

Wander Gomes da Silva

**OBTENÇÃO DE AUSTENITA RETIDA
E SEU EFEITO NO DESGASTE POR
FADIGA DO AÇO DIN 100 Cr 6**

Trabalho de Formatura apresentado à
Escola Politécnica da Universidade de
São Paulo para a conclusão do curso de
graduação em Engenharia Metalúrgica.

São Paulo
1996

Wander Gomes da Silva
Aluno do Curso de Graduação em Engenharia Metalúrgica

**Obtenção de Austenita Retida e Seu Efeito no Desgaste por
Fadiga do Aço DIN 100 Cr 6**

Trabalho de Formatura referente à disciplina PMT-594 do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

Orientador: Prof. Dr. Hélio Goldenstein.
Professor Doutor do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

São Paulo
1996

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Hélio Goldenstein, pela orientação e o interesse por este trabalho.

Ao Engº. Ricardo Strangis Cumino pelo apoio e incentivo constantes.

À ROLAMENTOS SCHAEFFLER DO BRASIL pela disposição do material, equipamentos e instalações para a execução dos ensaios.

À ROBERT BOSCH LTDA pela execução de medições em seu equipamento de Difração de Raio-X.

RESUMO

Foi aqui estudada a obtenção de diferentes níveis de austenita retida e sua influência na resistência ao desgaste de pistas de rolamentos produzidos a partir do aço DIN 100 Cr 6. Para tanto foram utilizados como corpos-de-prova rolamentos de bomba d'água, normalmente produzidos pela industria. Os rolamentos são compostos por um eixo e esferas (feitos com o aço AISI 52100), que tiveram tratamentos térmicos convencionais; e por um anel externo (DIN 100 Cr 6), que foi escolhido como o componente de estudo, ou seja, vários anéis externos foram submetidos a diferentes tratamentos térmicos de austenitização para que se fossem obtidos níveis distintos de austenita retida.

Após a etapa dos tratamentos térmicos, os rolamentos foram montados e realizou-se então ensaios de desgaste, onde os rolamentos eram postos em giro, sob a ação de uma carga radial, de modo a favorecer o processo de fadiga, responsável pela causa do desgaste em rolamentos.

Determinou-se o efeito da temperatura e tempo de austenitização na formação de austenita retida, e pela avaliação do desgaste por medição do nível de ruído, foram comparados os diversos tratamentos a fim de se determinar a inflênciia que a austenita não trasformada pela têmpora pode ter na vida útil de um rolamento.

Todos os tratamentos térmicos foram avaliados através de análise metalográfica e medição de dureza. Os níveis de austenita retida foram determinados por difração de Raio-X.

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS	3
RESUMO	6
1 - INTRODUÇÃO	7
1.1 - Generalidades	7
1.2 - Tipos de Desgaste	7
1.2.1 - Desgaste Abrasivo	8
1.2.2 - Desgaste Adesivo	8
1.2.3 - Corrosão/Desgaste	9
1.2.4 - Fadiga de Superfície ou de Contato	9
1.2.5 - Fretting	11
1.2.6 - Desgaste Lubrificado	12
1.3 - Fadiga	12
1.4 - Rolamentos: Algumas Características	14
1.4.1 - Aspectos Gerais	14
1.4.2 - Desgaste	15
1.5 - Tratamentos Térmicos - Propriedades Metalúrgicas do aço DIN 100 Cr 6	17
1.6 - Microconstituintes do DIN 100 Cr 6 Temperado e Revenido	19
2 - OBJETIVOS	20
3 - MATERIAIS E MÉTODOS	20

3.1 - Material	20
3.2 - Tratamentos Térmicos	22
3.3 - Análise Metalográfica	24
3.4 - Ensaios de Desgaste	25
4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO	26
4.1 - Tratamentos Térmicos Realizados	26
4.1.1 - Micrografias	26
4.1.2 - Discussão	40
4.2 - Medição de Dureza	41
4.2.1 - Dados Obtidos	41
4.2.2 - Discussão	44
4.3 - Medição do Nível de Austenita Retida	45
4.3.1 - Dados Obtidos	45
4.3.2 - Discussão	48
4.4 - Desgaste	48
4.4.1 - Resultados Obtidos	48
4.4.2 - Discussão	52
5 - CONCLUSÕES	53
6 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	55
APÊNDICE	57

ÍNDICE DE FIGURAS

<p>Figura 1: Tensões alternadas de cisalhamento resultantes do esforço de contato no rolamento⁽⁵⁾.</p> <p>Figura 2: Aspecto de <i>pitting</i> em pista de rolamento de esferas.</p> <p>Figura 3: Componentes da bomba d'água. No detalhe o conjunto montado.</p> <p>Figura 4: Micrografia do aço DIN 100 Cr 6 como recebido: carbonetos coalescidos em matriz ferrítica. Ataque Nital. 1400 x.</p> <p>Figura 5: Esquema do equipamento utilizado para o ensaio de desgaste. Vista Lateral.</p> <p>Figura 6: Esquema mostrando a direção da força aplicada ao rolamento. Vista Frontal.</p> <p>Figura 7: Micrografia do aço DIN 100 Cr 6 temperado e revenido. Amostra A1 Austenitização: 803 °C por 30 min. Ataque Nital. 1400 x.</p> <p>Figura 8: Micrografia do aço DIN 100 Cr 6 temperado e revenido. Amostra A2 Austenitização: 830 °C por 30 min. Ataque Nital. 1400 x.</p> <p>Figura 9: Micrografia do aço DIN 100 Cr 6 temperado e revenido. Amostra A3 Austenitização: 872 °C por 30 min. Ataque Nital. 1400 x.</p> <p>Figura 10: Micrografia do aço DIN 100 Cr 6 temperado e revenido. Amostra A4 Austenitização: 904 °C por 30 min. Ataque Nital. 1400 x.</p> <p>Figura 11: Micrografia do aço DIN 100 Cr 6 temperado e revenido. Amostra A5 Austenitização: 912 °C por 30 min. Ataque Nital. 1400 x.</p> <p>Figura 12: Micrografia do aço DIN 100 Cr 6 temperado e revenido. Amostra A6 Austenitização: 938 °C por 30 min. Ataque Nital. 1400 x.</p> <p>Figura 13: Micrografia do aço DIN 100 Cr 6 temperado e revenido. Amostra A7 Austenitização: 965 °C por 30 min. Ataque Nital. 1400 x.</p> <p>Figura 14: Micrografia do aço DIN 100 Cr 6 temperado e revenido. Amostra A8 Austenitização: 1020 °C por 30 min. Ataque Nital. 1400 x.</p> <p>Figura 15: Micrografia do aço DIN 100 Cr 6 temperado e revenido. Amostra B1 Austenitização: 792 °C por 45 min. Ataque Nital. 1400 x.</p> <p>Figura 16: Micrografia do aço DIN 100 Cr 6 temperado e revenido. Amostra B2 Austenitização: 820 °C por 45 min. Ataque Nital. 1400 x.</p>	<p>10</p> <p>11</p> <p>21</p> <p>22</p> <p>25</p> <p>26</p> <p>27</p> <p>27</p> <p>28</p> <p>28</p> <p>29</p> <p>29</p> <p>30</p> <p>30</p> <p>31</p> <p>31</p>
---	---

Figura 17: Micrografia do aço DIN 100 Cr 6 temperado e revenido. Amostra B3 Austenitização: 849 °C por 45 min. Ataque Nital. 1400 x.	32
Figura 18: Micrografia do aço DIN 100 Cr 6 temperado e revenido. Amostra B4 Austenitização: 922 °C por 45 min. Ataque Nital. 1400 x.	32
Figura 19: Micrografia do aço DIN 100 Cr 6 temperado e revenido. Amostra B5 Austenitização: 949 °C por 45 min. Ataque Nital. 1400 x.	33
Figura 20: Micrografia do aço DIN 100 Cr 6 temperado e revenido. Amostra B6 Austenitização: 1020 °C por 45 min. Ataque Nital. 1400 x.	33
Figura 21: Micrografia do aço DIN 100 Cr 6 temperado e revenido. Amostra C1 Austenitização: 782 °C por 60 min. Ataque Nital. 1400 x.	34
Figura 22: Micrografia do aço DIN 100 Cr 6 temperado e revenido. Amostra C2 Austenitização: 803 °C por 60 min. Ataque Nital. 1400 x.	34
Figura 23: Micrografia do aço DIN 100 Cr 6 temperado e revenido. Amostra C3 Austenitização: 854 °C por 60 min. Ataque Nital. 1400 x.	35
Figura 24: Micrografia do aço DIN 100 Cr 6 temperado e revenido. Amostra C4 Austenitização: 880 °C por 60 min. Ataque Nital. 1400 x.	35
Figura 25: Micrografia do aço DIN 100 Cr 6 temperado e revenido. Amostra C5 Austenitização: 934 °C por 60 min. Ataque Nital. 1400 x.	36
Figura 26: Micrografia do aço DIN 100 Cr 6 temperado e revenido. Amostra C6 Austenitização: 1000 °C por 60 min. Ataque Nital. 1400 x.	36
Figura 27: Micrografia do aço DIN 100 Cr 6 temperado e revenido. Amostra C7 Austenitização: 1020 °C por 60 min. Ataque Nital. 1400 x.	37
Figura 28: Micrografia do aço DIN 100 Cr 6 temperado e revenido. Amostra D1 Austenitização: 785 °C por 90 min. Ataque Nital. 1400 x.	37
Figura 29: Micrografia do aço DIN 100 Cr 6 temperado e revenido. Amostra D2 Austenitização: 828 °C por 90 min. Ataque Nital. 1400 x.	38
Figura 30: Micrografia do aço DIN 100 Cr 6 temperado e revenido. Amostra D3 Austenitização: 863 °C por 90 min. Ataque Nital. 1400 x.	38
Figura 31: Micrografia do aço DIN 100 Cr 6 temperado e revenido. Amostra D4 Austenitização: 970 °C por 90 min. Ataque Nital. 1400 x.	39
Figura 32: Micrografia do aço DIN 100 Cr 6 temperado e revenido. Amostra D5 Austenitização: 1000 °C por 90 min. Ataque Nital. 1400 x.	39

Figura 33: Porcentagem de carbonetos dissolvidos em função da temperatura e do tempo de austenitização para o aço AISI 52100 ⁽²⁰⁾ .	40
Figura 34: Dureza x Temperatura - Austenitização por 30 minutos.	41
Figura 35: Dureza x Temperatura - Austenitização por 45 minutos.	42
Figura 36: Dureza x Temperatura - Austenitização por 60 minutos.	42
Figura 37: Dureza x Temperatura - Austenitização por 90 minutos.	43
Figura 38: γ_{retida} x Temperatura - Série A.	46
Figura 39: γ_{retida} x Temperatura - Série B.	46
Figura 40: γ_{retida} x Temperatura - Série C.	47
Figura 41: γ_{retida} x Temperatura - Série D.	47
Figura 42: γ_{retida} x Ruído. A curva de ajuste refere-se aos dados após desgaste. Série A	49
Figura 43: γ_{retida} x Ruído. A curva de ajuste refere-se aos dados após desgaste. Série B	49
Figura 44: γ_{retida} x Ruído. A curva de ajuste refere-se aos dados após desgaste. Série C	50
Figura 45: γ_{retida} x Ruído. A curva de ajuste refere-se aos dados após desgaste. Série D	51
Figura 46: γ_{retida} x Ruído. Todas as amostras. Tabela de valores no Apêndice.	51

RESUMO

Foi aqui estudada a obtenção de diferentes níveis de austenita retida e sua influência na resistência ao desgaste de pistas de rolamentos produzidos a partir do aço DIN 100 Cr 6. Para tanto foram utilizados como corpos-de-prova rolamentos de bomba d'água, normalmente produzidos pela industria. Os rolamentos são compostos por um eixo e esferas (feitos com o aço AISI 52100), que tiveram tratamentos térmicos convencionais; e por um anel externo (DIN 100 Cr 6), que foi escolhido como o componente de estudo, ou seja, vários anéis externos foram submetidos a diferentes tratamentos térmicos de austenitização para que se fossem obtidos níveis distintos de austenita retida.

Após a etapa dos tratamentos térmicos, os rolamentos foram montados e realizou-se então ensaios de desgaste, onde os rolamentos eram postos em giro, sob a ação de uma carga radial, de modo a favorecer o processo de fadiga, responsável pela causa do desgaste em rolamentos.

Determinou-se o efeito da temperatura e tempo de austenitização na formação de austenita retida, e pela avaliação do desgaste por medição do nível de ruído, foram comparados os diversos tratamentos a fim de se determinar a influência que a austenita não transformada pela têmpera pode ter na vida útil de um rolamento.

Todos os tratamentos térmicos foram avaliados através de análise metalográfica e medição de dureza. Os níveis de austenita retida foram determinados por difração de Raio-X.

1 - Introdução

1.1 - Generalidades

Existe atualmente uma grande preocupação na otimização de produtos e/ou processos de modo a que se reduzam custos. O desenvolvimento de tecnologia decorrente de pesquisas contribui decisivamente para que haja melhoria nos sistemas de produção. Componentes mecânicos podem ter um custo de manutenção bastante elevado em função do desgaste a que estão submetidos⁽¹⁾. Para a análise do projeto de processos ou materiais é etapa fundamental a seleção de ensaios que melhor possam modelar e simular as condições tribológicas na prática. Existem ensaios de campo que utilizam diretamente o componente; e ensaios de laboratório, onde normalmente, testa-se o material. Os ensaios de campo, em geral envolvem custos mais altos, ao passo que os de laboratório podem apresentar problemas quanto a reprodutibilidade de condições e transferibilidade de resultados para a prática.

1.2 - Tipos de Desgaste

Existem várias definições normalizadas para o termo *desgaste* (DIN - ASTM); Rotondaro resumiu-as em: *alteração indesejável e usualmente gradual da superfície de uma peça como consequência de uma ação mecânica*⁽²⁾. Podemos ampliar este conceito para o caso de surgimento de trincas (ou microtrincas) decorrentes também de processos mecânicos.

O desgaste de um componente mecânico pode ter diversas causas e se manifestar por diversos mecanismos, dependendo da solicitação, das condições de trabalho, dos materiais envolvidos. Os principais processos, ou tipos de desgaste são listados a seguir.

1.2.1 - Desgaste Abrasivo

A resistência ao desgaste por abrasão não é propriedade intrínseca do material e sim depende do sistema tribológico. O desgaste abrasivo pode se apresentar principalmente através do microsulcamento ou microcortes, além de microtrincas ou microfadiga. Isso é função da deformação plástica que ocorrerá durante a penetração de uma partícula abrasiva.

O desgaste abrasivo pode ocorrer pela perda de material de uma superfície quando atritada com outra de maior dureza ou quando existe partículas duras com movimento relativo a duas superfícies atritantes, gerando maior remoção de material naquela de menor dureza.

A resistência à abrasão é aumentada de maneira significativa quando o material apresenta dureza maior do que o abrasivo. Além disso, o desgaste abrasivo tem sido minimizado através da melhora no acabamento das superfícies, assim como pelo controle na rugosidade dos componentes^(3,4).

1.2.2 - Desgaste por Adesão

O tipo de desgaste adesivo tem como base a teoria da adesão para atrito. Quando duas superfícies são colocadas juntas sob ação de uma carga normal de compressão, estas podem aderir em algumas regiões de suas áreas reais de contato, formando junções. Essas junções devem ser quebradas para a realização do deslizamento entre as superfícies. A quebra ocorrerá na parte mais fraca da junção, que pode ser tanto na interface original como no material de menor resistência ou tenacidade.

Sabe-se que a área real de contato entre duas superfícies (microscopicamente) é muito menor do que a área aparente (macroscopicamente) sendo que, na realidade, uma quantidade relativamente pequena de protuberâncias chegam a interagir⁽³⁾. Ao se aplicar uma carga normal estaticamente, a pressão local nessas protuberâncias torna-se bastante elevada, excedendo até, o limite de escoamento do material e provocando deformação plástica; a área real de contato começa a aumentar até que possa suportar uma carregamento elástico. Neste processo as protuberâncias podem aderir, e caso a resistência das *soldas* formadas seja alta, poderá ocorrer deformação

plástica dentro de um dos materiais (ou ambos). A ruptura na região de adesão transfere material de uma superfície a outra. Não há a geração instantânea de uma partícula, mas em movimentos relativos subsequentes, poderá haver o desprendimento dessa pequena porção de material, originando uma partícula que pode ser inclusive fonte de um processo de desgaste abrasivo.

1.2.3 - Corrosão/Desgaste

É um tipo de desgaste no qual uma reação química, ou eletroquímica com o meio contribui para o aumento da taxa de desgaste. Em alguns casos, as reações químicas ocorrem primeiramente em uma ou ambas as superfícies atritantes. Os produtos de reação são geralmente de fraca adesão, facilitando sua remoção pela ação mecânica (abrasão), que eventualmente pode preceder a reação química, resultando na formação de pequenos fragmentos que reagem subsequentemente com o meio ambiente^(3,4). Um bom exemplo de desgaste corrosivo é o ocasionado em motores de combustão interna, principalmente os mais antigos, que trabalhavam em temperatura relativamente baixas, onde era maior a condensação de produtos resultantes da combustão, de alta ação corrosiva. Para maiores temperaturas de trabalho de um motor, menor será a condensação, minimizando a componente de desgaste corrosivo.

1.2.4 - Fadiga de Superfície ou de Contato

Peças submetidas a esforços de contato em rolamento, com ou sem escorregamento, podem desenvolver de falhas na superfície, conhecidas como *pitting* e *spalling*, que são manifestações de fadiga devido a tensões cíclicas resultantes do esforço de contato. Engrenagens, mancais de rolamento (de esferas, cilindros ou agulhas), cilindros de laminação são peças sujeitas a este tipo de desgaste.

No processo de fadiga de contato as tensões significativas são as tensões de cisalhamento máximas que alternam em sentido durante o rolamento, conforme mostra o seguinte esquema:

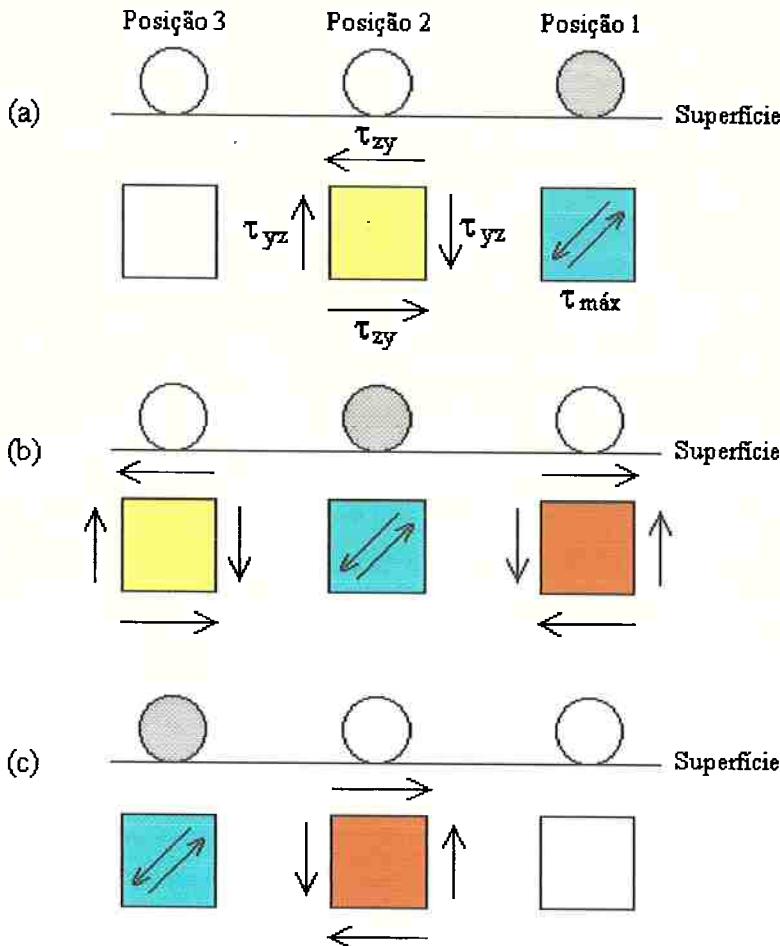


Figura 1: Tensões alternadas de cisalhamento resultantes do esforço de contato no rolamento⁽⁵⁾.

Em rolamento puro (sem escorregamento) essas máximas tensões de cisalhamento ocorrem num plano abaixo da superfície e dão início ao processo de fadiga nucleando uma trinca subsuperficialmente; a propagação destas trincas pode resultar em trincamentos secundários, que atingem a superfície, caracterizando o desgaste. Em rolamento acompanhado de escorregamento, as forças tangenciais e o aquecimento resultante do atrito provocam alterações na grandeza e localização das tensões: as máximas tensões de cisalhamento aumentam de valor e se localizam junto à superfície. A trinca é então iniciada nesta e se propaga para o interior da peça.

Em rolamento com escorregamento, a fadiga de contato normalmente ocorre na região ou componente com escorregamento negativo, ou seja, quando o sentido de escorregamento é oposto ao de rolamento. Deve-se entender por sentido de escorregamento àquele em que atua a força de atrito; e sentido de rolamento ao sentido em que o ponto de contato se desloca. Um exemplo onde pode haver escorregamento

negativo (e portanto maior é a possibilidade de ocorrência de fadiga de contato) é o cilindro com menor velocidade periférica no contato entre dois cilindros.



Figura 2: Aspecto de *pitting* em pista de rolamento de esferas.

1.2.5 - Fretting

Outro fenômeno característico de processo de fadiga de superfície é o *fretting* que ocorre em superfícies de contato que não deveriam ter movimentos relativos, mas que em função de falhas de montagem, vibração, etc., apresentam micro-movimentos de escorregamento.

Apesar de alguns processos desse mecanismo de desgaste ainda não serem entendidos, acredita-se que ele se inicia pela *solda* e arrancamento de pequenas partículas das superfícies em contato (como no desgaste adesivo), partículas estas que se oxidam e funcionam como abrasivo (desgaste abrasivo) que riscalha as superfícies, dando origem, nestes riscos, a trincas de fadiga.

O processo de fretting pode ser reconhecido através de duas características, além da possibilidade de movimento relativo entre as superfícies: observam-se várias trincas de fadiga paralelas, uma delas se propagando e causando a eventual ruptura; a localização das trincas é interior às superfícies em contato e não na periferia, onde deveriam ser esperadas, devido às concentrações de tensões e/ou tensões residuais de tração resultantes da montagem.

1.2.6 - Desgaste Lubrificado

Fluidos lubrificantes tem três importantes efeitos na redução de atrito e desgaste (abrasivo/adesivo) de superfícies em deslizamento:

- fornecem um filme de baixa resistência ao cisalhamento entre as superfícies, desta maneira aliviando os defeitos da adesão;
- resfriam as superfícies, pelo efeito da redução do atrito, removendo calor por convecção. Com isto reduzem os efeitos térmicos prejudiciais como o amolecimento da superfície;
- em sistemas recirculantes, o lubrificante carrega muitos ou todos os produtos de desgaste para fora da interface, reduzindo a abrasão da superfície por partículas enruadas ou oxidadas.

Desgaste adesivo e abrasivo dependem do contato direto sólido-sólido e esse processos operam por fricção. Entretanto, se as superfícies em movimento puderem ser separadas por um filme lubrificante, como em mancais hidrostáticos e hidrodinâmicos, esses mecanismos de desgaste podem não operar. Na ausência de partículas abrasivas, mancais hidrostáticos podem operar “indefinidamente”.

1.3 - Fadiga

A falha por fadiga resulta do desenvolvimento progressivo de uma trinca sob a influência de aplicações repetidas de tensões que são consideravelmente inferiores à tensão capaz de provocar uma fratura sob carga monotonicamente crescente, ou mesmo com valores nominais inferiores ao limite de escoamento. Neste caso, a fratura normalmente ocorre após um grande número de ciclos de tensões, tipicamente superior a 10^3 ciclos. Para o caso de tensões acima do limite de escoamento, é natural esperar que o número de ciclos seja menor.

Nota-se a importância do estudo da fadiga quando consideramos que todo componente móvel está de alguma forma submetido a tensões cíclicas.

Podemos dividir o processo de fadiga em três estágios básicos:

- Estágio I: nucleação da trinca por deformação plástica localizada e o seu crescimento inicial ao longo de planos de escorregamento, sob influência de tensões de cisalhamento. Pode corresponder de 0% a 90% do número de ciclos total (até a ruptura). Este estágio pode ser acelerado pela presença de entalhes e/ou tensões localizadas.

- Estágio II: Corresponde ao crescimento da trinca num plano perpendicular à tensão principal de tração. A fratura neste estágio é a mais característica do processo de fadiga, que ocupa a maior parte de superfície da mesma.

- Estágio III: corresponde à fratura brusca, quando a trinca desenvolvida no processo de fadiga atinge o tamanho crítico, propagando-se de maneira instável.

Fica claro que para a ocorrência de uma fratura por fadiga, devem ser verificadas duas condições:

- tensões de tração: são estas tensões que provocam o crescimento da trinca no estágio II. Embora tensões de compressão não provoquem fratura por fadiga, carregamento externo em compressão pode provocar.

- deformação plástica localizada: embora a fadiga possa ocorrer em tensões nominais abaixo do limite de escoamento, é necessário que haja uma deformação plástica localizada, pois analogamente a qualquer tipo de fratura em metais, a fadiga é nucleada e acompanhada na propagação por deformação plástica.

Sendo um processo essencialmente localizado, é fácil de entender a importância, na fadiga, da concentração de tensões devido a variação de dimensões e estado da superfície (entalhes mecânicos, raios de concordância, riscos de usinagem) ou tensões residuais decorrentes de tratamentos mecânicos ou térmicos. Devido a isto, os resultados de ensaios de laboratório, em corpos-de-prova do material estudado, tem significado bastante restrito; normalmente são necessários que se realizem ensaios no componente propriamente dito (peça), para se avaliar a resistência à fadiga.

1.4 - Rolamentos: Algumas Características

1.4.1 - Aspectos Gerais

Os rolamentos são componentes mecânicos de qualidades bastante especiais. Seus principais requisitos são:

- alta precisão dimensional;
- alta resistência à corrosão;
- alta resistência ao desgaste.

Para que essas características sejam atendidas, deve-se utilizar um material de composição química adequada, atendendo a estas especificações. O material mais amplamente utilizado na fabricação de rolamentos é o aço DIN 100 Cr 6 - equivalente ao AISI 52100 - cujos principais elementos de liga tem as seguintes faixas de composição:

Elemento de Liga (%)	AÇO	
	DIN 100 Cr 6	AISI 52100
C	0,95 - 1,05	0,98 - 1,10
Cr	1,40 - 1,65	1,30 - 1,60
Mn	0,25 - 0,45	0,25 - 0,45
Si	0,15 - 0,35	0,15 - 0,35
P	máx. 0,030	máx. 0,030
S	máx. 0,025	máx. 0,025

Tabela 1: Faixas de composição química para os aços DIN 100 Cr 6 e AISI 52100

As etapas básicas de fabricação do rolamento são:

- torneamento (usinagem mole);
- tratamento térmico;
- retificação e lapidação (usinagem dura);
- montagem.

Como matéria prima, utilizam-se principalmente tubos e barras para a fabricação de anéis e eixos; e arames, para a produção dos elementos rolantes (esferas, cilindros e agulhas). O material é recebido na condição recozida (mínima dureza). O DIN

100 Cr 6 é um aço ao cromo de alto carbono (Cr é um elemento forte formador de carbonetos). Segundo Nogueira, na condição recozida deve apresentar carbonetos coalescidos em matriz ferrítica, fase mole, facilitando a etapa de torneamento⁽⁶⁾. Em seguida procede-se ao tratamento térmico (austenitização → têmpera → revenimento) onde objetiva-se o endurecimento dos componentes (pela formação da martensita), com relativa tenacidade (revenimento).

1.4.2 - Desgaste

A primeira idéia que surge quando se fala em desgaste de rolamentos é que este seja originado pelo atrito, já que o rolamento caracteriza-se por “deslizamento” entre seus elementos (anéis externo e interno, esferas, rolos, etc.). Entretanto, ao analisarmos as características acima mencionadas, e estudando o rolamento em condições ideais de funcionamento (bem lubrificados) percebemos que a ocorrência de atrito que provoque o desgaste é bastante remota, já que entre os anéis ou eixos e os elementos rolantes, não existe (ou não deve existir) deslizamento, mas apenas rolamento.

O desgaste verificado em rolamentos decorre então de processos de *fadiga de contato* caracterizado pela formação de trincas depois de um número crítico de revoluções. Antes deste tempo, não existe praticamente nenhum desgaste detectável. Assim, no caso de rolamentos, ao contrário do que ocorre em outros sistemas tribológicos, não se usa o termo *taxa de desgaste* mas sim *vida útil*, conforme diz Carvalho⁽⁷⁾. Entretanto, vale lembrar que em condições adversas, como falha de montagem ou problemas de lubrificação, pode aparecer outras componentes de desgaste oriundas de atrito, reduzindo portanto, a vida do rolamento.

Dessa forma, segundo Nogueira, o aço para rolamento deve ter como principal requisito a resistência a fadiga, cujos fatores mais influentes, ligados ao material são: inclusões, microestrutura e a microsegregação⁽⁶⁾.

Devido a sua pouca plasticidade, as inclusões mais prejudiciais são: alumina, cálcio-aluminatos, nitretos e os carbonitretos. Seu tamanho também é importante fator de influência em fadiga, cuja resistência aumenta com a diminuição do tamanho e distribuição mais homogênea dessas inclusões.

Algumas características microestruturais como a fração volumétrica, o tamanho e a distribuição de cada fase e as propriedades específicas de cada uma delas tem grande influência no processo de fadiga e no desgaste abrasivo de um determinado sistema tribológico. As respostas podem ser muito diferentes, observando-se por vezes algumas inversões quando se compara com o comportamento dos materiais homogêneos, como por exemplo a ocorrência de maiores taxas de desgaste com o aumento da dureza.

A ocorrência de filmes contínuos de carbonetos é prejudicial, no que diz respeito à fadiga, justificando a condição coalescida no recebimento do material. Além disso, a presença de carbonetos precipitados nesta forma contribui com o aumento da resistência ao desgaste dos rolamento produzidos com o DIN 100 Cr 6. A nível industrial, os tratamentos de têmpera realizados com este material não promovem a total dissolução desses carbonetos, garantido então suas propriedades. A austenitização é feita em temperaturas não muito elevadas por tempos pequenos (geralmente 840°C por 20 - 30 minutos), conforme verificou Cumino⁽⁸⁾. As temperaturas de início e fim de transformação martensítica (M_s e M_f) são função do teor de carbono da matriz, de forma que, com o aumento do teor de C solubilizado, há um abaixamento de M_s e respectivamente de M_f ⁽⁹⁾. Com a austenitização feita de maneira bem controlada evita-se a total solubilização dos carbonetos mantendo M_s e M_f em valores tais que minimizam a presença de austenita retida, que representa uma fase mole quando comparada a martensita formada pela têmpera. A menos de uma aplicação e especificação em particular, o tratamento térmico a que se submete os elementos de um rolamento visa obter o menor teor de austenita retida pois, segundo Fan e colaboradores, esta fase reduz a resistência à fadiga e ao desgaste⁽¹⁰⁾. Meng e outros sugerem até a execução de tratamentos sub-zero para minimizar ao máximo os níveis de austenita retida⁽¹¹⁾.

Existem, entretanto, alguns estudos no sentido de se verificar um eventual benefício da austenita retida no que diz respeito a aumento de resistência ao desgaste por fadiga de contato. Stickels mostrou que amostras do aço AISI 52100, tratado de modo a se obter níveis significativos de austenita retida, a partir de um pequeno tamanho de grão austenítico, teve melhora na resistência à fadiga, quando comparado a tratamentos térmicos convencionais.⁽¹²⁾

1.5 - Tratamentos Térmicos - Propriedades Metalúrgicas do aço DIN 100 Cr 6

A matéria-prima para a fabricação de rolamentos (barras, tubos e arames) deve ser fornecida na condição coalescida (recozida, com esferoidização dos carbonetos), para facilitar a etapa de usinagem. O tratamento de coalescimento ocorre em duas etapas:

- esferoidização: as lamelas de cementita são transformadas inicialmente em pequenas partículas levemente alongadas, passando a carbonetos arredondados;
- crescimento dos carbonetos: ocorre o coalescimento propriamente dito dos carbonetos, função do tempo e temperatura do tratamento, dentro dos limites da transformação. Consequentemente, decresce o número de partículas, e aumenta a distância média entre elas, já que aumentam de tamanho. Os principais parâmetros que influem no tamanho e distribuição dos carbonetos são o tempo e a temperatura: segundo Rossi, altas temperaturas significam dissolução das partículas, e portanto diminuição na fração volumétrica (e diâmetro médio) das mesmas. Em temperaturas menores, mas para tempos longos, ocorre o crescimento competitivo dos carbonetos, resultando numa estrutura de carbonetos grandes, porém sem uniformidade de tamanhos⁽¹³⁾.

A microestrutura contendo carbonetos finos, homogeneamente distribuídos produz, após têmpera, microestrutura de martensita também homogênea com carbonetos finos. Para tanto, recomenda-se até que sejam realizados tratamentos prévios à têmpera, visando a obtenção de perlita fina, bainita ou mesmo martensita revenida⁽¹⁴⁾. Beswick mostra que o aço AISI 52100 (equivalente ao DIN 100 Cr 6) com microestrutura prévia perlítica (ou de martensita revenida) apresenta temperatura de início de formação de austenita em aquecimento contínuo, inferior àquela com microestrutura prévia esferoidizada⁽¹⁵⁾.

Entretanto, tratamentos térmicos adicionais acarretam custo de produção e devem ser evitados, tanto quanto possível. Nesse sentido muitos são os esforços para que se obtenha um material com microestrutura fina e homogênea já após a etapa de recozimento.

Uma vez torneadas, executa-se nas peças a etapa de têmpera (visando obter uma alta dureza) e o revenimento (alívio de tensões da têmpera, aumentando a tenacidade). As propriedades do aço após a têmpera são produto das condições de coalescimento (estado prévio do material) já que o tamanho e a distribuição dos carbonetos na estrutura

temperada depende desses parâmetros na estrutura coalescida^(6,14). Kar mostrou também que a têmpera (e revenimento) a partir de estados alternativos ao coalescido apresentam resultados diferenciados⁽¹⁶⁾. As variáveis operacionais da têmpera (tempo e temperatura) são entretanto, os principais fatores influentes nas propriedades obtidas após o tratamento térmico. A austenitização realizada à temperatura de 840 °C, por tempos de 30 minutos, tem como principal reação a dissolução dos carbonetos⁽¹³⁾. Baixas temperaturas de austenitização ocasionam a permanência de grande número de carbonetos não dissolvidos, que podem inclusive atuar como nucleantes de trincas. Dependendo do tempo e da temperatura, poderá coexistir uma certa parcela de austenita retida, juntamente com os carbonetos. Já a altas temperaturas, maior é a solubilização dos carbonetos; consequentemente, menor será a temperatura M_s , promovendo então maior quantidade de austenita retida. Pode-se até eliminar a presença de carbonetos precipitados, restando apenas uma matriz martensítica com determinada porção da austenita. Além disso, segundo Kar a grande presença de carbono em solução favorece o aparecimento de microtrincas de têmpera⁽¹⁶⁾.

Em escala industrial, o revenimento do aço DIN 100 Cr 6 costuma ser realizado em temperaturas relativamente baixas (175 °C), por tempos que variam de 1 a até 3 horas. A função principal desse tratamento é o alívio de tensões provocados pela transformação martensítica, oriunda da têmpera, sendo este um microconstituente que apresenta alta fragilidade. Normalmente, após a etapa de revenimento, a dureza do material cai ligeiramente; entretanto, ganha-se uma estrutura bem mais tenaz, quando comparada àquela bruta de têmpera. Basicamente, durante o revenimento, podem acontecer, conforme a temperatura e o tempo de tratamento, diversos processos, como a segregação do carbono para defeitos do reticulado, precipitação de carbonetos, decomposição da austenita retida (nos constituintes do equilíbrio) além da recuperação e recristalização da estrutura martensítica⁽⁹⁾.

De maneira simplificada, podemos dizer que o revenimento é uma união entre precipitação e recuperação/recristalização: a precipitação de carbonetos diminui a supersaturação em C da martensita; temos também uma recuperação, já que, pelo efeito da temperatura, há uma redistribuição do carbono não precipitado diminuindo a deformação da estrutura tetragonal da martensita e consequentemente, provocando ligeira queda na dureza, mas aumentando a tenacidade do material.

Para o DIN 100 Cr 6, pela exigência da alta resistência à fadiga além do mínimo prejuízo na dureza, faz-se o revenido em temperatura baixas, onde não há grandes alterações microestruturais, senão o alívio de tensões. Os níveis de austenita retida obtidos pela têmpera não são alterados, ou seja, não há decomposição (pelo menos significativa) desta fase, mesmo porque elementos de liga como Cr e Mn agem como estabilizantes da austenita: Cohem mostra que a adição de 1% de Cr num aço contendo 1 % de C promove um aumento do nível de austenita retida de até 50%⁽¹⁷⁾.

1.6 - Mircroconstituintes do DIN 100 Cr 6 Temperado e Revenido

Podemos distinguir basicamente três microestruturas características:

- martensita: típica dos aços alto carbono (ou altamente ligados), encontramos no DIN 100 Cr 6 a martensita acicular, formada na verdade por plaquetas lenticulares (estruturas tridimensionais em forma de lente), cuja intersecção com o plano de polimento se dá, ao microscópio óptico, na forma de agulhas. Altamente susceptível ao ataque metalográfico (nital) é a estrutura de coloração escura (marrom e/ou marrom azulado, conforme a intensidade do ataque), observada em microscópio óptico.

- austenita retida: nas ligas ferrosas, a austenita é uma fase normalmente de alta temperatura (acima de 730 °C, tipicamente). Para um resfriamento lento, a austenita se decompõe nas fases de equilíbrio (ferrita + perlita ou perlita + cementita). Entretanto, para resfriamentos rápidos, existe a transformação de não-equilíbrio originando a martensita, que tem uma temperatura de início (M_s) e fim (M_f) de transformação. Se durante o superresfriamento, não for atingida a temperatura M_f , haverá um residual de austenita não transformada, denominada austenita retida, que não se transforma nos constituintes de equilíbrio por não haver condições cinéticas favoráveis para tal (baixa temperatura). Ao microscópio óptico, apresenta grãos facetados (geométricos) de coloração branca brilhante (não é atacada pelo nital).

- carbonetos: partindo-se de uma estrutura prévia coalescida, após a têmpera, esta continua sendo a morfologia dos carbonetos. Ao microscópio, mostram-se como pequenos nódulos, arredondados de coloração branca, já que seu interior também

não é atacado (nital), mas sim a região de interface com a matriz - ferrítica, na condição coalescida, ou martensítica, para o material temperado.

2 - Objetivos

Este trabalho visa o estudo da influência da austenita retida na resistência ao desgaste que ocorre nas pistas de rolamentos feitos com aço DIN 100 Cr 6, levando em conta que o mecanismo de desgaste para esses casos é fundamentalmente o de fadiga por contato. Não pretendeu-se aqui avaliação da vida útil, nem tampouco a realização de ensaios de fadiga até a falha dos componentes. Trata-se de um estudo comparativo onde, através da realização de diferentes tratamentos térmicos de austenitização e consequente têmpera, obtiveram-se rolamentos produzidos com diferentes níveis de austenita retida. Através de ensaios de desgaste (fadiga), onde os rolamentos foram postos em funcionamento, sobre carga, executados por um tempo fixo, foi feita uma avaliação do desempenho desses rolamentos a fim de se determinar uma provável influência da presença da austenita retida.

Para tanto, o desgaste foi provocado através de um motor elétrico, aplicando-se uma carga radial ao rolamento. O desgaste foi avaliado através de exames de ruído, havendo uma série de medições antes e depois do desgaste, quando então se deu a comparação dos resultados.

3 - Materiais e Métodos

3.1 - Material

Para o desenvolvimento deste trabalho, foi utilizado o produto F-110398, produzido pela ROLAMENTOS SCHAEFFLER DO BRASIL, utilizado como bomba d'água em automóveis. Cada conjunto é formado pelos seguintes componentes:

- 1 anel externo - aço DIN 100 Cr 6;
- 1 eixo - aço DIN 100 Cr 6;

- 12 esferas - aço AISI 52100;
- 2 gaiolas de esferas;
- 2 anéis de vedação;
- graxa lubrificante.

Observação: tanto o eixo como o anel externo possuem 2 pistas (6 esferas por pista).

No processo normal de fabricação deste produto, o anel externo e as esferas são submetidos a têmpera total, ao passo que o eixo sofre têmpera por indução (apenas a superfície é beneficiada, mantendo-se o núcleo recocido, e portanto tenaz). Logo, por apresentar maior facilidade no controle das variáveis de tratamento térmico, o anel externo foi escolhido para que, através de diferentes tratamentos fossem obtidos diferentes níveis de austenita retida. Eixos e esferas tiveram tratamentos térmicos convencionais, iguais para todos os componentes, garantindo mesmas propriedades mecânicas e metalúrgicas.

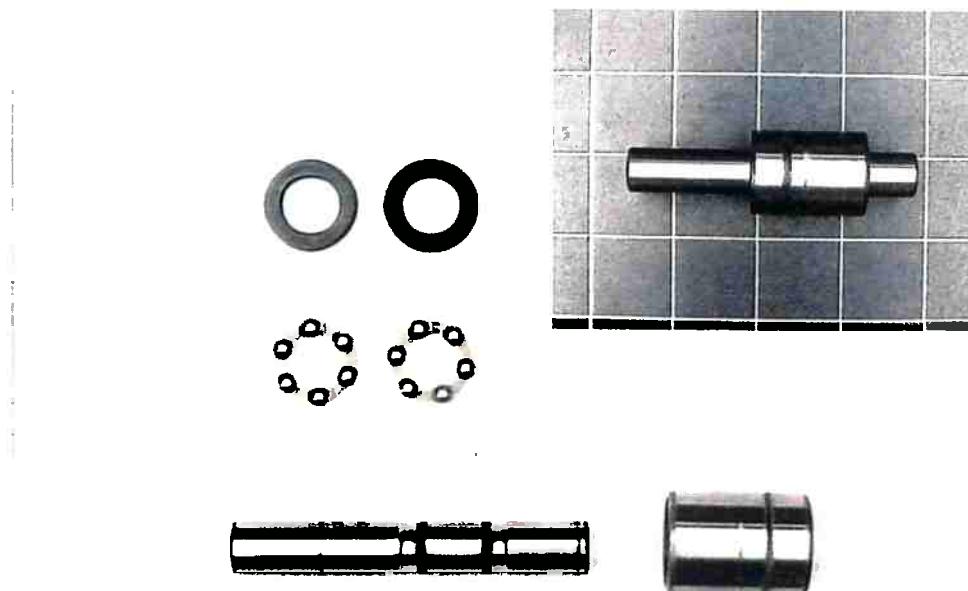


Figura 3: Componentes do rolamento de bomba d'água. No detalhe, o conjunto montado.

Os anéis externos foram obtidos após a etapa de torneamento, a partir de tubos fornecidos na condição coalescida, com dureza de 207 HB e a seguinte composição química (conforme Certificado de Qualidade 72.569/95 da Mannesmann):

C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo	Al	Cu	O (ppm)	Ti
1,04	0,31	0,014	0,009	0,23	0,05	1,49	0,02	0,02	0,01	18	0,002

Tabela 2: Composição Química (em %) do aço DIN 100 Cr 6 utilizado neste trabalho.

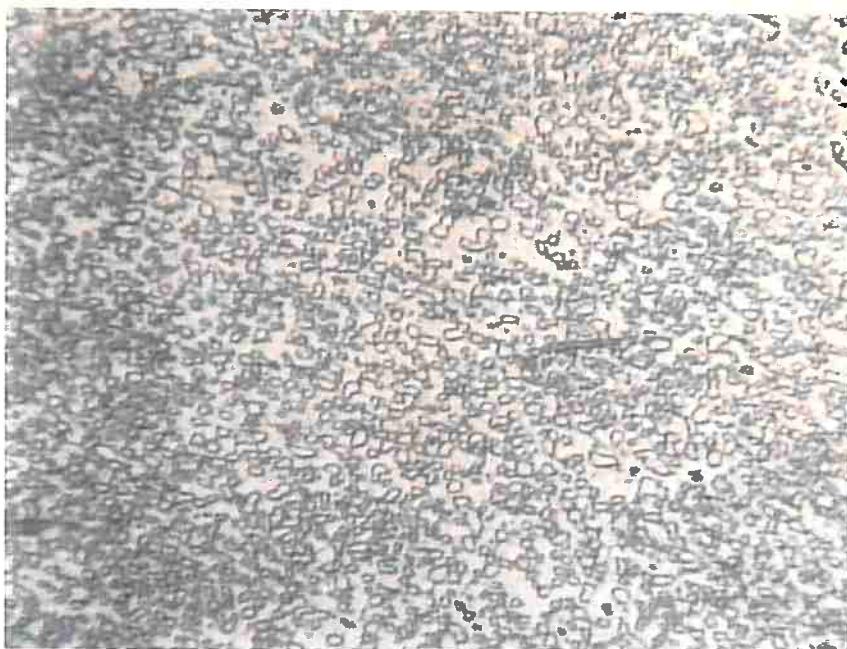


Figura 4: Micrografia do aço DIN 100 Cr 6 como recebido: carbonetos coalescidos em matriz ferrítica. Ataque Nital. 1400 x.

3.2 - Tratamentos Térmicos

Por se tratar de um aço de alto carbono, o DIN 100 Cr 6 requer cuidados especiais quando passa por um tratamento térmico a fim de se evitar um processo de descarbonatação na superfície, e consequentemente levar a conclusões errôneas no que diz respeito ao efeito da austenita retida, já que a fadiga de contato (desgaste) é um fenômeno de superfície⁽¹⁸⁾.

Em escala industrial, a austenitização é realizada em forno a resistência com atmosfera controlada (N_2 , propano, álcool). Para os procedimentos de laboratório, as peças (anel externo) foram tratadas nos seguintes fornos (mufla): Carbolite Furnaces - CSF 1200; Quimis R Engro - série 6000.

Para evitar os efeitos da descarbonatação foi utilizada uma caixa-de-carvão⁽¹⁹⁾: as peças foram imersas em carvão vegetal de granulometria variável (1.68 a 7.93

mm), contido numa caixa, com tampa, de ferro fundido. A temperatura foi controlada através de um termopar tipo K (Chromel-Alumel) cuja ponta foi inserida no interior da caixa-de-carvão.

Para cada tratamento de austenitização foram utilizadas três peças, sendo uma destinada a sacrifício (análise metalográfica, medição de dureza, etc.) e as outras duas destinadas aos ensaios de desgaste. Foram realizados quatro grupos de tratamentos:

Amostra	Temperatura ($\pm 5^{\circ}\text{C}$)	Tempo (min)
A1	803	30
A2	830	30
A3	872	30
A4	904	30
A5	912	30
A6	938	30
A7	965	30
A8	1020	30
B1	792	45
B2	820	45
B3	849	45
B4	922	45
B5	949	45
B6	1020	45
C1	782	60
C2	803	60
C3	854	60
C4	880	60
C5	934	60
C6	1000	60
C7	1020	60
D1	785	90
D2	828	90
D3	863	90
D4	970	90
D5	1000	90

Tabela 3: Tratamentos térmicos realizados com o aço DIN 100 Cr 6

Em cada tratamento, as três peças foram envolvidas por uma arame inoxidável (Ni-Cr) de modo a facilitar a manipulação durante a têmpera, realizada em óleo (temperatura ambiente), imediatamente após o fim de cada período de austenitização acima relacionados.

Realizou-se então os tratamentos de revenimento, à 180 °C por 60 minutos com resfriamento ao ar, independentemente do tempo/temperatura de austenitização. Para tanto, foi utilizado um forno (mufla) EDG - 3000.

3.3 - Análise Metalográfica

Cada tratamento térmico produziu três amostras. Após a identificação das mesmas, duas foram reservadas para posterior montagem e realização dos ensaios de desgaste. Com a restante, foram feitas análise de microestrutura, medições de dureza e de austenita retida.

Para a análise metalográfica, as amostras (anéis externos) foram cortadas longitudinalmente, lixadas (220, 320, 400, 600), polidas (6μ , 3μ , 1μ) e atacadas em solução Nital 4%, por 5 segundos. Para o exame microscópico foi utilizado um microscópio óptico ERNST-LEITZ - Wetzlar sendo as fotos tiradas a partir do equipamento de digitalização SONY - VideoPrinter UP-1800 MD.

As medições de dureza foram realizadas na escala HRC, num durômetro VOLPERT - Testor HT 1a, tendo como penetrador um cone de diamante com ângulo de ponta de 120°. Foi utilizada a carga de 150 kgf. Para cada tratamento, foram feitas 5 impressões, das quais se calculou o valor médio.

Para avaliação da descarbonetação foram ainda realizadas medições de microdureza na escala Vickers, com carga de 1 kgf (HV1) na superfície e no núcleo das peças através de um microdurômetro KARL FRANK - Frank Finotest. Foi utilizado como penetrador uma pirâmide de diamante com ângulo de superfície de 136°. Ao longo da secção longitudinal, em todas as peças (de cada um dos tratamentos realizados) foram tiradas 4 impressões distantes 0,1 mm da superfície e mais 4 impressões na posição central, calculando-se a média dos valores encontrados.

A fração de austenita retida foi medida através da técnica de difração de Raios-X, executada no Laboratório Metalográfico - S18 - ROBERT BOSCH LTDA., utilizando um equipamento RIGAKU X-RAY DIFFRACTOMETER, com radiação K-alpha. Os parâmetros utilizados para a medição foram: plano 200 e ângulo 2θ variando de 101 a 110° para a martensita e plano 220 com ângulo 2θ entre 123,5 e 132° para a austenita.

3.4 - Ensaios de Desgaste

Os ensaios de desgaste foram realizados num equipamento destinado originalmente a testes de vazamento de graxa, e consiste de um motor elétrico trifásico WEG - 80686 de 2 CV, operando a 60 Hz (220 ou 380 V) com 3400 rpm. Ao eixo do motor é acoplado o eixo do rolamento de bomba d'água, sendo que o anel externo é apoiado num suporte, permanecendo fixo. Um dispositivo pneumático, conectado à outra ponta do eixo do rolamento aplica uma carga na direção radial de 6 bar (ou 29,4 kgf). Para maior validade de resultados, os ensaios de desgaste foram executados em duas peças de cada tratamento térmico. Por ser um estudo comparativo, o tempo de ensaio utilizado neste trabalho, para cada rolamento, foi relativamente pequeno quando comparado aos tempos típicos de ensaios de fadiga, ou de determinação da vida útil de um componente mecânico, onde os testes podem durar centenas de horas. Entretanto, o tempo aqui utilizado foi significativo para a determinação de diferentes efeitos provocados, provavelmente pelos vários níveis de austenita retida. Cada peça foi submetida a um ensaio com 5 horas de duração, o que equivale a aproximadamente 10^6 rotações (ou ciclos de tensão).

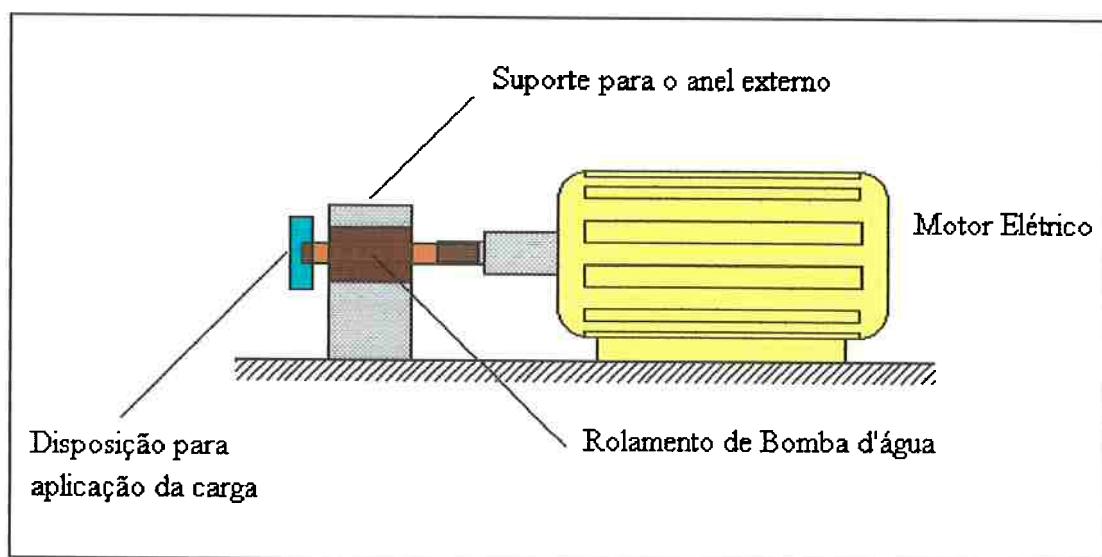


Figura 5: Esquema do equipamento utilizado para o ensaio de desgaste - Vista Lateral.

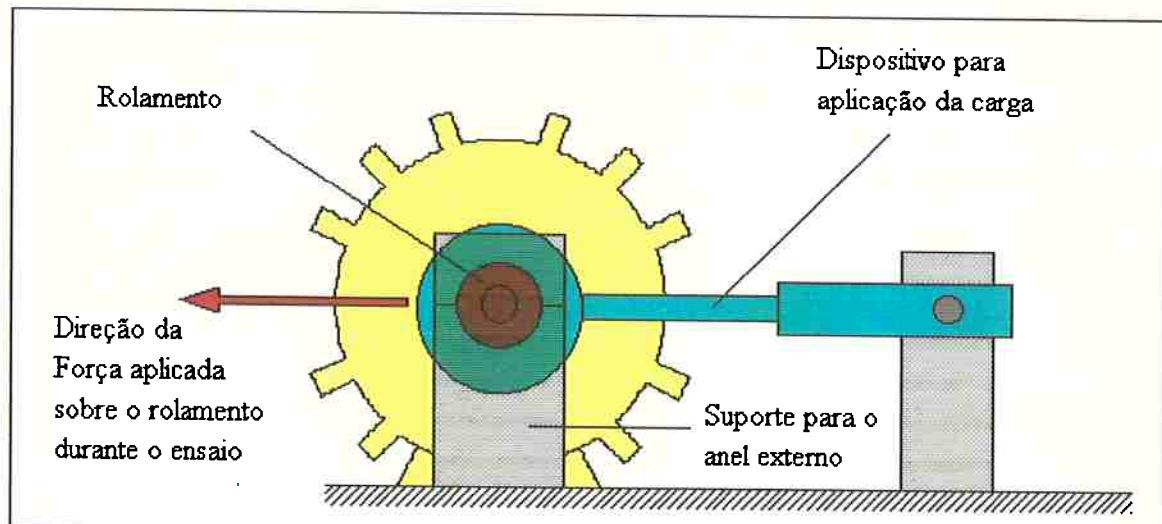


Figura 6: Esquema mostrando a direção da força aplicada ao rolamento - Vista Frontal.

A avaliação do desgaste (fadiga) provocado nos rolamentos foi feita através de equipamento para medição do nível de ruído, normalmente utilizado na linha de montagem de rolamentos. Foram feitas medições do ruído antes e depois do desgaste, sendo feita a devida comparação entre as várias peças. Foi utilizada a escala comparativa “g”, comum na industria. No exame, o eixo do rolamento é conectado a um eixo girante; um pequeno dispositivo (microfone) é posto em contato ao anel externo, que permanece fixo.

4 - Resultados e Discussão

4.1 - Tratamentos Térmicos Realizados

4.1.1 - Micrografias

A seguir são apresentadas as micrografias de todos os tratamentos térmicos realizados para a devida avaliação metalográfica dos mesmos. As fotos aparecem na mesma ordem da tabela 3, em ordem crescente de tempo e temperatura.



Figura 7: Micrografia do aço DIN 100 Cr 6 temperado e revenido. Amostra A1
Austenitização: 803 °C por 30 min. Ataque Nital. 1400 x.



Figura 8: Micrografia do aço DIN 100 Cr 6 temperado e revenido. Amostra A2
Austenitização: 830 °C por 30 min. Ataque Nital. 1400 x.



Figura 9: Micrografia do aço DIN 100 Cr 6 temperado e revenido. Amostra A3
Austenitização: 872 °C por 30 min. Ataque Nital. 1400 x.



Figura 10: Micrografia do aço DIN 100 Cr 6 temperado e revenido. Amostra A4
Austenitização: 904 °C por 30 min. Ataque Nital. 1400 x.



Figura 11: Micrografia do aço DIN 100 Cr 6 temperado e revenido. Amostra A5
Austenitização: 912 °C por 30 min. Ataque Nital. 1400 x.



Figura 12: Micrografia do aço DIN 100 Cr 6 temperado e revenido. Amostra A6
Austenitização: 938 °C por 30 min. Ataque Nital. 1400 x.

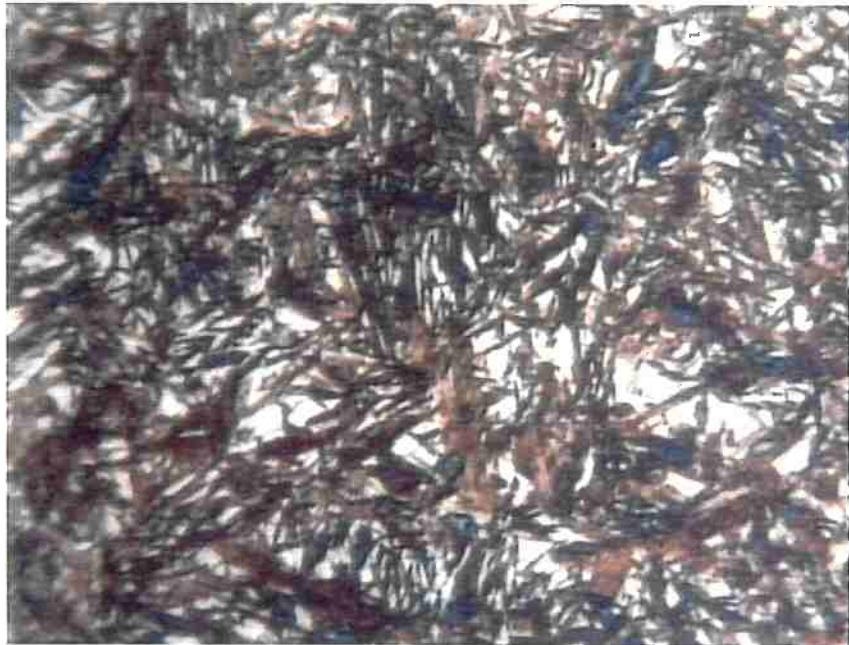


Figura 13: Micrografia do aço DIN 100 Cr 6 temperado e revenido. Amostra A7
Austenitização: 965 °C por 30 min. Ataque Nital. 1400 x.



Figura 14: Micrografia do aço DIN 100 Cr 6 temperado e revenido. Amostra A8
Austenitização: 1020 °C por 30 min. Ataque Nital. 1400 x.



Figura 15: Micrografia do aço DIN 100 Cr 6 temperado e revenido. Amostra B1
Austenitização: 792 °C por 45 min. Ataque Nital. 1400 x.



Figura 16: Micrografia do aço DIN 100 Cr 6 temperado e revenido. Amostra B2
Austenitização: 820 °C por 45 min. Ataque Nital. 1400 x.



Figura 17: Micrografia do aço DIN 100 Cr 6 temperado e revenido. Amostra B3
Austenitização: 849 °C por 45 min. Ataque Nital. 1400 x.

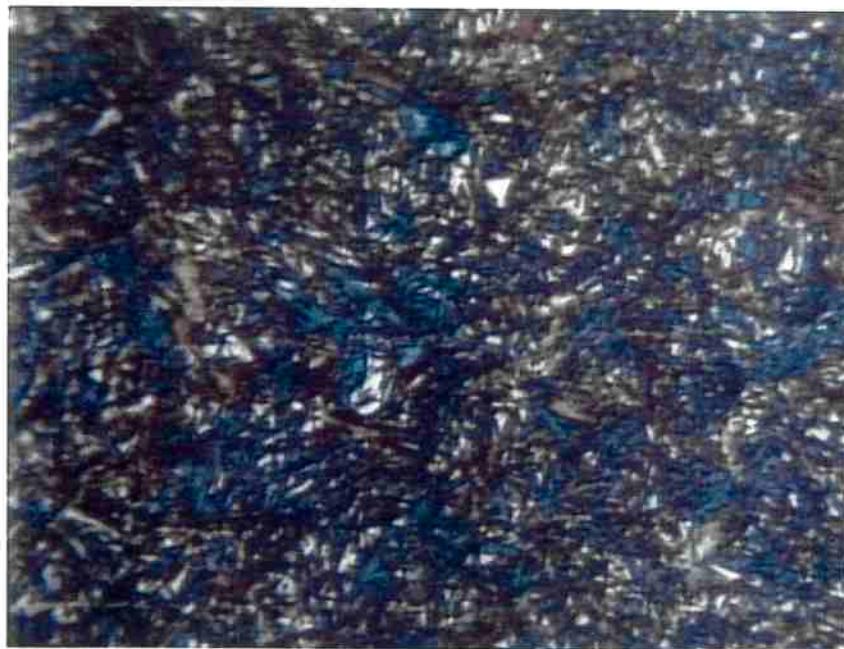


Figura 18: Micrografia do aço DIN 100 Cr 6 temperado e revenido. Amostra B4
Austenitização: 922 °C por 45 min. Ataque Nital. 1400 x.

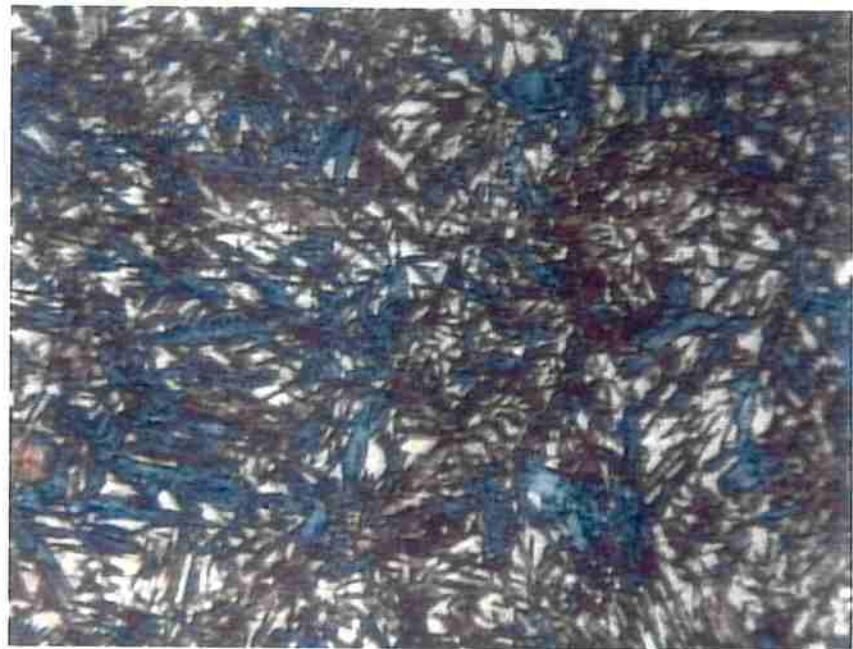


Figura 19: Micrografia do aço DIN 100 Cr 6 temperado e revenido. Amostra B5
Austenitização: 949 °C por 45 min. Ataque Nital. 1400 x.

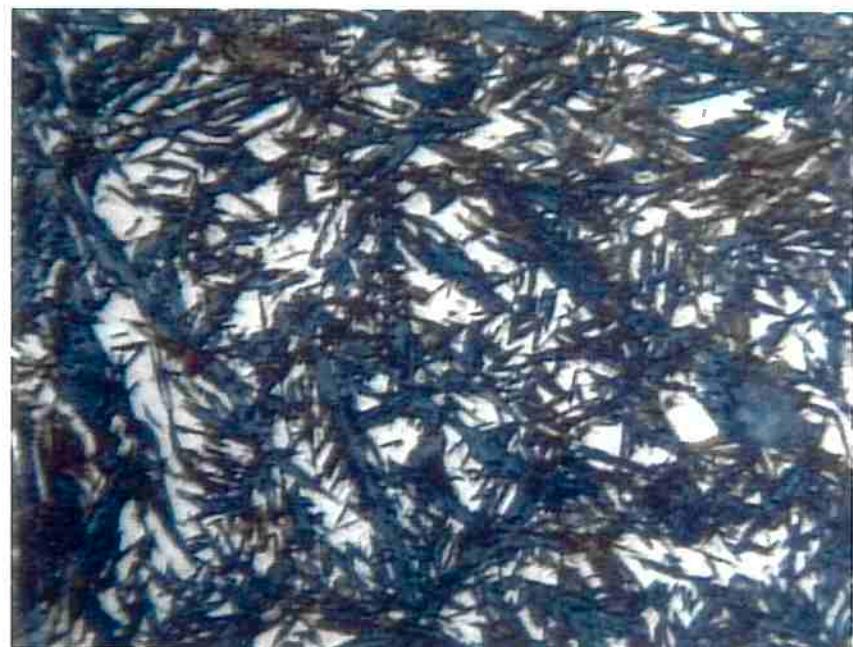


Figura 20: Micrografia do aço DIN 100 Cr 6 temperado e revenido. Amostra B6
Austenitização: 1020 °C por 45 min. Ataque Nital. 1400 x.



Figura 21: Micrografia do aço DIN 100 Cr 6 temperado e revenido. Amostra C1
Austenitização: 782 °C por 60 min. Ataque Nital. 1400 x.



Figura 22: Micrografia do aço DIN 100 Cr 6 temperado e revenido. Amostra C2
Austenitização: 803 °C por 60 min. Ataque Nital. 1400 x.



Figura 23: Micrografia do aço DIN 100 Cr 6 temperado e revenido. Amostra C3
Austenitização: 854 °C por 60 min. Ataque Nital. 1400 x.



Figura 24: Micrografia do aço DIN 100 Cr 6 temperado e revenido. Amostra C4
Austenitização: 880 °C por 60 min. Ataque Nital. 1400 x.

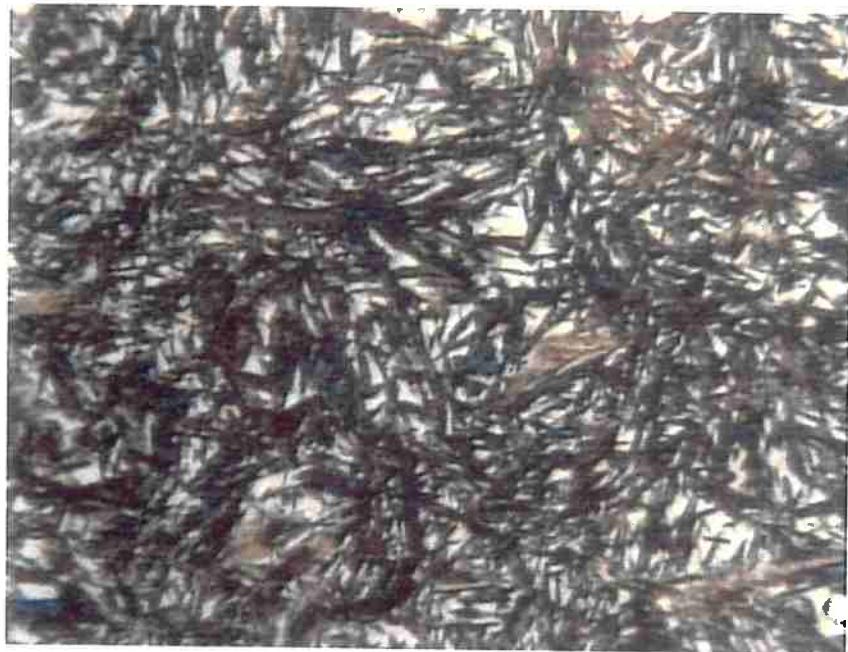


Figura 25: Micrografia do aço DIN 100 Cr 6 temperado e revenido. Amostra C5
Austenitização: 934 °C por 60 min. Ataque Nital. 1400 x.



Figura 26: Micrografia do aço DIN 100 Cr 6 temperado e revenido. Amostra C6
Austenitização: 1000 °C por 60 min. Ataque Nital. 1400 x.

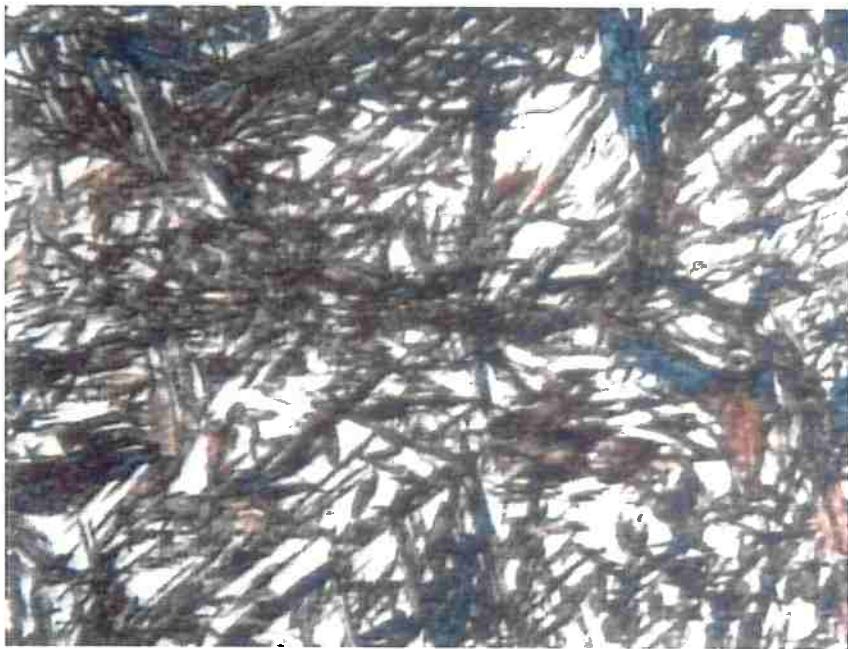


Figura 27: Micrografia do aço DIN 100 Cr 6 temperado e revenido. Amostra C7
Austenitização: 1020 °C por 60 min. Ataque Nital. 1400 x.



Figura 28: Micrografia do aço DIN 100 Cr 6 temperado e revenido. Amostra D1
Austenitização: 785 °C por 90 min. Ataque Nital. 1400 x.



Figura 29: Micrografia do aço DIN 100 Cr 6 temperado e revenido. Amostra D2
Austenitização: 828 °C por 90 min. Ataque Nital. 1400 x.

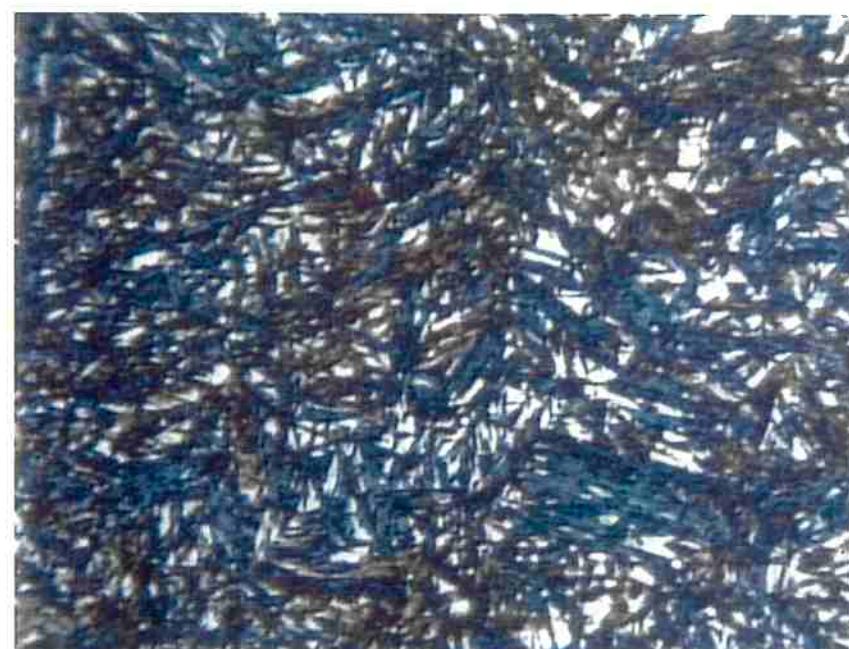


Figura 30: Micrografia do aço DIN 100 Cr 6 temperado e revenido. Amostra D3
Austenitização: 863 °C por 90 min. Ataque Nital. 1400 x.



Figura 31: Micrografia do aço DIN 100 Cr 6 temperado e revenido. Amostra D4
Austenitização: 970 °C por 90 min. Ataque Nital. 1400 x.

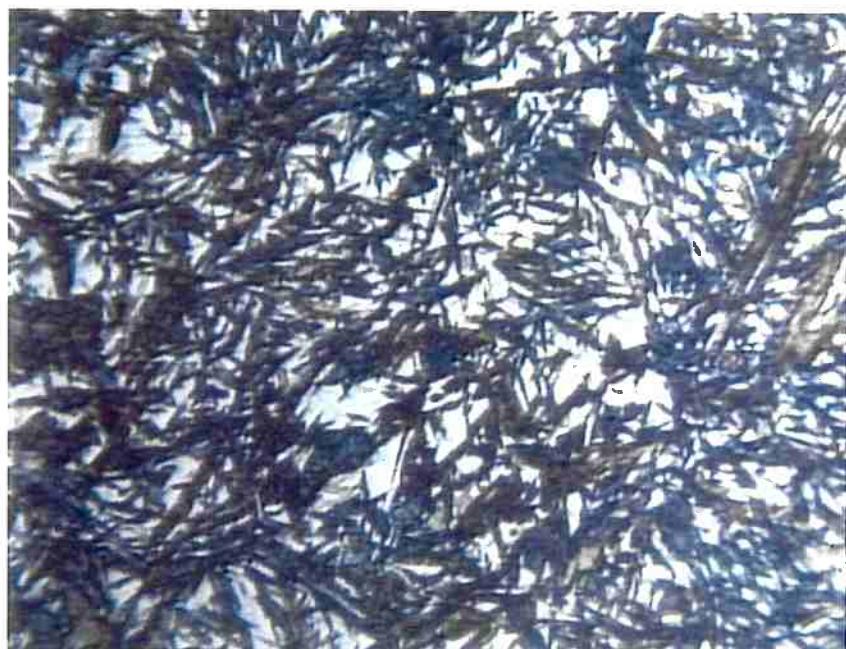


Figura 32: Micrografia do aço DIN 100 Cr 6 temperado e revenido. Amostra D5
Austenitização: 1000 °C por 90 min. Ataque Nital. 1400 x.

4.1.2 - Discussão

Quanto maior a temperatura (fixado um tempo) maior será a parcela de austenita retida e menor será a presença de carbonetos coalescidos. Por exemplo, para temperaturas superiores a 940 °C (30 min.), ou 880 °C (60 min.) não mais se observa a ocorrência de carbonetos ao microscópio óptico. Essas observações vão de encontro ao observado por Peilloud em relação à dissolução de carbonetos com diferentes tempos e temperaturas de austenitização:

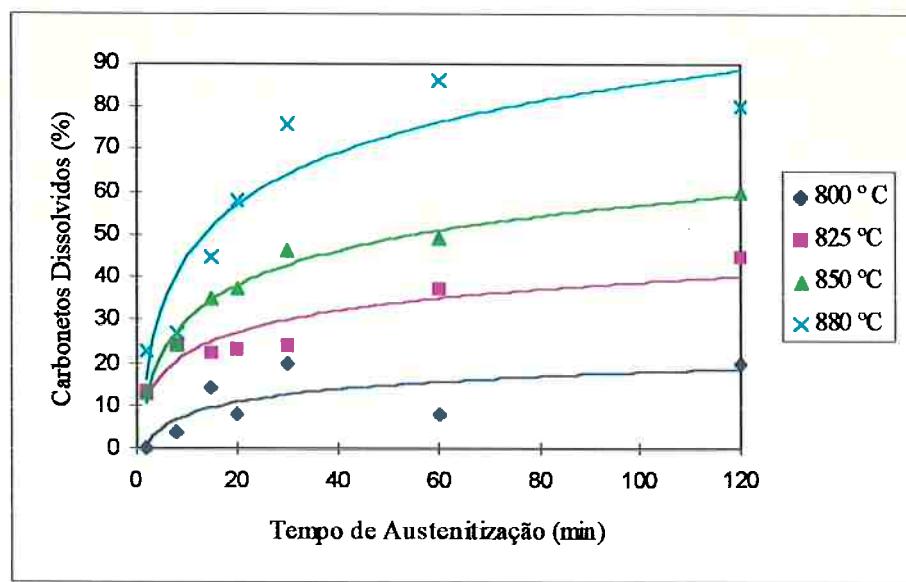


Figura 33: Porcentagem de carbonetos dissolvidos em função da temperatura e do tempo de austenitização para o aço AISI 52100⁽²⁰⁾.

A maior ou menor dissolução dos carbonetos reflete diretamente no nível de austenita retida e na temperabilidade. O estado recozido tem cerca de 16% em volume de carbonetos, que dissolvem cerca de 9% de Cr em peso. Nesta situação, praticamente todo o Cr está combinado como carbonetos do tipo $(Fe,Cr)_3C$ e não contribui para a temperabilidade⁽¹⁴⁾. É necessário que parte desses carbonetos seja dissolvida durante a austenitização. Pode-se ter o máximo de dissolução de carbonetos elevando-se a temperatura de austenitização para valores acima de 1040 °C (temperatura A_{cm} do material). Por outro lado, a maior dissolução dos carbonetos, aumentando portanto o teor de C e Cr da austenita, abaixa o valor de M_s , diminuindo a porcentagem de martensita formada na têmpera, aumentando, portanto os níveis de austenita retida. Vale a relação, para aços de baixa liga⁽⁹⁾:

$$M_s (\text{°C}) = 561 - 474(\% \text{C}) - 33(\% \text{Mn}) - 17(\% \text{Ni}) - 17(\% \text{Cr}) - 21(\% \text{Mo})$$

Não se deve confundir, entretanto temperabilidade com abaixamento da temperatura M_s , visto que são fenômenos independentes.

Quanto a morfologia da martensita, fica evidenciada a forma lenticular (ou acicular) nas amostras que são submetidas a temperaturas de austenitização mais elevadas, devido a maior presença de austenita retida. Entretanto para as temperaturas de austenitização mais baixas, temos (pelo menos visualmente) a maciça presença de martensita caracterizada pela região escura que ocupa toda a micrografia, notando-se apenas a presença dos carbonetos não dissolvidos pela austenitização.

4.2 - Medições de Dureza

4.2.1 - Dados Obtidos

Com relação as medidas de dureza, os resultados foram os seguintes:

Amostra	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8
HRC	60,0	62,0	60,9	62,0	61,3	59,5	59,0	60,1

Tabela 4: Dureza HRC nas amostras da austenitizadas por 30 min.

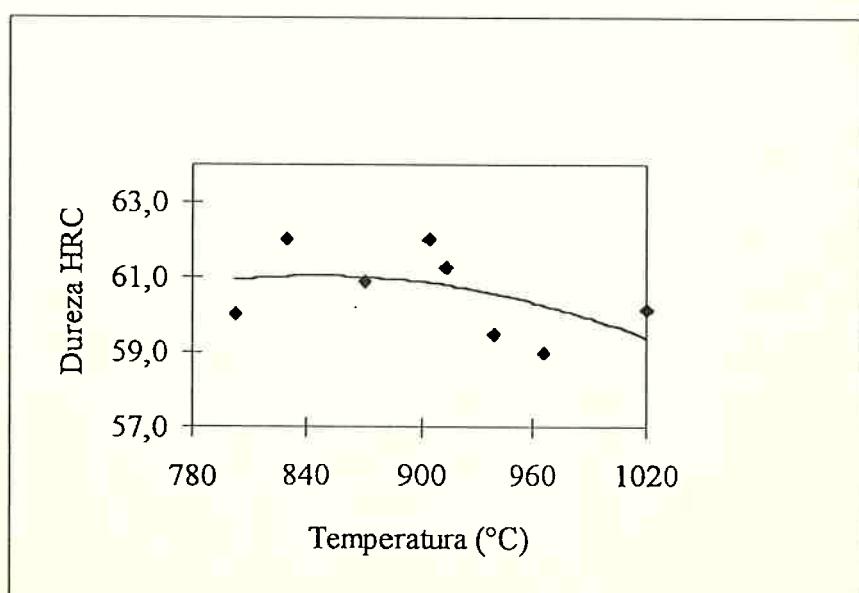


Figura 34: Dureza x Temperatura - Austenitização por 30 minutos.

Amostra	B1	B2	B3	B4	B5	B6
HRC	61	60,6	60,9	62,4	61,4	59,0

Tabela 5: Dureza HRC nas amostras da austenitizadas por 45 min.

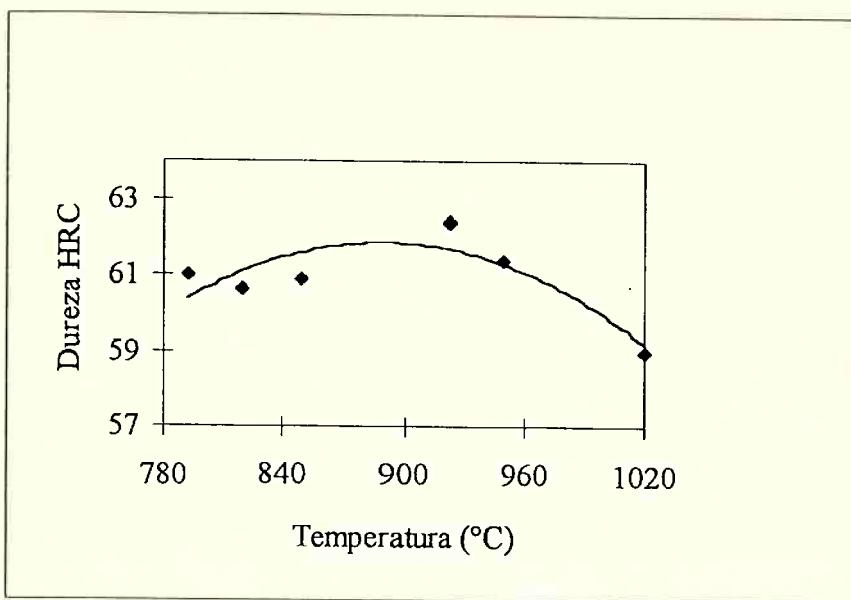


Figura 35: Dureza x Temperatura - Austenitização por 45 minutos.

Amostra	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
HRC	59,3	60,9	61,1	62,0	61,1	57,8	60,0

Tabela 6: Dureza HRC nas amostras da austenitizadas por 60 min.

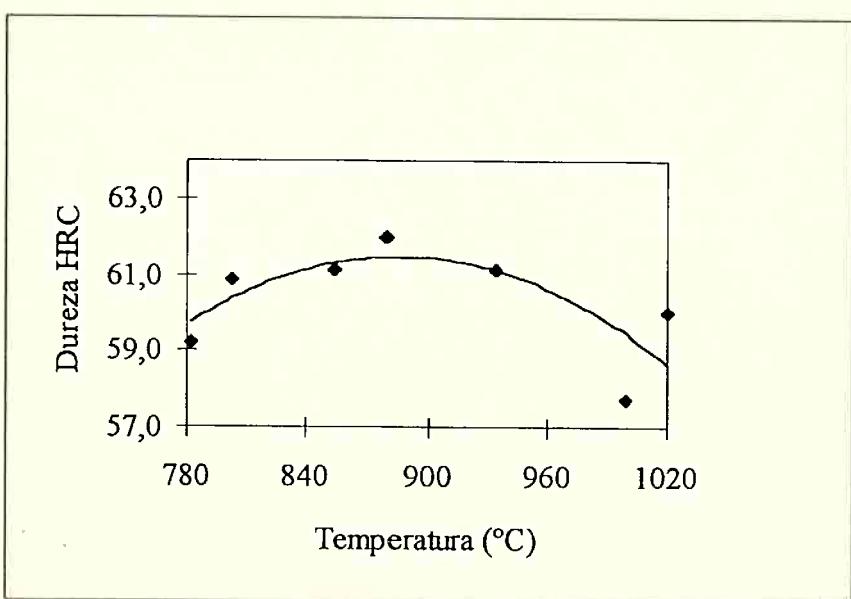


Figura 36: Dureza x Temperatura - Austenitização por 60 minutos.

Amostra	D1	D2	D3	D4	D5
HRC	63,5	61,3	61,3	59,3	61

Tabela 7: Dureza HRC nas amostras da austenitizadas por 90 min.

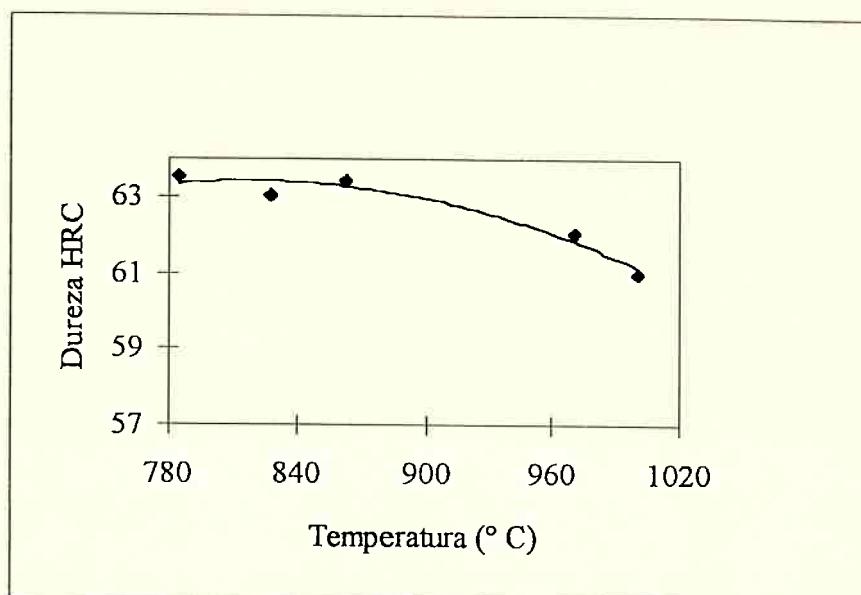


Figura 37: Dureza x Temperatura - Austenitização por 90 minutos.

Os valores de dureza na escala Vickers, obtidos a partir da superfície e do núcleo, foram:

Amostra	Superfície				Núcleo				Média Sup.	Média Núcleo
A1	765	765	765	765	765	765	757	757	765	761
A2	805	772	797	805	805	805	797	822	795	807
A3	788	757	772	772	805	772	757	765	772	775
A4	805	830	822	822	797	848	822	813	820	820
A5	805	822	805	780	805	822	805	805	803	809
A6	686	699	686	673	686	699	686	699	686	693
A7	699	679	679	666	699	699	679	679	681	689
A8	805	805	805	805	805	813	813	805	805	809
B1	713	699	713	713	699	699	713	699	710	703
B2	797	780	765	749	780	757	772	797	773	777
B3	805	757	765	765	788	772	772	757	773	772
B4	839	839	822	839	822	822	839	839	835	831
B5	805	765	780	757	757	765	797	780	777	775
B6	757	757	788	757	780	757	788	780	765	776
C1	713	686	686	706	686	713	699	699	698	699
C2	788	757	757	788	788	757	772	788	773	776
C3	788	822	788	772	830	788	788	788	793	799
C4	822	805	805	805	805	805	822	822	809	814
C5	772	772	772	720	757	772	713	772	759	754
C6	706	690	699	706	699	706	699	706	700	703
C7	780	797	797	780	797	797	797	797	789	797
D1	757	757	757	713	757	713	713	757	746	735
D2	772	805	813	772	805	780	805	813	791	801
D3	797	797	772	822	797	805	797	765	797	791
D4	757	757	775	765	757	757	772	772	764	765
D5	713	713	699	713	699	699	713	713	710	706

Tabela 8: Dureza Vickers HV1 - superfície e núcleo

4.2.2 - Discussão

Nota-se que para todos os tempos de austenitização existe um comportamento semelhante na variação da temperatura com a dureza obtida após a têmpera (lembre que todas as amostras foram submetidas a iguais condições de revenimento). Existe uma tendência de crescimento da dureza com o aumento da temperatura; atinge-se um valor máximo e, continuando o aumento de temperatura a dureza começa a cair. O aumento de dureza verificado até um certo valor máximo pode ser explicado pela maior solubilização dos carbonetos: neste caso, maior será o teor de C da austenita e consequentemente da martensita que se forma durante a têmpera. Já foi

mostrado que um dos fatores que aumenta a dureza da martensita é o teor crescente de C da mesma⁽⁹⁾, já que maior será a deformação do reticulado cristalino. Por outro lado, a medida que se aumenta a temperatura de austenitização, mais elevados serão os níveis de austenita retida, fase com dureza bastante inferior a da martensita. Logo, é natural esperar a queda na dureza para amostras austenitizadas a temperatura muito elevadas.

Apesar disso, quando comparado à especificação de dureza na fabricação de rolamentos com o aço DIN 100 Cr 6, pouco efeito tem a variação da temperatura de austenitização, já que o menor valor de dureza encontrado na foi de 57,8 HRC (amostra C6 com tratamento de 1000 °C, por 60 minutos), valor este não muito abaixo do mínimo especificado, que é de 60 HRC, em geral.

Analizando a tabela 8, observamos que a diferença entre a dureza na superfície e no núcleo das peças é muito pequena, mostrando que a ocorrência de descarbonetação foi pouco significante.

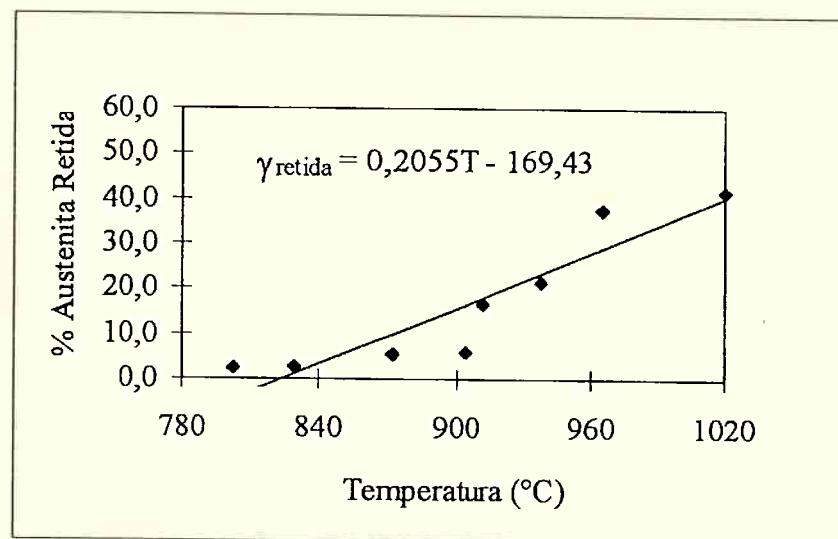
4.3 - Medição do Nível de Austenita Retida

4.3.1 - Dados Obtidos

Das medições realizada pela BOSCH, tiramos os seguintes resultados:

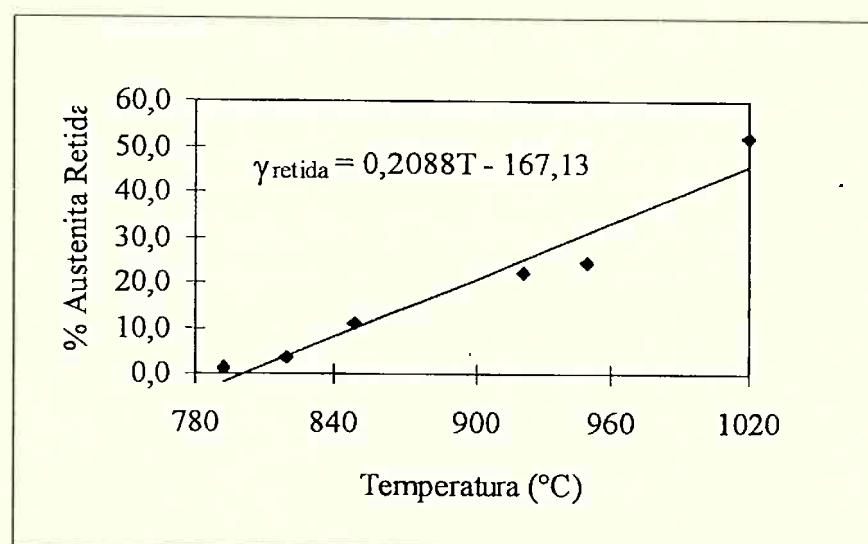
Amostra	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8
γ retida	2,2	2,5	5,5	5,6	16,6	21,4	37,4	41,8

Tabela 9: Fração de Austenita Retida - 30 min.

Figura 38: γ_{retida} x Temperatura - Série A.

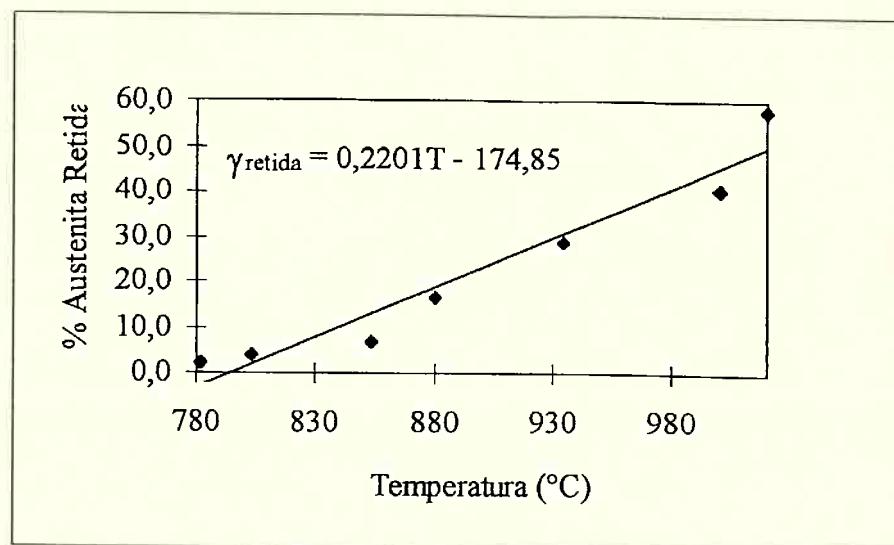
Amostra	B1	B2	B3	B4	B5	B6
γ_{retida}	1,4	3,6	11,0	22,4	24,6	51,9

Tabela 10: Fração de Austenita Retida - 45 min.

Figura 39: γ_{retida} x Temperatura - Série B.

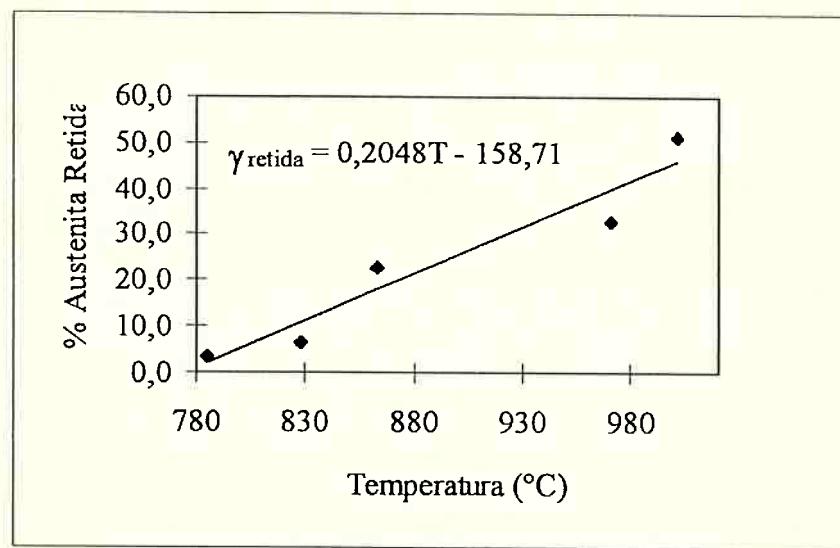
Amostra	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
γ_{retida}	2,4	4,0	6,5	16,4	29,1	40,6	57,8

Tabela 11: Fração de Austenita Retida - 60 min.

Figura 40: γ_{retida} x Temperatura - Série C.

Amostra	D1	D2	D3	D4	D5
γ_{retida}	3,5	6,7	22,6	33,0	51,3

Tabela 12: Fração de Austenita Retida - 90 min.

Figura 41: γ_{retida} x Temperatura - Série D.

4.3.2 - Discussão

Nota-se o comportamento linear que existe entre a fração de austenita retida e a temperatura, como já previu Cumino⁽⁸⁾. Mesmo para temperaturas diferentes, a expressão obtida por regressão linear é praticamente a mesma em todos os casos. Portanto, de maneira genérica, podemos dizer que o nível de austenita retida em função da temperatura de austenitização é:

$$\gamma_{\text{retida}} = 0,2098 \times T - 167,53$$

4.4 - Desgaste

4.4.1 - Resultados Obtidos

Apresentamos a seguir os dados obtidos após os ensaios de desgaste, cuja avaliação foi feita através de comparação, por meio da medição do nível de ruído de um rolamento. Para cada tratamento térmico, foram utilizadas duas amostras, sendo que os valores apresentados abaixo referem-se a respectiva média entre as duas peças.

% Austenita Retida	Ruído "g"	
	Antes	Depois
2,2	0,10	0,20
2,5	0,10	0,25
5,5	0,10	0,40
5,6	0,11	0,20
16,6	0,12	0,28
21,4	0,10	0,35
37,4	0,08	0,65
41,8	0,11	0,20

Tabela 13: Relação entre a fração de Austenita Retida e o Ruído (antes e depois do ensaio de desgaste) - Série A

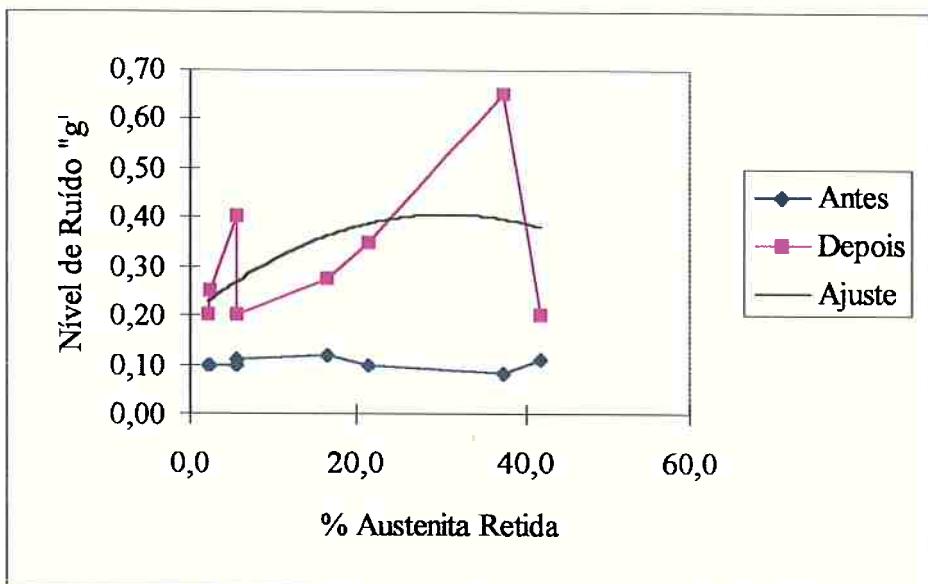


Figura 42: γ_{retida} x Ruído. A curva de ajuste refere-se aos dados após o desgaste. Série A

% Austenita Retida	Ruído "g"	
	Antes	Depois
1,4	0,10	0,18
3,6	0,09	0,30
11,0	0,10	0,35
22,4	0,10	0,30
24,6	0,10	0,40
51,9	0,11	0,29

Tabela 14: Relação entre a fração de Austenita Retida e o Ruído (antes e depois do ensaio de desgaste) - Série B

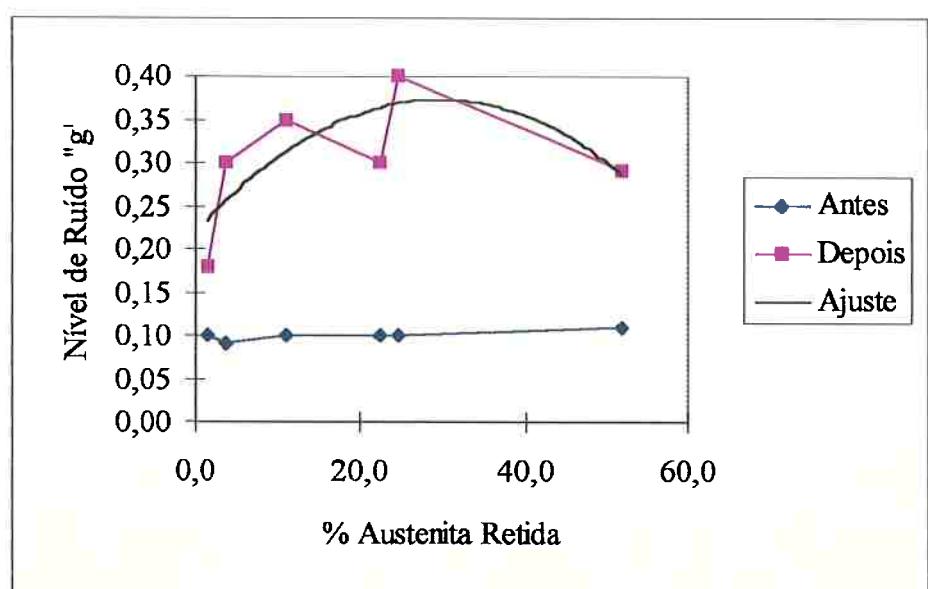


Figura 43: γ_{retida} x Ruído. A curva de ajuste refere-se aos dados após o desgaste. Série B

% Austenita Retida	Ruído "g"	
	Antes	Depois
2,4	0,10	0,30
4,0	0,10	0,12
6,5	0,10	0,25
16,4	0,10	0,50
29,1	0,12	0,45
40,6	0,10	0,20
57,8	0,12	0,20

Tabela 15: Relação entre a fração de Austenita Retida e o Ruído (antes e depois do ensaio de desgaste) - Série C

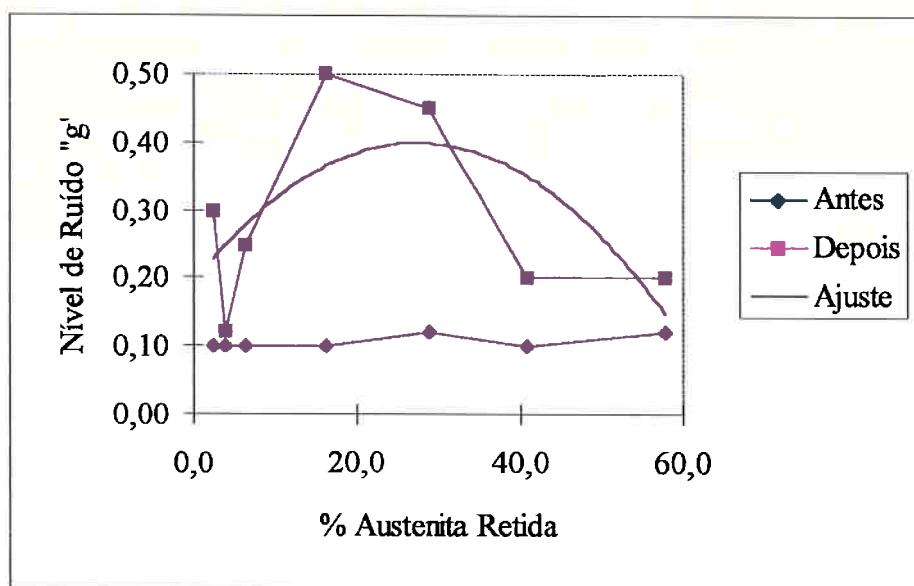


Figura 44: γ_{retida} x Ruído. A curva de ajuste refere-se aos dados após o desgaste. Série C

% Austenita Retida	Ruído "g"	
	Antes	Depois
3,5	0,10	0,24
6,7	0,10	0,25
22,6	0,11	0,50
33,0	0,10	0,35
51,3	0,10	0,22

Tabela 16: Relação entre a fração de Austenita Retida e o Ruído (antes e depois do ensaio de desgaste) - Série D.

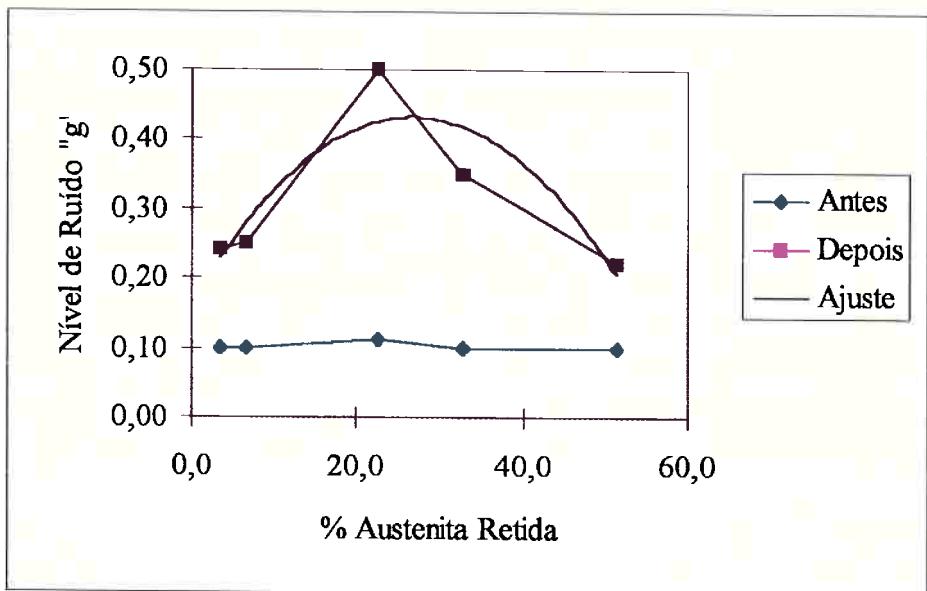


Figura 45: γ_{retida} x Ruído. A curva de ajuste refere-se aos dados após o desgaste. Série D

Em se tratando de um estudo comparativo, e como a fração de austenita retida mostrou ser pouco afetada pelo tempo de austenitização, temos na figura 46 um gráfico mostrando o aumento relativo do nível de ruído em função do desgaste para todas as amostras.

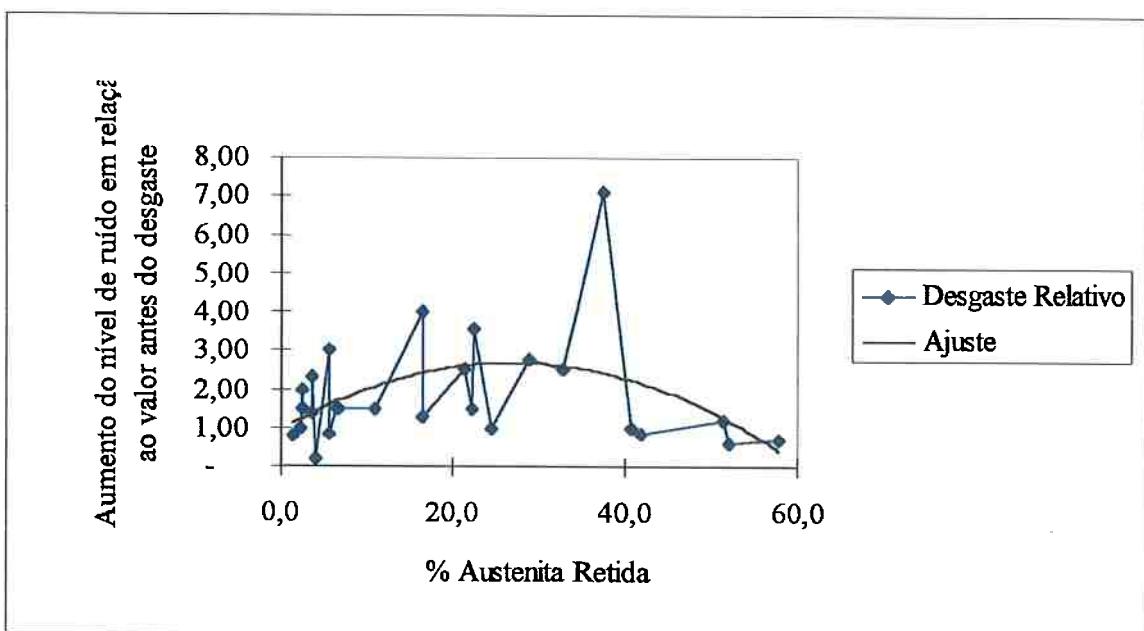


Figura 46: γ_{retida} x Ruído. Todas as amostras. Tabela de valores no Apêndice.

4.4.2 - Discussão

Os valores absolutos de desgaste obtidos nos respectivos ensaios tem significância relativa, devido aos diversos fatores que podem influir nesses resultados. Entretanto, quando se observa as curvas de ajuste, obtidas por regressão polinomial de 2º grau, nota-se claramente que existe uma tendência que se mantém constante para as séries estudadas (A, B, C e D), fato inclusive que também se observa quando comparadas todas as amostras juntas (figura 46). De maneira genérica, podemos dizer que para frações de austenita retida contidas na faixa 25 - 30% existe uma maximização nos processos de desgaste, ou seja, de valores baixos até 25% notamos a crescente tendência para ocorrer o desgaste; já para valores acima de 30% o desgaste tende a diminuir.

Baixos valores de austenita retida significa também maior presença de carbonetos não dissolvidos, que por sua distribuição homogênea, é benéfica para a resistência à fadiga. Além disso, a martensita terá menor teor de carbono, garantindo uma estrutura de maior tenacidade. A maior dissolução de carbonetos, obtida com o aumento da temperatura de austenitização, promove maior supersaturação do elemento carbono (além de outros elementos de liga como o Cr), o que torna a martensita mais dura e frágil (maiores tensões internas devidas sobretudo a deformação no reticulado provocada pelo carbono). Menor será a presença de carbonetos; entretanto durante o revenimento, devido a essa maior supersaturação em C da martensita, maior será a precipitação de carbonetos metaestáveis (do tipo carboneto- ϵ), visíveis apenas com microscopia eletrônica. A presença de partículas pequenas, mas de distribuição homogênea é benéfica para a resistência em fadiga, o que poderia explicar o menor desgaste ocorrido nas amostras que contém mais austenita retida, além dessa fase ser de tenacidade bem mais elevada que a da martensita.

5 - Conclusões

Como já era esperado, a medida que aumentamos a temperatura de austenitização, maior é a presença de austenita retida e menor a ocorrência de carbonetos precipitados. Para 30 minutos de austenitização, realizada a 940 °C não mais se observa a presença de carbonetos precipitados (em microscópio óptico). O mesmo ocorre a 880 °C, se o tempo de tratamento for de 60 minutos, mostrando que a dissolução dos carbonetos é função tanto do tempo como da temperatura à que se submete um determinado material.

A fração de austenita retida torna-se visível em microscopia óptica quando em valores superiores a 10 % aproximadamente, permitindo, nesses casos, que se faça uma pré-avaliação através de simples exame metalográfico. Entretanto, se o material apresentar valores inferiores a 10%, nada é possível de se afirmar com relação à austenita retida, exigindo portanto, exames mais específicos.

Foi observado que a fração de austenita retida, que permanece após a têmpera cresce linearmente com a temperatura, praticamente independente do tempo de austenitização, seguindo a seguinte relação empírica:

$$\gamma_{\text{retida}} = 0,2098 \times T - 167,53$$

onde T é a temperatura de austenitização (°C).

A variação da dureza em função da temperatura de austenitização (e portanto dos diferentes níveis de austenita retida), é relativamente pequena, sendo que os valores obtidos praticamente não fogem da faixa especificada na fabricação de rolamentos. Nota-se entretanto que o aumento da temperatura promove um aumento de dureza, que atinge um máximo (entre 830 a 890 °C, conforme o tempo de tratamento) e depois começa a cair.

O processo de desgaste nas pistas de rolamentos produzidos com o aço DIN 100 Cr 6 torna-se maior com o aumento da presença de austenita retida a medida que esta cresce até valores da ordem de 20 a 30 %. A partir de então, o material parece

apresentar uma melhora na resistência ao desgaste. Entretanto, essas conclusões foram baseadas num comportamento observado a partir de regressões polinomiais feitas com os dados, já que apenas a observação direta dos valores encontrados não se mostra suficientemente significativa. Percebe-se, entretanto que existe uma tendência no comportamento do desgaste perante a presença da austenita retida, permitindo, portanto, a apresentação dessas conclusões.

6 - Referências Bibliográficas

- (1) HUTCHINGS, I. M., Introduction in: *TRIBOLOGY: Friction and Wear of Engineering Materials*. Edward Arnold, 1992.
- (2) ROTONDARO, R. G., *Mecanismos de Desgaste Abrasivo*, Dissertação de Doutorado, EPUSP, São Paulo, 1988
- (3) Metals Handbook, 8^a edição, V. 10, ASM, 1962
- (4) VATAVUK, J., *Mecanismos de Desgaste em Anéis de Pistão e Cilindros de Motores de Combustão Interna*, Dissertação de Doutorado, EPUSP, São Paulo, 1994.
- (5) CETLIN, P. R., et al, *Análise de Fraturas*, ABM, São Paulo.
- (6) NOGUEIRA, M. A. S., *Efeito da Microestrutura Prévia e da Microsegregação na Formação da Austenita, nas Temperaturas M_s e nas Transformações Isotérmicas do Aço AISI 52100*, Dissertação de Mestrado, EPUSP, São Paulo, 1986.
- (7) CARVALHO, M. A., *Simulação do Desgaste em Cilindros de Trabalho Para Laminação a Frio de Tiras de Aço*, Qualificação para Dissertação de Mestrado, EPUSP, São Paulo, 1994.
- (8) CUMINO, R. S., *Otimização de Tratamentos Térmicos em Escala Industrial do Aço AISI 52100*, Trabalho de Formatura, EPUSP, São Paulo, 1994
- (9) TSCHIPTSCHIN, A. P., et al, *Metalografia dos Aços*, ABM, São Paulo.
- (10) FAN, X. H., et al, *A Study of Light - Chromium Cast Iron on Abrasion Resistance and Impact Fatigue Resistance*, in **Wear**, nº 138, p. 47 - 60, 1990.

- (11) MENG, F., et al, *Wear Resistance and Microstructure of Cryogenic Treated Fe-1,4Cr-1C Bearing Steel*, in **Scripta Metallurgica et Materialia**, V. 31, nº 7, p. 865 - 868, 1994.
- (12) STICKELS, C. A., *Rolling Contact Fatigue Tests of 52100 Bearing Steel Using a Modified NASA Ball Test Rig*, in **Wear**, nº 98, p. 199 - 210, 1984.
- (13) ROSSI, E. H., et al, *A influência das Variáveis de Processamento na Esferoidização do Aço ABNT 52100*, in **Metalurgia**, V. 39, nº 310, ABM, p. 479 - 485, 1983.
- (14) STICKELS, C. A., *Carbide Refining Heat Treatments for 52100 Bearing Steel*, in **Metallurgical Transactions A**, V. 5, p. 865 - 874, 1974.
- (15) BESWICK, J., *Effect of Prior Cold Work on the Martensite Transformation in SAE 52100* in **Metallurgical Transactions 15 A**, V. 2, p. 299 - 306, 1984.
- (16) KAR, R. J., et al, *The Effect of Heat Treatment on Microstructure and Mechanical Properties in 52100 Steel*, in **Metallurgical Transactions A**, V. 10A, p. 1711 - 1717, 1979.
- (17) COHEN, M., *Reteined Austenite*, in **Transaction, ASM**, V. 41, p. 35 - 94, 1949.
- (18) MEANS, J. W. M., et al, *A Rolling Ball Test for Establishing Contact Fatigue Behaviour of Bulk Materials, Surface Layers on Coating*, in **Tribology International**, V. 24, nº 6, p. 351 - 356, 1991.
- (19) CHIAVERINI, V., *Tratamentos Térmicos das Ligas Ferrosas*, ABM, São Paulo, 1987.
- (20) PEILLOUD, F., et al, *Optimisation du Traitement Thermique de l'acier 100 Cr 6* in **Mémories et Etudes Scientifiques de la Revue de Metallurgie**, V. 3, nº 81, 1984.

Apêndice

Amostra	HR1	HR2	HR3	HR4	HR5	Dureza Média
A1	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0
A2	63,0	62,0	62,0	62,0	61,0	62,0
A3	61,0	60,5	61,0	61,0	61,0	60,9
A4	62,0	62,0	62,5	61,5	62,0	62,0
A5	60,5	61,0	62,0	61,5	61,5	61,3
A6	60,0	60,0	59,0	58,5	59,5	59,4
A7	59,0	59,0	59,0	58,5	59,5	59,0
A8	60,0	60,0	60,0	60,5	60,0	60,1
B1	61,0	61,0	60,5	61,0	61,5	61,0
B2	60,5	60,5	61,0	60,5	60,5	60,6
B3	60,5	61,0	61,0	61,0	61,0	60,9
B4	62,5	62,5	62,0	62,5	62,5	62,4
B5	61,0	62,0	61,0	61,5	61,5	61,4
B6	59,0	59,5	60,0	58,0	59,0	59,1
C1	59,0	59,0	59,5	59,5	59,5	59,3
C2	61,0	60,5	61,5	61,0	60,5	60,9
C3	61,0	61,5	61,0	61,0	61,0	61,1
C4	62,0	62,0	62,0	62,0	62,0	62,0
C5	61,0	61,5	61,0	61,0	61,0	61,1
C6	57,5	58,0	57,5	58,0	58,0	57,8
C7	60,0	60,0	60,5	60,0	59,5	60,0
D1	63,0	63,5	64,0	63,5	63,5	63,5
D2	62,5	62,5	63,0	63,5	63,5	63,0
D3	63,5	63,5	63,0	63,5	63,5	63,4
D4	61,5	62,0	62,0	62,0	62,5	62,0
D5	61,0	60,5	60,5	61,5	61,5	61,0

Tabela I: Valores obtidos na medição de dureza (HRC).

Tratamento Térmico	Ruído Antes		Ruído Depois		Ruído Antes	Ruído Depois	Desgaste Relativo
	1º amostra	2º amostra	1º amostra	2º amostra	Média	Média	
A1	0,10	0,10	0,20	0,20	0,10	0,20	1,0
A2	0,09	0,11	0,25	0,25	0,10	0,25	1,5
A3	0,10	0,10	0,38	0,42	0,10	0,40	3,0
A4	0,11	0,11	0,21	0,19	0,11	0,20	0,8
A5	0,11	0,13	0,27	0,28	0,12	0,28	1,3
A6	0,09	0,11	0,35	0,35	0,10	0,35	2,5
A7	0,08	0,08	0,60	0,70	0,08	0,65	7,1
A8	0,11	0,11	0,17	0,23	0,11	0,20	0,8
B1	0,10	0,10	0,17	0,19	0,10	0,18	0,8
B2	0,10	0,08	0,28	0,32	0,09	0,30	2,3
B3	0,12	0,08	0,33	0,37	0,10	0,35	2,5
B4	0,10	0,10	0,30	0,30	0,10	0,30	2,0
0	0,10	0,10	0,41	0,39	0,10	0,40	3,0
B6	0,10	0,12	0,27	0,31	0,11	0,29	1,6
C1	0,10	0,10	0,28	0,32	0,10	0,30	2,0
C2	0,10	0,10	0,12	0,12	0,10	0,12	0,2
C3	0,10	0,10	0,24	0,26	0,10	0,25	1,5
C4	0,10	0,10	0,50	0,50	0,10	0,50	4,0
C5	0,11	0,13	0,41	0,49	0,12	0,45	2,8
C6	0,10	0,10	0,17	0,23	0,10	0,20	1,0
C7	0,12	0,12	0,24	0,16	0,12	0,20	0,7
D1	0,10	0,10	0,26	0,22	0,10	0,24	1,4
D2	0,10	0,10	0,24	0,26	0,10	0,25	1,5
D3	0,11	0,11	0,57	0,43	0,11	0,50	3,5
D4	0,11	0,09	0,37	0,33	0,10	0,35	2,5
D5	0,10	0,10	0,21	0,23	0,10	0,22	1,2

Tabela II - Resultados dos Ensaios de Desgaste