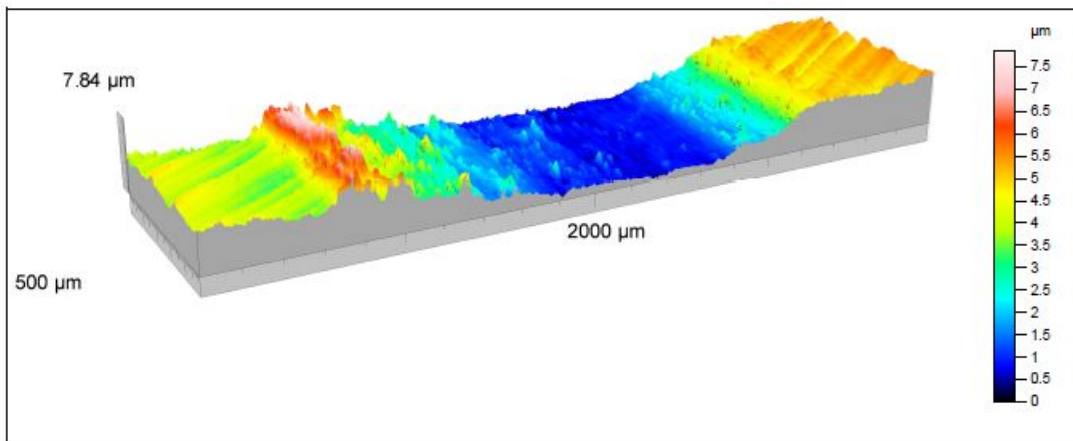


Figura 14 - Perfil topográfico da amostra W7 D - 1, com um raio da pista de 24 mm.

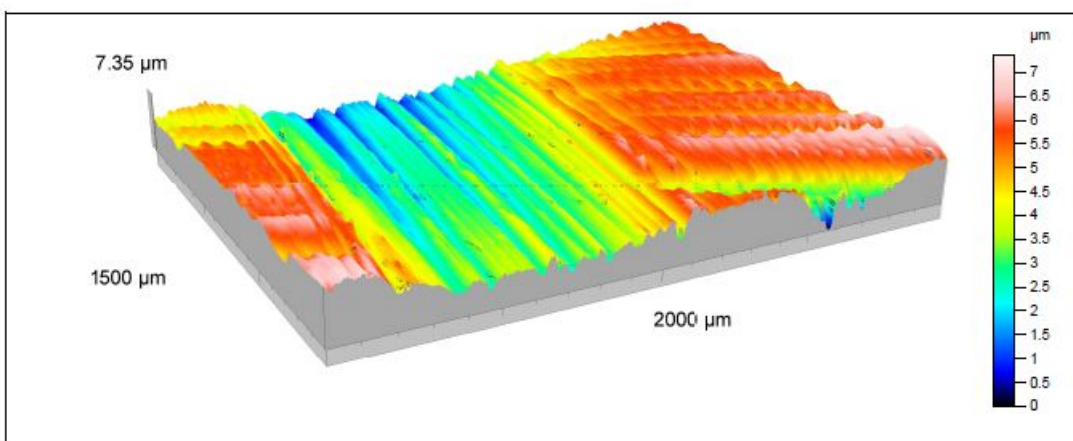


Figura 15 - Perfil topográfico da amostra W7 D - 2, com um raio da pista de 24 mm.