# EFEITO DA TEMPERATURA DE REVENIDO NO COMPORTAMENTO TRIBOLÓGICO DO AÇO DIN 100Cr6

J. C. Miranda (¹), A. Ramalho (²), Sérgio Cavadas (²) jcerejo@ipg.pt, amilcar.ramalho@dem.uc.pt

(¹) Esc. Sup. de Tecnologia e Gestão, Inst. Politec. da Guarda, 6300 Guarda, Portugal (²) ICEMS - Departamento de Engenharia Mecânica - FCTUC, Coimbra, Portugal

**ABSTRACT:** The steel DIN 100Cr6 is often used in highly stressed mechanical components. It is mostly used on rolling bodies and bearings rings. This steel is usually used in tempered state and it is tempered to the maximum hardness. With low temperatures of tempering we can obtain a hardness higher than 7,5GPa. However, in some utilisations of this steel, the temperature can already be significant, without being yet necessary to use special steels for high temperatures. In these cases, the heat treatment has to be readjusted, in particular the tempering temperature. As the tempering temperature produces a significant variation of the hardness and tenacity, the wear resistance will certainly be affected.

The main purpose of this work is to study the influence of the microstructure variation on the friction and wear of the steel DIN 100Cr6. The microstructure variation was produced by variation of the heat treatment, more specifically of the tempering temperature. To obtain this, the rotative specimens were treated using different tempering temperatures between 200°C and 500°C. To evaluate de variation produced on the wear resistance, we have used two techniques: friction and wear tests with crossed cylinder contact in unidirectional sliding and tests of micro-abrasion by sphere. The results obtained are widely discussed, having into account the wear mechanisms observed and the hardness and microstructure variations resultant from the heat treatments. One other aim of the present study was to verify the new energetic parameters aptitude to quantify the wear resistance. The results of this study are perfect to the concretisation of this aim, because, using the same chemical composition and with successive variations of the microstructure, it is possible to change significantly the tribological behaviour. The results of the tests of sliding are compared considering both the classical Archard approach, and the use of new parameters based on the relation between the dissipated energy by friction and the wear volume.

# Keywords: Wear, Friction, Heat Treatment, Dissipated Energy.

**RESUMO:** O aço de baixa liga DIN 100Cr6 é bastante utilizado em componentes mecânicos altamente solicitados, sendo os corpos rolantes e os anéis dos rolamentos a sua aplicação mais conhecida. Este aço é habitualmente utilizado no estado temperado e revenido para a máxima dureza, e com baixas temperaturas de revenido podem obter-se durezas superiores a 7,5 GPa. Contudo, em algumas das aplicações deste aço a temperatura pode ser já significativa, sem que todavia se justifique ainda a utilização de aços para alta temperatura. Nestes casos o tratamento térmico tem que ser reajustado, em particular a temperatura de revenido. Como a temperatura de revenido produz uma variação significativa da dureza e da tenacidade, a resistência ao desgaste será certamente afectada.

O objectivo do presente trabalho foi estudar a influência da variação da microestrutura do aço DIN 100Cr6 no atrito e no desgaste. A variação da microestrutura foi produzida por variação do tratamento térmico, mais especificamente da temperatura de revenido. Para o efeito os cilindros rotativos foram tratados utilizando diferentes temperaturas de revenido entre 200°C. Para avaliar a variação produzida na resistência ao desgaste foram utilizadas duas técnicas: ensaios de atrito e desgaste com contacto de cilindros cruzados em escorregamento unidireccional e ensaios de micro-abrasão por esfera.

Os resultados obtidos são amplamente discutidos tendo em conta os mecanismos de desgaste observados e as variações de dureza e de microestrutura resultantes dos tratamentos térmicos. Um outro objectivo do presente estudo foi verificar a aptidão de novos parâmetros energéticos para quantificar a resistência ao desgaste. Os resultados do presente estudo são perfeitos para a concretização deste objectivo porquanto utilizando a mesma composição química e com variações sucessivas da microestrutura é possível variar significativamente o comportamento tribológico. Os resultados dos testes de deslizamento são pois comparados considerando quer a abordagem clássica de Archard quer a utilização de novos parâmetros baseados na relação entre a energia dissipada por atrito e o volume de desgaste.

Palavras-chave: Desgaste, Atrito, Tratamento Térmico, Energia Dissipada.

# 1. INTRODUCÃO

Actualmente o aço DIN 100Cr6 é bastante utilizado na produção de inúmeros componentes mecânicos sujeitos a esforços elevados, como por exemplo os corpos rolantes e os anéis de rolamentos. A utilização deste aço já tem algumas décadas de história e tem sido alvo de estudos exaustivos. Alguns dos temas investigados são o tempo de servico de rolamentos, falhas prematuras dos corpos rolantes em serviço e ainda variáveis como o atrito e o desgaste que possam afectar este tipo de ocorrências [1-3]. O tipo de tratamento térmico que se promove e a consequente alteração da microestrutura são aspectos que devem ser estudados com alguma atenção. As curvas de revenido deste aço, revelam uma diminuição significativa da dureza com o aumento da temperatura [4]. A variação da resistência ao desgaste do aço com a temperatura de revenido foi já verificada por diferentes técnicas [1]. Com o presente estudo, pretende-se investigar o atrito e o desgaste em contactos deslizantes do aço DIN 100Cr6 para diferentes temperaturas de revenido utilizando uma dupla abordagem experimental através de ensaios de deslizamento e de ensaios de abrasão. Pretende-se também comparar a aplicação das metodologias clássicas, coeficiente ou taxa específica de desgaste, com a quantificação do desgaste utilizando parâmetros energéticos.

# 2. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

# **Materiais**

O material usado neste estudo foi o aço DIN 100Cr6 cuja composição é a seguinte: 1,01wt%C, 1,50%Cr, 0,30%Mn, 0,25%Si, 0,02%S e 0,027%P (% em peso). Os discos deste aço foram maquinados e austenitizados a 850°C, temperados em óleo e posteriormente foram revenidos durante duas horas a diferentes temperaturas: 200°C, 300°C, 400°C e 500°C.

Para o cilindro antagonista também foi utilizado o aço DIN 100Cr6 temperado e revenido com dureza final de 7500 MPa.

O acabamento superficial efectuado aos provetes utilizados, resultou numa rugosidade média de  $0.078 \propto m$  para o parâmetro  $R_a$  e  $1.133 \propto m$  para o  $R_z$ .

# Ensaios de desgaste por deslizamento

O atrito e o desgaste foram estudados experimentalmente num tribómetro com contacto de cilindros cruzados e escorregamento unidireccional (figura 1). O equipamento é constituído pelo disco rotativo de forma cilíndrica (3) e por um cilindro de reduzidas dimensões que se encontra fixo (5). A carga normal é aplicada através de um sistema parafuso/mola (4) e é medida pela célula de carga (1). O cilindro fixo com um diâmetro de 10 mm, é suportado por um sistema de rotação livre, que é equilibrado por uma segunda célula de carga (2) utilizada para medir a força de atrito. O diâmetro do disco rotativo era de 60 mm e a velocidade de rotação imposta 159,1 rpm ou seja, a velocidade de deslizamento correspondia a 0,5 m/s.

Consideraram-se três cargas normais para cada par de materiais, 5 N, 10 N e 20 N. O tempo de duração dos

ensaios foi de duas horas, a que corresponde uma distância de deslizamento de 3600 m.

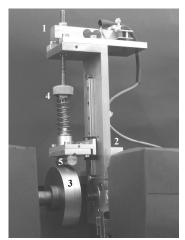


Fig. 1 – Tribómetro com contacto de cilindros cruzados.

Durante o teste, os valores da força de atrito foram adquiridos periodicamente com intervalos de tempo  $\Delta t$ . Em cada aquisição foi adquirido um número muito significativo de dados a partir dos quais se calculou um valor médio da

força de atrito,  $\overline{F}_a$ , representativa do intervalo de tempo  $\Delta t$ . Este intervalo era de 2 minutos na primeira meia hora do ensaio e 10 minutos até ao fim. No final do ensaio, o cilindro fixo apresenta um desgaste em forma elíptica (figura 2). O volume de desgaste provocado neste provete pode ser contabilizado utilizando a expressão simplificada (1) que foi proposta por A. Ramalho [5]. Para tal, mede-se as dimensões do eixo maior (b) e do menor (a) da elipse.

$$V = \frac{\pi}{2} h^2 \sqrt{d_1 d_2}$$
 [1]

Onde:

d<sub>1</sub> – diâmetro do cilindro fixo;

d<sub>2</sub> – diâmetro do cilindro rotativo;

h – profundidade da marca de desgaste.

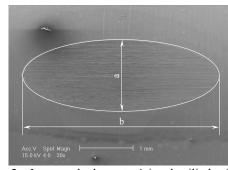


Fig. 2 – Imagem do desgaste típico do cilindro fixo.

Para quantificar o volume de desgaste provocado no disco rotativo, procedeu-se da seguinte forma: utilizando um rugosimetro Rodenstock RM600 3D, obtiveram-se 5 perfis de rugosidade perpendiculares à pista desgastada. Para cada um dos perfis determinou-se a área correspondente ao vale

desgastado. Com este conjunto de valores, encontrou-se o valor médio ao qual foi multiplicado pelo perímetro nominal do disco rotativo. Desta forma obtivemos para cada um dos ensaios o volume correspondente ao material desgastado no disco rotativo.

#### Ensaios de desgaste por micro-abrasão

Os ensaios de micro-abrasão por esfera, foram realizados utilizando a técnica de ball-cratering na variante de esfera fixa. Neste ensaio, uma esfera roda solidária com um veio e é pressionada contra o material que se pretende estudar. No decorrer do ensaio é introduzido no contacto um fluxo contínuo de uma solução abrasiva.

No presente estudo utilizou-se uma esfera de aço DIN 100Cr6 com diâmetro de 25,4 mm. A carga normal aplicada, foi de 1 N e a velocidade de rotação da esfera foi de 75 rpm (velocidade de deslizamento de 0,1 m/s). A duração dos ensaios variou entre 100 e 500 rotações. Como abrasivo usou-se carboneto de silício com granulometria P2500, dimensão média de 8 ∝m. O abrasivo foi utilizado em solução aquosa na proporção de 0,35 g de SiC por ml de água destilada.

No final dos ensaios as crateras de abrasão resultantes foram observadas em microscópio óptico equipado com mesa de medida micrométrica com o objectivo de medir as suas dimensões. As crateras produzidas têm a forma de uma calote esférica e os diâmetros da sua projecção eram medidos em duas direcções ortogonais, respectivamente a direcção do movimento relativo e a direcção perpendicular. O valor médio dos raios da cratera, r, bem como o raio da esfera, R, eram depois utilizados para calcular a profundidade e o volume de material removido, utilizando formulário adequado [6].

A morfologia das superfícies de desgaste resultantes de ambos os testes foi observada em microscópio electrónico de varrimento.

A dureza dos provetes foi determinada por indentação Vickers com uma carga de 30 quilogramas, aplicada durante 15 segundos.

# 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A influência da temperatura de revenido nas propriedades mecânicas foi verificada por ensaios de dureza. Na tabela 1, resumem-se os valores obtidos. Confirma-se que o aumento da temperatura de revenido reduz significativamente os valores da dureza.

Tabela 1 – Microdurezas do DIN 100Cr6 para diversas temperaturas de revenido.

arversus temperaturus de revenido.					
T <sub>revenido</sub> [°C]	Dureza [MPa]				
200	7800				
300	6600				
400	5300				
500	4500				

Os testes de desgaste por deslizamento mostraram que após alguns milhares de voltas a força de atrito estabilizou e foi possível calcular o valor médio após estabilização. A tabela 2 resume os valores de atrito registados.

Tabela 2 – Valores de atrito após estabilização.

T <sub>revenido</sub>	Carga Normal [N]	Força de atrito [N]	Coeficiente de atrito	
	5	4,77	0,97	
200	10	8,99	0,91	
	20	16,19	0,82	
	5	4,00	0,81	
300	10	6,85	0,69	
	20	14,79	0,75	
	5	4,39	0,89	
400	10	8,84	0,90	
	20	17,36	0,88	
	5	3,63	0,74	
500	10	8,65	0,88	
	20	15,48	0,78	

No final de cada um dos ensaios foi medido o volume de desgaste de cada um dos provetes do par de deslizamento. A caracterização da resposta para cada par de materiais testado foi feita inicialmente através do valor da taxa específica de desgaste, também conhecida por coeficiente de desgaste. Atendendo a que a taxa específica de desgaste é dada pela equação (2), como se realizaram ensaios com distintos valores de força normal, o valor da taxa específica de desgaste pode ser calculado através do declive da linearização da representação gráfica do volume de desgaste em função do produto distância de deslizamento pela carga normal. Este método de cálculo permite normalizar a acção da carga normal atendendo à sua relação linear com o desgaste tal como é estabelecido pela equação de Archard. Na figura 3 apresentam-se os gráficos correspondentes aos cilindros rotativo e fixo.

$$k = \frac{V}{S \times N} \tag{2}$$

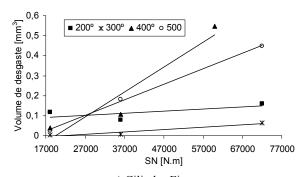
Observando os gráficos das figuras 3 a) e b) é possível concluir que ambos os componentes do par de deslizamento seguem a mesma tendência. Verifica-se que apesar do aumento da temperatura de revenido conduzir sempre a uma redução da dureza, a temperatura de revenido de 300 °C conduz a volumes de desgaste mínimos. Na tabela 3 apresentam-se os valores das taxas específicas de desgaste correspondentes a estes ensaios.

Nos processos de deslizamento o trabalho realizado pela força de atrito representa uma percentagem muito significativa da energia total transferida para o sistema. Como o desgaste é um processo que consome energia, o valor do volume de desgaste deve estar dependente da quantidade de energia que entra no sistema. Este princípio tem vindo a ser cada mais usado para derivar parâmetros de quantificação do desgaste [7,8]. Partindo do pressuposto que o atrito é o processo energético mais importante que determina as mudanças no sistema, é claro que ele desempenha um papel relevante na quantidade de material

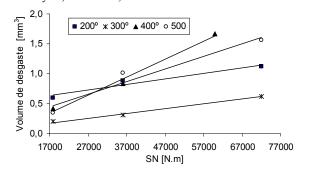
removido por desgaste. Num ensaio, a energia total dissipada por atrito pode ser calculada através da equação (3) como o somatório de todas as parcelas ΔE calculadas ao longo do ensaio. O valor de cada uma das parcela é função

do valor médio da força de atrito,  $\bar{F_a}$ , e no seu cálculo assume-se que a velocidade de deslizamento é constante,  $V_t$ . Este método foi objecto de uma publicação recente onde se encontra convenientemente explicado [9].

$$\Delta E = \overline{F}_a \quad V_t \quad \Delta t \tag{3}$$



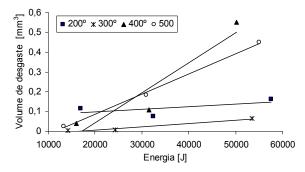
a) Cilindro Fixo 200°C: y=1,04E-06x+7,40E-02 300°C: y=1,21E-06x-2,64E-02 400°C: y=1,24E-05x-2,40E-01 500°C: y=7,76E-06x-1,08E-01



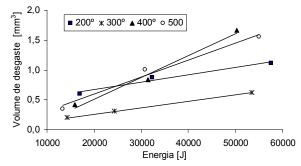
b) Disco Rotativo 200°C: y=9,19E-06x+4,78E-01 300°C: y=8,00E-06x+3,97E-02 400°C: y=2,99E-05x-1,65E-01 500°C: y=2,13E-05x+7,62E-02

Fig. 3 – Volume de desgaste em função de SN para os ensaios de deslizamento.

A determinação da energia dissipada por atrito foi efectuada para todos os ensaios. Os resultados são representados graficamente nas figuras 4 a) e b). Como se pode constatar a evolução do desgaste com a energia é razoavelmente linear e o declive das rectas associadas corresponde a uma taxa de desgaste em termos energéticos. A tabela 3 apresenta um resumo dos resultados obtidos.



a) Cilindro Fixo 200°C: y=1,31E-06x+7,08E-02 300°C: y=1,67E-06x-2,66E-02 400°C: y=1,51E-05x-2,61E-01 500°C: y=1,02E-05x-1,19E-01

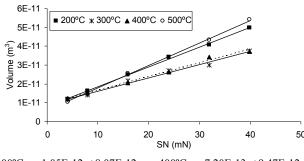


b) Disco Rotativo 200°C: y=1,25E-05x+4,19E-01 300°C: y=1,08E-05x+4,37E-02 400°C: y=3,67E-05x-2,22E-01

 $500^{\circ}\text{C}$ : y=2,85E-05x+2,79E-02

Fig. 4 – Volume de desgaste em função da energia dissipada para os ensaios de deslizamento.

A avaliação da resistência ao desgaste abrasivo foi efectuada por micro-abrasão. No final dos ensaios o volume de desgaste das crateras produzidas pelos ensaios realizados com diferentes números de voltas foi calculado a partir da dimensão das crateras. Na figura 5 representa-se a evolução gráfica do volume de desgaste em função do produto SN. Pode pois constatar-se que como já havia acontecido com os ensaios de deslizamento, o aumento da temperatura de revenido aumentou a resistência ao desgaste abrasivo. Efectivamente, as amostras revenidas a 300 e mesmo a 400 °C apresentaram uma resistência ao desgaste abrasivo superior ao da amostra revenida a 200 °C. Contudo quando se aumentou a temperatura de revenido de 400 para 500 °C a resistência ao desgaste reduziu-se significativamente. A inclinação das rectas de regressão linear no gráfico da figura 5 corresponde à taxa específica de desgaste de cada um dos materiais testados, os valores obtidos são apresentados na tabela 3.



200°C: y=1,05E-12x+8,07E-12 400°C: y=7,20E-13x+9,47E-12 300°C: y=7,07E-13x+9,08E-12 500°C: y=1,19E-12x+5,98E-12

Fig. 5 – Volume de desgaste em função de SN para os ensaios de micro-abrasão.

A observação das superfícies de desgaste resultantes dos ensaios de deslizamento revelou que o aumento da temperatura de revenido conduziu sempre a um aumento da intensidade do dano visível. Efectivamente, em todos os casos foram observados sulcos com a direcção do deslizamento, contudo à medida que aumentava a temperatura de revenido os sulcos tornavam-se muito mais pronunciados, figura 6 a) a d). As crateras de micro-abrasão apresentavam sulcos finos e paralelos à direcção do movimento relativo da esfera formados por deformação plástica promovida pelo contacto das partículas abrasivas contra as amostras ensaiadas, figura 6 e) e f). Este tipo de dano é vulgarmente designado por abrasão a dois corpos porque é produzido por uma partícula abrasiva em escorregamento, enquanto que para partículas em rolamento o dano resulta de pitting por fadiga de contacto e designa-se por abrasão a três corpos.

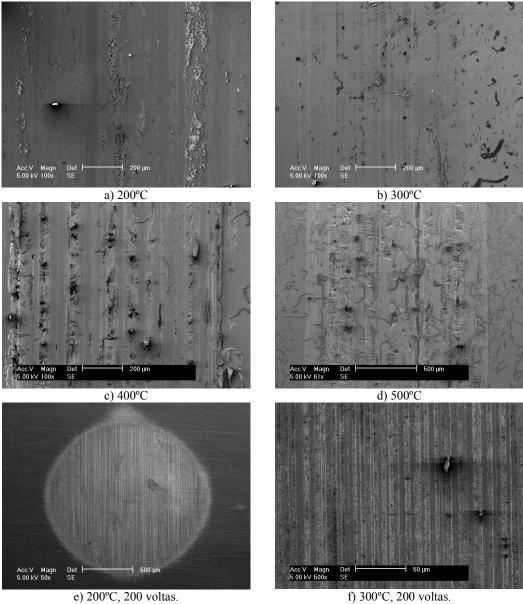


Fig. 6 – Morfologia das superfícies de desgaste. a) a d) desgaste por escorregamento. e) e f) desgaste por micro-abrasão.

Comparando os resultados obtidos pelas duas técnicas de caracterização, figura 7, é possível concluir que ambas as técnicas revelaram que a temperatura de revenido de 300°C conduz aos valores mais elevados da resistência ao desgaste apesar da dureza ser inferior à conseguida quando a temperatura de revenido é de 200°C. Apesar de pela observação da morfologia das superfícies de desgaste não ter sido possível detectar variações significativas dos mecanismos de remoção do material quando se comparavam as superfícies de desgaste de amostras tratadas com diferentes temperaturas de revenido, a variação de comportamento observada é justificável atendendo à variação da microestrutura e das propriedades tenacidade / dureza resultantes da variação da temperatura de revenido.

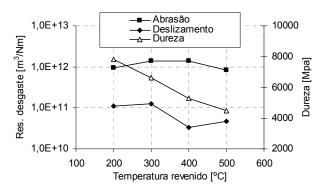


Fig. 7 – Variação da dureza e da resistência ao desgaste, nos ensaios de deslizamento e abrasão, com a temperatura de revenido.

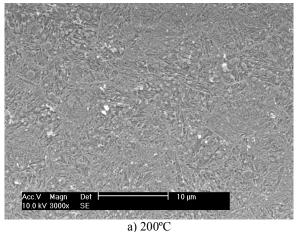
Tabela 3 –	- Resultados	do	desgaste de	todos	os ensaios.

	Ensaios de Abrasão	Ensaios de Deslizamento							
T <sub>revenido</sub> [°C]	Taxa especifica de desgaste [mm³/Nm]	Carga Normal [N]	Energia dissipada [J]	Taxa especifica de desgaste [mm³/Nm]		Taxa energética de desgaste [mm³/J]			
				Disco rotativo	Cilindro fixo	Disco rotativo	Cilindro fixo		
		5	16959,9	9,19x10 <sup>-6</sup>	1,04x10 <sup>-6</sup>	1,25x10 <sup>-5</sup>	1,31x10 <sup>-6</sup>		
200	1,05x10 <sup>-6</sup>	10	32393,3						
		20	57516,6						
		5	14205,9						
300	$7,07 \times 10^{-7}$	10	24350,6	$8,00x10^{-6}$	1,21x10 <sup>-6</sup>	1,08x10 <sup>-5</sup>	1,67x10 <sup>-6</sup>		
		20	53531,6						
		5	15980,9						
400	$7,20 \times 10^{-7}$	10	31475,9	2,99x10 <sup>-5</sup>	1,24x10 <sup>-5</sup>	3,67x10 <sup>-5</sup>	1,51x10 <sup>-5</sup>		
		20	50228,2						
500	1,19x10 <sup>-6</sup>	5	13313,7	2,13x10 <sup>-5</sup>	7,76x10 <sup>-6</sup>	2,85x10 <sup>-5</sup>	1,02x10 <sup>-5</sup>		
		10	30879,2						
		20	55060,4						

A microestrutura das diferentes amostras de aço foi analisada em superfícies polidas atacadas com Nital a 3% por observação em SEM, figura 8. Identificou-se em todas as amostras uma microestrutura constituída por uma matriz de martensite fina com uma dispersão de carbonetos de crómio primários. Contudo foram identificadas algumas variantes, à medida que se aumentou a temperatura de revenido assistiu-se a uma coalescência dos carbonetos, de facto como se observa na figura 8 à medida que aumenta a temperatura de revenido aumenta o número e a dimensão dos carbonetos.

Assim, a justificação do aumento da resistência ao desgaste notado para a temperatura de revenido de 300 °C, e no caso do desgaste abrasivo mesmo para 400 °C, deve-se ao facto

de que com o aumento da temperatura de revenido se assiste a uma perda de dureza da matriz que contudo até um determinado valor crítico é compensada pelo papel de reforço exercido pelos carbonetos associado ao ganho de tenacidade da matriz martensitica revenida.



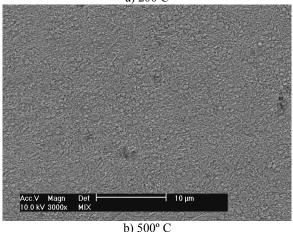


Fig. 8 – Microestrutura do 100Cr6 a diferentes temperaturas de revenido.

#### 4. CONCLUSÕES

A influência da temperatura de revenido do aço DIN 100Cr6 no atrito e no desgaste foi investigado neste estudo. Foram realizados ensaios de deslizamento com a geometria de cilindros cruzados, e ainda ensaios de micro-abrasão através da técnica de ensaios de ball-cratering. Os resultados obtidos revelaram que:

- O aumento da temperatura de revenido fez baixar a dureza do aço;
- O aumento da temperatura de revenido aumentou o número e o tamanho dos carbonetos dispersos na matriz;
- Apesar da redução de dureza, a resistência máxima ao desgaste ocorreu para a temperatura de revenido de 300°C, quer para o desgaste por deslizamento quer para o desgaste abrasivo.
- No caso do desgaste por abrasão a temperatura de revenido de 400 °C apresenta uma resistência à abrasão muito semelhante ao valor máximo.

- Apesar da variação das condições de tratamento térmico produzirem alterações tanto ao nível do desgaste abrasivo como do desgaste por deslizamento, a sua influência é muito maior ao nível do desgaste por abrasão.
- Nos ensaios de deslizamento, os resultados foram tratados utilizando duas abordagens distintas a abordagem energética e a abordagem clássica de Archard-Czichos. A análise energética demonstrou ser muito equivalente à análise tradicional pelo modelo clássico. As vantagens da abordagem energética revelam-se sobretudo em ensaios onde o atrito não estabilize ao longo da duração do ensaio.

# REFERÊNCIAS

- [1] You Wang, Xiao Dong Li, ZhenCheng Feng, The relationship between the product of load and sliding speed with friction temperature and sliding wear of a 52100 steel, Scripta Metallurgica et Materialia, Vol. 33, no 7, pp. 1163-1168, 1995.
- [2] Y. Xie, J. A. Williams, The prediction of friction and wear when a soft surface slides against a harder rough surface, Wear, 196 (1996) 21-34.
- [3] Braham Prakash, Ken'ichi Hiratsuka, Sliding wear behaviour of some Fe-, Co- and Ni-based metallic glasses during rubbing against bearing steel, Tribology Letters Vol.8, (2000) 153-160.
- [4] ASM, Heat Treating, Metals Handbook, vol. 4, ninth ed., American Society for Metals, Metal Park, OH, USA,1991.
- [5] A. Ramalho, Micro-scale abrasive wear test of thin coated cylindrical substrates, Tribology Letters Vol.16, N° 1 (2004) 133-141.
- [6] K.L. Rutherford, I.M. Hutchings, Theory and application of a microscale abrasive wear test, J. Test. Eval. Am. Soc. Test. Mater. 25 (2) (1997)250-260.
- [7] M.Z. Huq and J.-P. Celis, Expressing wear rate in sliding contacts based on dissipated energy, Wear, 252 (2002) 375-383.
- [8] A. Ramalho, J.C. Miranda, The relationship between wear and dissipated energy in sliding systems, Wear, 260 (2006) 361-367.
- [9] A. Ramalho, J.C. Miranda, Friction and Wear of Electroless NiP and NiP+PTFE Coatings, Wear, 259 (2005) 828-834.