

# ESTUDO DA RESISTÊNCIA AO DESGASTE DO AÇO VILLARES VF800AT COM DIFERENTES REVENIMENTOS<sup>1</sup>

José D. Bressan<sup>2</sup>  
Karina Lopez<sup>3</sup>  
André L. Leite<sup>3</sup>  
Rafael A. Mesquita<sup>4</sup>

## Resumo

O trabalho atual examina a resistência ao desgaste do aço ferramenta Villares VF800AT temperado e com diferentes temperaturas de revenido, e portanto, vários valores de dureza e tenacidade foram investigados. O ensaio de desgaste por deslizamento e/ou abrasão foram realizados em um tribômetro tipo esfera-sobre-disco onde os discos eram de aço ferramenta VF800AT com diferentes tratamentos térmicos. As esferas foram de metal duro, WC-Co, com diâmetro de 9,97 mm e microdureza Vickers de 1925 HV(0,3). O comportamento ao desgaste do aço ferramenta foi analisado, utilizando-se uma velocidade de deslizamento de 0,45 m/s, cargas normais de 50 N e 58 N, distância de deslizamento total de 3000 m e controle local de temperatura e umidade de 27°C e 50% respectivamente. Os discos tinham uma espessura de 3,6 mm e foram submetidos ao mesmo tratamento típico de tempera, austenitização a 1.030°C, mas os processos de revenimento duplo foram executados em diferentes temperaturas de 300°C, 500°C e 540°C, produzindo diferentes durezas no disco. Da análise dos gráficos traçados do volume perdido acumulativo versus a distância de deslizamento, calcularam-se os diferentes coeficientes de desgaste e taxas de desgaste em função da carga normal, do tratamento térmico e da dureza. Devido às variações da dureza e tenacidade do disco, diferentes resistências ao desgaste foram observadas. Os mecanismos do desgaste também foram investigados medindo o coeficiente de atrito on-line. O desgaste ocorre em duas fases: fase de rodagem inicial até os primeiros 300 m e segunda fase de taxa de desgaste constante. Conclui-se que aumentar a dureza do disco nem sempre corresponde a um aumento na resistência ao desgaste: ambos os discos revenidos a 540°C e 500°C tiveram a mesma dureza de 63,5 HRC, mas a taxa ao desgaste foram diferentes. O melhor tratamento térmico para a maior resistência ao desgaste do aço ferramenta Villares VF800AT foi tempera e duplo revenido a 540°C, proporcionando um melhor desempenho para o uso em ferramentas de corte e conformação a frio de chapas metálicas.

**Palavras chaves:** Esfera-sobre-disco; Aço ferramenta VF800AT; Tratamento térmico; Resistência ao desgaste; WC-Co.

## INFLUENCE OF TEMPERING TEMPERATURE ON THE WEAR RESISTANCE OF VILLARES VF800AT TOOL STEEL

### Abstract

Present work examines the wear resistance of Villares VF800AT tool steel quenched and with different tempering temperatures and, thus, various hardness and toughness were investigated. The wear testing by sliding and/or abrasion were carried out in a ball-on-disc tribometer which discs or counter face were VF800AT tool steel tested as received and with different heat treatments. The balls were spheres of hard metal, WC-Co, with diameter of 9.97 mm and micro-hardness Vickers of 1925. The tool steel discs wear behavior were evaluated, using sliding velocity of 0.45 m/s, normal load of 50 N and 58 N, total sliding distance of 3000 m and controlled room temperature and humidity at 27 °C and 50 % respectively. The heat treated discs had thickness of 3.6 mm and were submitted to the same quenching treatment, solution heat treatment at 1030 °C, but the double tempering process were performed at different temperatures of 300 °C, 500 °C and 540 °C, producing different disc hardness. From the analysis of plotted graphs of cumulative lost volume versus sliding distance, it was calculated the different wear coefficient and wear rates as function of the normal load, heat treatment and hardness. Due to disc hardness and toughness variations, different wear resistances were observed. The wear mechanisms were also investigated by measuring on-line the friction coefficient. Increasing the disc hardness not allays correspond to an increase in the wear resistance: both discs tempered at 540 °C and at 500 °C had similar hardness of 63,5 HRC, but showed different were rate and wear resistance. Hence, the optimized heat treatment for greater wear resistance of Villares VF800AT tool steel was the double tempering at 540 °C, providing a better performance for cold shearing and stamping tooling for cold sheet metals forming processes.

**Key words :** Ball-on-disc; VF800AT tool steel; Heat treatment; Wear resistance; WC-Co.

<sup>1</sup> *Contribuição técnica ao 6° Encontro da Cadeia de Ferramentas, Moldes e Matrizes, 20 a 22 de agosto de 2008, São Paulo, SP*

<sup>2</sup> *Departamento de Engenharia Mecânica - CCT - Udesc Joinville – Campus Universitário, 89.223-100 – Joinville/SC – Brasil. email: dem2jdb@joinville.udesc.br*

<sup>3</sup> *Departamento de Engenharia Mecânica - CCT - Udesc Joinville – Campus Universitário, 89.223-100 – Joinville/SC- Brasil. email: kakau\_lopez@hotmail.com.br*

<sup>4</sup> *Engenheiro de Materiais, Pesquisador da Villares Metals S. A., Sumaré, SP, Brasil, e-mail: rafael.mesquita@villaresmetals.com.br*

# 1 INTRODUÇÃO

Os processos industriais de conformação de metal a frio como o corte e puncionamento de chapa, a estampagem, o embutimento profundo e o forjamento são realizados à temperatura ambiente, usando-se aços especiais ou aços ferramentas de alta resistência mecânica e dureza. Essas operações a frio, temperatura inferior a 200°C, requerem aços de alto limite de escoamento, em tração ou compressão, a fim de resistirem às possíveis deformações plásticas em pontos de alta concentração de tensões que ocorrem no ferramental durante os processos de corte ou conformação de chapas metálicas ou conformação de metal em geral. Adicionalmente, outros requisitos importantes dos materiais de ferramentas e igualmente necessários para alto desempenho do ferramental são a resistência ao desgaste, a resistência ao impacto de cargas dinâmicas, a resistência ao choque térmico, a tenacidade a fratura e o baixo custo.

Durante as operações de conformação de metais podem-se verificar cinco tipos básicos de mecanismos de falha nas ferramentas na conformação à frio de metais que são: *desgaste, lascamento, deformação plástica, caldeamento ou aderência e trinca catastrófica*. Portanto, o desempenho de aços ferramenta para trabalho à frio está relacionado com as seguintes propriedades mecânicas: resistência ao desgaste, tensão limite de escoamento, tenacidade à fratura e módulo de elasticidade. Ou seja, devido ao tipo de sollicitação que ocorrem no ferramental nas operações de corte e conformação de metais, é necessário que o material tenha propriedades diferenciadas como alta dureza, alta resistência ao desgaste e elevada tenacidade. Nessas operações, cargas quase estáticas elevadas e cargas de impacto estão presentes: o material da ferramenta pode conter micro-trincas ou defeitos, superficiais ou no seu interior originários dos processos de fabricação do material ou do tratamento térmico, conduzindo às rupturas. Essas micro-trincas podem ser consideradas estáveis se a propriedade mecânica tenacidade à fratura for suficientemente elevada.

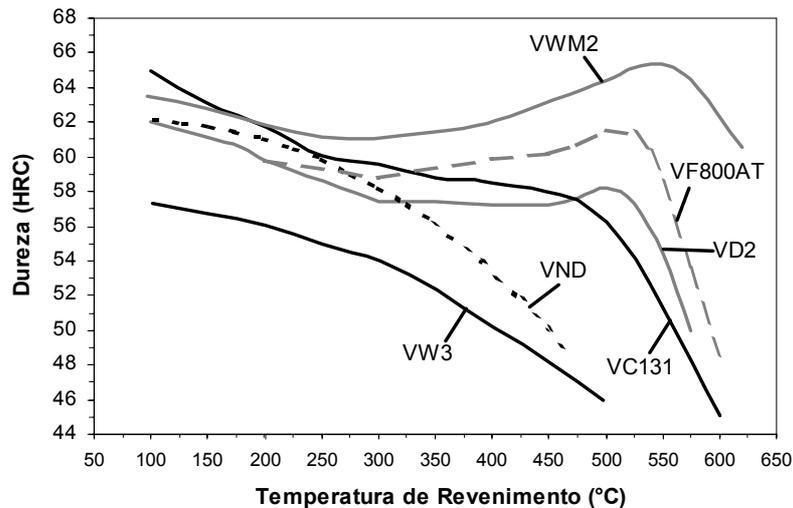
Dentre os principais aços ferramenta para fabricação de punções e matrizes<sup>(1)</sup> destacam-se os aços AISI M2, AISI D2, AISI D6 (Villares VC131) e o novo aço produzido pela Villares Metais, o VF800AT.<sup>(2)</sup> O aço VF800AT é um aço ferramenta específico para trabalho a frio produzido pela Villares Metais do Brasil, apresentando alta resistência ao desgaste e relativa boa tenacidade a fratura. O metal duro ou carbeto de tungstênio WC-Co também é muito utilizado devido a sua alta resistência, porém, de custo elevado. Aços ferramentas podem ter sua vida útil aumentada através dos processos de tratamento superficial como a nitretação a plasma, o processo Toyota Diffusion Process e os processos PVD e CVD.

O aço ferramenta AISI D2 ou VILLARES D2 tem um alto conteúdo de elementos de liga e geralmente é recomendado pelos ferramenteiros como material para punção e matriz no processo de corte de chapas a frio.<sup>(1)</sup> Porém, o aço AISI D6 tem propriedades mecânicas semelhantes e é um material com potencial de substituir o aço D2, mas tem composição química diferente e custo maior.

## 1.1 O Tratamento Térmico em Aços Ferramenta

O tratamento térmico nos aços é realizado com a finalidade de aliviar tensões residuais, alterar a microestrutura do material e conferir propriedades mecânicas elevadas, conseqüentemente, influenciar no desempenho dos aços ferramenta. Entretanto, a grande maioria das falhas prematuras de ferramentas é resultado de

um tratamento térmico incorreto: “Estima-se que cerca de 70% das falhas prematuras de ferramentas tem como causa as falhas de tratamento térmico”.<sup>(3)</sup>



**Figura 1:** Curvas de dureza versus temperatura de revenimento para aços ferramenta VW3, VND, VD2, VC131, VF800AT e VWM2. Os dados referem-se a corpos de prova temperados em óleo e duplo revenido. As temperaturas de austenitização são as típicas para cada aço: 920°C para VW3, 800°C para VND, 940°C para VC131, 1010°C p/ VD2, 1.030°C p/ VF800AT, 1.200°C p/ VWM2.<sup>(2)</sup>

As propriedades mecânicas finais do aço ferramenta após o tratamento térmico como dureza, ductilidade e tenacidade são grandemente dependentes do processamento térmico utilizado: ciclo de pré-aquecimento e aquecimento, temperatura de austenitização (enxarque), velocidade de resfriamento e ciclo de revenimentos. Ou seja, as propriedades mecânicas finais do material dependem da sua microestrutura que, por sua vez, depende das condições de temperatura, tempo e taxa de aquecimento e resfriamento do processo térmico. A microestrutura de um aço ferramenta, após o revenimento, pode estar constituída de duas ou mais das seguintes fases: ferrita, bainita, martensita, austenita retida e carbeto complexos. Na Figura 1, apresentam-se as curvas de dureza dos principais aços ferramenta em função da temperatura de revenimento. Os picos de dureza em torno de 550°C do aço VWM2 e VF800AT é devido a precipitação de carbeto complexos ( $Mo_2C$ ,  $W_2C$ , VC) : este fenômeno é conhecido como endurecimento secundário que confere dureza ao aço sob altas temperaturas de até 550°C.

Após a tempera, o aço ferramenta tem elevada dureza e resistência à tração, mas é frágil. Para melhorar suas propriedades mecânicas, deve-se reaquecê-lo numa temperatura mediana, ou seja, na temperatura de revenimento. Portanto, o revenimento do aço ferramenta tem as finalidades de alívio das tensões residuais internas e de aumento da ductilidade.

## 1.2 O Ensaio de Desgaste

A vida em serviço de um ferramental para conformação a frio depende da sua resistência a fadiga, resistência a fratura e da resistência ao desgaste. Na fase de seleção do material do ferramental, a resistência ao desgaste é um dos importantes parâmetros de projeto e, conseqüentemente, ensaios de laboratório foram desenvolvidos com o objetivo de se medir a resistência ao desgaste sob condições controladas semelhantes às condições em serviço. A correlação entre os ensaios de laboratório e a aplicação no projeto de ferramental de corte e conformação é de

grande importância para a tribologia prática. Porém, o coeficiente de atrito e a resistência ao desgaste são fenômenos complexos e não são propriedades características do material, e depende tanto das propriedades mecânicas, físicas, químicas do material, topografia da superfície quanto dos parâmetros de processo como pressão de contato, presença de partículas duras, temperatura, velocidade de deslizamento e meio ambiente. Para simular a condição em serviço, os ensaios de laboratório devem ter as mesmas condições reais em serviço como geometria, materiais, pressão de contato, temperatura, meio ambiente, velocidade de deslizamento, intensidade da potência de atrito e pulso de energia.

A equação fenomenológica que geralmente é utilizada na análise dos resultados experimentais do ensaio de desgaste de laboratório é a equação de Archad<sup>(4)</sup> que avalia a razão de desgaste e o coeficiente de desgaste através da equação linear,

$$Q (\text{mm}^3/\text{m}) = \frac{V}{S} = K \frac{F_N}{H} \quad (1)$$

onde K é o *coeficiente de desgaste*: é adimensional e menor que 1. Q é o parâmetro que mede a razão de desgaste ou “taxa de desgaste” (=volume perdido acumulado V ou massa perdida por unidade de deslizamento S),  $F_N$  é a carga normal aplicada, H é a dureza Vickers do material mais mole. Em geral, a *resistência ao desgaste* é definida como sendo 1/K. O *coeficiente de específico de desgaste*  $K_s$  é dado por,

$$K_s (\text{mm}^3/\text{N.m}) = \frac{Q}{F_N} = \frac{K}{H} \quad (2)$$

No ensaio de pino-sobre-disco o material mais mole geralmente é o disco. O volume perdido acumulado é calculado por:  $V = m/\rho$  ( $m$ = massa ;  $\rho$ = densidade).

O objetivo do presente trabalho foi investigar a resistência ao desgaste de aço ferramenta Villares VF800AT com tratamento térmico de tempera e diferentes temperaturas de revenido e, portanto, diferentes durezas e tenacidades, buscando-se a otimização das propriedades e apresentando-se uma curva de resistência ao desgaste versus temperatura de revenido.

## 2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL E MATERIAIS

O comportamento ao desgaste dos discos do aço de ferramenta de VF800AT foi investigado realizando-se ensaios de desgaste no equipamento esfera-sobre-disco: a distância deslizante total foi constante, a carga normal na esfera e a velocidade de deslizamento também foram constantes,<sup>(5)</sup> conforme norma padrão ASTM G99<sup>(6)</sup>. A Tabela 1 mostra os parâmetros usados durante o teste. Duas cargas normais foram empregadas, 50 N e 58 N; para cada temperatura de revenido, 4 corpos de prova do disco foram usados. As esferas foram de metal duro, WC-Co, com diâmetro de 9.97 mm e micro-dureza Vickers de 1.925 mHV0.5.

**Tabela 1** - Parâmetros usados nos ensaios esfera-sobre-disco com discos de aço Villares VF800AT .

Velocidade deslizamento (m/s)	Carga normal (N)	Distância deslizamento (m)	Raio da pista (mm)	Micro-dureza da esfera (mHV0.3)
0,45	50 e 58	3000	14,5	1925

## 2.1 Preparação dos Corpos de Prova

**Disco.** Na fabricação do disco, barras redondas de VF800AT (marca registrada Villares VF800AT) foram utilizadas. Os discos foram usinados pelo método convencional até obter a forma desejada com uma espessura de 3.6 mm e diâmetro de aproximadamente 50 mm como visto na Figura 2. Após a tempera, os discos foram duplamente revenidos em diferentes temperaturas a fim melhorar sua dureza e tenacidade, de acordo com o objetivo de aplicação em ferramentas. Em seguida, os discos foram polidos. As condições do tratamento térmico e dureza alcançada final podem ser vistas na Tabela 2 e Tabela 3.

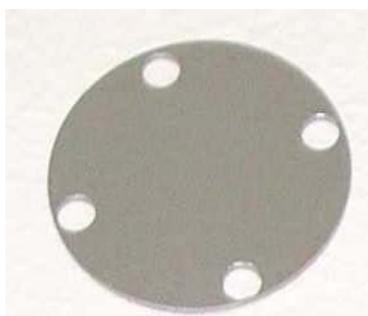


Figura 2. Disco de aço ferramenta Villares VF800AT utilizado em testes.

**Tabela 2.** Condições do tratamento térmico da tempera de todos os disco Villares VF800AT.

Tratamento Térmico	Aço ferramenta VF800AT	
	Temperatura	Tempo (h)
1 <sup>o</sup> pré-aquec.	450 °C	01:00
2 <sup>o</sup> pré-aquec.	800 °C	00:10
Austenitização	1030 °C	00:20
Resfriamento	530 °C	00:10
Resfriamento	Ar	02:00

**Tabela 3.** Condições do revenimento de cada pino de aço VF800AT e dureza obtida.

Tratamento Térmico	Discos 1A, 1B, 1D		Discos 3A, 3B, 3C	Discos 4A, 4B, 4C	Discos 5A, 5B
	Tempo	Temperatura	Temperatura	Temperatura	Sem tratam.
1 <sup>o</sup> Revenido	02:00	300 °C	500 °C	540 °C	-
Resfriamento	02:00	Ar	Ar	Ar	-
2 <sup>o</sup> Revenido	02:00	300 °C	500 °C	540 °C	-
Resfriamento	02:00	Ar	Ar	Ar	-
Dureza HRC		59,5	63,5	63,4	15,7

## 2.2 Procedimentos do Ensaio de Esfera-sobre-disco

Os corpos de prova seguiram um rigoroso procedimento de preparação a fim de eliminar quaisquer vestígios de sujeira ou oxidação. Em seguida, suporte-esfera e disco foram pesados numa balança analítica com resolução de 0,1 mg para determinação de sua massa inicial antes do ensaio.

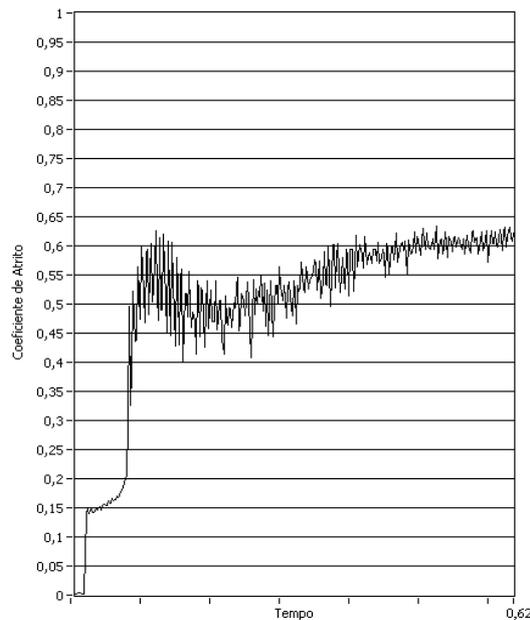
Foram ajustados o raio da pista de deslizamento, a rotação do porta amostra (disco) e o contador de voltas que foi programado para interromper o ensaio a cada 300 m percorridos para um total de 3000 m, de modo a permitir as tomadas de medida intermediárias da perda de massa do conjunto suporte-esfera e do disco. Estas medições foram precedidas sempre de uma completa limpeza dos corpos de prova, usando ar comprimido. Foram ensaiados discos de aço VF800AT em ambas as faces, sendo a utilizada a mesma esfera de WC para cada disco e apenas girando-as para uma nova posição a cada novo ensaio. O equipamento possui uma campânula onde se controla as condições de temperatura e umidade ambiente. Nos presentes ensaios as condições ambientes foram 27°C e 50% de umidade relativa aproximadamente.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

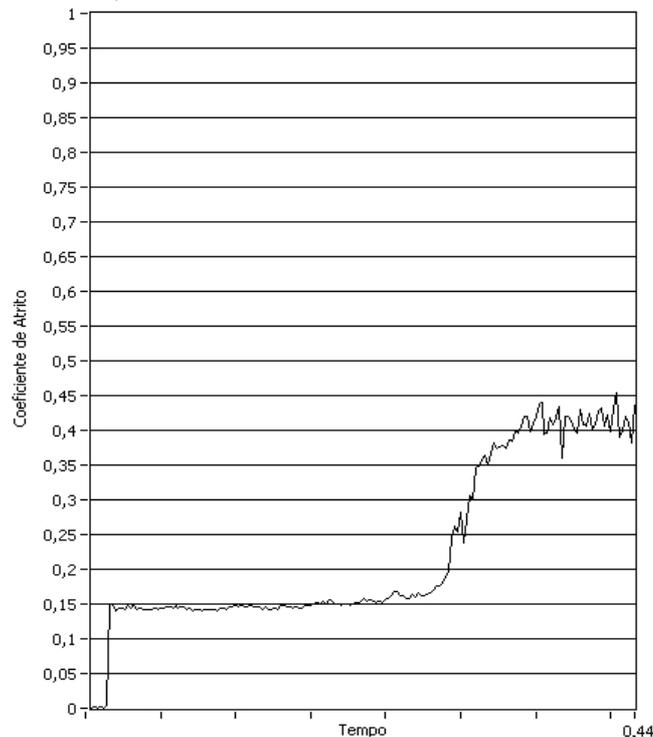
Nas Figuras 3 e 4 apresentam-se o registro on-line do coeficiente de atrito nos primeiros 3 m, 10 segundos, antes do ensaio de desgaste, usando-se uma carga normal  $F_N$  de 50 N e 58 N respectivamente para disco revenido a 500°C. O coeficiente de atrito inicial é de  $\mu = 0,15$ , possivelmente antes da quebra do filme de óxido do disco de aço VF800AT. Porém, obteve-se um coeficiente de atrito médio de  $\mu = 0,70$  para todos os discos revenidos a 500 °C e ensaiados com  $F_N = 50$  N após os 3 m iniciais, tendo uma de força atrito  $F_t$  média de 35 N. Aumentando-se a carga para 58 N, os primeiros 3 m tiveram um coeficiente de atrito  $\mu = 0,15$  como é visto na Figura 3. As mesmas médias foram obtidas para os discos revenidos a 540°C.

Discos sem tratamento e aqueles revenidos a 300°C apresentaram o coeficiente de atrito médio nos 3 m iniciais de  $\mu = 0,16$  e  $\mu = 0,45$  respectivamente, para carga normal de 50 N.

Com o decorrer do deslizamento, o coeficiente de atrito aumentou, mantendo-se oscilante por volta dos  $\mu = 0,55$  para os discos sem tratamento térmico,  $\mu = 0,57$  para os discos revenidos a 300 °C,  $\mu = 0,52$  para os discos revenidos a 500°C e  $\mu = 0,45$  para os discos revenidos a 540°C, quando utilizando uma carga normal de 50 N. Ao utilizar uma carga de 58 N nos discos revenidos a 500°C e 540°C o coeficiente de atrito médio no decorrer do ensaio foi em torno de  $\mu = 0,50$  e  $\mu = 0,42$  respectivamente. As grandes amplitudes de oscilações do atrito durante os ensaios ocorrem devido ao aumento da rugosidade superficial, mecanismos de desgaste presentes e formação da camada intermediária dentro da pista de desgaste.



**Figura 3** - Registro on-line do coeficiente de atrito nos primeiros 3 m, antes do ensaio de desgaste e com uma carga normal de 50 N, utilizando disco 3D revenido a 500°C.



**Figura 4** - Registro on-line do coeficiente de atrito nos primeiros 3 m, antes do ensaio de desgaste e com uma carga normal de 58 N, utilizando disco 3A revenido a 500°C.

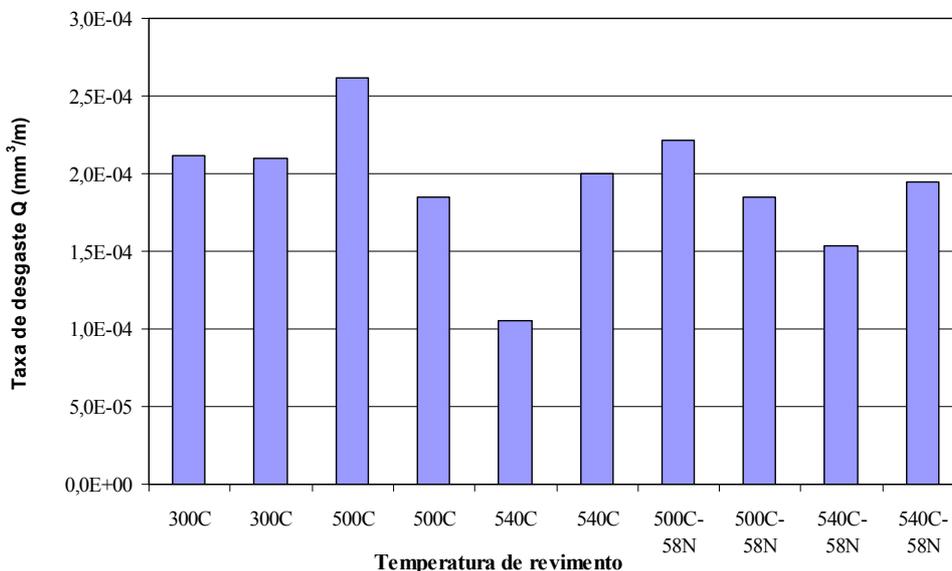
Na Figura 5 apresentam-se um gráfico comparativo das taxas de desgaste média dos discos de VF800AT com tratamento de tempera e duplo revenidos. Na Tabela 4, mostra-se o resumo dos valores medidos experimentalmente da dureza, taxa de desgaste e coeficiente de desgaste dos discos. A taxa de desgaste média dos discos com tratamento térmico é da ordem 10 vezes inferior aos discos sem tratamento térmico. A menor taxa de desgaste média observado foi de  $1,5 \times 10^{-4}$  mm<sup>3</sup>/m e refere-se ao disco temperado e revenido duplo a 540 °C. Porém, os discos

com revenido duplo a 500°C apresentaram mesma dureza do revenido duplo a 540°C, mas a taxa de desgaste média foi de  $2,2 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{m}$ .

Da análise dos gráficos de volume perdido versus distância percorrida observa-se que a maior taxa de desgaste, ou seja menor resistência ao desgaste, foram os discos sem tratamento térmico: dureza 15,4 HRC (mHV 270,8 Kgf/mm<sup>2</sup>), taxa de desgaste de aproximadamente  $Q = 13,0 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{m}$  e coeficiente de desgaste  $K = 6,90 \times 10^{-5}$ .

Os resultados vistos nas Figuras 6 e 7 referem-se aos valores da perda de volume cumulativo dos discos de VF800AT com as diferentes temperaturas de revenido e cargas normais de 50 N e de 58 N contra esfera de metal duro: volume perdido do disco versus distância percorrida pela esfera. A taxa de desgaste é aproximadamente constante na segunda fase após os primeiros 150 m ou fase de rodagem inicial. As curvas estão próximas e paralelas na segunda fase, indicando mesma taxa de desgaste média geral de  $1,9 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{m}$ , mas cada disco tem uma taxa inicial de desgaste diferente. Portanto, o coeficiente de desgaste e a taxa de desgaste do aço VF800AT dependem do tratamento térmico, isto é da temperatura do revenido e não somente da sua dureza. Portanto, o tratamento térmico também deve ser escolhido de modo a otimizar a resistência ao desgaste.

Nas Figuras 8 e 9 apresentam-se os resultados experimentais das durezas HRC obtidas e as correspondentes taxas de desgaste e coeficiente de desgaste do aço ferramenta VF800AT contra esfera de metal duro e cargas de 50 N e 58 N. Arbitrou-se a temperatura de revenimento de 800°C para o material como recebido, sem tratamento térmico. As curvas de dureza e taxa de desgaste versus temperatura de revenimento do aço ferramenta VF800AT seguem tendências opostas. Nota-se um mínimo na taxa de desgaste e no coeficiente de desgaste para o revenimento a 540°C. Entretanto, o mínimo poderá estar próximo a 600°C.



**Figura 5** -Comparativo da taxa de desgaste em função da temperatura de revenido dos discos VF800.

**Tabela 4.** Resumo dos valores de dureza, taxa de desgaste e coeficiente de desgaste dos discos.

Disco-VF800AT	Taxa de Desgaste média Q (mm <sup>3</sup> /m)	micro-dureza Vickers média (mHV0,3) (Kgf/mm <sup>2</sup> )	Dureza HRC média (medida direta)	Coeficiente de desgaste K
Disco 5-a - s/ trat. - 50N	13,00 x10 <sup>-4</sup>	270,8	15,4	6,90 x10 <sup>-5</sup>
Disco 5-b -s/ trat. - 50N	10,40 x10 <sup>-4</sup>	263,6	15,8	5,37 x10 <sup>-5</sup>
Disco 1-a - 300C - 50N	2,12 x10 <sup>-4</sup>	703,8	59,3	2,92 x10 <sup>-5</sup>
Disco 1-b - 300C - 50N	2,10 x10 <sup>-4</sup>	725,5	59,6	2,99 x10 <sup>-5</sup>
Disco 3-c - 500C - 50N	2,62 x10 <sup>-4</sup>	628,7	63,5	3,23 x10 <sup>-5</sup>
Disco 3-d - 500C - 50N	1,85 x10 <sup>-4</sup>	838,7	63,4	3,04 x10 <sup>-5</sup>
Disco 3-a - 500C - 58N	2,21 x10 <sup>-4</sup>	830,5	63,6	3,10 x10 <sup>-5</sup>
Disco 3-b - 500C - 58N	1,85 x10 <sup>-4</sup>	695,5	63,9	2,18 x10 <sup>-5</sup>
Disco 4-c - 540C - 50N	1,05 x10 <sup>-4</sup>	803,8	63,4	1,65 x10 <sup>-5</sup>
Disco 4-d - 540C - 50N	2,00 x10 <sup>-4</sup>	821,1	63,5	3,22 x10 <sup>-5</sup>
Disco 4-a - 540C - 58N	1,54 x10 <sup>-4</sup>	832,4	63,4	2,17 x10 <sup>-5</sup>
Disco 4-b - 540C - 58N	1,95 x10 <sup>-4</sup>	819,1	63,2	2,70 x10 <sup>-5</sup>

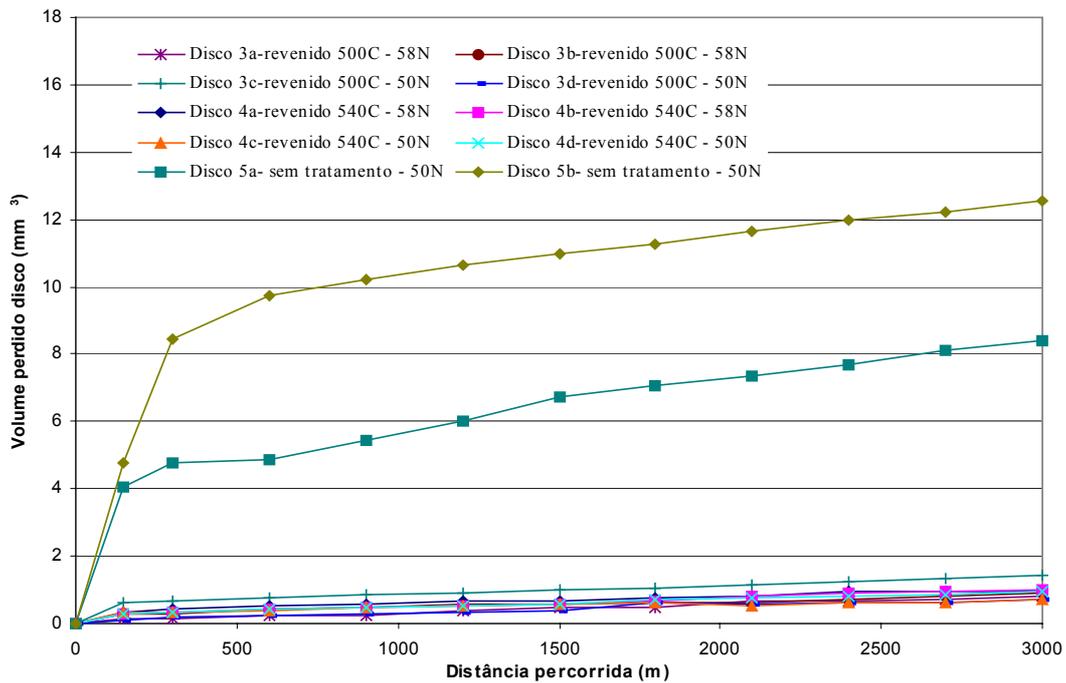
Nas Figuras 10 e 11 apresentam-se os resultados experimentais da perda de volume da esfera de metal duro. A taxa de desgaste da esfera variou razoavelmente devido as diferentes resistências ao desgaste dos discos. A curva da taxa de desgaste também tem duas fases distintas: fase inicial ou de rodagem inicial até os primeiros 300 m e a segunda fase de taxa de desgaste constante. As curvas são aproximadamente paralelas após os 300 m, indicando mesma taxa de desgaste média geral de  $0,23 \times 10^{-4}$  mm<sup>3</sup>/m, mas cada disco tem uma taxa inicial de desgaste diferente. Ou seja, a taxa de desgaste da esfera de metal duro é dez vezes menor que a taxa de desgaste do disco de aço VF800AT temperado e revenido.

Na Figura 11 mostram-se a evolução do diâmetro maior da área de desgaste na ponta das esferas. Tendo em vista a necessidade de um método alternativo de se medir o desgaste da esfera, devido a dispersão dos resultados de perda de massa da esfera, investigou-se também como o diâmetro da área desgastada na ponta da esfera evoluiu e se existe uma relação com o volume perdido da esfera, conforme trabalho já apresentado anteriormente.<sup>(7)</sup> A área de desgaste era elíptica, medindo-se os diâmetros maior e menor da elipse. As curvas são aproximadamente lineares e paralelas, exceto a fase inicial de rodagem onde se verificam os aplainamentos dos picos de rugosidades e quebra do filme de óxido. A curva do diâmetro de desgaste na distancia percorrida é menor quando utilizado os discos com tratamento térmico. O maior diâmetro de desgaste ocorreu para discos sem tratamento térmico que possuem a menor dureza, como esperado. Porém, o pino é o material de maior dureza, ou seja, a equação (1) de Archad deve ser reescrita, substituindo-se a dureza H por uma dureza equivalente  $H_e$  ( $1/H_e = 1/H_{disco} + 1/H_{esfera}$ ).

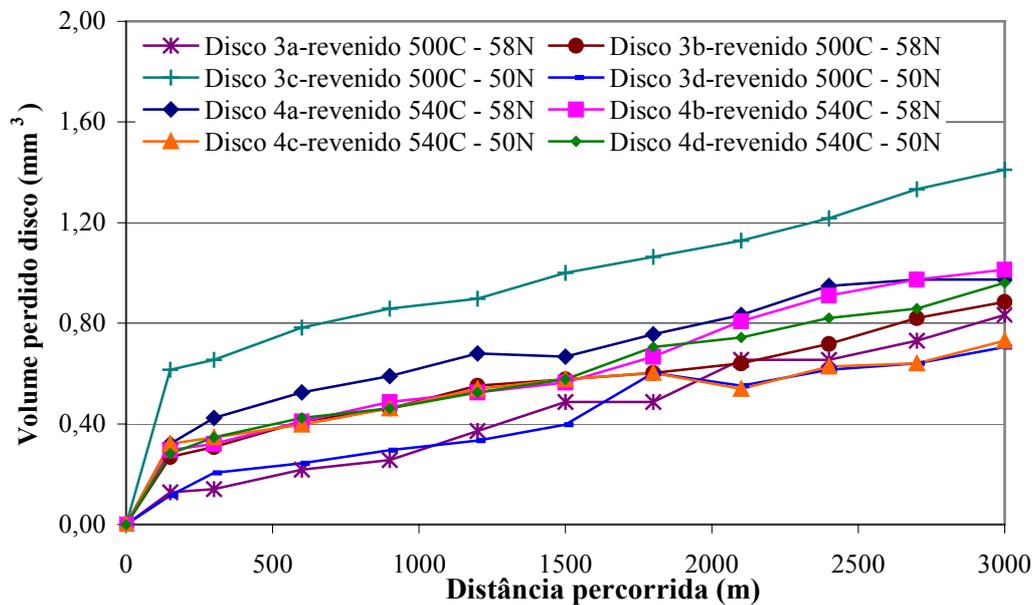
A esfera de metal duro de dureza 1925 mHV0,3 teve uma taxa de desgaste 10 vezes menor que o aço VF800AT temperado e revenido. Portanto, é um material adequado para o ensaio de desgaste esfera-sobre-disco. Um método alternativo de se medir o desgaste da esfera é medir o diâmetro maior da área desgastada na ponta do pino. A evolução do diâmetro é linear com a distância de deslizamento e é inversamente proporcional a dureza da esfera.

No caso dos discos de aço VF800AT, observou-se que a taxa de desgaste depende da dureza e é aproximadamente linear e constante até o final na segunda fase do desgaste. Na fase inicial ou de rodagem inicial, primeiros 300 m, a taxa é elevada. Isto é devido possivelmente ao processo de rompimento dos picos de

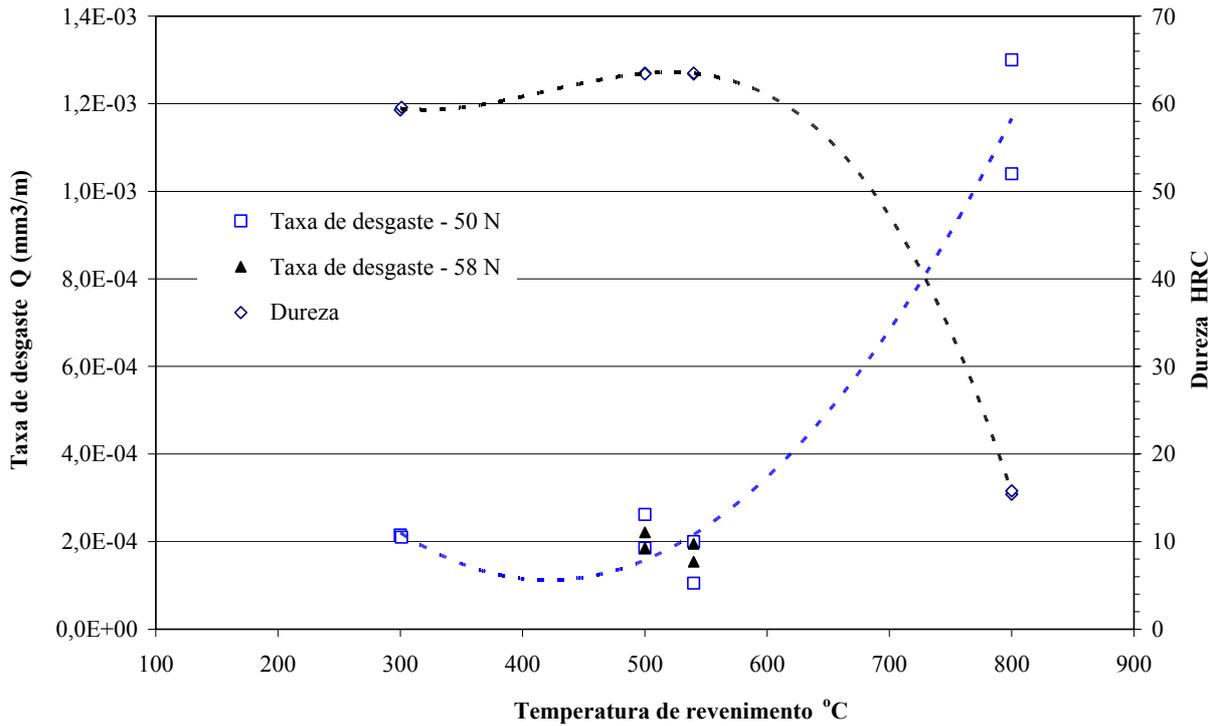
rugosidades da superfície do disco, quebra do filme de óxido e também devido a menor pressão de contato esfera-disco e formação do sulco na pista de desgaste.



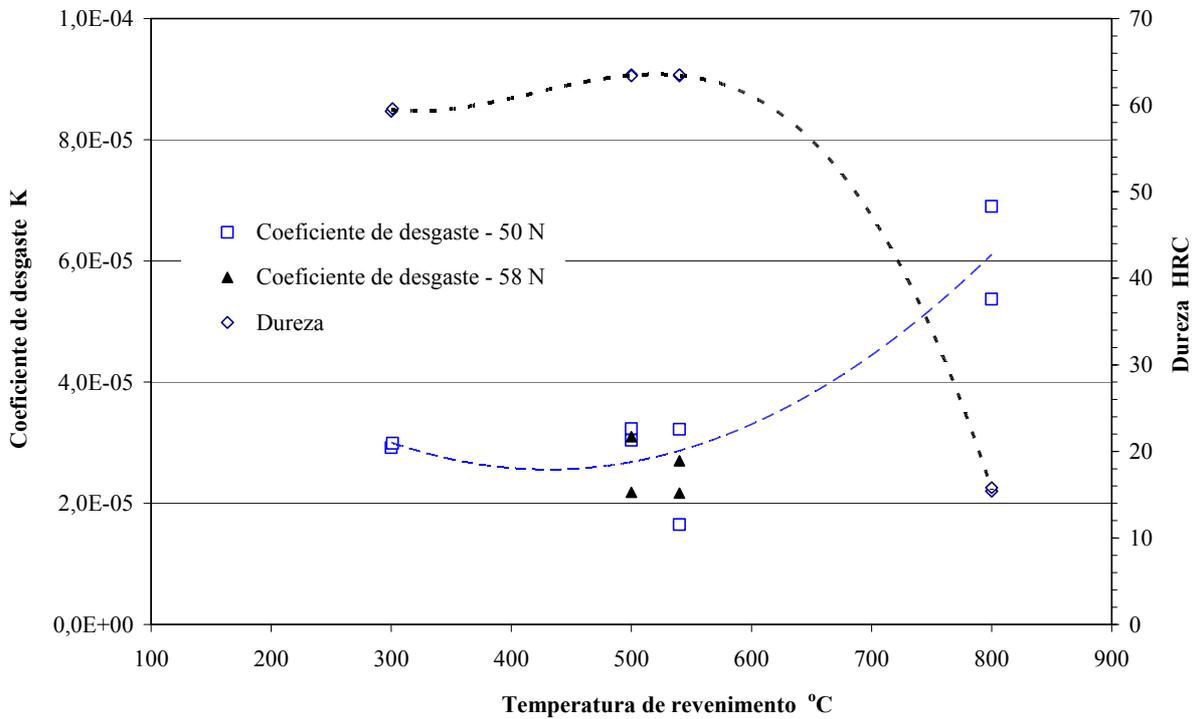
**Figura 6** - Volume cumulativo perdido dos discos de VF800AT sem e com tratamento térmico versus distância percorrida pela esfera de metal duro. Cargas normais de 50 N e 58 N.



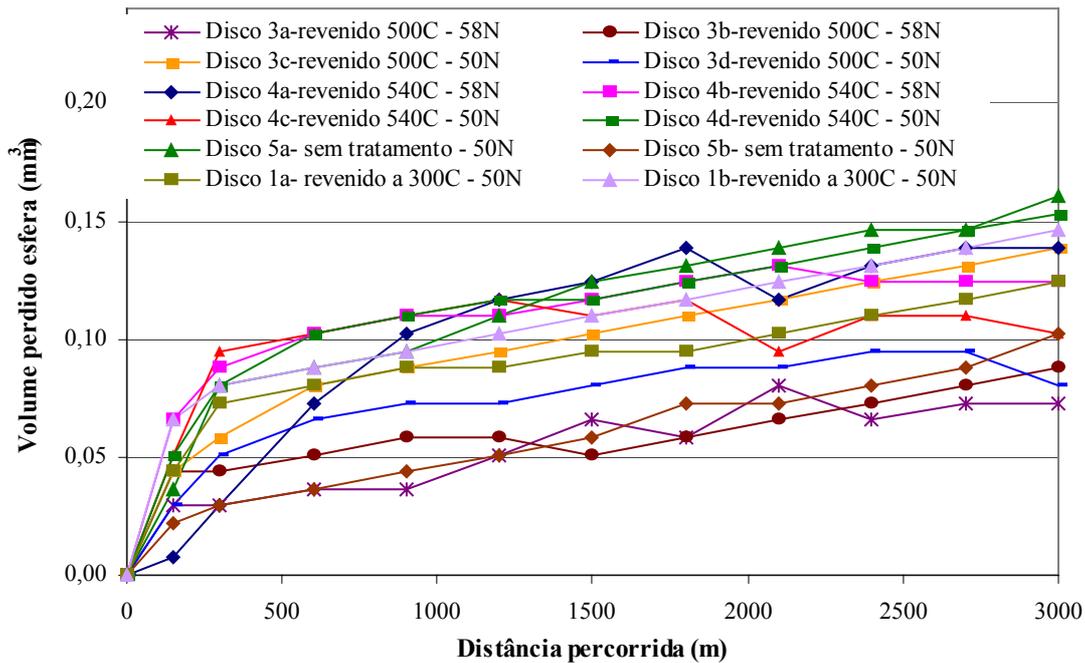
**Figura 7** – Volume cumulativo perdido dos discos de VF800AT temperado e revenido versus distância percorrida contra esfera de metal duro. Cargas normais de 50 N e 58 N.



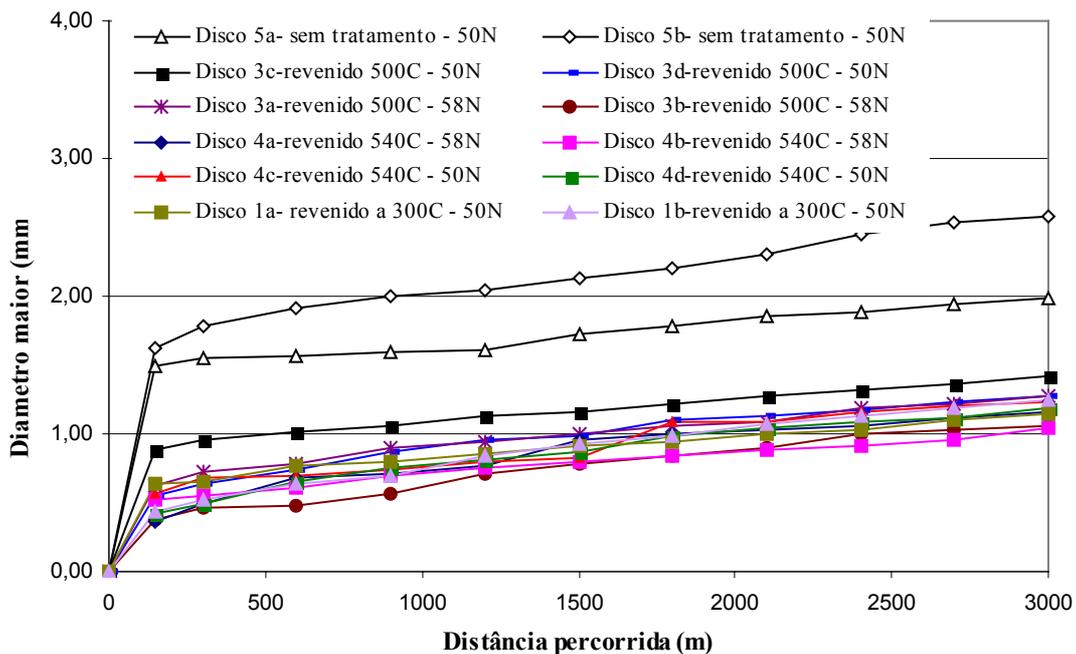
**Figura 8.** Curvas de dureza e taxa de desgaste versus temperatura de revenimento do aço ferramenta VF800AT. Ensaio de desgaste com cargas normais de 50N e 58 N.



**Figura 9.** Curvas de dureza e coeficiente de desgaste versus temperatura de revenimento do aço ferramenta VF800AT. Ensaio de desgaste com cargas normais de 50 N e 58 N.



**Figura 10** - Volume cumulativo perdido da esfera de metal duro versus distância percorrida contra disco de VF800AT. Ensaio de desgaste com cargas normais de 50 N e 58 N.



**Figura 11** - Diâmetro maior da área de desgaste da esfera de metal duro versus distância percorrida contra disco de VF800AT. Ensaio de desgaste com cargas normais de 50 N e 58 N.

#### 4 CONCLUSÕES

Da análise dos gráficos das curvas de dureza e taxa de desgaste versus temperatura de revenimento do aço ferramenta VF800AT, nota-se que as curvas seguem tendências opostas. Observa-se um mínimo na taxa de desgaste e no coeficiente de desgaste para o revenimento duplo a 540°C. Portanto, o melhor tratamento térmico em relação a resistência ao desgaste foi obtido com duplo revenido a 540°C, dando a dureza média final 63,5 HRC (812 mHV), taxa média de

desgaste  $Q = 1,5 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{m}$  e coeficiente médio de desgaste  $K = 2,42 \times 10^{-5}$ . Porém, o mínimo poderá estar próximo a  $600^\circ\text{C}$ . Outros ensaios são necessários.

Como os discos com duplo revenidos a  $500^\circ\text{C}$  e  $540^\circ\text{C}$  tem dureza muito próximas de 63,5 HRC, a diferença na resistência ao desgaste é devido possivelmente aos mecanismos de desgaste por micro-lascamento e adesão do aço VF800AT. Uma outra explicação possível para a maior resistência ao desgaste do aço revenido a  $540^\circ\text{C}$  é sua maior tenacidade em função do tratamento de revenido. Menor tenacidade favorece os mecanismos de micro-tricamento e micro-lascamento presentes no desgaste por deslizamento no ensaio esfera-sobre-disco, aumentando a taxa de remoção. A ocorrência de trincas superficiais devido ao choque térmico na tempera também pode ter influenciado a resistência ao desgaste. Portanto, o tratamento térmico deve ser adequado para otimizar a resistência ao desgaste.

O coeficiente de atrito inicial foi  $\mu = 0,15$  com carga 50 N, possivelmente antes da quebra do filme de óxido do disco de VF800AT, mas o atrito médio foi de  $\mu = 0,70$ .

Finalizando, no caso específico do aço VF800AT, o tratamento térmico que otimiza a resistência ao desgaste é tempera e revenimento duplo a  $540^\circ\text{C}$ , propiciando maior desempenho em ferramentas de corte e conformação a frio de chapas metálicas.

## **Agradecimentos**

Os autores gostariam de agradecer o suporte financeiro recebido do CNPq na forma de auxílio e bolsas de pesquisa, também da FAPESC, da Universidade do Estado de Santa Catarina-UDESC e da Villares Metals pelo material do disco doado.

## **REFERÊNCIAS**

- 1 ASM HANDBOOK, Forming and Forging. ASM International, V.14, p. 483, 1988.
- 2 MESQUITA, R.A.; Andrijauskas, P.S.; França, L.C.; Abreu, D.Q. e Barbosa, C.A., Um novo aço para trabalho a frio de alta tenacidade-VF800AT. In: IV Conferência Nacional de Conformação de Chapas, Gramado/RS, outubro/2001, p.72-79.
- 3 MESQUITA, R.A.; Leiva, D.R. e Barbosa, C.A., Estudos de tratamento térmico nos aços ferramenta VH13ISO e VF800AT. In: 3º Encontro da Cadeia de Ferramentas, Moldes e Matrizes, São Paulo, Brasil, 10 a 12 de Agosto, 2005.
- 4 HUTCHINGS, I.M. Tribology: Friction and wear of engineering materials. Arnold, 1995.
- 5 BRESSAN, J.D. e Hesse, R., Construction and validation tests of a pin-on-disc equipment. In: XVI Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, COBEM 2001, Uberlândia/MG, dezembro/2001.
- 6 ASTM, Designation: G99-95; Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus, p. 336-390, 1995.
- 7 BRESSAN, J.D.; Gilapa, L.C.M.; Paganini, D. e Mesquita, R.A., Nova metodologia para medir resistência ao desgaste no ensaio pino-sobre-disco. In: 3º Encontro da Cadeia Produtiva de Ferramentas, Moldes e Matrizes. 28 a 30 de Outubro. São Paulo, S.P.. 2005.