

MARIA CRISTINA MORÉ FARIAS

**DESGASTE POR DESLIZAMENTO DE AÇOS  
INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICOS**

Dissertação apresentada à Escola  
Politécnica da Universidade de  
São Paulo para obtenção do  
título de Mestre em Engenharia

São Paulo  
1999

A mis padres:  
Valentina y Rafael  
Por ustedes soy como soy  
y soy lo que soy.

## AGRADECIMENTOS

A los profesores *Amilton Sinatora* y *Deniol Tanaka* por la confianza depositada en mi, y por sus críticas y sugerencias.

Al profesor *Ambrosio Filho* por sus críticas y sugerencias en el examen de cualificación

A los profesores *André Tschiptschin*, *Angelo Fernando Padilha* y *Hélio Goldenstein* y a los alumnos de pos-graduación del Departamento de Engenharia de Metalurgia de la EPUSP por la colaboración técnica ofrecida durante la realización de este trabajo.

A los alumnos de pos-graduación, funcionarios del *Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN)* y al *Laboratório de Caracterização Tecnológica del Departamento de Engenharia de Minas de la EPUSP* por la ayuda ofrecida en la preparación de las muestras de ensayo.

A la *FAPESP* por el proyecto temático nº 94/3529-0 y por la bolsa de maestría otorgada a través del proceso nº 96/08083-5.

A los *compañeros del Laboratório de Fenômenos de Superfície* por la paciencia y por ayuda ofrecida durante la realización de este trabajo. Felicitaciones por el esfuerzo y por el fructífero trabajo en conjunto mantenido día a día.

A mis *amigos cubanos* por su intensa preocupación por el desarrollo de este trabajo.

A mis "*amigos internacionales*" (argentinos, colombianos, chilenos, peruanos, panameños, norteamericanos y brasilenos), por los grandes momentos de alegría y de tensión que hemos vivido juntos en estos casi tres años

*"Los mejores amigos se conocen en los momentos difíciles"*

*Gracias Fran, Vilma, Victor, Verónica, Mónica y Aída por sus grandes consejos y por su ayuda.*

*A ti Julio, mi amor, te conozco desde siempre y desde lejos.*

*Gracias por tu paciencia, por tu ayuda, por tu amistad y por tu amor*

*Eres lo que siempre estuve esperando.*

## SUMARIO

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE SÍMBOLOS

RESUMO

“ABSTRACT”

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS.....</b>	<b>4</b>
<b>3</b>	<b>REVISÃO DA LITERATURA.....</b>	<b>5</b>
3.1	Classificação do desgaste .....	5
3.2	Mecanismos de desgaste .....	9
3.2.1	Reação Triboquímica .....	9
3.2.2	Abrasivo .....	10
3.2.3	Fadiga de contato .....	11
3.2.4	Adesivo.....	11
3.2.5	Mecanismos de desgaste adesivo .....	13
a)	Teoria da delaminação de Suh (1973) .....	13
b)	Kayaba (1979).....	15
c)	Sasada (1979).....	18
d)	Rigney (1984).....	22
e)	Heilmann (1983) .....	27
f)	Wert (1989).....	30
3.2.6	Resumo dos mecanismos de desgaste adesivo apresentados .....	32
3.3	Variáveis que influenciam no desgaste por deslizamento.....	34
3.3.1	Influência das variáveis microestruturais.....	36
a)	Estrutura cristalina .....	37

b)	Energia de falha de empilhamento (EFE).....	38
c)	Partículas de segunda fase.....	39
d)	Estabilidade estrutural.....	40
e)	Tamanho de grão.....	42
3.3.2	Modelos matemáticos.....	44
a)	Equações fenomenológicas.....	44
b)	Equações baseadas em mecanismos de contato.....	48
3.4	Transições no desgaste por deslizamento.....	50
<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>58</b>
4.1	Materiais.....	58
4.2	Métodos.....	59
4.2.1	Caracterização dos materiais.....	59
4.2.2	Ensaio de Desgaste.....	60
a)	Equipamento.....	60
b)	Ensaio de desgaste.....	62
c)	Ensaio de desgaste complementares.....	64
4.2.3	Caracterização das amostras desgastadas.....	65
a)	Metalografia.....	65
b)	Rugosidade.....	66
c)	Ferritoscopia.....	66
d)	Difração de raios-X.....	66
e)	Microdureza.....	67
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>68</b>
5.1	Atrito.....	68
5.2	Desgaste.....	71
5.2.1	Análise da carga normal e da distância de deslizamento.....	71
5.2.2	Análise do tipo de material.....	72

5.2.3	Ensaio interrompidos.....	73
5.3	Rugosidade.....	74
5.4	Ferritoscopia.....	75
5.5	Raios-X das superfícies desgastadas e dos resíduos de desgaste.....	76
5.5.1	Fases presentes.....	76
5.5.2	Análise quantitativa das fases presentes.....	87
5.6	Microscopia óptica.....	88
5.6.1	Superfície.....	88
5.6.2	Partículas de desgaste.....	89
5.6.3	Seção longitudinal.....	90
5.7	Microscopia eletrônica de varredura.....	92
5.7.1	Superfície.....	92
5.7.2	Partículas de desgaste.....	94
5.7.3	Seção longitudinal.....	96
5.8	Microdureza.....	98
5.9	Desgaste, transformação martensítica e gradiente de dureza.....	99
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>99</b>
<b>7</b>	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>99</b>
	<b>ANEXO A.....</b>	<b>99</b>
	<b>ANEXO B.....</b>	<b>99</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>99</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3. 1. Formação de uma partícula de desgaste de forma laminar.....	15
Figura 3. 2. Partícula transferida que consiste de lâminas emplilhadas ( <i>slip-tangues</i> ) a qual foi destacada da superfície e transferida para a superfície oposta segundo o modelo de Kayaba. ....	16
Figura 3. 3. Esquema que mostra o processo de transferência adesiva de um fragmento de material em forma de lâmina ( <i>slip-tongue</i> ) segundo Kayaba.....	17
Figura 3. 4. Esquema mostrando a transferência adesiva de uma cunha segundo Kayaba.....	18
Figura 3. 5. Mecanismo de desgaste adesivo segundo Sasada. ....	19
Figura 3. 6. Deslocamento vertical do pino devido à geração, crescimento e remoção de uma partícula de transferência na interface de deslizamento do pino e do disco. ....	22
Figura 3. 7. Curva de desgaste do pino (deslocamento do pino na direção vertical) em função da distância de deslizamento .....	22
Figura 3. 8. Transferência de material e micro-ranhuras observadas na superfícies desgastada de um pino de Cu que deslizou contra um disco de Cu e 40 % de Ni, com carga normal de 0,59 N e velocidade de deslizamento de 0,5 mm/s, segundo Rigney. ....	23
Figura 3. 9. Partícula transferida de cobre puro com aparência laminar. ....	24
Figura 3. 10. Típica partícula de desgaste resultante dos desgaste por deslizamento de um pino de cobre sobre um disco de ferro. ....	26
Figura 3. 11. Aspecto dos fragmentos de desgaste: (a) laminares, (b) irregulares de forma laminar.....	27
Figura 3. 12. Distribuições de discordâncias produzidas pela deformação plástica no ferro puro (microscopia eletrônica de transmissão). (a) Emaranhados e células livres de dicordâncias formadas após uma deformação de 9 % a 20 °C. (b) Distribuição homogênea de discordâncias formada após 7 % de deformação plástica a -135 °C. ....	29

Figura 3. 13. Microscopia eletrônica de transmissão correspondente ao corte de uma seção longitudinal ao longo da pista de desgaste de um bloco de cobre (anel de aço inoxidável martensítico AISI 440 C, carga 67 N, distância de deslizamento 12 m, velocidade de deslizamento 0,05 m/s). A seta indica a posição da interface e a direção do deslizamento. A região escura (t) corresponde com a camada transferida; B é a região do material base (cobre) com estrutura de células de discordâncias.....	29
Figura 3. 14. Esquema mostrando as regiões sub-superficiais que podem se formar durante o desgaste por deslizamento.....	32
Figura 3. 15. Variáveis que influenciam no desgaste por deslizamento.....	35
Figura 3. 16. Natureza dos parâmetros do sistema tribológico.....	35
Figura 3. 17. Variáveis que influenciam nos mecanismos de desgaste por deslizamento.....	36
Figura 3. 18. Efeito da tensão aplicada na transformação martensítica.....	40
Figura 3. 19. Formação de martensita por deformação de tração para diferentes temperaturas de deformação. Aços do tipo 18-8 Cr-Ni. ....	41
Figura 3. 20. Variação da taxa de desgaste e da resistência de contato com a carga para o par latão 60/40- <i>Stellite</i> (61 % Co, 30 % Cr). Foram inseridos no gráfico os perfis de rugosidade da pista desgastada do pino de . Observa-se que a rugosidade da superfície desgastada com cargas acima da transição (0,8 kg) é aproximadamente 100 vezes maior do que a correspondente a condições de carga abaixo da transição.....	51
Figura 3. 21. Intensidade do desgaste de aços no contato deslizante a seco no ar como uma função da carga e velocidade de deslizamento (escala logarítmica). ....	52
Figura 4. 1. Micrografia óptica do aço inoxidável austenítico AISI 304. Ataque eletrolítico com ácido oxálico 10%. Observa-se uma estrutura austenítica com inclusões e maclas de recozimento. Foram observadas as mesmas características na microestrutura do aço AISI 316.....	58
Figura 4. 2. Máquina de ensaio de desgaste tipo pino-sobre-disco modelo TE79. ....	61
Figura 4. 3. Componentes do sistema de ensaio pino-sobre-disco. 1- Peso morto para a aplicação da carga, 2- Nível do bolha, 3- Porta-pino, 4- Porta-disco, 5- Braço de fixação do pino e de aplicação da carga, 6- Sensores de temperatura e de umidade, 7- Célula de carga para a medição da força de atrito.....	62
Figura 4. 4. Esquema do sistema de ensaio de desgaste com geometria do tipo pino-sobre-disco mostrando as dimensões dos corpos de prova.....	62

Figura 4. 5.	Esquema mostrando as seções que utilizam-se para a análise das amostras desgastadas. (a) paralela, (b) longitudinal, (c) transversal.....	65
Figura 5. 1.	Variação do coeficiente de atrito do aço AISI 304. Carga de 10 N, distância de deslizamento de 9000 m. A extensão do <i>runnign-in</i> foi até 1500 m.....	69
Figura 5. 2.	Variação do coeficiente de atrito do aço AISI 304. Distância de deslizamento de 9000 m, carga de 20 N. A extensão do <i>runnign-in</i> foi até 2000 m.....	69
Figura 5. 3.	Perda de volume acumulada (a) e taxa de desgaste acumulada (b) do pino dos aços AISI 304 e AISI 316. Ensaio interrompido, carga de 20 N e distância de deslizamento de 9000 m .....	74
Figura 5. 4.	Variação da rugosidade após o desgaste em função da distância de deslizamento medida em diferentes regiões da pista de desgaste. Os dados correspondem com as medições realizadas na superfície desgastada do pino de aço inoxidável AISI 316. Carga de 20 N e distância de deslizamento de 9000 m, ensaio interrompido.....	75
Figura 5. 5.	Espectros de difração de raios-X do pino e disco de aço AISI 304. Carga 10 N, distância total de 3000 m. ....	77
Figura 5. 6.	Espectros de difração de raios-X do pino, disco e dos resíduos de desgaste do aço AISI 304. Carga 10 N, distância 9000 m. ....	78
Figura 5. 7.	Espectros de difração de raios-X do pino, disco e dos resíduos de desgaste do aço AISI 304. Carga 20 N, distância 3000 m. ....	79
Figura 5. 8.	Espectros de difração de raios-X do pino, disco e dos resíduos de desgaste do aço AISI 304. Carga 20 N, distância 5000 m. ....	80
Figura 5. 9.	Espectros de difração de raios-X do pino, disco e dos resíduos de desgaste do aço AISI 304. Carga 20 N, distância 7000 m. ....	81
Figura 5. 10.	Espectros de difração de raios-X do pino, disco e dos resíduos de desgaste do aço AISI 304. Carga 20 N, distância 9000 m. ....	82
Figura 5. 11.	Espectros de difração de raios-X do pino e disco do aço AISI 316. Carga 10 N, distância 3000 m. ....	83
Figura 5. 12.	Espectros de difração de raios-X do pino, disco e dos resíduos de desgaste do aço AISI 316. Carga 10 N, distância 9000 m. ....	84
Figura 5. 13.	Espectros de difração de raios-X do pino, disco e dos resíduos de desgaste do aço AISI 316. Carga 20 N, distância 3000 m. ....	85
Figura 5. 14.	Espectros de difração de raios-X do pino, disco e dos resíduos de desgaste do aço AISI 316. Carga 20 N, distância 9000 m. ....	86

Figura 5. 15. Centro da pista de desgaste do disco de aço AISI 304. Carga de 20 N e distância de 9000 m.....	89
Figura 5. 16. Partícula de desgaste do aço AISI 316 correspondente ao período de <i>running-in</i> do ensaio interrompido. Carga de 20 N e distância total de 9000 m.....	90
Figura 5. 17. Partículas de desgaste do aço AISI 316 do período estável do ensaio interrompido. Carga de 20 N e distância total de 9000 m.....	90
Figura 5. 18. Seção longitudinal do disco desgastado de aço AISI 304. Carga de 20 N e distância de deslizamento de 9000 m.....	91
Figura 5. 19. Superfície desgastada do disco de aço AISI 316 mostrando uma região deformada onde o material formou camadas superpostas.....	92
Figura 5. 20. Acumulação de material na ponta de um risco de abrasão. Figura correspondente à superfície desgastada do disco de aço AISI 316. Carga 20 N e distância de deslizamento de 9000 m.....	93
Figura 5. 21. Partículas de desgaste do período de <i>running-in</i> (1000 m). Ensaio interrompido, carga de 20 N, distância de deslizamento de 9000 m, aço AISI 316 .....	94
Figura 5. 22. Partículas de desgaste do período estável do ensaio interrompido. Aço inoxidável AISI 316, carga de 20 N e distância de deslizamento de 9000 m. Observam-se partículas em forma de placas, esféricas e em forma de bastão. ....	95
Figura 5. 23. Partícula de desgaste (A) da Figura 5. 22. Carga de 20 N e 9000 m de distância total. O aspecto da partícula indica que esta foi deformada e enrolada antes de sair da interface de deslizamento como resíduo de desgaste.....	96
Figura 5. 24. Seção longitudinal mostrando a presença de uma camada de material aderido, embaixo da qual aparece uma camada de grãos deformados na direção do deslizamento. Observa-se também a presença de uma trinca na camada aderida. Seção longitudinal do pino de aço AISI 316 para uma carga normal de 20 N e distância total de 9000 m. ....	97
Figura 5. 25. Perfis de microdureza da seção longitudinal do pino e disco dos aços inoxidáveis austeníticos AISI 304 e AISI 316 para carga de 10 N e 20 N e distância de 9000 m. Medidas de microdureza realizadas com carga de 10 g. ....	98

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3. 1. Classificação do desgaste.....	8
Tabela 3. 2. Classificação dos processos de desgaste por deslizamento. ....	9
Tabela 3. 3. Variáveis consideradas no modelo de Paretkar e co-autores .....	47
Tabela 4. 1. Composição química dos aços AISI 304 e AISI 316 (%).....	58
Tabela 5. 1. Coeficiente de atrito médio e desvio padrão do aço AISI 304.....	70
Tabela 5. 2. Coeficiente de atrito médio e desvio padrão do aço AISI 316.....	70
Tabela 5. 3. Perda de massa (g) dos aços inoxidáveis austeníticos AISI 304 e AISI 316 .....	72
Tabela 5. 4. Quantidade de martensita do aço AISI 304 após ensaios de desgaste ....	88

## LISTA DE SÍMBOLOS

$M_{d30}$	Temperatura para a qual forma-se 50% de martensita com a aplicação de uma deformação de 30% sob condições de tração uniaxial, definida pela Equação (3.1)
$\sigma_0$	Limite de escoamento, definido pela Equação (3.2)
$\sigma_i$	Tensão de atrito que se opõe ao movimento das discordâncias
D	Diâmetro do grão
V	Perda de volume
t	Tempo
$\beta$	Termo definido como certa característica das superfícies iniciais
$\Delta W$	Perda de massa do material, definida pela Equação (3.6)
F	Carga aplicada
V	Velocidade
W	Perda de massa, definida pela Equação (3.7)
L	Comprimento da marca de desgaste
$P_0$	Pressão normal
$H_0$	Dureza inicial
$\sigma_u$	Tensão normal na instabilidade
$\epsilon_u$	Deformação na instabilidade (compressão axial)
$n_u$	Coefficiente de encruamento
$\tau_s$	Limite de cisalhamento volumétrico na instabilidade
m	Fator de atrito na interface
$\mu$	Coefficiente de atrito
s	Parâmetro da estrutura
g	Aceleração da gravidade

Q	Perda de volume por unidade de distância de deslizamento, definida pela Equação (3.11)
K	Coefficiente de desgaste
V(t)	Perda de volume após um tempo de deslizamento t, definida pela Equação (3.12)
N(t)	Taxa de geração de fragmentos, ou número de fragmentos formados por unidade de tempo
f(D)	Percentual de fragmentos gerados novamente
D	Diâmetro dos fragmentos
$C_e(t)$	Cobertura efetiva das camadas protetoras contra o desgaste sob a área nominal de contato
A	Área nominal de contato
$P_r(D)$	Probabilidade de que um fragmento D seja eliminado da trilha de desgaste
I	Intensidade integrada por unidade de comprimento, definida pela Equação (A.1)
$I_0$	Intensidade do raio incidente
e	Carga do elétron
m	Carga e massa do elétron
c	Velocidade da luz
$\lambda$	Comprimento de onda da radiação incidente
r	Raio do goniômetro
A	Área de seção transversal do raio incidente
v	Volume da célula unitária
F	Fator estrutura
P	Fator multiplicidade
$\theta$	Ângulo de Bragg
$e^{-2M}$	Fator temperatura
$\mu$	Coefficiente de absorção linear

$L$	Fator Lorentz (polarização)
$I_\gamma$	Intensidade de um pico de difração específico correspondente à austenita, definida pela Equação (A.3)
$V_\gamma$	Fração volumétrica da austenita
$\mu_m$	Coefficiente de absorção linear da mistura de fases
$I_\alpha$	Intensidade de um pico de difração específico correspondente à martensita, definida pela Equação (A.4)
$V_\alpha$	Fração volumétrica da martensita

## RESUMO

Uma das razões do grande esforço dedicado ao estudo do desgaste por deslizamento é devido a sua complexidade, especialmente no que se refere aos mecanismos envolvidos. No desgaste por deslizamento estão presentes mecanismos de adesão, fadiga, triboquímico e abrasão. Adicionalmente, podem ocorrer transições na taxa de desgaste devidas ao efeito da carga, velocidade de deslizamento ou da transformações de fases, entre outros fatores. Nos aços inoxidáveis austeníticos ocorre a transformação martensítica por deformação plástica durante o desgaste por deslizamento. O esclarecimento da influência desta transformação é ainda um ponto de atenção para os pesquisadores.

Com o objetivo de estudar o comportamento do desgaste dos aços inoxidáveis austeníticos, assim como a influência da transformação martensítica induzida por deformação plástica foram realizados ensaios de desgaste por deslizamento com variações na carga normal e na distância. Os aços AISI 304 e AISI 316 foram os materiais de estudo e o sistema de ensaio utilizado foi do tipo pino-sobre-disco. Foram caracterizadas as superfícies desgastadas e os resíduos de desgaste mediante microscopia óptica, microscopia eletrônica de varredura e difração de raios-X. Para a caracterização das regiões sub-superficiais foram realizadas medidas de microdureza.

No desgaste dos aços inoxidáveis austeníticos a microestrutura e a dureza da sub-superfície são afetadas pela presença da fase martensita induzida por deformação plástica. A dureza das regiões sub-superficiais influenciam na magnitude do desgaste. O material sofrerá um desgaste maior, se uma região sub-superficial, mais próxima à superfície desgastada, endurecida fortemente devido à deformação plástica e/ou à presença da martensita, não pode ser suportada pela regiões menos encruadas correspondentes ao material base.

## "ABSTRACT"

One of the reasons for the high efforts dedicated to study the sliding wear is its complexity, due to the multiple mechanisms involved. Mechanisms such as adhesion, abrasion, tribochemical effects and fatigue are present in sliding wear. Also transitions in the wear rate due to effects like loading, sliding speed or phase transformation, among other factors can occur. In austenitic stainless steels strain-induced martensitic transformation during sliding wear occurs. The explanation of the influence of that transformation is still a point of attention for researchers.

To study the austenitic stainless steels wear behavior as well as the influence of strain-induced martensitic transformation, sliding wear tests were performed with various normal loads and sliding distances. The materials studied were stainless steels AISI 304 and AISI 316. The wear tests were performed on pin-on-disk equipment. The wear surfaces and wear debris were characterized by means of optical microscopy, scanning electron microscopy and X-ray diffraction. For the characterization of the sub-superficial areas microhardness measurements were performed.

In the sliding wear of austenitic stainless steels the microstructure and sub-surface hardness are affected by the presence of strain-induced martensite. The hardness of sub-superficial areas influences the wear magnitude. The material will suffer a larger wear if the less hardened base region cannot support a strongly hardened sub-superficial area due to plastic deformation and/or martensite presence.

## 1 INTRODUÇÃO

O desgaste por deslizamento é um dos tipos de desgaste que ocorre com mais frequência na indústria e por isto é estudado com grande interesse pelos pesquisadores. Uma das razões do grande esforço dedicado ao estudo do desgaste por deslizamento é a sua complexidade, especialmente no que se refere aos múltiplos mecanismos envolvidos. No desgaste por deslizamento estão presentes mecanismos de adesão, formação e crescimento de trincas sub-superficiais por fadiga e formação de filmes superficiais por processos triboquímicos. Também ocorre abrasão por microcorte, sulcamento ou formação de proas.

Experimentos com diferentes tipos de metais mostraram que o deslizamento produz deformação plástica na superfície e um gradiente de deformação em baixo da superfície desgastada. Variáveis relacionadas às condições de contato e outras relacionadas à microestrutura dos materiais deslizantes influenciam na intensidade da deformação plástica da superfície e das regiões abaixo desta.

Durante o desgaste por deslizamento podem ocorrer transições na taxa de desgaste influenciadas pela carga, velocidade e distância de deslizamento ou condições ambientais tais como temperatura, umidade, entre outros. Com a elevação da carga ocorre uma transição de desgaste moderado para desgaste severo devido à ruptura do filme de óxido formado durante o desgaste moderado. Acima desta transição, o desgaste aumenta linearmente com a carga até acontecer uma segunda transição, onde o desgaste muda de severo para moderado. A causa desta segunda transição é a presença de um

novo filme de óxido que forma-se para altas temperaturas de contato e cuja estrutura difere da estrutura do óxido formado no desgaste moderado.

Foi observada em certos valores críticos de carga uma terceira transição acima da qual acontece um endurecimento da superfície devido à transformação martensítica por resfriamento em aços carbono.

Nos aços inoxidáveis austeníticos a transformação martensítica ocorre devido à deformação plástica. Segundo Hsu<sup>1</sup>, o aço inoxidável austenítico do tipo AISI 304 tem baixa resistência à adesão devido à ocorrência da transformação da fase austenita em martensita induzida por deformação plástica. Entretanto, Yang<sup>2</sup> mostrou experimentalmente que o aço AISI 304 desgastou-se menos que o aço AISI 310 de menor tendência a sofrer transformação martensítica por deformação. Porém o aço AISI 304 provocou um desgaste considerável do contra-corpo de aço ferramenta. Segundo Yang<sup>2</sup>, a transformação martensítica induzida por deformação, combinada com a transferência de material, cria uma camada na superfície suficientemente dura para produzir abrasão por microcorte na superfície do contra-corpo.

No aço AISI 310 a transformação martensítica não ocorre devido a que este aço tem uma composição química que estabiliza a austenita. O aço AISI 316 tem um comportamento intermediário entre o AISI 304 e AISI 310, a transformação martensítica induzida por deformação só ocorre depois de grandes distâncias de deslizamento<sup>3</sup>. Adicionalmente, Smith<sup>4</sup> mostrou que a transformação martensítica que ocorre durante o desgaste por deslizamento do aço AISI 316 não influencia na resistência ao desgaste deste material.

O esclarecimento da influência da martensita induzida por deformação na resistência ao desgaste, assim como as características do desgaste dos aços inoxidáveis austeníticos, além de sua importância conceitual é ainda um ponto de atenção para os pesquisadores devido às importantes aplicações destes materiais em diferentes indústrias, tais como a indústria química, eletrônica, automobilística, entre outras.

## 2 OBJETIVOS

Esta dissertação trata sobre o desgaste por deslizamento dos aços inoxidáveis austeníticos e tem como objetivo principal estudar a influência da carga normal e da distância de deslizamento no comportamento do atrito e do desgaste destes materiais.

Foi feita a caracterização das superfícies desgastadas e das regiões sub-superficiais assim como dos resíduos de desgaste. Inclui-se também o estudo da influência da transformação martensítica induzida por deformação no comportamento do desgaste.

### 3 REVISÃO DA LITERATURA

#### 3.1 Classificação do desgaste

A existência de diferentes tipos de desgaste nos metais tem gerado várias idéias quanto à classificação. Há vários termos associados ao desgaste, como *scuffing*<sup>1</sup>, *scoring*<sup>2</sup> e *galling*<sup>3</sup>, que têm diferentes significados para diferentes autores<sup>5</sup>. Mais do que definir tais termos, um caminho mais fácil para o entendimento do desgaste seria começar por sua própria classificação.

Vários critérios são utilizados para classificar o desgaste, tais como: movimento relativo entre os corpos do tribossistema, interação ou estado físico dos corpos e mecanismo de remoção de material. Na classificação baseada no movimento relativo entre os corpos, tem-se o desgaste por deslizamento, desgaste com movimento alternativo, por rolamento, por impacto ou por fluxo. Considerando a interação entre os corpos, tem-se o desgaste por interação de sólido e sólido (a mais freqüente), sólido e líquido ou sólido e gás. Relacionado ao elemento interfacial, os processos de desgaste podem ser denominados como desgaste a seco ou desgaste lubrificado<sup>5</sup>.

---

<sup>1</sup> (1) Dano localizado causado pela ocorrência de solda entre duas superfícies em deslizamento, sem fusão da superfície. Nota: No UK, *scuffing* implica somente solda. Nos EU, *scuffing* pode incluir efeitos abrasivos e o termo *scoring* é usado algumas vezes como sinônimo. (2) *Galling* moderado resultante da solda das asperezas devido ao calor do atrito.<sup>14</sup>

<sup>2</sup> (1) Formação de severos riscos na direção do deslizamento devido à solda localizada ou à abrasão.<sup>14</sup>

<sup>3</sup> Uma forma severa de *scuffing* associada com o dano ou falha total da superfície.<sup>14</sup>

A Tabela 3. 1 apresenta alguns exemplos de processos de desgaste, levando em consideração o tipo de interação, elemento interfacial e movimento relativo entre os corpos do tribossistema<sup>5</sup>.

O desgaste também pode ser classificado por mecanismos, que envolvem parâmetros do tribossistema, como as propriedades dos materiais em contato e as condições de operação, entre outros. Conhecendo-se o mecanismo de formação de resíduos de desgaste, facilita-se a seleção de materiais resistentes ao desgaste, assim como as técnicas para seu controle. Porém, tem como desvantagens que, em muitas situações, o mecanismo de desgaste é desconhecido, e vários mecanismos operam simultaneamente<sup>5</sup>. Segundo a norma DIN 50320<sup>6</sup>, há quatro mecanismos essenciais: adesão, abrasão, fadiga superficial e reação triboquímica.

Um critério muito utilizado atualmente foi proposto por Archard<sup>7</sup>, que classificou o desgaste em moderado e severo. O desgaste moderado é usualmente observado a baixas cargas resultando em uma baixa taxa de desgaste. O desgaste severo é observado quando as cargas são altas onde ocorre um aumento descontínuo da taxa de desgaste em relação ao período de desgaste moderado.

O critério de Archard, aparentemente simples, é muito utilizado nos sistemas metálicos deslizantes<sup>8</sup>, e em vários casos oferece uma ampla informação no que se refere ao mecanismo de desgaste atuante e ao aspecto tanto da superfície desgastada, bem como da composição e tamanho dos resíduos de desgaste.

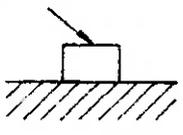
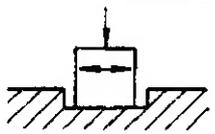
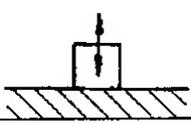
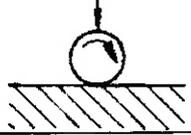
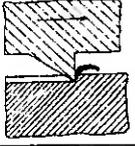
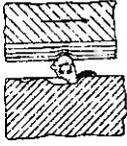
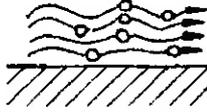
Quinn<sup>9</sup> também classifica o desgaste em severo e moderado, considerando os mecanismos de adesão, *scuffing*, fadiga superficial, abrasão, *fretting*<sup>4</sup>, cavitação e erosão no desgaste severo e no desgaste moderado, foi incluída a oxidação.

Essencialmente, o desgaste por deslizamento é aquele no qual há um movimento relativo entre duas superfícies em contato com uma carga aplicada, onde o dano da superfície não acontece por riscamento devido à penetração das asperezas ou por partículas externas<sup>10</sup>.

---

<sup>4</sup> Fenômenos de desgaste que ocorre entre duas superfícies em movimento relativo oscilatório de pequena amplitude.<sup>14</sup>

Tabela 3. 1. Classificação do desgaste<sup>5</sup>.

Estado físico do contra-corpo	Interface	Movimento	Nome Comum	Esquema
Sólido	Não há	Deslizamento	Desgaste por Deslizamento a Seco	
		Alternativo	<i>Fretting</i>	
		Impacto	Desgaste por Impacto	
		Rolamento	Desgaste por Rolamento	
		Deslizamento de Partículas	Desgaste Abrasivo a Dois Corpos	
		Gás ou Líquido, Sólido	Fluxo	Erosão
Sólido	Sólido	Deslizamento ou Rolamento	Desgaste Abrasivo a Três Corpos	
Líquido	Partículas de gás ou vapor	Fluxo	Cavitação	

Utilizando os critérios de classificação do desgaste, descritos acima pode-se resumir uma classificação do desgaste por deslizamento, segundo mostra a Tabela 3. 2.

Tabela 3. 2. Classificação dos processos de desgaste por deslizamento.

Movimento	Contra-corpo	Interface	Nome	Mecanismo	Nome
D E S L I Z A M E N T O	S	Sem Lubrificante	<i>Desgaste por Deslizamento a Seco</i>	Adesão ou Desgaste Dominado pela Deformação Plástica	<i>Desgaste Adesivo, Delaminação</i>
	Ó				
	L			Reação Triboquímica	<i>Desgaste Oxidativo</i>
	I	Lubrificante	<i>Desgaste por Deslizamento Lubrificado</i>		
	D			Fadiga Superficial	<i>Desgaste por Fadiga Superficial</i>
	O				

### 3.2 Mecanismos de desgaste

#### 3.2.1 Reação Triboquímica

O desgaste por reação triboquímica ocorre durante o contato entre duas superfícies sólidas as quais reagem com o meio. O meio corrosivo pode ser gasoso ou líquido. Inicialmente o contato entre as asperezas de ambas superfícies leva à remoção de metal devido ao mecanismo de adesão. Logo após deste pequeno período de desgaste adesivo, os metais em contato reagem com o meio resultando na formação de camadas protetoras das superfícies que reduzem o contato metal-metal. O aquecimento por atrito leva à formação de ilhas ou platôs de óxido as quais crescem até uma espessura crítica. As grandes pressões no contato entre asperezas ou a microfadiga provocam o trincamento das camadas protetoras levando à formação de partículas de desgaste não metálicas. Na presença de uma atmosfera de oxigênio as partículas de desgaste são constituídas fundamentalmente por óxidos. As partículas de desgaste metálicas e não metálicas formadas podem provocar a abrasão das superfícies em contato. Este processo

de desgaste por reação triboquímica procede mediante uma remoção e ressurgimento das camadas protetoras nas superfícies de contato<sup>10</sup>.

### 3.2.2 Abrasivo

Pelas suas características é considerado com um tipo de desgaste independente do mecanismos de reação triboquímica, fadiga superficial e adesão. Acontece quando uma superfície dura ou uma superfície contendo partículas duras, desliza sobre uma superfície mais mole levando à formação de ranhuras na superfície desta. A formação das partículas de desgaste ocorre quando o material das ranhuras é removido<sup>10,11</sup>.

Várias são as características mediante as quais é classificado o desgaste abrasivo: situação (condições macroscópicas que produzem o desgaste: geometria do contato, tensões, velocidade de deslizamento, entre outras), mecanismos (processo microscópicos que geram a partículas de desgaste) e manifestações ou conseqüências (taxa de desgaste, transições na taxa de desgaste, características das superfícies desgastadas e dos resíduos de desgaste)<sup>12</sup>. Os tipos de contato são divididos, tradicionalmente, em duas categorias: abrasão a *dois corpos* e a *três corpos*. Quando as partículas abrasivas não são fraturadas durante o processo, o desgaste é de *baixas tensões*, caracterizado pelo baixo riscamento da superfície; contrariamente ao que ocorre no desgaste sob *altas tensões*, onde as partículas abrasivas são fraturadas e a superfície apresenta um riscamento mais intenso. Segundo o tipo de mecanismos de desgaste existe uma classificação de desgaste abrasivo por sulcamento, formação de proa e corte. Embora no desgaste por deslizamento sejam observados alguns mecanismos de abrasão, o desgaste abrasivo é considerado como um tipo de desgaste independente devido a suas próprias características.

### 3.2.3 Fadiga de contato

É observada durante o deslizamento e/ou rolamento entre superfícies ou durante o impacto de sólidos e/ou líquidos contra outra superfície. O carregamento e descarregamento cíclicos ao qual está exposto um material pode induzir a formação de trincas na superfície e, abaixo desta, ocorrendo o trincamento e o destacamento de grandes fragmentos de material<sup>11</sup>. Durante a fadiga ocorre deformação elástica e deformação plástica, encruamento, formação e propagação de trincas.

Durante contato por deslizamento entre dois corpos sólidos, o deslizamento repetido, juntamente com os mecanismos de adesão ou de abrasão pode causar a formação e propagação de trincas no superfície ou abaixo desta. Segundo a teoria da delaminação de Suh<sup>13</sup>, as trincas sub-superficiais propagam-se paralelas à superfície desgastada. Geralmente o processo de delaminação ocorre devido à ação simultânea da adesão e da fadiga superficial. O carregamento cíclico da superfície é causado pela força de atrito e pela força normal atuantes na área de contato, onde a força de atrito tem uma componente adesiva<sup>10</sup>.

### 3.2.4 Adesivo

Ocorre quando dois corpos deslizam um sobre o outro produzindo-se um arrancamento de fragmentos de material de uma das superfícies os quais aderem-se no contra-corpo. Posteriormente, estes fragmentos aderidos podem sair da superfícies e voltar à superfície inicial ou podem ser convertidos diretamente em resíduos de desgaste<sup>11</sup>.

A adesão está relacionada com o contato e interação entre as asperezas de duas superfícies em deslizamento. Nesta interação geram-se forças atrativas nos pontos de contato das asperezas de caráter covalente, iônico, metálico ou de Van der Waals<sup>10</sup>.

Como a área de contato entre asperezas é muito pequena, mesmo para baixas cargas, a tensão de contato é grande a qual causa a deformação plástica das asperezas que favorece a formação das junções adesivas. As tensões tangenciais que são criadas durante o deslizamento poderão causar a fratura das junções e a transferência de material de uma superfície à outra. A formação e ruptura destas junções é favorecida por fatores tais como: limpeza das superfícies, isto é, superfícies livre de óxidos ou outros filmes ou gases adsorvidos, baixa pressão atmosférica ou vácuo, ductilidade, número de sistemas de deslizamento, dureza, encruamento e outras propriedades dos materiais deslizantes<sup>8</sup>.

Com aplicação de altas cargas e com lubrificação pobre, ocorre um desgaste adesivo severo da superfície de componentes metálicos deslizantes. Este tipo de desgaste adesivo severo foi definido como *galling*<sup>14</sup>. O dano é caracterizado pela ocorrência de transferência de material a nível macroscópico, isto é, grandes fragmentos de material ou protuberâncias que são facilmente visíveis nas duas superfícies em contato.

Diferentes mecanismos tem sido propostos para explicar o desgaste adesivo que ocorre durante o deslizamento de duas superfícies. Todos os mecanismos propostos envolvem deformação plástica da superfície e da sub-superfície, porém diferem nos detalhes dos processos através dos quais formam-se os resíduos de desgaste. Alguns

destes mecanismos propostos na literatura para descrever o desgaste adesivo serão apresentados a seguir.

### **3.2.5 Mecanismos de desgaste adesivo**

Vários dos mecanismos de desgaste adesivo propostos na literatura demonstraram a existência de dois estágios: transferência de material e destacamento dos fragmentos do sistema deslizante para a formação de resíduos de desgaste. Porém estas etapas são descritas de formas diferentes. A seguir são apresentados vários mecanismos de desgaste adesivo propostos por diferentes autores.

#### **a) Teoria da delaminação de Suh (1973)<sup>13, 15</sup>**

A teoria da delaminação, proposta por Suh<sup>13</sup> é uma das explicações do desgaste adesivo de uma superfície deformada plasticamente. Está baseada no comportamento das discordâncias e na formação e propagação de trincas na sub-superfície dos materiais deslizantes. Esta teoria prediz qualitativamente a forma laminar das partículas de desgaste mas não considera a ocorrência do processo de transferência de material. A descrição geral desta teoria foi apresentada mediante uma seqüência de eventos os quais levam à formação das partículas de desgaste. Considerando o caso da superfície de um metal B, e um metal A, mais duro, ter deslizado sobre B, tem-se a seqüência de eventos a seguir:

- 1- Quando ambas as superfícies metálicas são colocadas em contato deslizante, as cargas normal e tangencial são transmitidas aos pontos de contato por ações adesivas e de sulcamento. As asperezas da superfície mais mole sofrem deformação plástica e algumas são fraturadas devido à ação repetida das cargas normal e tangencial.

2- A tração superficial exercida pela asperezas mais duras sobre a superfície mais mole induz deformação por cisalhamento e esta deformação acumula-se com a ação repetida das cargas.

3- À medida em que o deslizamento continua, acumulam-se discordâncias abaixo da superfície. Este acúmulo de discordâncias provoca a formação de vazios que com o tempo coalescem, resultando numa trinca paralela à superfície de desgaste. A formação de vazios pode ser favorecida pela presença de partículas duras no material as quais bloqueiam o movimento e interação das discordâncias. Os resultados experimentais indicam que a formação de vazios a partir das partículas duras de segunda fase pode ser devido à quebra da interface matriz-partícula ou devido à quebra da partícula de segunda fase<sup>16</sup>.

4- Uma vez a trinca formada a ação posterior das cargas e da deformação plástica causa a extensão, e propagação das trincas as quais tendem-se a propagar paralelas à superfície e a uma profundidade determinada. Uma possível causa de que as trincas se propagam paralelas à superfície é que a intensidade das tensões atuantes é máxima abaixo do contato e em certa profundidade em relação à superfície.

5- O crescimento de trincas até um comprimento crítico conduz à separação do material localizado entre a trinca e a superfície. Posteriormente forma-se uma partícula laminar de desgaste conforme mostra a Figura 3. 1.

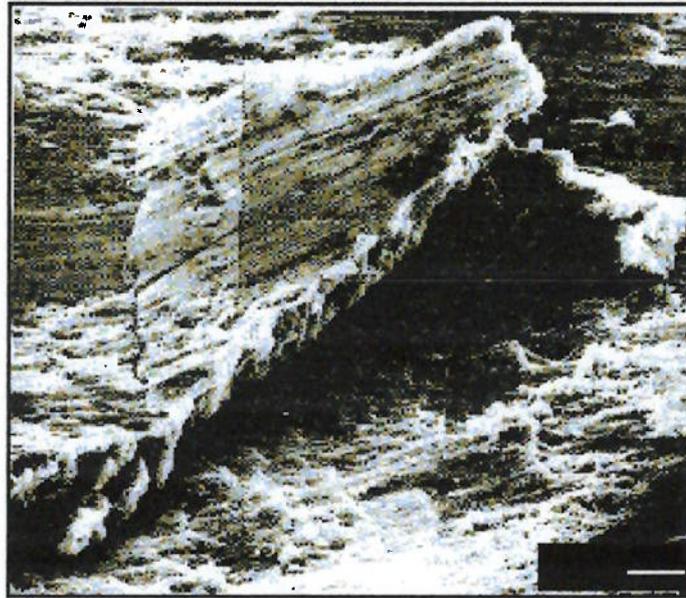


Figura 3. 1. Formação de uma partícula de desgaste de forma laminar<sup>17</sup>.

**b) Kayaba (1979)<sup>18</sup>**

Em observações do processo de transferência adesiva e dos fragmentos aderidos, realizadas num sistema de desgaste deslizante de aço inoxidável 304 inserido num microscópio eletrônico de varredura, detectaram-se dois tipos de processos de transferência adesiva. O primeiro processo consistiu da formação e crescimento de junções adesivas seguido de escorregamento sucessivo do material para formar um volume em forma lâmina ou (*slip-tongue*). O escorregamento ocorreu juntamente com a formação e crescimento de trincas na base da lâmina até provocar sua fratura e destacamento. O fragmento destacado transfere-se para a superfície do contra-corpo. Este fragmento está formado por típicas lâminas empilhadas, como apresenta a Figura 3.

2.



Figura 3. 2. Partícula transferida que consiste de lâminas emplilhadas (*slip-tongues*) a qual foi destacada da superfície e transferida para a superfície oposta segundo o modelo de Kayaba<sup>18</sup>.

Finalmente o processo de geração da lâmina e de transferência adesiva foi dividido em seis estágios sucessivos explicados a seguir e mostrados esquematicamente na Figura 3. 3.

- 1.- Figura 3. 3 (a). Aplicação de uma carga normal no contato em estado estático.
- 2.- Figura 3. 3 (b). Geração de uma força de atrito, crescimento da junção.
- 3.- Figura 3. 3 (c). Escorregamento na direção da linha AC e geração da lâmina ABCB'. Formação de uma nova interface de contato AA'.
- 4.- Figura 3. 3 (d). Flexão da lâmina ABCB' devido à ação do cisalhamento na suas faces superior e inferior e à compressão concentrada na sua origem B'. A segunda zona plástica A'AB'C' estende-se abaixo da primeira lâmina formada. Esta etapa e a anterior ocorreriam aproximadamente ao mesmo tempo.
- 5.- Figura 3. 3 (e). Geração sucessiva de lâminas contanto que as condições de tensão sejam apropriadas. As trincas propagam-se na base da lâmina.
- 6.- Figura 3. 3 (f). Escorregamento na interface de contato e formação de um fragmento transferido.

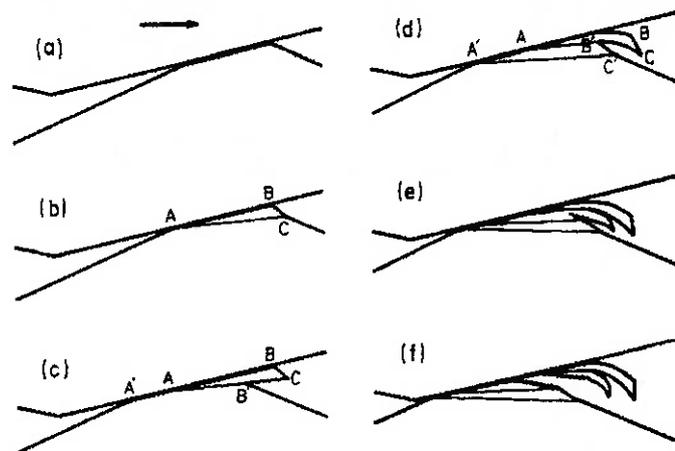


Figura 3. 3. Esquema que mostra o processo de transferência adesiva de um fragmento de material em forma de lâmina (*slip-tongue*) segundo Kayaba<sup>18</sup>.

Segundo Kayaba<sup>18</sup>, outro tipo de transferência adesiva ocorre em ausência de escorregamento na interface. Este processo foi dividido em seis estágios, representados na Figura 3. 4.

- 1.- Figura 3. 4 (a). Aplicação de uma carga normal no contato em estado estático.
- 2.- Figura 3. 4 (b). Aplicação de uma força tangencial e crescimento da junção sem deslizamento relativo da interface.
- 3.- Figura 3. 4 (c). Propagação repentina de uma trinca dentro do material na borda de saída A da região plástica ABC. A região ABCC'D deforma-se e a linha BC dobra-se como resultado da abertura da trinca D. O deslizamento acontece em pequena escala na linha de escorregamento AC e no mesmo tempo a trinca deixa de se propagar.
- 4.- Figura 3. 4 (d). Extensão de uma segunda região plástica DC'E a partir da ponta da trinca correspondente ao contato imaginário DC'.
- 5.- Figura 3. 4 (e). Continuação da propagação da trinca formada e do micro-escorregamento o qual leva à formação de uma terceira região plástica similar à etapa anterior.
- 6.- Figura 3. 4 (f). Separação da cunha do volume do material por ruptura.

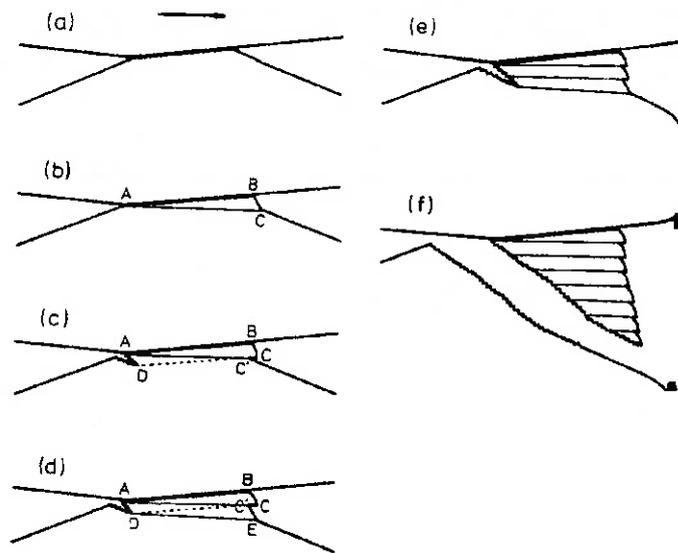


Figura 3. 4. Esquema mostrando a transferência adesiva de uma cunha segundo Kayaba<sup>18</sup>.

Segundo Kayaba<sup>18</sup> somente quando os fragmentos são transferidos para uma superfície ou outra, o processo de adesão é importante. Portanto, pode-se afirmar que o mecanismo de desgaste adesivo ocorre por transferência adesiva de uma lâmina (*slip-tongue*) ou de uma cunha e os resíduos de desgaste formam-se por destacamento dos fragmentos transferidos das superfícies em deslizamento.

#### c) Sasada (1979)<sup>19</sup>

Sasada<sup>19</sup> apresentou outro mecanismo de desgaste adesivo a partir de observações mais detalhadas do comportamento dos fragmentos de material desde a etapa inicial de desprendimento até serem convertidas em resíduos de desgaste. Estas observações mostraram que as partículas de desgaste não são produzidas diretamente a partir dos fragmentos de material desprendidos das superfícies em deslizamento. Pequenos fragmentos chamados “elementos de transferência” aderem-se nas superfícies deslizantes e juntam-se um com outro. Neste processo os elementos transferidos aumentam seu tamanho, encruam-se, e oxidam-se enquanto permanecem na interface de

deslizamento até que finalmente são removidas como partículas de desgaste. Portanto, os resíduos de desgaste tem uma forma, composição e propriedades diferentes em relação às partículas inicialmente desprendidas<sup>19</sup>.

O processo de formação das partículas de desgaste foi modelado como segue:

Quando a força de atrito produz o cisalhamento da junção formada entre as asperezas, pequenos fragmentos de material das superfícies são arrancados e aderidos nas superfícies deslizantes, tal como o representa a Figura 3. 5 [(a)-(c)].



Figura 3. 5. Mecanismo de desgaste adesivo segundo Sasada<sup>19</sup>.

Os pequenos fragmentos são chamados “elementos de transferência”. Estes fragmentos criam uma nova aspereza na superfície oposta e podem formar uma nova junção durante o deslizamento posterior, Figura 3. 5 (d). O cisalhamento do novo

contato formado produz uma nova partícula de transferência a qual adere-se numa das duas superfícies deslizantes, Figura 3. 5 (e). A repetição deste processo leva ao crescimento da partícula de transferência, conforme mostra a Figura 3. 5 (f).

A partícula transferida suporta a pressão total de contato. Se as propriedades do material não mudam durante o deslizamento, a partícula de transferência retida na interface tem que ser deformada plasticamente na direção normal no momento que a pressão normal de contato seja superior ao limite de escoamento do material, Figura 3. 5 [(g)-(h)].

A partícula transferida também é cisalhada além de ser comprimida, resultando em um fragmento em forma de lâmina aderido nas superfícies. O estágio final do processo de formação dos resíduos de desgaste é a formação de um conglomerado de lâminas transferidas aderido numa das superfícies o qual cresce rapidamente levando consigo outros fragmentos transferidos ou pequenas partículas desprendidas da superfície oposta. Até que em fim, uma partícula grande em forma de placa ou lâmina é removida da interface deslizante, Figura 3. 5 (i).

Sasada<sup>19</sup> obteve os principais resultados a partir de ensaios de desgaste por deslizamento a seco num arranjo pino-contra-disco. Utilizou metais puros (Mo, Fe, Ni, Cu, Ag, Zn, Al) ensaiados com uma carga normal numa faixa de 1-5 N. Segundo este autor as partículas de desgaste teriam forma de placas se estas são removidas da superfície do pino. Logicamente, as partículas transferidas também aderem-se na superfície do disco mas não são cisalhadas durante o deslizamento porque a passagem repetida do pino perturba o cisalhamento e crescimento da partícula transferida.

Portanto, as partículas de desgaste podem ter forma equiaxial ou laminar dependendo dos detalhes do processo de transferência adesiva.

Sasada<sup>19</sup> demonstrou o crescimento das partículas de transferência mediante a medição do deslocamento vertical do pino durante o contato com o disco, segundo a hipótese seguinte: se os fragmentos desprendidos de ambas superfícies em deslizamento aglomeram-se para formar uma partícula de tamanho maior dentro da interface, e são removidas posteriormente, o pino tem que se mover na direção vertical em função dos processos de geração, crescimento e remoção das partículas conforme mostra a Figura 3. 6 e a Figura 3. 7.

Segundo Sasada<sup>19</sup>, se o desgaste tivesse um comportamento linear como mostra a Figura 3. 6 (1), o comprimento do pino diminui linearmente com o aumento da distância de deslizamento, de modo que a relação entre o decréscimo do comprimento do pino e a distância de deslizamento segue a curva ABC da Figura 3. 7. Se uma partícula que é arrancada da superfície fica retida na interface de deslizamento e além disso cresce, o pino necessariamente desloca-se na direção vertical oposta a sua perda de massa, sendo afastado do disco como mostra a Figura 3. 6 (2). No momento em que esta partícula sai da interface o pino retorna à superfície do disco. Portanto, neste caso, a curva do decréscimo do comprimento do pino em função da distância de deslizamento é a assinalada como ADEF na Figura 3. 7.

Sabe-se que as vibrações tem uma influência negativa no desgaste e que devem ser eliminadas para oferecer um correto resultado do ensaio de desgaste. Mas a partir do estudo de Sasada<sup>19</sup>, está claro que é impossível evitar um movimento relativo

proveniente dos processo de geração das partículas de desgaste. Em outras palavras, segundo Sasada<sup>19</sup>, a vibração não é a causa mas é um resultado do desgaste.

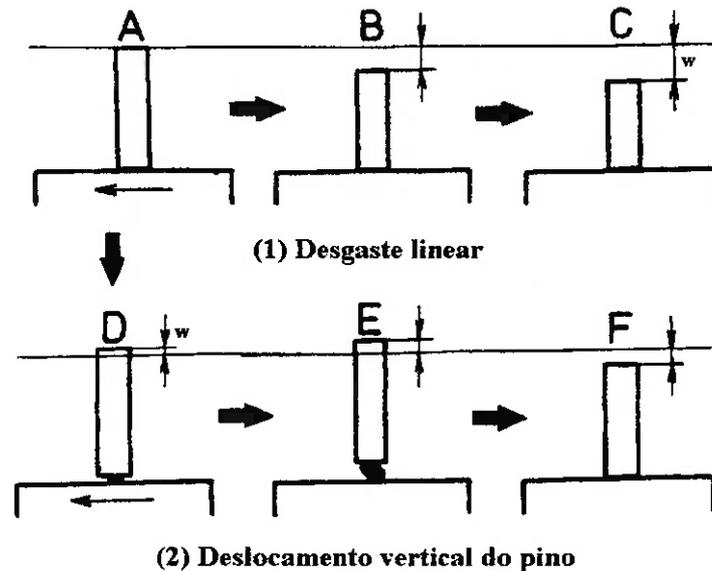


Figura 3. 6. Deslocamento vertical do pino devido à geração, crescimento e remoção de uma partícula de transferência na interface de deslizamento do pino e do disco<sup>19</sup>.

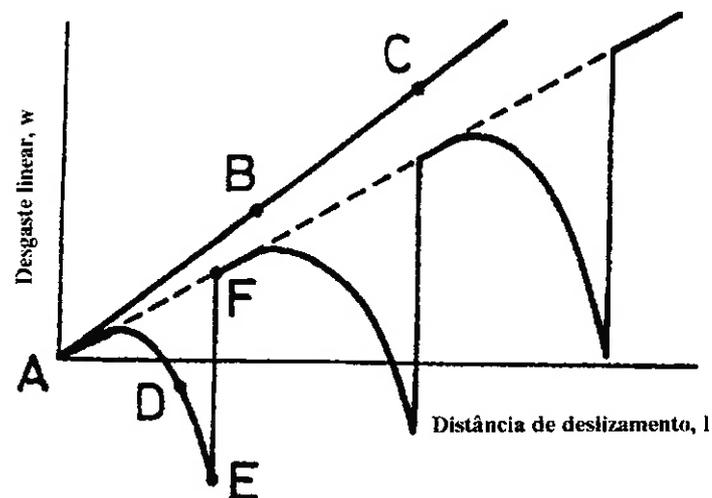


Figura 3. 7. Curva de desgaste do pino (deslocamento do pino na direção vertical) em função da distância de deslizamento<sup>19</sup>.

#### d) Rigney (1984)<sup>20</sup>

Outras experiências, realizadas com pares tribológicos de ferro, níquel, molibdênio, cobre e ligas de cobre, permitiram propor uma seqüência de eventos

envolvidos no desgaste por deslizamento, determinar a composição química e a estrutura dos resíduos de desgaste, da superfície e sub-superfície, assim como caracterizar a geometria das partículas de desgaste<sup>20</sup>.

Nos estudos de Rigney<sup>20</sup> o processo inicial de deslizamento (micrômetros de distância percorrida) foi caracterizado pela presença de pequenos fragmentos de material transferido na superfície desgastada. Neste período observou-se também a presença de micro-ranhas produzidas por deformação plástica e/ou por corte sem evidências de material transferido, conforme mostra a Figura 3. 8.

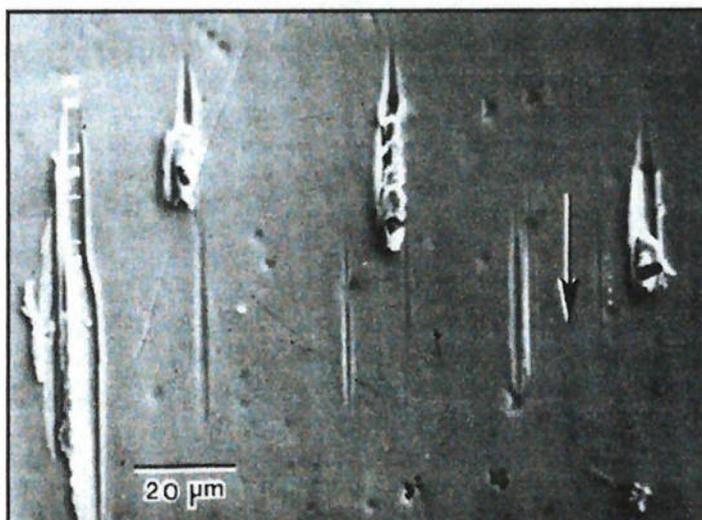


Figura 3. 8. Transferência de material e micro-ranhas observadas na superfícies desgastada de um pino de Cu que deslizou contra um disco de Cu e 40 % de Ni, com carga normal de 0,59 N e velocidade de deslizamento de 0,5 mm/s, segundo Rigney<sup>20</sup>.

Observou-se que o material transferido tem uma estrutura de lâminas superpostas (vide Figura 3. 9). Na frente do material transferido observou-se a formação de uma proa. Esta estrutura laminar dos fragmentos transferidos também foi detectada por Kayaba<sup>18</sup> nos seus ensaios conforme mostrada na Figura 3. 2.

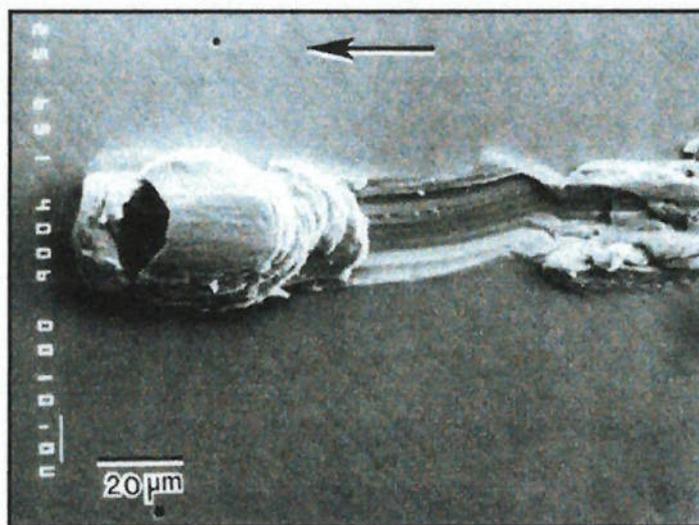


Figura 3. 9. Partícula transferida de cobre puro com aparência laminar<sup>20</sup>.

Outro aspecto importante do trabalho de Rigney<sup>20</sup> é em relação à direção do processo de transferência, o qual foi descrito que ocorre de três maneiras: simples ( $A \rightarrow B$  ou  $B \rightarrow A$ ), mútua ( $A \rightarrow B$  e  $B \rightarrow A$ ) e regressiva ( $A \rightarrow B \rightarrow A$ ). Na maioria dos ensaios realizados por Rigney<sup>20</sup>, foi detectada a transferência mútua, que concorda com Sasada<sup>19</sup> que a direção em que ocorre a transferência depende da geometria do sistema de ensaio. A rugosidade e a solubilidade mútua entre ambos componentes também influencia na intensidade do processo de transferência de material, sendo que a transferência é maior para rugosidade e solubilidade maior.

Rigney<sup>20</sup> estabeleceu uma analogia entre o processo de mistura dos fragmentos de transferência e o processo comercial de produção de ligas metálicas a partir de pós produzidos em moinhos de bola (*mechanical alloying*). Esta hipótese foi comprovada com o auxílio da microscopia eletrônica de transmissão, comparando a estrutura da camada transferida de amostras desgastadas de cobre e uma seção de uma liga de cobre obtida em um moinho de bolas. Em ambos casos obteve-se a estrutura de grãos muito pequenos.

Finalmente a seqüência de eventos envolvidos no desgaste por deslizamento foi apresentada como segue: o contato entre asperezas provoca uma considerável deformação plástica do par de materiais em deslizamento. Esta deformação plástica produz uma mudança na microestrutura da superfície e sub-superfície, levando a uma instabilidade do material, o qual provoca a transferência de pequenos fragmentos do material deformado. Os eventos seguintes tem analogia com o processo de ligação mecânica, onde os fragmentos transferidos são deformados, encruados e misturados com outros fragmentos do mesmo material ou do material do contra-corpo e também com os componentes do meio (oxigênio, lubrificante, entre outros). O resultado final do processo é uma camada transferida com uma estrutura de grãos muitos pequenos a partir da qual surgem os resíduos de desgaste com diferentes geometrias<sup>20</sup>.

Rigney<sup>20</sup> demonstrou que pelo menos dois tipos de resíduos de desgaste formam-se durante o deslizamento de dois corpos metálicos: laminares e não laminares, ambos com uma estrutura de grãos muitos finos, sendo que esta estrutura corresponde com a estrutura da camada transferida com composição química do par de materiais deslizantes.

A formação dos resíduos laminares pode ser em parte explicada com a teoria da delaminação, porém estes surgem a partir da camada transferida e não diretamente do material base conforme o descrito por Suh<sup>13</sup>. Para um maior esclarecimento deste fato, Rigney<sup>20</sup> sugere que além da microscopia eletrônica de varredura (MEV), é necessária a utilização de outras técnicas complementares tais como: espectroscopia de dispersão de energia de raios-X (*EDS*), espectroscopia de dispersão de comprimento de onda de

raios-X (*WDS*), difração de raios X, espectroscopia de elétrons de Auger (*AES*), microscopia eletrônica de transmissão (*MET*), difração de elétrons, entre outras.

Segundo Rigney<sup>20</sup> os resíduos de desgaste não laminares tem diferentes configurações: “placas, fitas, cilindros, esferas, cavacos, fragmentos irregulares, e agrupamentos de pequenas partículas”. Diferentes efeitos podem provocar a formação de diferentes configurações dos resíduos de desgaste. Os agrupamentos formam-se, por exemplo, em pares tribológicos de aço, onde as pequenas partículas que desprendem-se das superfícies atraem-se entre si pelo efeito do ferromagnetismo. O enrolamento dos resíduos laminares leva à formação de resíduos de configuração cilíndrica como mostra a Figura 3. 10. Os fragmentos de desgaste irregulares são encontrados com maior frequência e a sua geometria é basicamente laminar, isto é, são um caso particular dos resíduos laminares. Nota-se na Figura 3. 11 a diferença entre os resíduos laminares e irregulares.



Figura 3. 10. Típica partícula de desgaste resultante dos desgaste por deslizamento de um pino de cobre sobre um disco de ferro<sup>21</sup>.

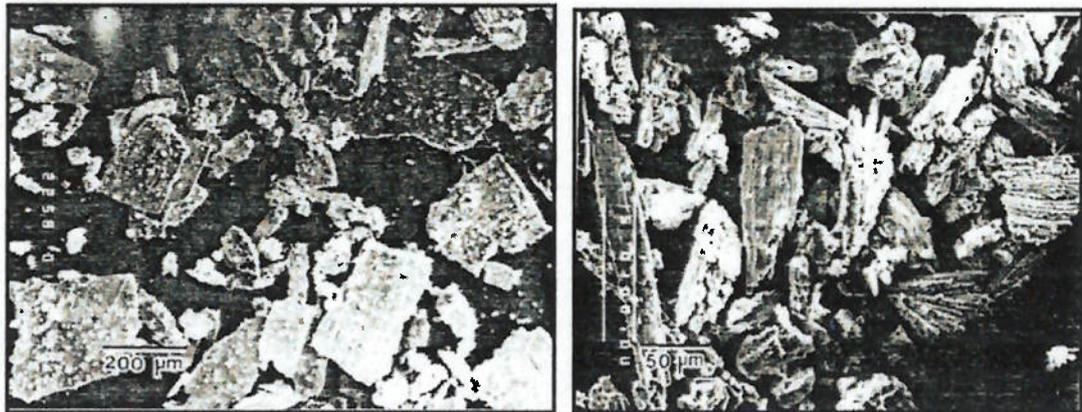


Figura 3. 11. Aspecto dos fragmentos de desgaste: (a) laminares, (b) irregulares de forma laminar.

e) **Heilmann (1983)**<sup>22</sup>

No trabalho de Heilmann<sup>22</sup>, o uso de diferentes técnicas de análise como a microscopia óptica, MEV, EDS, WDS e MET permitiu a observação do processo de transferência de material e obter informação sobre a estrutura e composição química do material transferido e dos fragmentos de desgaste. Obteve-se uma estreita relação entre as características da camada transferida e geração de resíduos de desgaste<sup>22</sup>.

Segundo os resultados dos experimentos de Heilmann<sup>22</sup> com amostras de ligas de cobre deslizando sobre aço inoxidável martensítico AISI 440C, o processo de transferência de material ocorre nos primeiros momentos do deslizamento antes de serem detectados fragmentos de desgaste.

O estudo das regiões sub-superficiais revelaram uma estrutura diferente em função da profundidade a partir da superfície, sendo observada uma camada de estrutura de grãos muito pequenos perto da superfície, cuja composição química é similar à composição do material transferido, consistente de elementos químicos provenientes de ambos materiais em deslizamento. Abaixo da camada de material transferido observou-

se uma região muito deformada com estrutura celular cuja composição química corresponde com a do material base. Os resíduos de desgaste tiveram a mesma composição e estrutura da camada transferida.<sup>22</sup>

As células de discordâncias formam-se como resultado da deformação plástica de um metal ou liga. Quando um metal é deformado plasticamente ocorre um aumento da densidade das discordâncias e da sua mobilidade, resultando na formação de uma distribuição específica das discordâncias que depende de: tipo de estrutura cristalina do material deformado, temperatura e velocidade da deformação, energia de falha de empilhamento, entre outros fatores. Na Figura 3. 12 apresentam-se duas distribuições das discordâncias que mostram o efeito da deformação plástica em amostras de ferro puro a temperaturas de 20 °C e de - 135 °C. A deformação plástica a 20 °C produz a formação de emaranhados de discordâncias arranjadas em paredes as quais rodeiam regiões (“células”) quase livres de discordâncias, vide Figura 3. 12 (a). A deformação plástica a -135 °C produz uma distribuição de discordância quase homogênea, segundo mostra a Figura 3. 12 (b). A região inferior (B) da Figura 3. 13 mostra uma parte de uma amostra de cobre altamente deformada devido ao desgaste, também com as características de uma estrutura de células de discordâncias, de acordo com o mostrado na Figura 3. 12 (a).<sup>23</sup>

Os estudos de Heilmann<sup>22</sup> se estenderam ao desgaste lubrificado. Estes ensaios permitiram concluir que a presença de lubrificante retarda o processo de desgaste adesivo devido à redução do contato metal-metal e portanto reduz a transferência adesiva. Simplesmente o lubrificante produz a dispersão e separação das pequenas partículas transferidas (elementos de transferência) antes de que estes possam se juntar

para formar uma camada transferida. Portanto, o lubrificante diminui a taxa de desgaste adesivo.

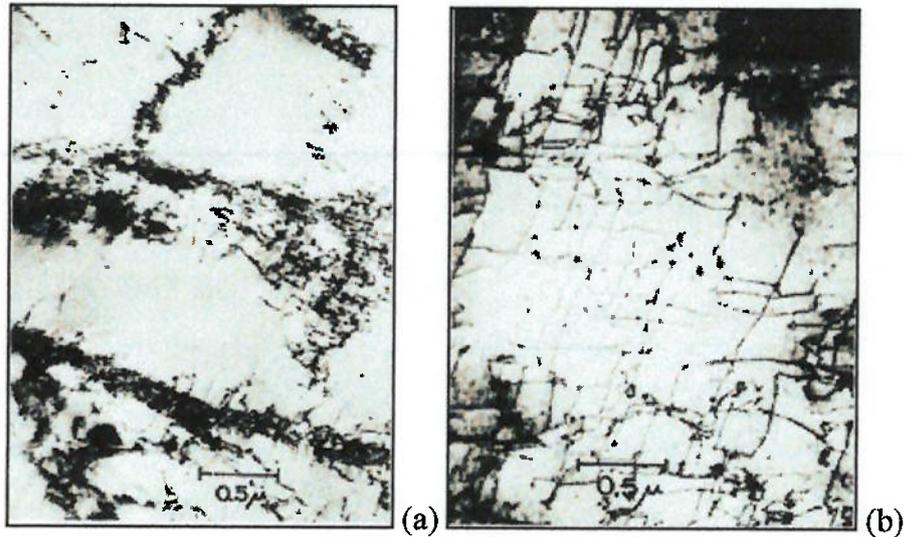


Figura 3. 12. Distribuições de discordâncias produzidas pela deformação plástica no ferro puro (microscopia eletrônica de transmissão). (a) Emaranhados e células livres de discordâncias formadas após uma deformação de 9 % a 20 °C. (b) Distribuição homogênea de discordâncias formada após 7 % de deformação plástica a -135 °C.<sup>23</sup>

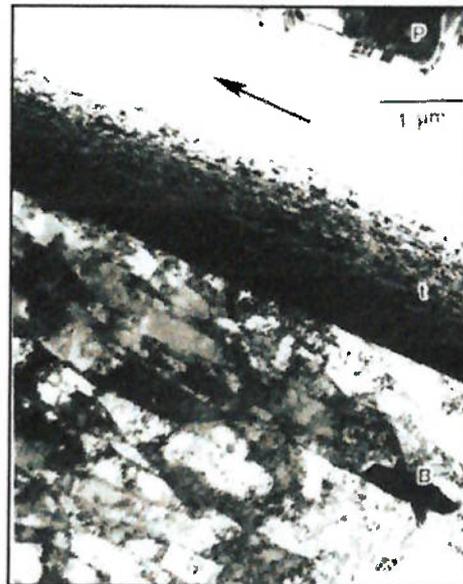


Figura 3. 13. Microscopia eletrônica de transmissão correspondente ao corte de uma seção longitudinal ao longo da pista de desgaste de um bloco de cobre (anel de aço inoxidável martensítico AISI 440 C, carga 67 N, distância de deslizamento 12 m, velocidade de deslizamento 0,05 m/s). A seta indica a posição da interface e a direção do deslizamento. A região escura (t) corresponde com a camada transferida; B é a região do material base (cobre) com estrutura de células de discordâncias.<sup>23</sup>

**f) Wert (1989)<sup>24</sup>**

Wert<sup>24</sup> apresentou um mecanismo de desgaste que considera a influência das variáveis microestruturais no comportamento do desgaste. Também mostrou que durante o desgaste forma-se abaixo da superfície uma camada muito fina de material transferido e uma camada de estrutura celular similarmente ao descrito por Heilmann<sup>22</sup>. O mecanismo proposto por Wert<sup>24</sup> apresenta-se a seguir:

1- Na interação inicial das asperezas, desenvolve-se uma estrutura celular a qual durante o progresso da deformação plástica torna-se mais fina e definida. A carga normal e a distância de deslizamento favorecem este comportamento de forma proporcional. Com o aumento da profundidade a partir da superfície desgastada o tamanho das células e a espessura das paredes de células aumentam.

2- A facilidade de formação das células de discordâncias está relacionada com o número de sistemas de deslizamento ativos (estrutura cristalina), orientação do cristal em relação à superfície em contato e com a energia de falha de empilhamento. A formação das células requer a ocorrência de escorregamento com desvio (*cross slip*) das discordâncias favorecido a altas energias de falha de empilhamento.

3- Dependendo da temperatura de recristalização, grau de aquecimento por atrito e da energia de deformação armazenada, a recristalização pode ocorrer nas regiões mais altamente deformadas, isto é, nas regiões próximas à superfície. Como resultado têm-se novos grãos livres de deformação. Para uma maior profundidade a partir da superfície, a energia de deformação armazenada é menor, sendo as células de discordâncias mais estáveis. Para profundidades suficientemente grandes, as deformações não serão

suficientes para produzir células de discordâncias e somente serão observados emaranhados de discordâncias.

4- Durante o deslizamento ocorre uma rotação das células de discordâncias, e o alinhamento dos grãos na direção de deslizamento e levando à formação de uma banda de cristais paralelos à superfície. Também uma camada mista é formada na superfície devido aos eventos de oxidação ou adesão.

5- O efeito principal das partículas de segunda fase no desgaste induzido por deformação plástica é favorecer a nucleação de trincas sub-superficiais por ruptura da ligação da interface matriz/partícula ou por fratura da partícula.

6- Finalmente, podem formar-se diferentes regiões a partir da superfície dependendo da influência das variáveis microestruturais. Estas regiões sub-superficiais são citadas seguir:

- *Região 4*: uma camada mista com tamanho de célula extremadamente pequeno.
- *Região 3*: uma camada altamente deformada que pode recristalizar ou não .
- *Região 2*: uma região de células de discordâncias indistinguível.
- *Região 1*: metal não deformado característico do volume do material.

Os resultados experimentais obtidos por outros pesquisadores não mostraram a formação da *Região 3*, onde pode ocorrer recristalização, conforme o descrito por Wert<sup>24</sup>. Segundo Rice<sup>25</sup>, durante o desgaste por deslizamento dos metais, formam-se abaixo da superfície desgastada três regiões características, mostradas na Figura 3. 14. A *Região 4*, descrita por Wert<sup>24</sup>, como sendo uma camada mista com células de discordâncias de pequeno tamanho, corresponde à *Região 3*, mostrada na Figura 3. 14,

segundo os resultados experimentais de Rice<sup>25</sup>. A *Região 2*, correspondente ao mecanismo apresentado por Wert<sup>24</sup> corresponde à *Região 2*, mostrada na Figura 3. 14, conforme os resultados de Rice<sup>25</sup>. Nesta região ocorre deformação plástica a qual leva ao afinamento dos grãos e à formação de células de discordâncias.

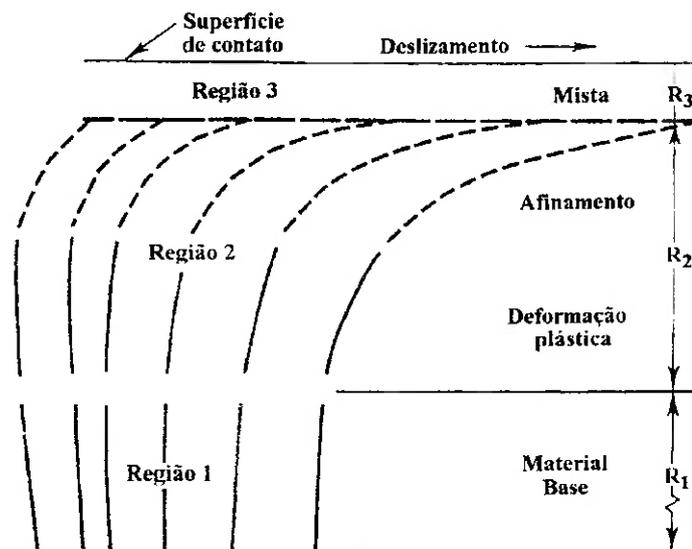


Figura 3. 14. Esquema mostrando as regiões sub-superficiais que podem se formar durante o desgaste por deslizamento.<sup>25</sup>

### 3.2.6 Resumo dos mecanismos de desgaste adesivo apresentados

A teoria de Suh<sup>13</sup> explica a deformação plástica e fratura das superfícies em deslizamento baseado na movimentação das discordância. Igualmente é explicada a forma laminar das partículas de desgaste as quais formam-se a partir de trincas que propagam-se paralelas à superfície desgastada. Porém, a teoria da delaminação de Suh<sup>13</sup> não considera a ocorrência de transferência de material e a formação de uma camada transferida abaixo da superfície desgastada composta de uma mistura de ambos materiais em contato.

Entretanto, Kayaba<sup>18</sup> considera a influência da deformação plástica juntamente com a nucleação de trincas que geram partículas em forma de lâminas ou de cunha. Já neste mecanismo, considera-se a ocorrência de transferência das lâminas ou cunhas destacadas da superfície.

Sasada<sup>19</sup>, além de descrever a transferência adesiva, demonstrou experimentalmente que os pequenos fragmentos destacados das superfícies interagem entre si e com o meio interfacial. Sasada<sup>19</sup> também mostrou que as tensões normais e de cisalhamento provocam a formação de partículas laminares de desgaste.

Rigney<sup>20</sup> realiza uma análise mais profunda sobre a interação entre as partículas destacadas e o meio, similarmente ao descrito por Sasada<sup>19</sup>. Também mostrou a existência de uma camada na superfície com composição do material transferido.

Heilmann<sup>22</sup> e Rice<sup>25</sup> comprovaram que as características da região sub-superficial variam em função da profundidade em relação à superfície. Foi proposta a existência de três regiões características, uma região com grãos muito pequenos com composição do material transferido e dos resíduos de desgaste, similar ao descrito por Rigney<sup>20</sup>. Embaixo desta primeira região tem-se uma região muito deformada com estrutura celular e finalmente uma região não deformada com a mesma microestrutura do material inicial.

No mecanismo de Wert<sup>24</sup> é discutida a influência das variáveis microestruturais no desenvolvimento das camadas sub-superficiais. Também considera-se a influência de parâmetros de ensaio como a carga normal, distância e velocidade de deslizamento. A

temperatura tem uma função especial porque pode levar à formação de uma outra camada onde ocorre uma recristalização dos grão deformados. Esta camada recristalizada não foi considerada por Heilmann e Rice<sup>22,25</sup>.

No avanço da apresentação de cada modelo notou-se um melhor entendimento e caracterização dos fenômenos que ocorrem durante o desgaste adesivo sendo proposta uma relação entre as características das superfícies desgastadas, as partículas de desgaste e as variáveis microestruturais, do meio ambiente e interfacial, assim como as condições de carregamento. Nos itens a seguir serão apresentadas as principais variáveis que influenciam no comportamento do desgaste por deslizamento dos metais.

### **3.3 Variáveis que influenciam no desgaste por deslizamento**

Muitas variáveis estão envolvidas no comportamento do desgaste por deslizamento, tais como as variáveis relacionadas à geometria do par deslizante e também as variáveis metalúrgicas, sem excluir as variáveis externas como as condições de carregamento e as do meio interfacial e circundante. A Figura 3. 15 mostra as principais variáveis do tribossistema que influenciam no comportamento do desgaste do par deslizante.

Segundo Zum Gahr<sup>10</sup>, cada variável tem uma natureza diferente em função da etapa do processo de deslizamento, conforme mostra a Figura 3. 16. Variáveis como o trabalho exercido, a massa de cada corpo, as propriedades do material e a temperatura da interface, podem ser consideradas como variáveis de entrada do tribossistema. Por outro lado, estas podem ser o resultado final do processo, isto é, podem-se transformar em variáveis de saída do tribossistema.

Devem ser considerados também efeitos como as vibrações, calor gerado, atmosfera e mudanças das propriedades dos materiais. Como resultado final do atrito e desgaste, há a geração de produtos indesejáveis, como fragmentos de desgaste, ruído, calor e vibrações.

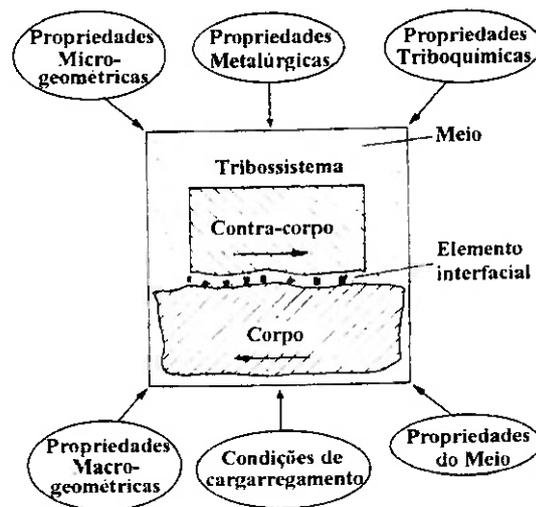


Figura 3. 15. Variáveis que influenciam no desgaste por deslizamento.

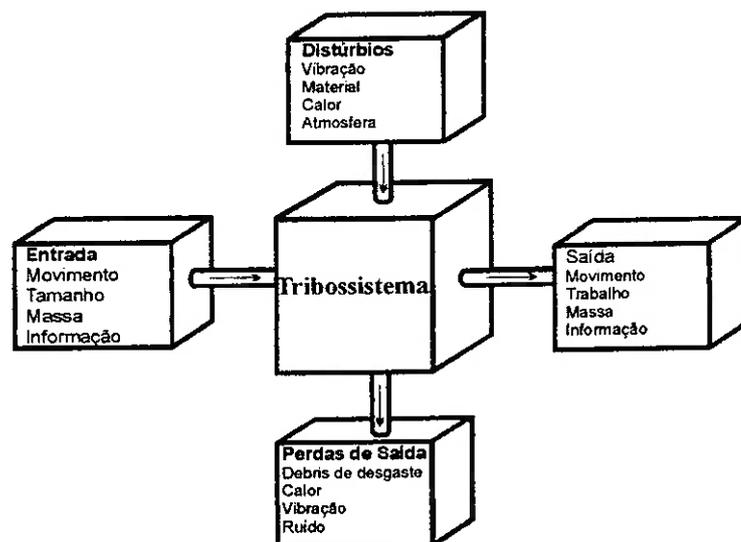


Figura 3. 16. Natureza dos parâmetros do sistema tribológico.

Os esforços mecânicos, a temperatura da interface e do meio e o fenômeno de corrosão são os fatores principais que determinam a existência de um ou vários

mecanismos de desgaste. Estes três fatores estão fortemente relacionados e neles influenciam a carga normal, velocidade e distância (ou tempo) de deslizamento<sup>8</sup>. Além das condições de carregamento, fatores como o tipo de deformação (elástica ou plástica), elemento interfacial e as propriedades dos materiais deslizantes, determinam a predominância de um ou vários mecanismos de desgaste<sup>10</sup>, conforme mostra a Figura 3.17. Nesta figura, observa-se que o tipo de contato (elástico ou plástico) depende da força de atrito (que depende da força normal), área de contato e propriedades do material. As propriedades do material são afetadas pelas condições ambientais e pela temperatura de contato.

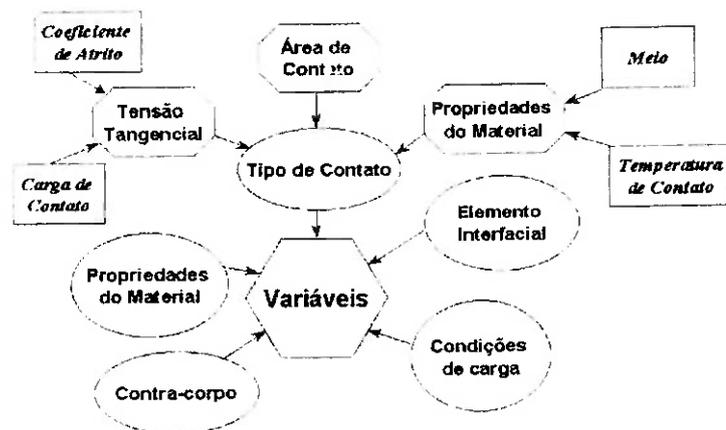


Figura 3.17. Variáveis que influenciam nos mecanismos de desgaste por deslizamento.

### 3.3.1 Influência das variáveis microestruturais

A deformação plástica e fratura são dois efeitos que podem levar à formação de resíduos de desgaste e envolvem o movimento e interação das discordâncias. O comportamento das discordâncias é afetado fundamentalmente pelas variáveis microestruturais. Dentre destas variáveis incluem-se o tipo de estrutura cristalina, falhas de empilhamento, presença de segundas fases, instabilidade estrutural, tamanho de grão, precipitados (coerentes e incoerentes), entre outros<sup>24</sup>.

### a) Estrutura cristalina

Nos materiais metálicos a deformação plástica usualmente ocorre na direção e planos mais compactos. A combinação de um plano de deslizamento e direção de deslizamento define o sistema de deslizamento. O número de sistemas de deslizamento varia com tipo de estrutura cristalina. Em estruturas cristalinas com um maior número de sistemas de deslizamento as discordâncias têm maior possibilidade de se movimentar e de interagir. Em estruturas cúbicas de fases centradas (cfc), com 12 sistemas de deslizamento a deformação e fratura ocorrem com maior facilidade do que em cristais com estrutura hexagonal (hc) com 3 sistemas de deslizamento. Nos cristais (hc) podem ser ativados outros planos de deslizamento a temperaturas elevadas<sup>26</sup>.

O comportamento das discordâncias, dependente do tipo de estrutura cristalina, leva a diferentes resultados no desgaste, referidos à magnitude da deformação e características das regiões sub-superficiais (composição, orientação, espessura). Estas características também são afetadas pela carga normal, velocidade e distância de deslizamento<sup>24</sup>.

Kato<sup>27</sup> e co-autores realizaram uma análise, com o auxílio da microscopia eletrônica de transmissão, sob a influência da carga, velocidade e distância de deslizamento no comportamento das discordâncias em amostras desgastadas de alumínio. Os ensaios de desgaste foram realizados em uma configuração do tipo pino-sobre-anel, com lubrificação. Foi observado no alumínio que a densidade de discordâncias aumentou com a distância de deslizamento e diminuiu linearmente com a profundidade a partir da superfície. O tamanho das células de discordâncias diminuiu

com o aumento da carga e da velocidade de deslizamento e aumentou linearmente com o aumento da profundidade abaixo da superfície.

No desgaste por deslizamento de metais hexagonais como o titânio, o comportamento das discordâncias é diferente em relação aos metais com estrutura cúbica, como o alumínio. Nutt<sup>28</sup>, estudou o atrito, o desgaste e as características das regiões sub-superficiais no titânio, utilizando arranjos do tipo esfera-sobre-placa e bloco-sobre-anel e técnicas de microscopia eletrônica de varredura e de transmissão. Além das células de discordâncias, como as observadas no alumínio, foram observadas maclas de deformação na região sub-superficial.

#### **b) Energia de falha de empilhamento (EFE)**

Analisando a influência da energia de falha de empilhamento no desgaste por deslizamento, considerou-se que materiais com alta EFE, como o alumínio e o níquel sofrem um desgaste mais severo do que os materiais com baixa EFE<sup>29</sup>, como o caso das ligas de cobre (Cu-Sn, Cu-Al). Segundo Rigney e Glaeser<sup>30</sup>, uma explicação para a correlação entre a resistência ao desgaste e a energia de falha de empilhamento é a facilidade de formação de células de discordâncias.

Os materiais com alta EFE apresentam discordâncias dissociadas em parciais próximas umas das outras. Isto facilita sua movimentação por escalada (*climb*) ou escorregamento com desvio (*cross slip*). Uma vez tendo alta mobilidade, as discordâncias geradas durante a deformação tenderão a ter uma distribuição heterogênea, própria de uma microestrutura celular. Por outro lado, quando um metal com baixa EFE é deformado, suas discordâncias têm baixa mobilidade devido ao fato

das mesmas estarem afastadas entre si. Isto implica a dificuldade para ocorrência de escalada ou escorregamento com desvio e portanto para formar uma microestrutura celular. Neste caso, as discordâncias têm uma distribuição homogênea<sup>30,31</sup>.

As células de discordâncias podem admitir uma grande deformação plástica, porém o seu tamanho e orientação, assim como a espessura da região celular influenciam na fratura. Isto é, a estrutura de células de discordância é uma região apropriada para a formação de vazios e nucleação de trincas. Trincas sub-superficiais podem se propagar paralelamente às paredes das células e gerar os resíduos laminares de desgaste sem a necessidade de ocorrência de adesão ou cisalhamento<sup>30</sup>.

A EFE é influenciada pela composição química. No aço, o aumento do teor de níquel e de carbono aumenta a EFE, entretanto, o cromo, silício, manganês e nitrogênio diminuem a EFE<sup>32</sup>. Schramm e Reed<sup>32</sup> determinaram a EFE de sete tipos comerciais de aços inoxidáveis austeníticos cujos valores estiveram na faixa de 18 mJ/m<sup>2</sup> (para o aço AISI 304L) até 94 mJ/m<sup>2</sup> (para o aço AISI 310S). O aço AISI 304 é representativo das ligas com baixa EFE e AISI 316 representa as ligas com alta EFE. Estes dois aços diferem no comportamento do atrito e desgaste devido à diferença de EFE e de estabilidade estrutural.

### **c) Partículas de segunda fase**

A presença de partículas de segunda fase é outro fator microestrutural que influencia na deformação plástica e fratura que acontecem durante o desgaste por deslizamento. As partículas de segunda fase são regiões de alta concentração de tensões, adequadas para a nucleação e propagação de trincas devido a que bloqueiam o

movimento e interação das discordâncias. A nucleação de trincas a partir das partículas duras de segunda fase pode ser devido à quebra da interface matriz-partícula ou devido à quebra da partícula de segunda fase. Eventualmente, após a trinca formada ter alcançado um comprimento crítico gera-se uma partícula de desgaste<sup>13,16</sup>.

#### d) Estabilidade estrutural

Em alguns aços inoxidáveis austeníticos ocorre a transformação da austenita em martensita devido à deformação plástica. Estes aços são chamados metaestáveis. A Figura 3. 18 representa a energia livre da austenita ( $F^\gamma$ ) e da martensita ( $F^\alpha$ ) em função da temperatura. A formação da martensita a partir do resfriamento da austenita ocorre a temperaturas inferiores a  $M_s$ . Quando é aplicada uma tensão no material durante a deformação à frio, a energia livre da austenita aumenta até  $F^\gamma$  em uma magnitude de  $\Delta G_e^{\gamma \rightarrow \alpha'}$ , energia mecânica devido à tensão aplicada. A temperatura  $M_s$  é deslocada para uma temperatura maior  $M'_s = M_d$ , sendo  $M_d$  a temperatura acima da qual não ocorre transformação da austenita em martensita induzida por deformação<sup>33</sup>.

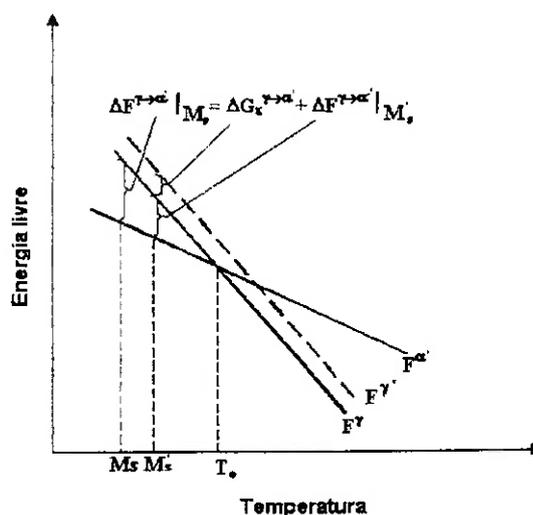


Figura 3. 18. Efeito da tensão aplicada na transformação martensítica<sup>34</sup>.

Na Figura 3. 19 estão representadas uma série de curvas típicas relacionando a quantidade de martensita com a magnitude da deformação. Observa-se que a taxa da transformação ( $dM/de$ ) é zero no começo da deformação e aumenta gradualmente até um valor máximo para grandes deformações. Após isto, sob uma deformação superior, a taxa de deformação diminui até que a transformação não ocorre mais, alcançando-se uma quantidade de martensita limite ( $M_T$ ). A porcentagem de martensita e o seu valor limite dependem da temperatura. Como mostra a Figura 3. 19, a quantidade de martensita e  $M_T$  diminuem com o aumento da temperatura de deformação.

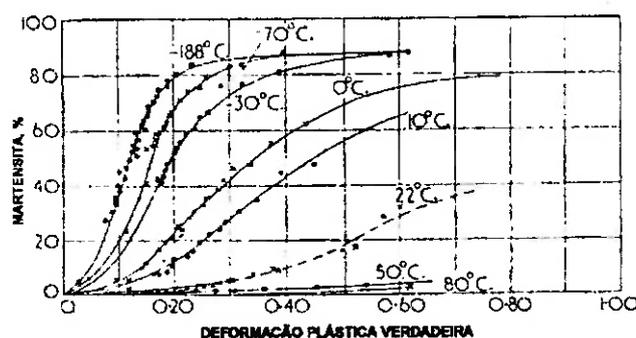


Figura 3. 19. Formação de martensita por deformação de tração para diferentes temperaturas de deformação. Aços do tipo 18-8 Cr-Ni<sup>33</sup>.

A temperatura  $M_d = M'_s$  foi determinada para valores pequenos de deformação. Entretanto, Angel<sup>33</sup> obteve martensita para temperaturas superiores a  $M_d$ , porém com deformações maiores (0,30 a 0,50). Segundo Angel<sup>33</sup>, a temperatura  $M_d$  é difícil de determinar experimentalmente, portanto foi introduzido outro termo,  $M_{d30}$ , definido como a temperatura para a qual forma-se 50% de martensita com a aplicação de uma deformação de 30% sob condições de tração uniaxial. A temperatura  $M_{d30}$  determina a estabilidade da austenita e foi calculada em função da composição química segundo a Equação 3.1.

$$M_{d30}(^{\circ}\text{C}) = 497 - 462(\text{C} + \text{N})\% - 9,2\text{Si}\% - 8,1\text{Mn}\% - 13,7\text{Cr}\% - 20\text{Ni}\% - 18,5\text{Mo}\%$$

(3. 1)

Segundo a Equação (3. 1) o carbono e o nitrogênio têm o maior efeito na diminuição da temperatura  $M_{d30}$ . O níquel, elemento estabilizador da austenita, tem uma maior tendência à diminuição de  $M_{d30}$  do que o silício, cromo e molibdênio, elementos formadores de ferrita. O manganês, elemento formador de austenita tem o mesmo efeito que o silício, aproximadamente.

#### e) Tamanho de grão

Sabe-se que uma diminuição do tamanho de grão produz um aumento do limite de escoamento, isto foi explicado pelo conceito de que o contorno de grão atua como barreira para o movimento das discordâncias. A dependência do limite de escoamento com o tamanho de grão em qualquer deformação plástica até a fratura dúctil foi expressada através da equação 2 (equação de Hall-Petch) . Pode-se também dizer que esta equação exprime a variação da tensão de fratura frágil com o tamanho de grão e a dependência da resistência à fadiga com o tamanho de grão<sup>35</sup>.

$$\sigma_o = \sigma_i + k'D^{-1/2}$$

(3. 2)

onde:

$\sigma_o$ : limite de escoamento

$\sigma_i$ : tensão de atrito que se opõe ao movimento das discordâncias

$k'$ : constante

$D$ : diâmetro do grão

Vários pesquisadores obtiveram experimentalmente uma relação entre o tamanho de grão e instabilidade estrutural em aços inoxidáveis austeníticos em função da quantidade de martensita formada pela deformação à tração. Ramman e Padmanabhan<sup>36</sup> mostraram que uma variação do diâmetro de grão de 60  $\mu\text{m}$  até 350  $\mu\text{m}$  afetou a taxa de formação da martensita induzida por deformação plástica do aço inoxidável austenítico AISI 304L durante ensaios de tração. Este comportamento foi explicado pela densidade de maclas de recozimento presente no aço AISI 304L em função do tamanho de grão. Nos aços com grão grosso, recozidos a temperaturas mais elevadas do que os materiais com grão fino, obteve-se uma estrutura com uma maior densidade de maclas de recozimento. Segundo Mangonon<sup>37,38</sup>, as maclas, são uma das regiões preferenciais para a nucleação da martensita, conseqüentemente, no aço de grão grosso a quantidade de martensita foi maior em comparação ao grão fino.

Semelhantemente ao trabalho de Raman e Padmanabhan<sup>36</sup>, Varma<sup>39</sup> estudou o efeito do tamanho de grão austenítico nas características da transformação martensítica durante ensaios de tração do aço AISI 304. Foram obtidos resultados que evidenciaram uma relação entre a quantidade de martensita induzida por deformação, o tamanho de grão e o limite de escoamento. Entretanto não foram observadas mudanças na quantidade de martensita com a taxa de deformação. Foram comparados os comportamentos dos aços AISI 304 e AISI 316. Este último material não sofreu transformação na faixa de até 55 % de deformação.

A mudança de modo de deformação uniaxial para multiaxial incrementa a quantidade de martensita induzida por deformação no aço AISI 304. Os ensaios de laminação resultaram num aumento da quantidade desta fase, afetada também pelo

tamanho de grão. Também observou-se uma quantidade de martensita no aço AISI 316 o qual mostra que neste material a formação de martensita depende do modo de deformação.

Não foram encontrados resultados na literatura referidos à influência do tamanho de grão no comportamento do desgaste, porém pode-se esperar que o tamanho de grão afete a magnitude das deformações e das tensões induzidas durante o deslizamento assim como a instabilidade da estrutura dos aços inoxidáveis austeníticos acima citados. Rigney<sup>30</sup>, na sua discussão da importância das variáveis microestruturais no comportamento do desgaste mostrou que o tamanho de grão é um dos fatores que influencia a formação de células de discordâncias na sub-superfície do material desgastado, as quais, segundo este autor, são regiões preferenciais para a nucleação de trincas.

### 3.3.2 Modelos matemáticos

Entre os anos 1947 e 1992 destacaram-se três tipos de equações gerais de desgaste: equações empíricas, equações baseadas em mecanismos de contato e equações baseadas nos mecanismos de falha dos materiais<sup>40</sup>.

#### a) Equações fenomenológicas

As equações fenomenológicas, típicas da década de 1970, foram obtidas diretamente a partir de dados dos ensaios onde a taxa de desgaste é representada por uma das equações seguintes:

$$V = \frac{\beta}{\alpha} \{1 - \exp(-\alpha t)\} \quad (3.3)$$

$$V = \alpha t \quad (3.4)$$

$$V = \beta \exp(\alpha t) \quad (3.5)$$

onde:

V: perda de volume

$\alpha$ : constante

t: tempo

$\beta$ : termo definido como certa característica das superfícies iniciais, não definido pelo autor

Existem equações fenomenológicas onde a relação entre as variáveis é um produto com cada variável elevada a um expoente. Por exemplo, a Equação 3.6 onde perda de massa do material  $\Delta W$  é função da carga aplicada F, da velocidade V e do tempo t, sendo K, a, b e c constantes empíricas.

$$\Delta W = KF^a V^b t^c \quad (3.6)$$

Paretkar e co-autores<sup>41</sup> apresentaram um estudo experimental do desgaste adesivo a seco de um conjunto de ligas de cobre deslizando contra um aço temperado. Na análise dos resultados obtidos, formularam uma equação que considera as variáveis que podem influenciar o sistema analisado, variando de forma simultânea. Esta equação foi formulada a partir das variáveis listadas na Tabela 3. 3. Paretkar e co-autores<sup>41</sup> utilizaram o critério de instabilidade plástica para determinar o comportamento do desgaste dos materiais de estudo, considerando que a ocorrência de deformação plástica na sub-superfície tem que produzir uma instabilidade em determinado instante. Isto é, uma vez que a instabilidade plástica é alcançada, na sub-superfície nucleam-se microtrincas as quais juntam-se e crescem. Isto explicaria a formação dos resíduos de desgaste.

As variáveis foram incluídas em duas categorias: variáveis externas ou operacionais como a carga normal, velocidade de deslizamento e comprimento da trilha de desgaste e variáveis independentes relacionadas com as características do material.

A perda de desgaste (expressada em perda de massa do material) foi assumida como uma função de todas as variáveis independentes com uma relação indicada por expoentes em cada variável, isto é:

$$\frac{W}{P_0 L^2} = f[(H_0 / P_0)^a, (\sigma_u / P_0)^c, (\epsilon_u)^d, (n_u)^e, (\tau_s / P_0)^p, m^n, \mu^g, S^i (vt/L)^j, (Lg/v^2)^m] \quad (3.7)$$

Esta equação foi rearranjada até formar dois grupos de variáveis dimensionais.

$$\frac{W}{L^2 P_0} = \phi \left[ \frac{H_0 \sigma_u n_u \epsilon_u}{P_0^2} \right]^A \left[ \frac{\tau_s \mu g L}{P_0 v^2} \right]^B \quad (3.8)$$

onde:

$W / L^2 P_0 = (Z)d$ : indica a perda de massa por unidade de comprimento da marca de desgaste ( $W / L$ ), por unidade de comprimento da marca vezes a pressão normal ( $LP_0$ ). O produto  $LP_0$  considera o efeito combinado do comprimento da marca e da pressão normal na taxa de desgaste.

A, B : expoentes para considerar o efeito combinado interativo das variáveis identificadas

$\phi$ : constante onde foram consideradas as variáveis não identificadas

Tabela 3. 3. Variáveis consideradas no modelo de Paretkar e co-autores<sup>41</sup>

No.	Variáveis	Símbolo	Unidade
1	Dureza inicial	$H_o$	MPa
2	Limite de cisalhamento volumétrico na instabilidade	$\tau_s$	MPa
3	Tensão normal na instabilidade	$\sigma_u$	MPa
4	Deformação na instabilidade (compressão axial)	$\epsilon_u$	-
5	Coefficiente de encruamento	$n_u$	-
6	Pressão normal	$P_o$	MPa
7	Coefficiente de atrito	$\mu$	-
8	Fator de atrito na interface	$m$	-
9	Parâmetro da estrutura	$s$	-
10	Velocidade de deslizamento	$v$	m/s
11	Comprimento da marca de desgaste	$L$	m
12	Tempo de deslizamento	$t$	s
13	Perda de massa	$W$	g
	Perda de altura na amostra	$dh$	m
14	Aceleração da gravidade	$g$	m/s <sup>2</sup>

A partir dos resultados experimentais, foi obtido o modelo experimental generalizado para o desgaste por deslizamento a seco através da seguinte equação:

$$\frac{W}{L^2 P_o} = K_2 \left[ \frac{(\tau_s \tau_i)(\mu/v)^2 L g P_o^2}{(H_o \sigma_u n_u^2)} \right]^{K_1} \quad (3.9)$$

Esta equação foi simplificada considerando as relações entre as variáveis usadas na análise, onde:

$$\frac{W}{L^2 P_o} = K_2 \left[ \frac{\mu P_o L g}{4 H_o n_u^2 v^2} \right]^{K_1} \quad (3.10)$$

Segundo a Equação 3.10 os parâmetros principais que governam o fenômeno de desgaste são a tensão de cisalhamento na interface,  $\tau_s$ , o coeficiente de encruamento,  $n_u$ , a dureza inicial,  $H_o$ , o coeficiente de atrito,  $\mu$ , e a velocidade de deslizamento,  $v$ .

### b) Equações baseadas em mecanismos de contato

Foram comuns nos anos 1970-1980. Além da região de contato entre as superfícies, em muitas das equações considera-se também uma propriedade do material, usualmente o módulo de elasticidade  $E$  ou a dureza  $H$ . A equação de Archard<sup>42</sup> é um exemplo. Em tal equação, tem-se uma constante  $K$  denominada como o coeficiente de desgaste e definida como a probabilidade do contato entre duas asperezas vir a produzir uma partícula de desgaste. Seu valor foi obtido experimentalmente.

O modelo assume que: o contato ocorre onde as asperezas se tocam, a área real de contato é igual à soma das áreas de contato das asperezas individuais, a deformação local das asperezas é plástica e que a área máxima de contato é circular e é proporcional à carga normal. A partir destas considerações tem-se a equação a seguir

$$Q = \frac{KW}{H} \quad (3.11)$$

Esta equação indica que a perda de volume por unidade de distância de deslizamento,  $Q$ , é proporcional à carga normal aplicada,  $W$ , e inversamente proporcional à dureza do material mais mole  $H$ .

O modelo de Archard<sup>42</sup> tem com limitação que não considera os efeitos da deformação plástica tais como encruamento e mudanças na microestrutura do material. Apesar disto, esta equação tem servido de guia para a modelagem do desgaste para o qual é citado o coeficiente de desgaste  $K$ .

Jiang<sup>43</sup> e co-autores estudaram o desgaste da liga de níquel Nimonic 80A (73 % Ni, 19,5 % Cr) e o desenvolvimento de camadas protetoras contra o desgaste a temperaturas de 20 °C a 600 °C e apresentaram um modelo matemático considerando o fenômeno de transição de regime de desgaste de severo a moderado. Tal modelo mostrou concordância com as observações experimentais para liga estudada. O estudo foi realizado utilizando-se uma máquina de ensaio de desgaste tipo pino-sobre-disco com movimento alternativo, velocidade média de 83 mm/s, sob atmosfera de oxigênio puro, carga normal de 15 N.

A perda de volume após um tempo de deslizamento  $t$ ,  $V(t)$ , foi dada pela expressão seguinte :

$$V(t) = \frac{\pi}{6} \int_0^t \left\{ A(t)N(t)[1 - C_e(t)] \times \int_0^\infty [D^3 f(D) P_r(D)] dD \right\} dt \quad (3. 12)$$

onde:

$N(t)$ : taxa de geração de fragmentos, ou o número de fragmentos formados por unidade de tempo, em um tempo  $t$ ;

$f(D)dD$ : percentual de fragmentos gerados novamente, com diâmetro entre  $D$  e  $(D + dD)$ ;

$C_e(t)$ : cobertura efetiva das camadas protetoras contra o desgaste sob a área aparente de contato  $A$ ;

$P_r(D)$ : probabilidade de que um fragmento com um diâmetro  $D$  seja eliminado da trilha de desgaste.

O modelo de desgaste por deslizamento de Jiang e co-autores<sup>43</sup> desenvolvido para elevadas temperaturas, é muito mais abrangente em relação ao modelo de desgaste adesivo de Archard<sup>42</sup>. Considera a quantidade e comportamento das partículas destacadas dentro da interface dos materiais deslizantes. O coeficiente de desgaste K tem a mesma interpretação dada por Archard, porém é definido como dependente de outras variáveis. Considera também a oxidação da superfície, a temperatura, carga normal e tipo de deformação das asperezas.

### 3.4 Transições no desgaste por deslizamento

A complexidade do desgaste por deslizamento está relacionada com a grande quantidade de variáveis que exercem influência no processo que provoca variações consideráveis da taxa de desgaste. Hirst e Lancaster<sup>44</sup> confirmaram a ocorrência de transições na taxa de desgaste com a variação da carga normal aplicada. Os ensaios foram realizados em uma máquina com configuração do tipo pino-sobre-anel, onde foi estudado o comportamento do latão 60/40 (pino). O material do contra-corpo (anel) utilizado foi *Stellite* (61 % Co, 30 % Cr). Os resultados destes ensaios são mostrados na Figura 3. 20. Observa-se que para uma carga crítica (0,8 kg) houve uma transição na taxa de desgaste. Para valores de carga abaixo da carga de transição a taxa de desgaste teve baixos valores, este regime foi considerado por Archard<sup>7</sup> como de desgaste moderado. Para valores de carga acima da transição detectou-se uma alta taxa de desgaste, o regime foi definido por Archard<sup>7</sup> como de desgaste severo.

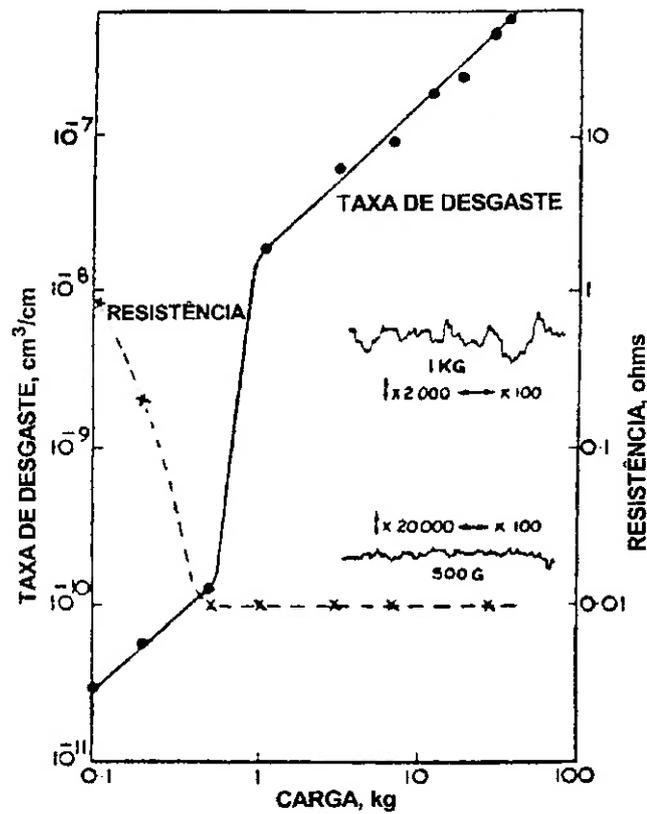


Figura 3. 20. Variação da taxa de desgaste e da resistência de contato com a carga para o par latão 60/40-Stellite (61 % Co, 30 % Cr). Foram inseridos no gráfico os perfis de rugosidade da pista desgastada do pino de . Observa-se que a rugosidade da superfície desgastada com cargas acima da transição (0,8 kg) é aproximadamente 100 vezes maior do que a correspondente a condições de carga abaixo da transição.<sup>44</sup>

Welsh<sup>45</sup> e Thompson<sup>46</sup> também relataram a existência de transições na taxa de desgaste com a variação da distância de deslizamento, a carga normal e a velocidade de deslizamento. Os regimens de desgaste observados, separados pelas transições (T1,T2) são chamados desgaste severo e moderado segundo Archard<sup>7</sup>. Como exemplo, tem-se um diagrama tridimensional obtido para uma aço com 0,52 % de carbono (vide Figura 3. 21), estudado por Welsh<sup>45</sup>. Com o aumento da carga e da velocidade, ocorre a primeira transição (T1) com uma mudança de desgaste moderado para desgaste severo. Esta transição é devida à ruptura da camada de óxido formada durante o desgaste moderado. Este desgaste é caracterizado pelo primeiro patamar da curva da Figura 3. 21. O aquecimento por atrito aumenta a temperatura superficial causando aumento da

espessura do filme de óxido, que protege a superfície do desgaste severo. Esta é a causa pela qual a taxa de desgaste abaixo de T1 é mais baixa do que acima de T1.

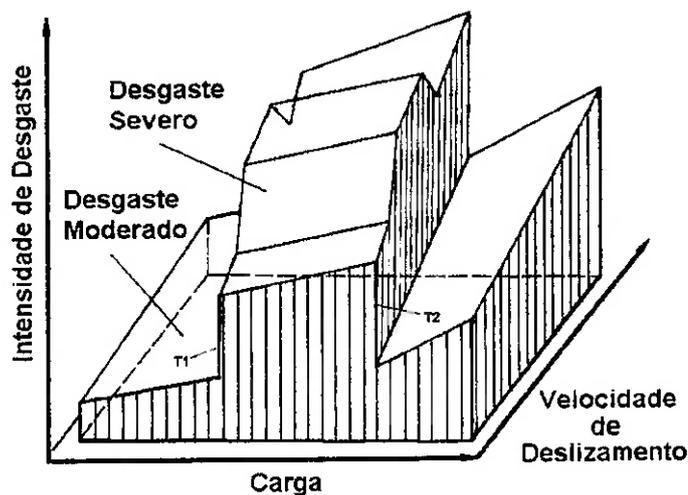


Figura 3. 21. Intensidade do desgaste de aço no contato deslizante a seco no ar como uma função da carga e velocidade de deslizamento (escala logarítmica).<sup>46</sup>

Nesse exemplo, uma segunda transição T2 acontece para valores de carga e velocidade mais altos do que os correspondentes à transição T1. A causa desta transição, T1 para T2, de desgaste severo para moderado, foi atribuída à mudança na dureza da superfície desgastada devido à ocorrência da transformação da austenita em martensita por resfriamento rápido. Entretanto, embora o endurecimento por transformações de fase ocorra, este não é estável neste patamar<sup>47</sup>. Em decorrência Welsh<sup>48</sup>, num segundo trabalho afirmou que a oxidação foi a responsável pela transição T2. Isto é, a causa desta segunda transição é a presença de um novo filme de óxido que forma-se para altas temperaturas de contato e cuja estrutura difere da estrutura do óxido formado no desgaste moderado.

Foi observada em certos valores críticos de carga ou de velocidade uma terceira transição, acima da qual acontece um endurecimento da superfície devido à

transformação martensítica do aço examinado. Segundo Welsh<sup>45</sup> a presença da martensita diminui a taxa de desgaste devido ao aumento da dureza na superfície que passa a ser um substrato mais duro para apoiar a camada de óxido.

Segundo as referências 7, 8, 44 a 48, com a variação da carga normal ou da velocidade de deslizamento, ocorre uma transição no comportamento do desgaste de moderado para severo ou de severo para moderado (vide Figura 3. 20 e Figura 3. 21). Em ambos regimens a taxa de desgaste varia linearmente com a carga e a velocidade de deslizamento. O desgaste moderado é caracterizado por um período inicial de desgaste severo com uma alta taxa de desgaste onde os resíduos de desgaste são metálicos. Logo após, a taxa de desgaste diminui até um valor constante, onde as partículas de desgaste são pequenas (0,01 a 1  $\mu\text{m}$ ) e compostas por óxidos. A aparência da superfície desgastada é lisa, demonstrado pelo perfil de rugosidade onde a altura das asperezas tem baixos valores (0,5  $\mu\text{m}$ ). A superfície de desgaste é coberta por uma camada de óxido, indicado nos altos valores de resistência de contato. Os corpos em contato têm taxas de desgastes iguais aproximadamente. O desgaste moderado também é caracterizado por baixos valores do coeficiente de atrito. O desgaste severo é caracterizado por uma alta taxa de desgaste, a superfície tem uma aparência rugosa, onde a altura das asperezas tem altos valores (25  $\mu\text{m}$ ). Também ocorre adesão e transferência de material para ambas superfícies em contato. A baixa resistência de contato medida na superfície significa que no desgaste severo ocorre uma ruptura da camada de óxido formada no desgaste moderado. Os resíduos de desgaste são grandes (20 a 200  $\mu\text{m}$ ) e metálicos. A taxa de desgaste dos materiais em contato é diferente e o coeficiente de atrito é maior do que no desgaste moderado.

Nos aços inoxidáveis austeníticos ocorrem transições na taxa de desgaste devido à transformação martensítica induzida por deformação plástica. Vários autores tem apresentados estudos sobre a influência da transformação martensítica por deformação no comportamento do desgaste destes materiais. Dumbleton<sup>47</sup> realizou ensaios de desgaste por deslizamento com o objetivo de estudar a influência do silício e da transformação martensítica induzida por deformação em várias composições do aço inoxidável austenítico AISI 301. As condições de ensaio foram: carga de 27 N, distância de deslizamento de 1143 m, 1500 rev/min e 2500 rev/min. Os resultados experimentais mostraram que o silício tem pouco efeito na transformação martensítica, porém produz um aumento da resistência mecânica do aço devido ao endurecimento por solução sólida. O silício também produz um aumento da resistência à corrosão. Por outro lado, os resultados experimentais mostraram que a diminuição do teor de níquel produz um aumento da taxa de encruamento, resistência à tração e da dureza do aço AISI 301. Também observou-se que a diminuição do teor de níquel produz um aumento da metaestabilidade do aço ou um aumento da quantidade de martensita induzida por deformação a qual diminuiu a taxa de desgaste. O aumento do número de ciclos provocou uma diminuição do efeito da martensita na taxa de desgaste devido ao aumento da temperatura de contato.

Hsu<sup>1</sup> estudou a influência da transformação martensítica no atrito e desgaste dos aços inoxidáveis austeníticos AISI 304, AISI 316 e Nitronic 60. Foram realizados ensaios de desgaste em sistema bloco-sobre-anel, com cargas de 67, 133, e 200 N, velocidade de 0,055 m/s em atmosfera de argônio. O aço AISI 304, com maior metaestabilidade, teve uma maior taxa de desgaste em relação aos outros aços estudados. Segundo os resultados de Hsu<sup>1</sup>, o aumento da quantidade de martensita

induzida por deformação produz uma diminuição da taxa de desgaste do aço inoxidável austenítico. Isto foi relacionado com a dureza relativa das camadas sub-superficiais. A presença de um substrato mole incapaz de suportar uma camada de martensita mais dura faz com que aumente o dano por desgaste em três sentidos. Primeiro, a superfície sofre uma maior fratura, em segundo lugar, esta superfície dura com estrutura martensítica produz um maior desgaste do contra-corpo. Esta segunda consequência foi mostrada por Hsu<sup>1</sup>, sendo que o aço AISI 304, provocou mais desgaste do contra-corpo (aço inoxidável martensítico AISI 440C) do que os aço AISI 316 e Nitronic 60 os quais apresentaram uma menor quantidade de martensita induzida por deformação. Por último, a menor dureza do substrato em relação à camada superficial, facilita a propagação da deformação plástica no interior do material, em decorrência disto, é maior a espessura de material com maior dano por desgaste.

Os estudos de Yang<sup>2</sup> e co-autores, não mostraram o efeito da transformação martensítica na taxa de desgaste do aço inoxidável austenítico, porém permitiram determinar a influência da metaestabilidade na direção do processo de transferência de material e na natureza dos resíduos de desgaste. Yang<sup>2</sup> estudou o comportamento do desgaste dos aços AISI 304 e AISI 310, deslizando contra o aço ferramenta M2, utilizando as mesmas condições de ensaio que as de Hsu<sup>1</sup>. No par deslizando AISI 310 – M2, observou-se que a transferência de material ocorreu principalmente da superfície do aço AISI 310 para a superfície do aço ferramenta e que os resíduos de desgaste tenham forma de placas constituídas basicamente do aço AISI 310. Neste aço não ocorreu transformação martensítica, devido a que tem uma composição química que estabiliza a austenita. Entretanto, no par AISI 304 – M2, ocorreu uma transferência de material do aço M2 para a superfície do aço AISI 304. O aço AISI 304 sofreu transformação

martensítica durante o desgaste, isto levou à formação de uma maior quantidade de resíduos de desgaste, com composição do aço ferramenta e com morfologia de cavacos. Portanto, a partir da análise das partículas de desgaste e da superfície, Yang<sup>2</sup> mostrou que o mecanismo de desgaste do aço ferramenta M2, quando deslizando contra o aço inoxidável AISI 304 é por microcorte. Isto foi influenciado pela presença de uma camada superficial constituída por martensita e por uma mistura mecânica de ambos materiais deslizando, suficientemente dura para provocar microcorte do aço ferramenta.

Em estudo do comportamento do desgaste do aço AISI 316, deslizando contra ele mesmo, Smith<sup>4</sup>, mostrou que este aço sofre transformação martensítica, porém esta fase não influencia na taxa de desgaste do aço estudado e sim na formação e ruptura das proas observadas na superfície desgastada. Foram realizados ensaios em sistema pino-sobre-placa com movimento alternativo, com cargas de 8 até 50 N e distância de deslizamento de 690 até 3.300 m. Nestas condições, observou-se que o mecanismo de desgaste do aço AISI 316, deslizando contra ele mesmo ocorre por formação de proas as quais formam-se a partir do material transferido. Observou-se também uma variação linear do desgaste com a distância de deslizamento, para os diferentes valores de carga utilizados. Smith<sup>4</sup> constatou por difração de raios-X que para baixas cargas, a quantidade de martensita aumenta com o aumento da distância de deslizamento e que para altas cargas o comportamento foi ao contrário, isto é, a quantidade de martensita diminui com o aumento da distância de deslizamento.

A partir dos resultados de Dumbleton<sup>47</sup>, Hsu<sup>1</sup> e Smith<sup>4</sup>, nota-se que não existem convergência entre os critérios destes pesquisadores referentes ao efeito da transformação martensítica na taxa de desgaste do aço inoxidável austenítico. Existem

três tendências sobre a influência da transformação martensítica. Segundo Dumbleton<sup>47</sup> a martensita produz uma diminuição na taxa de desgaste do aço inoxidável austenítico. Entretanto Hsu<sup>1</sup> e co-autores mostraram que a ocorrência da transformação martensítica produz um aumento da taxa de desgaste do aço inoxidável austenítico. Por outro lado, Smith<sup>4</sup> mostrou que a transformação martensítica não influencia na taxa de desgaste destes materiais porém influencia na formação e ruptura das proas formadas na superfície deslizante. Portanto, neste projeto, pretende-se esclarecer a influência da martensita induzida por deformação no desgaste por deslizamento dos aços inoxidáveis austeníticos e definir que outros fatores afetam a resposta do desgaste destes materiais.

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 Materiais

Nos ensaios de desgaste foram utilizados pinos e discos de aço inoxidável austenítico AISI 304 e AISI 316, cuja composição química está indicada na Tabela 4. 1.

Tabela 4. 1. Composição química dos aços AISI 304 e AISI 316 (%)

Elementos	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo
<b>AISI 304</b>								
Pino/Disco	0,080	1,29	1,00	0,04	0,03	18,80	8,27	0,03
<b>AISI 316</b>								
Pino	0,081	1,80	0,32	0,05	0,06	18,63	9,78	2,05
Disco	0,080	1,44	1,12	0,07	0,01	17,80	10,90	2,07

A dureza do aço AISI 304 foi de  $155 \pm 4$  HB e a dureza do aço AISI 316 foi de  $160 \pm 4$  HB . Os valores de dureza foram obtidos a partir de sete medições em três amostras. A Figura 4. 1 mostra a microestrutura típica dos materiais estudados. Observa-se uma estrutura austenítica com inclusões e maclas de recozimento.

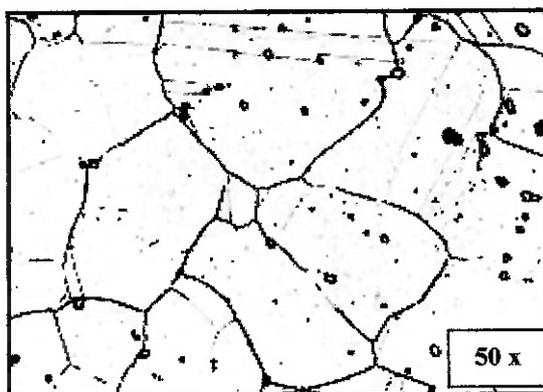


Figura 4. 1. Micrografia óptica do aço inoxidável austenítico AISI 304. Ataque eletrolítico com ácido oxálico 10%. Observa-se uma estrutura austenítica com inclusões e maclas de recozimento. Foram observadas as mesmas características na microestrutura do aço AISI 316.

## 4.2 Métodos

### 4.2.1 Caracterização dos materiais

A composição química dos materiais de estudo foi determinada mediante as técnicas de fluorescência de raios-X em espectrômetro de fluorescência de raios-X, marca Rigaku Co., modelo RIX3000 do Laboratório de Caracterização Físico Química do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN) e mediante espectroscopia por emissão óptica em ARL-3400 do Laboratório Químico da Ioschpe Maxion Fundação e Equipamento Ferroviários.

Para a identificação da microestrutura inicial do material realizou-se a preparação metalográfica convencional das amostras, previamente cortadas, fazendo as operações de embutimento, lixamento, polimento e ataque químico<sup>49,50</sup>. Para a observação da microestrutura inicial utilizou-se um microscópio óptico modelo BX60M, marca OLIMPUS do Laboratório de Fenômenos de Superfície (LFS) do Departamento de Engenharia Mecânica da ESPUSP.

A dureza das amostras foi determinada no durômetro Brinell, modelo Wolpert-HT do Laboratório Metalográfico do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da EPUSP. Utilizou-se uma pre-carga de 10 kg e uma carga de 187,5 kg e um indentador esférico com 2,5 mm de diâmetro.

A rugosidade foi medida utilizando-se o rugosímetro padrão Surtronic 3+ do Laboratório de Medidas de Grandezas Mecânicas do Departamento de Engenharia Mecânica da EPUSP. Na medição da rugosidade foi utilizado um *cut-off* de 0,8 mm e um comprimento de medição de 4 mm.

Para a medição da rugosidade, a superfície de contato de cada pino foi preparada mediante um processo de abrasão utilizando-se lixa d'água grana 320 de SiC, montada sobre o disco, na máquina de ensaio de desgaste. Esta operação foi realizada com carga de 4 N e velocidade de 0,10 m/s, para permitir um contato entre o pino e o disco aproximadamente uniforme, além de fixar a rugosidade inicial dos pinos e eliminar as irregularidades da superfície.

A rugosidade ( $R_a$ ) dos pinos teve um valor médio de  $0,31 \pm 0,02 \mu\text{m}$  e a rugosidade média correspondente aos discos foi de  $0,63 \pm 0,15 \mu\text{m}$ . Estes valores correspondem a 21 determinações com 3 repetições de medidas em cada uma das sete amostras para o caso dos pinos. Para o caso dos discos foram feitas 21 determinações com sete medições em cada uma das três amostras escolhidas.

#### **4.2.2 Ensaios de Desgaste**

##### **a) Equipamento**

A máquina utilizada para realizar os ensaios de desgaste por deslizamento foi pino-sobre-disco, modelo TE-79, de fabricação PLINT & PARTNERS LTD pertencente ao LFS do Departamento de Engenharia Mecânica da EPUSP. Na Figura 4. 2 são mostrados os componentes principais do equipamento que são:

1- *Microcomputador*. Com software de controle e monitoramento de parâmetros de interesse tribológico, tais como: velocidade angular, número total ciclos, força de atrito média, radio da pista de ensaio e tempo de ensaio, entre outros. O software também calcula a velocidade tangencial, a distância percorrida e o coeficiente de atrito.

2- *Máquina de ensaio tipo pino-sobre-disco*. Permite trabalhar com uma velocidade tangencial entre 0,01 m/s e 1,6 m/s, velocidade angular de 0 a 400 rpm e carga de contato de 0,1 N até 20 N. A aplicação da carga é feita mediante peso morto. No braço de fixação do pino e de aplicação da carga (vide Figura 4. 3), coloca-se o peso ou um conjunto de pesos que correspondem-se com a magnitude da carga a ser aplicada. O disco pode girar com movimento em espiral, mantendo a velocidade tangencial constante. A força de atrito sobre o pino é medida por uma célula de carga. Os valores da temperatura e da umidade relativa do ambiente podem ser obtidos mediante os sensores de temperatura e de umidade acoplados na máquina de ensaio. Os detalhes da máquina de ensaio são mostrados na Figura 4. 3. A geometria do sistema pino-sobre-disco mostra-se na Figura 4. 4.

3- *Interface de comunicação entre o microcomputador e a máquina de ensaio*

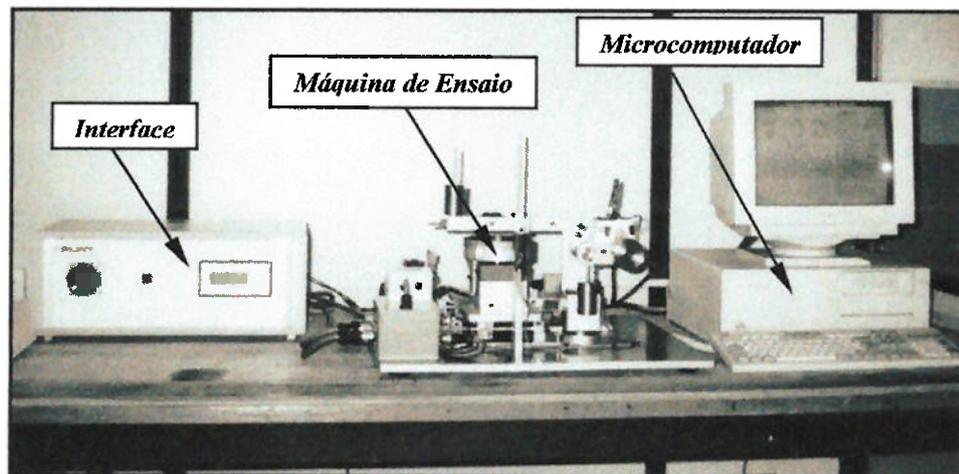


Figura 4. 2. Máquina de ensaio de desgaste tipo pino-sobre-disco modelo TE79.

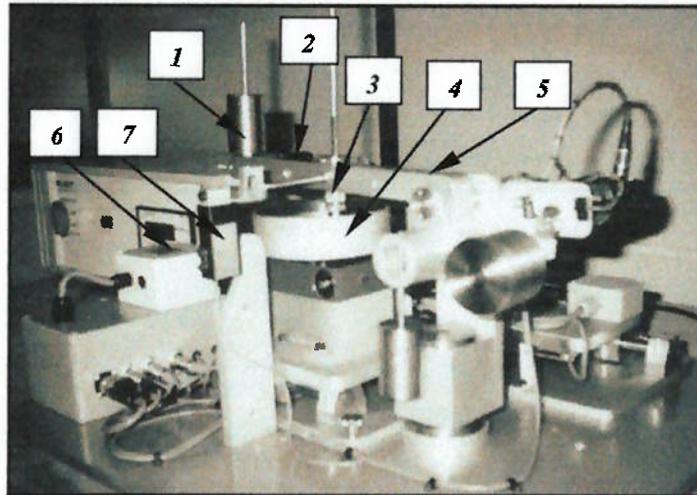


Figura 4. 3. Componentes do sistema de ensaio pino-sobre-disco. 1- Peso morto para a aplicação da carga, 2- Nível do bolha, 3- Porta-pino, 4- Porta-disco, 5- Braço de fixação do pino e de aplicação da carga, 6- Sensores de temperatura e de umidade, 7- Célula de carga para a medição da força de atrito.

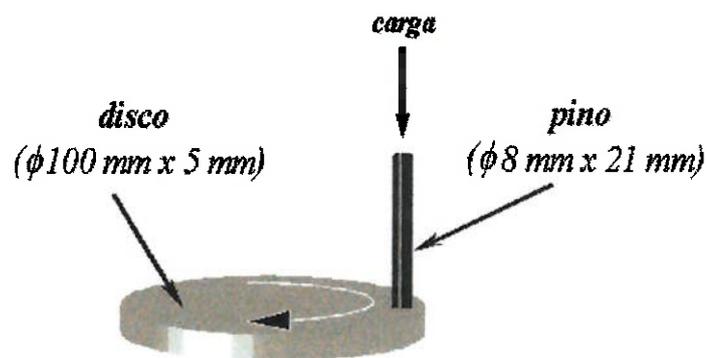


Figura 4. 4. Esquema do sistema de ensaio de desgaste com geometria do tipo pino-sobre-disco mostrando as dimensões dos corpos de prova.

#### b) Ensaios de desgaste

O procedimento dos ensaios de desgaste teve como base as recomendações da norma ASTM G99-90<sup>51</sup> e do manual da PLINT.<sup>52</sup> A seguir são explicadas as principais etapas executadas em cada ensaio.

1- *Limpeza das amostras.* Antes da realização do ensaio, o pino e o disco foram desengordurados com água e detergente e posteriormente limpadas em ultra-som, com álcool e secadas em ar quente.

2- *Assentamento do pino na superfície do disco por abrasão.* Para obter um contato pino-sobre-disco aproximadamente uniforme, a superfície do pino foi preparada mediante um processo de abrasão com lixa d'água grana 320 de SiC, segundo o explicado no item 4.2.1. Primeiramente foi colocado o disco no porta-disco e sobre sua superfície foi colocada a lixa. O sistema disco - lixa foi montado perpendicularmente em relação ao eixo de rotação com um desvio de  $\pm 1^\circ$  controlado mediante um relógio comparador, do LFS, modelo 2046F, Mitutoyo, com precisão de centésimo de milímetro. Após a montagem do sistema disco - lixa foi realizada a montagem do pino. O controle da perpendicularidade do pino em relação ao disco foi realizado com ajuda do nível de bolha montado sobre o braço de aplicação da carga, vide Figura 4. 3.

3- *Pesagem das amostras.* Após o assentamento foi desmontado o conjunto pino - porta-pino para sua limpeza em ultra-som, com álcool e secagem em ar quente e pesagem posterior. Também foi desmontada a lixa da superfície do disco. A pesagem do conjunto pino - porta-pino em balança analítica modelo AB204, Mettler Toledo, com uma precisão de décimo de milésimo de grama e carga máxima de 210 g. Para a pesagem dos discos utilizou-se uma balança semi-analítica modelo MJ-3000, Ohyo, com precisão de centésimo de grama e carga máxima de 3100 g. Ambas balanças são do LFS do Departamento de Engenharia Mecânica da EPUSP. A pesagem do disco foi realizada prévio à etapa de assentamento. Após a pesagem, o conjunto pino - porta-pino foi montado novamente na máquina de ensaio segundo o explicado na etapa anterior.

4- *Ensaio de desgaste.* Para a determinação do comportamento tribológico dos pares em questão foram realizados ensaios variando a carga aplicada e a distância. Os ensaios de desgaste foram realizados a seco com cargas de 10 N e 20 N, distâncias de

3000 m e 9000 m, velocidade tangencial de 0,63 m/s, velocidade angular de 200 rev/min e o raio da pista de desgaste foi de 30 mm. Cada material constitui um par tribológico, ou seja, ensaiou-se pino e disco do mesmo material para cada condição de ensaio. Foram realizadas três repetições para cada condição. Também foram realizados ensaios interrompidos com carga normal de 20 N com o objetivo de determinar a perda de massa e a taxa de desgaste do pino em distâncias de deslizamento sucessivamente maiores até atingir 9000 m. Durante os ensaios de desgaste, a temperatura e a umidade relativa do ambiente estiveram na faixa de 17 até 28 °C e 58 até 63 %, respectivamente. Os parâmetros de ensaio, incluindo-se o coeficiente de atrito e a distância percorrida, foram armazenados em arquivos de dados. A taxa de aquisição de dados da força de atrito, foi de um a cada 10 segundos, correspondente ao valor médio de 10 pontos obtidos a cada um segundo de ensaio.

### **c) Ensaios de desgaste complementares**

Adicionalmente, foram realizados ensaios de desgaste do para tribológico do aço inoxidável austenítico AISI 304 utilizando uma carga de 20 N e distâncias de 5000 m e 7000 m, visando determinar a quantidade de martensita induzida por deformação para estas condições e de esclarecer a sua influência na resistência ao desgaste do par tribológico em questão. Mantiveram-se as mesmas condições de velocidade tangencial e angular. Durante os ensaios de desgaste, a temperatura e a umidade relativa do ambiente estiveram na faixa de 25 até 31 °C e 52 até 61 %, respectivamente.

Para a finalização dos ensaios foi adotado como critério o alcance do número de ciclos do disco correspondente à distância de ensaio estabelecida. Isto é, para

3000 m correspondem 15915 ciclos, para 5000 m 26526 ciclos, para 7000 m 37136 ciclos e para 9000 m 47746 ciclos.

#### 4.2.3 Caracterização das amostras desgastadas

##### a) Metalografia

Para a observação das superfícies desgastadas do pino e do disco utilizou-se o microscópio óptico modelo BX60M, marca OLIMPUS. Posteriormente foi realizado o corte longitudinal à direção de deslizamento dos pinos e discos, segundo mostra a Figura 4. 5 (b). Para tanto, utilizou-se um disco abrasivo montado em cortadeiras metalográficas de precisão, modelos ISOMET 1000 ou ISOMET 2000, marca BUEHLER, pertencentes ao Laboratório de Análises Térmicas do Departamento de Engenharia Metalúrgica da EPUSP e ao Laboratório de Metalurgia do Pó do IPEN, respectivamente.

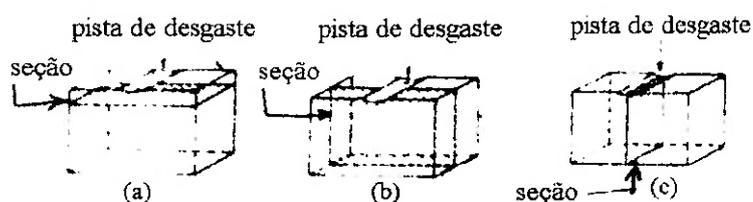


Figura 4. 5. Esquema mostrando as seções que utilizam-se para a análise das amostras desgastadas. (a) paralela, (b) longitudinal, (c) transversal.

Também para a observação das superfícies desgastadas foi utilizado o microscópio eletrônico de varredura, modelo Cambridge Stereoscan 240 do Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura e Microanálise do Departamento de Engenharia Metalúrgica da EPUSP. Para a caracterização das partículas de desgaste e da seção longitudinal da pista de desgaste utilizou-se o microscópio eletrônico de varredura,

modelo Leica Stereoscan 440 do Laboratório de Caracterização Tecnológica do Departamento de Engenharia de Minas da EPUSP.

#### **b) Rugosidade**

Para os ensaios de desgaste interrompidos foi medida a rugosidade após cada interrupção, utilizando o Rugosímetro Padrão Surtronic 3+. O comprimento de medição utilizado foi de 4 mm e o *cut-off* de 0,8 mm.

#### **c) Ferritoscopia**

A quantidade de martensita induzida pelo desgaste foi determinada usando a técnica magnética de ferritoscopia com ferritoscópio Fischer, do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da EPUSP, modelo MP3 Sonde GAB 1.3. Foram realizadas sete medições em cada amostra ensaiada.

#### **d) Difração de raios-X**

As superfícies desgastadas dos pinos e discos foram examinadas por difração de raios-X em um difratômetro modelo PW1710, marca PHILIPS do Laboratório de Caracterização Tecnológica do Departamento de Engenharia de Minas da EPUSP. Utilizou-se radiação  $K_{\alpha}$  do Cu, tensão de excitação de 40 kv e corrente de 50 mA. O ângulo de varredura foi de 40° até 110°, passo de 0,020° e tempo de 1 s por passo. Cada amostra foi passada três vezes pelo exame.

Os difratogramas obtidos foram posteriormente analisados com ajuda do software APD (*Automated Power Diffraction*), PW1877, versão 3.6 da PHILIPS. Desta

forma foi possível determinar a posição ( $2\theta$ ) e a intensidade (área embaixo do pico) dos picos de difração correspondentes às fases martensita e austenita as quais foram identificados mediante a comparação com o arquivo do JCPDS, *Joint Committee on Powder Diffraction standards*, onde estão arquivados os cartões de uma grande quantidade de substâncias.

No Anexo A apresenta-se a metodologia para a determinação da quantidade de austenita e de martensita presentes após do ensaio de desgaste.

#### **e) Microdureza**

O encruamento da superficial e sub-superficial, após os ensaios de desgaste, foi avaliado através de medidas de microdureza. Estas medidas foram efetuadas no equipamento FISCHER HV-100 do Laboratório de Fenômenos de Superfície da EPUSP. Este equipamento opera acoplado com um microscópio óptico e permite a medida de dureza num monitor de TV. Os valores de dureza são calculados mediante um software e visualizados no computador. A carga utilizada foi de 0,098 N (10 g). Obteve-se uma média de 11 repetições (valor máximo) para cada condição. Foram construídas curvas de dureza em função da profundidade em relação à superfície desgastada para cargas de 10 e 20 N correspondentes a uma distância de deslizamento de 9000 m.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Atrito

A Figura 5. 1 mostra a variação do coeficiente de atrito do aço AISI 304 em função da distância para um dos ensaios realizados com carga de 10 N e distância de 9000 m. Existem duas regiões distintas, uma região na qual o coeficiente de atrito oscila em torno de um valor médio estável, indicado pela reta vermelha na Figura 5. 1. Nesta região o coeficiente de atrito médio foi de  $0,5 \pm 0,04$  com variações de 0,2 a 0,6. Na outra região, designada como o *running-in* do sistema tribológico estudado, o coeficiente de atrito teve grandes oscilações as quais diminuíram com o aumento da distância. Nesta região, o coeficiente de atrito varia entre 0,2 e 1 e seu valor médio é de  $0,6 \pm 0,15$ , indicado pela reta azul na Figura 5. 1. A extensão do *running-in* do par tribológico de aço AISI 304 variou entre 1500 m e 2000 m para as condições estudadas.

Observou-se ainda, para o mesmo par tribológico e com carga de 20 N, que no *running-in* o coeficiente de atrito apresentou uma variação oposta à mostrada na Figura 5. 1, ele se elevou até atingir o valor médio  $0,6 \pm 0,03$ , vide Figura 5. 2. Nesta Figura observa-se que no período de *running-in* o coeficiente de atrito variou em torno de  $0,5 \pm 0,05$ , sendo seu valor e variação menores do que com carga de 10 N.

Na Tabela 5. 1 e na Tabela 5. 2 são apresentados os valores do coeficiente de atrito médio dos aços AISI 304 e AISI 316, respectivamente. Cada valor do coeficiente de atrito médio corresponde à média do coeficiente de atrito de três repetições de cada ensaio. O valor do coeficiente de atrito de cada ensaio é o valor médio de medidas armazenadas em arquivos de dados a cada 10 segundos, conforme explicado no item

4.2.2 b), considerando somente os valores do período estável de cada ensaio. De acordo com os resultados da Tabela 5. 1, Figura 5. 1 e Figura 5. 2, o coeficiente de atrito do aço AISI 304 médio de  $0,54 \pm 0,06$  e o correspondente ao aço AISI 316 tem um valor de  $0,48 \pm 0,03$ .

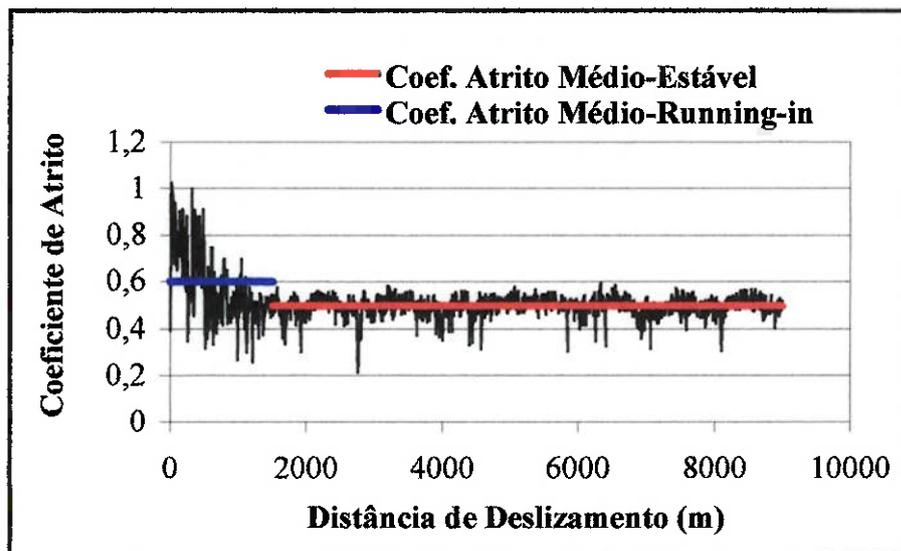


Figura 5. 1. Variação do coeficiente de atrito do aço AISI 304. Carga de 10 N, distância de deslizamento de 9000 m. A extensão do *runnign-in* foi até 1500 m.

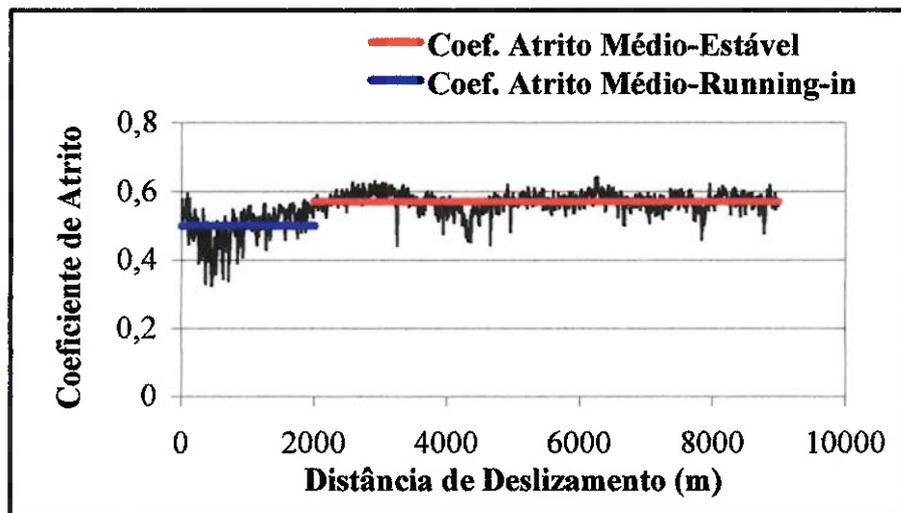


Figura 5. 2. Variação do coeficiente de atrito do aço AISI 304. Distância de deslizamento de 9000 m, carga de 20 N. A extensão do *runnign-in* foi até 2000 m.

Tabela 5. 1. Coeficiente de atrito médio e desvio padrão do aço AISI 304

Carga (N)	Distância (m)	Coeficiente de Atrito Médio
10	3000	$0,47 \pm 0,02$
	9000	$0,52 \pm 0,02$
20	3000	$0,61 \pm 0,00$
	9000	$0,56 \pm 0,01$

Tabela 5. 2. Coeficiente de atrito médio e desvio padrão do aço AISI 316

Carga (N)	Distância (m)	Coeficiente de Atrito Médio
10	3000	$0,46 \pm 0,04$
	9000	$0,52 \pm 0,02$
20	3000	$0,46 \pm 0,05$
	9000	$0,49 \pm 0,02$

O coeficiente de atrito para cada condição de ensaio oferece uma informação macroscópica do atrito entre as superfícies deslizantes. Porém, do ponto de vista microscópico, este valor não explica as dispersões observadas ao longo de cada ensaio. Estas dispersões contêm informações referidas aos eventos que ocorrem durante o deslizamento de duas superfícies, tais como: adesão, deformação plástica das superfícies deslizantes e das partículas retidas na interface, formação de trincas, transferência de material, crescimento e mistura das partículas destacadas, transformações de fase, entre outros.

Outro fator que influencia nas dispersões do coeficiente de atrito é a rigidez do equipamento de ensaio. Foi observado um deslocamento vertical do sistema de fixação do pino e de aplicação da carga normal da máquina de ensaio de desgaste. Porém, além da rigidez da máquina, este deslocamento também é provocado pelos eventos microscópicos citados anteriormente.

Em um estudo do desgaste adesivo realizado por Sasada<sup>19</sup> verificou-se que deslocamento do pino na direção vertical foi provocado pela presença de partículas na interface de contato (vide Figura 3. 6 e Figura 3. 7). Chen e Rigney<sup>21</sup>, em ensaios realizados em sistema pino-sobre-disco com molibdênio, cobre e ligas de cobre obtiveram três tipos principais de variações do coeficiente de atrito: coeficiente de atrito com grandes variações, coeficiente de atrito com variações moderadas e um coeficiente de atrito com comportamento intermediário. Os pares com maiores variações do coeficiente de atrito apresentaram camadas transferidas com uma espessura maior e superfícies desgastadas com uma maior rugosidade. Portanto, constata-se que a adesão, influenciada pela natureza das forças de coesão entre os materiais em contato, assim como o comportamento das partículas retidas na interface de contato afetam de maneira considerável as variações do coeficiente de atrito.

## **5.2 Desgaste**

### **5.2.1 Análise da carga normal e da distância de deslizamento**

A Tabela 5. 3, apresenta os dados da perda de massa dos aços AISI 304 e AISI 316. Observa-se para ambos materiais, que o aumento da carga de 10 N para 20 N provocou um aumento da perda de massa tanto no pino quanto no disco para as distâncias de 3000 m e 9000 m. Nesta Tabela observa-se também que o aumento da distância de deslizamento provocou um aumento da perda de massa tanto no pino como no disco para as cargas de 10 N e 20 N. Para o caso do aço AISI 316, o aumento da distância de deslizamento também causou um aumento da perda de massa do pino e do disco com carga de 10 N e 20 N.

Tabela 5. 3. Perda de massa (g) dos aços inoxidáveis austeníticos AISI 304 e AISI 316 .

<b>Carga (N)</b>	<b>Distância (m)</b>	<b>Amostra</b>	<b>Aço AISI 304</b>	<b>Aço AISI 316</b>
<b>10</b>	<b>3000</b>	<b>Pino</b>	0,025 ± 0,018	0,044 ± 0,002
		<b>Disco</b>	0,089 ± 0,006	0,053 ± 0,003
	<b>9000</b>	<b>Pino</b>	0,174 ± 0,003	0,114 ± 0,006
		<b>Disco</b>	0,297 ± 0,000	0,167 ± 0,000
<b>20</b>	<b>3000</b>	<b>Pino</b>	0,060 ± 0,005	0,066 ± 0,006
		<b>Disco</b>	0,150 ± 0,000	0,095 ± 0,005
	<b>9000</b>	<b>Pino</b>	0,213 ± 0,013	0,196 ± 0,012
		<b>Disco</b>	0,481 ± 0,052	0,335 ± 0,005

### 5.2.2 Análise do tipo de material

Comparando o desgaste dos dois materiais, nota-se na Tabela 5. 3 que para a carga de 10 N e distância de deslizamento de 3000 m a perda de massa do pino do aço AISI 304 foi menor do que a do pino do aço AISI 316. Entretanto, com o aumento da distância percorrida até 9000 m, a perda de massa do pino do aço AISI 304 foi maior em relação ao pino do aço AISI 316.

Com carga normal de 10 N e distância de deslizamento de 3000 m o disco do aço AISI 304 desgastou-se mais do que o correspondente ao aço AISI 316, permanecendo este mesmo comportamento com o aumento da distância até 9000 m, isto é, a perda de massa do disco foi maior no aço AISI 304 do que no aço AISI 316.

Nota-se na Tabela 5. 3 que com uma carga de 20 N a perda de massa do pino foi aproximadamente igual para ambos materiais para 3000 m e 9000 m. Para o caso dos discos houve diferença entre a perda de massa do aço AISI 304 e AISI 316, sendo que o disco de aço AISI 304 desgastou-se mais do que o de AISI 316 para as duas distâncias estudadas.

### 5.2.3 Ensaios interrompidos

Os resultados do ensaio com carga de 20 N realizado de maneira interrompida são mostrados na Figura 5. 3. A Figura 5. 3 (a) apresenta a perda de volume do pino em função da distância de deslizamento e mostra que para os dois aços estudados o desgaste teve um comportamento linear. A mesma relação linear entre a perda de volume e a distância de deslizamento foi obtida por Smith<sup>†</sup> em ensaios de desgaste realizados em configuração de ensaio do tipo pino-sobre-placa, sendo ambos de aço inoxidável austenítico AISI 316, com carga normal variando de 8 N até 48 N e distância de deslizamento variando de 200 m até 3300 m.

Nesta Figura observa-se também que os pinos dos dois materiais tiveram a mesma perda de massa ao longo da distância. Isto confirma os resultados obtidos nos ensaios realizados com distâncias de até 3000 m e 9000 m, conforme o mostrado na Tabela 5. 3.

A Figura 5. 3 (b) representa a taxa de desgaste de ambos materiais em função da distância de deslizamento, onde observa-se a etapa inicial de *running-in* na qual a taxa de desgaste teve valores altos para o aço AISI 304. Sugere-se que o *running-in* ocorre entre 1000 e 2000 m para o aço AISI 304, porém o aço AISI 316 teve um *running-in* correspondente a uma distância inferior a 1000 m.

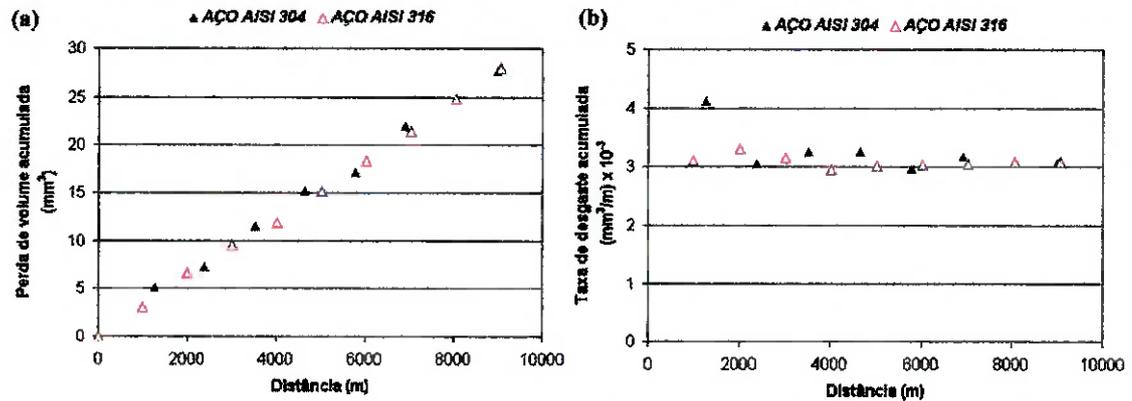


Figura 5. 3. Perda de volume acumulada (a) e taxa de desgaste acumulada (b) do pino dos aços AISI 304 e AISI 316. Ensaio interrompido, carga de 20 N e distância de deslizamento de 9000 m .

Após a etapa de *running-in*, a taxa de desgaste diminuiu até um valor médio, a qual permaneceu constante durante o resto do ensaio. Neste período estável, a taxa de desgaste foi aproximadamente a mesma para os dois metais, tendo um valor médio de  $3,13 \times 10^{-3} \pm 0,03 \text{ mm}^3/\text{m}$ . O coeficiente adimensional de desgaste foi o mesmo para ambos materiais e teve um valor médio de  $1,6 \times 10^{-4} \pm 0,01 \text{ mm}^3/\text{m N}$ .

### 5.3 Rugosidade

Após a ensaio de desgaste interrompido a rugosidade do pino aumentou grandemente em relação à rugosidade inicial. Antes do ensaio a rugosidade ( $R_a$ ) do pino era de  $0,2 \mu\text{m}$ . Depois dos primeiros 1000 m de distância de deslizamento a rugosidade média foi para 4, tendo valores diferentes em diferentes regiões da superfície desgastada conforme mostra a Figura 5. 4. As medições de rugosidade para distâncias superiores a 1000 m indicaram uma oscilação deste parâmetro entre  $2 \mu\text{m}$  e  $4 \mu\text{m}$ .

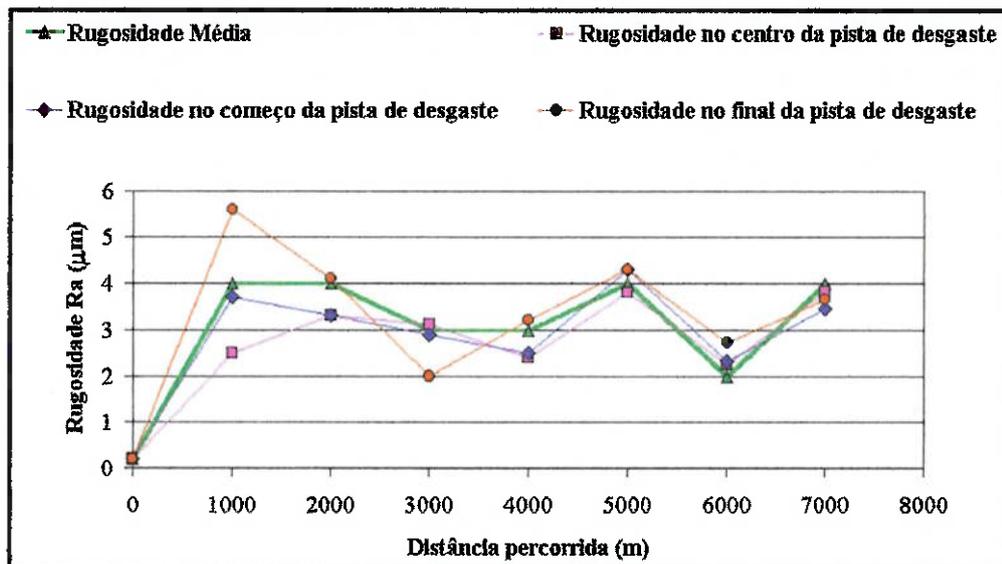


Figura 5. 4. Variação da rugosidade após o desgaste em função da distância de deslizamento medida em diferentes regiões da pista de desgaste. Os dados correspondem com as medições realizadas na superfície desgastada do pino de aço inoxidável AISI 316. Carga de 20 N e distância de deslizamento de 9000 m, ensaio interrompido.

#### 5.4 Ferritoscopia

Esta técnica não é muito adequada para a determinação da quantidade de martensita superficial, mas forneceu uma informação comparativa entre as medidas realizadas antes e depois dos ensaios de desgaste.

A quantidade de martensita detectada nos discos desgastados de aço AISI 304 foi 20 vezes maior do que a quantidade inicial. A quantidade desta fase correspondente ao aço AISI 316 foi nula. A presença de martensita induzida por deformação foi determinada com maior precisão através de difração de raios X.

## 5.5 Raios-X das superfícies desgastadas e dos resíduos de desgaste

### 5.5.1 Fases presentes

A partir da análise por difratometria de raios-X das superfícies desgastadas e das partículas de desgaste foram identificadas duas fases nos aços AISI 304 e AISI 316: uma fase cúbica de fases centradas (cfc), correspondente à austenita com parâmetro de rede de  $3,60 \times 10^{-10}$  m e outra fase com parâmetro de rede de  $2,874 \times 10^{-10}$  m. Este valor de parâmetro de rede corresponde ao da martensita ( $\alpha'$ ) induzida por deformação<sup>53</sup>.

As Figura 5. 5,..., e Figura 5. 14 mostram os espectros de difração resultantes da análise das superfícies desgastadas das amostras e dos resíduos de desgaste dos aços AISI 304 e AISI 316. Não foram apresentados os difractogramas correspondentes aos resíduos de desgaste dos aços AISI 304 e AISI 316 para uma carga de 20 N e 3000 m de distância, pois foi recolhida uma quantidade de partículas muito pequena, insuficiente para a análise de raios-X.

Nota-se nos difratogramas que o pico de austenita ( $\gamma$ ) de intensidade 100 %, correspondente ao plano (111), está muito elevado em comparação aos outros picos de  $\gamma$ . Esta elevação não é conseqüente com a diferença de intensidade entre o pico [ $\gamma$  (111)-100 %] e os outros da fase  $\gamma$ . A causa desta elevação poderia ser a ocorrência de superposição do pico [ $\gamma$  (111)-100 %] com o pico da fase  $\alpha'$ (101) de intensidade 100 %. Além disso, há possibilidade de ocorrência de uma superposição com o pico da fase  $\epsilon$ , hexagonal compacta (hp), paramagnética, plano (100) de 20 % de intensidade.

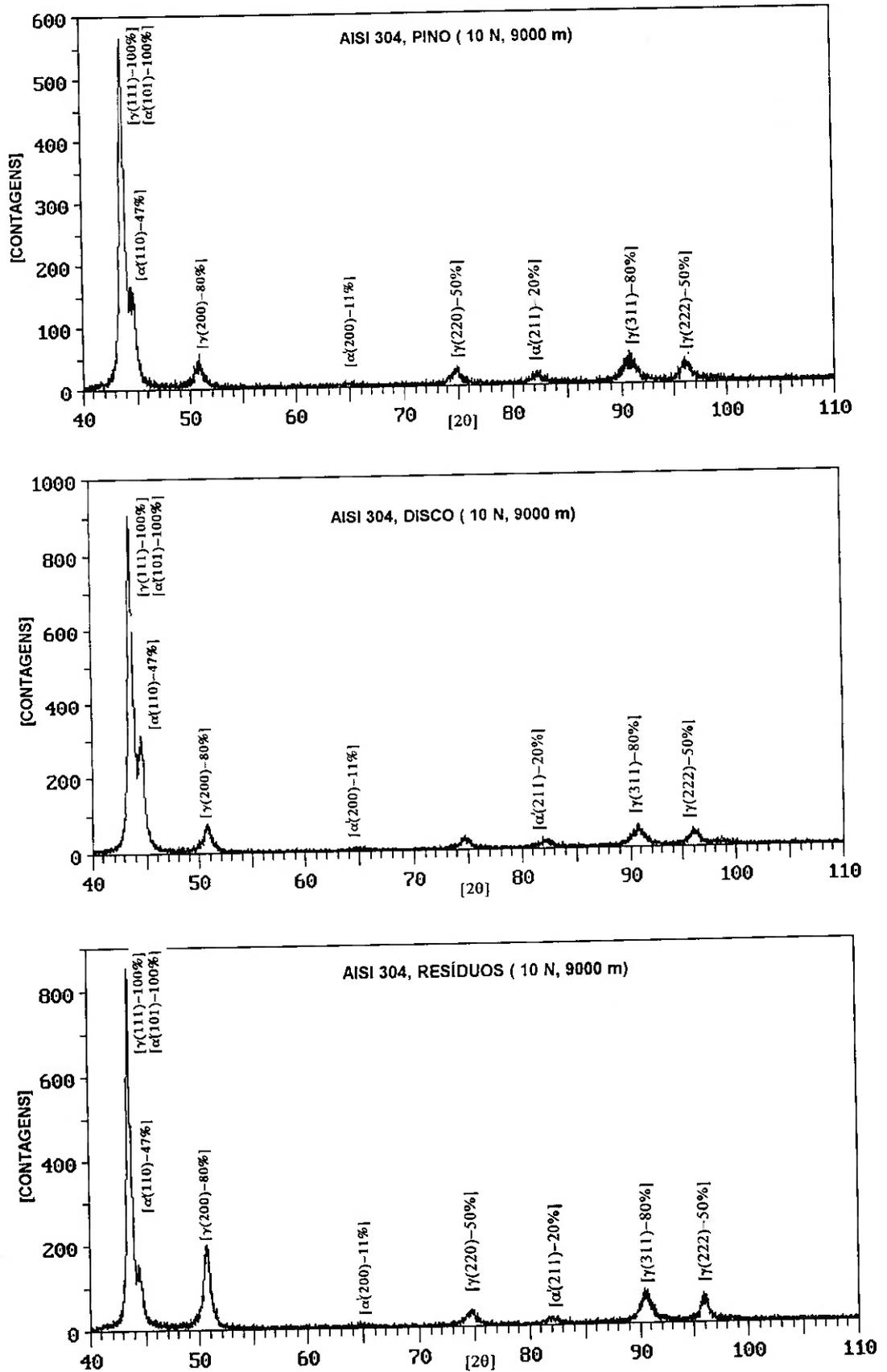


Figura 5. 6. Espectros de difração de raios-X do pino, disco e dos resíduos de desgaste do aço AISI 304. Carga 10 N, distância 9000 m.

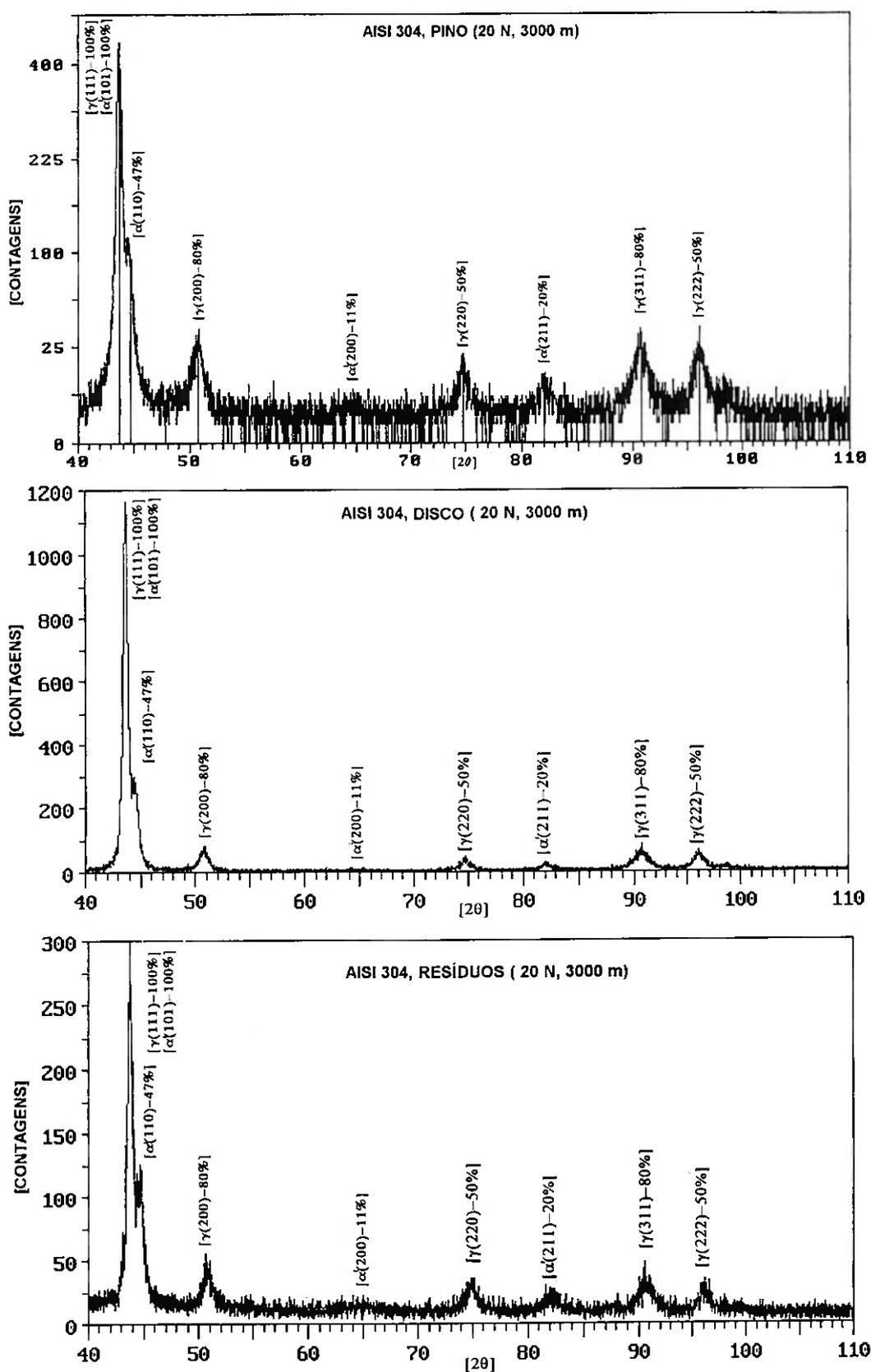


Figura 5. 7. Espectros de difração de raios-X do pino, disco e dos resíduos de desgaste do aço AISI 304. Carga 20 N, distância 3000 m.

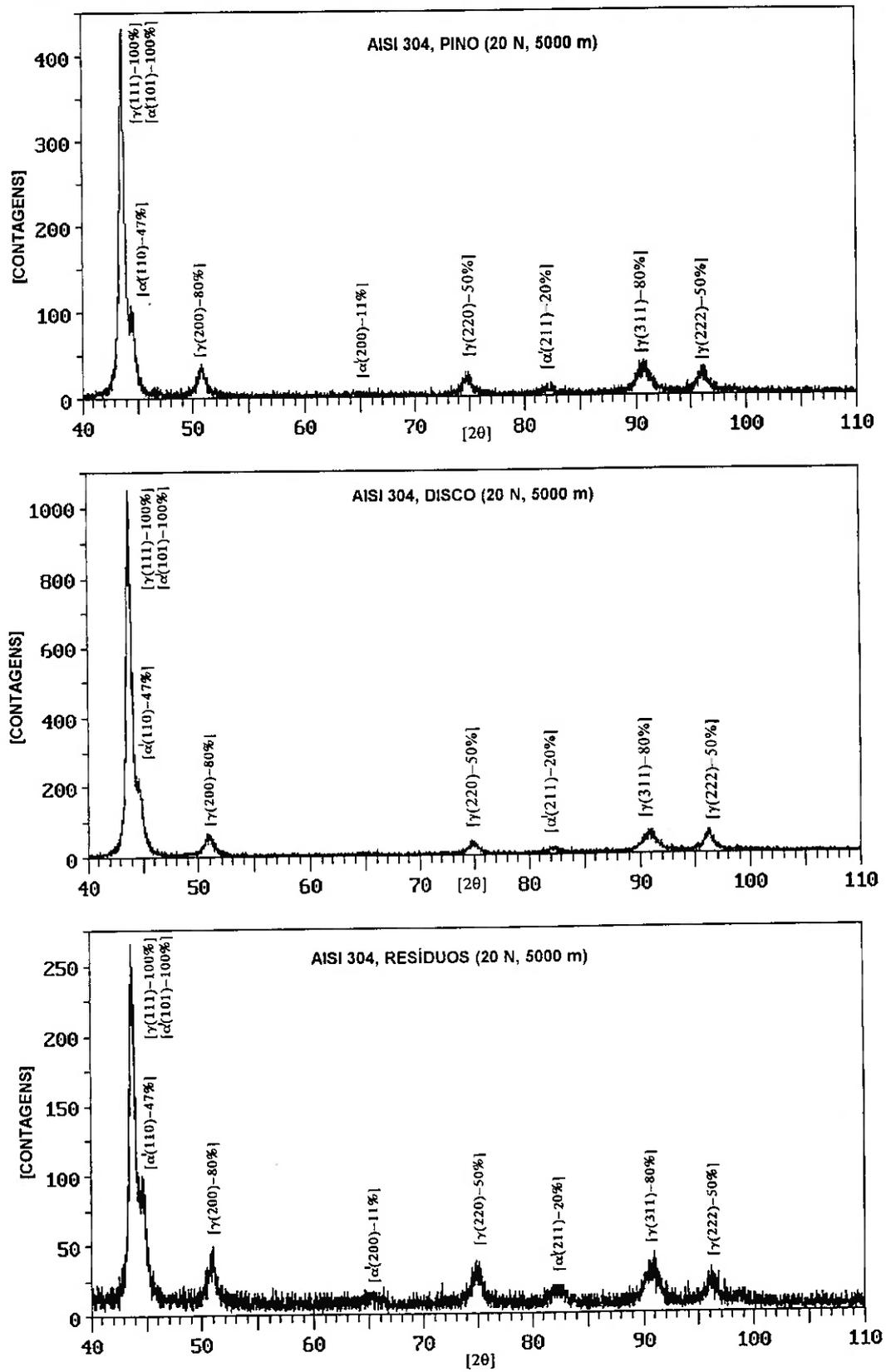


Figura 5. 8. Espectros de difração de raios-X do pino, disco e dos resíduos de desgaste do aço AISI 304. Carga 20 N, distância 5000 m.

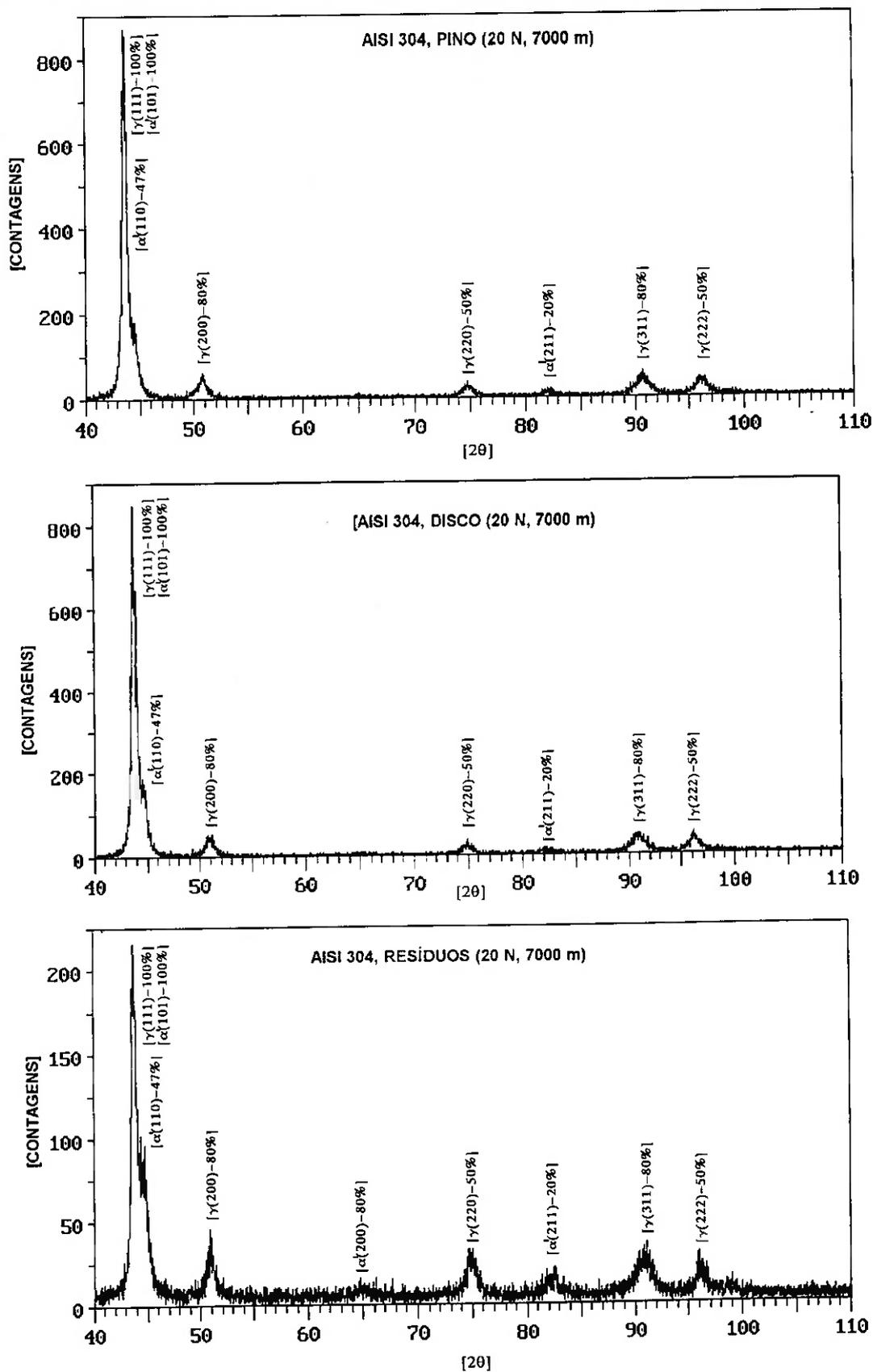


Figura 5. 9. Espectros de difração de raios-X do pino, disco e dos resíduos de desgaste do aço AISI 304. Carga 20 N, distância 7000 m.

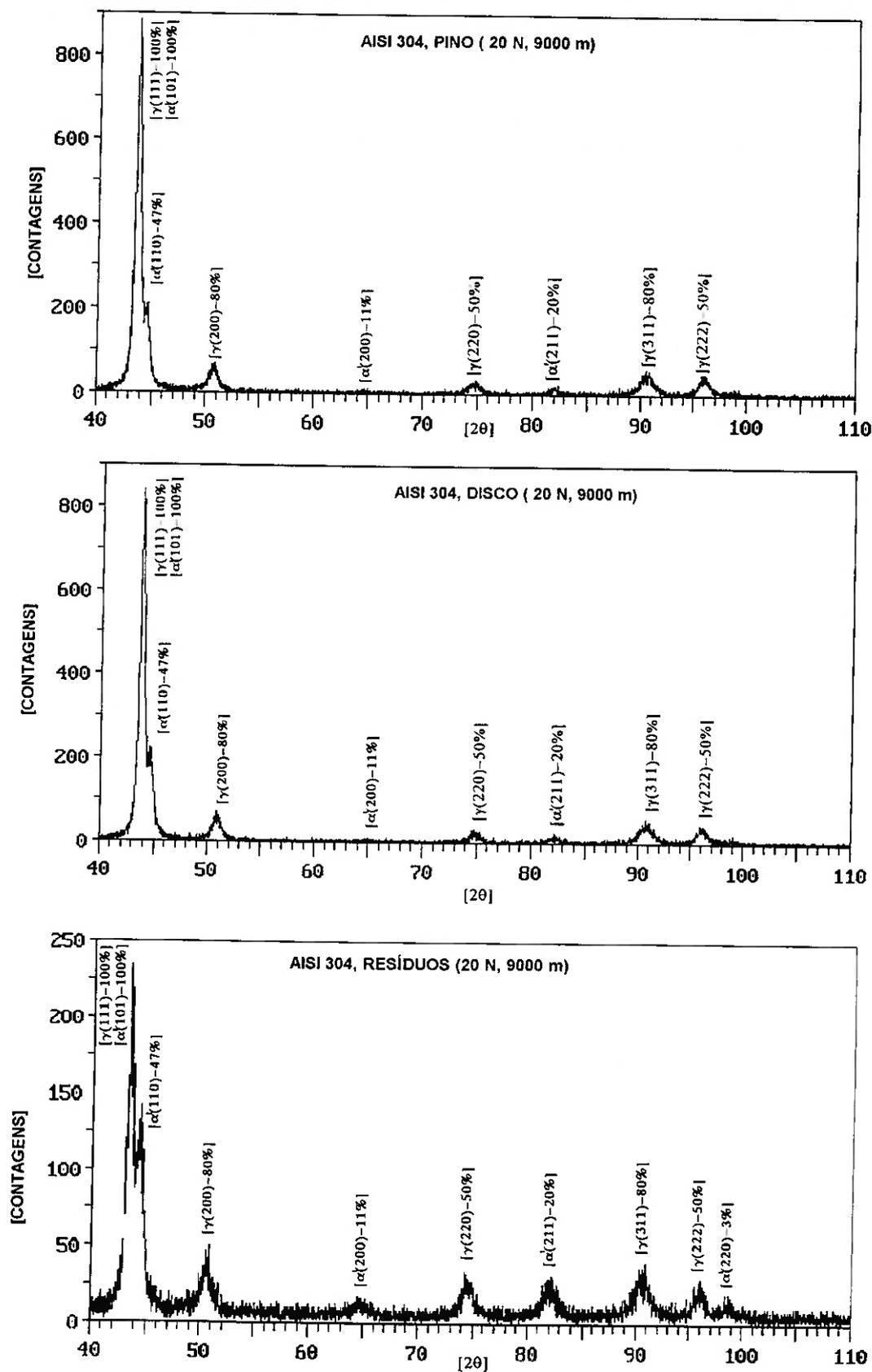


Figura 5. 10. Espectros de difração de raios-X do pino, disco e dos resíduos de desgaste do aço AISI 304. Carga 20 N, distância 9000 m.

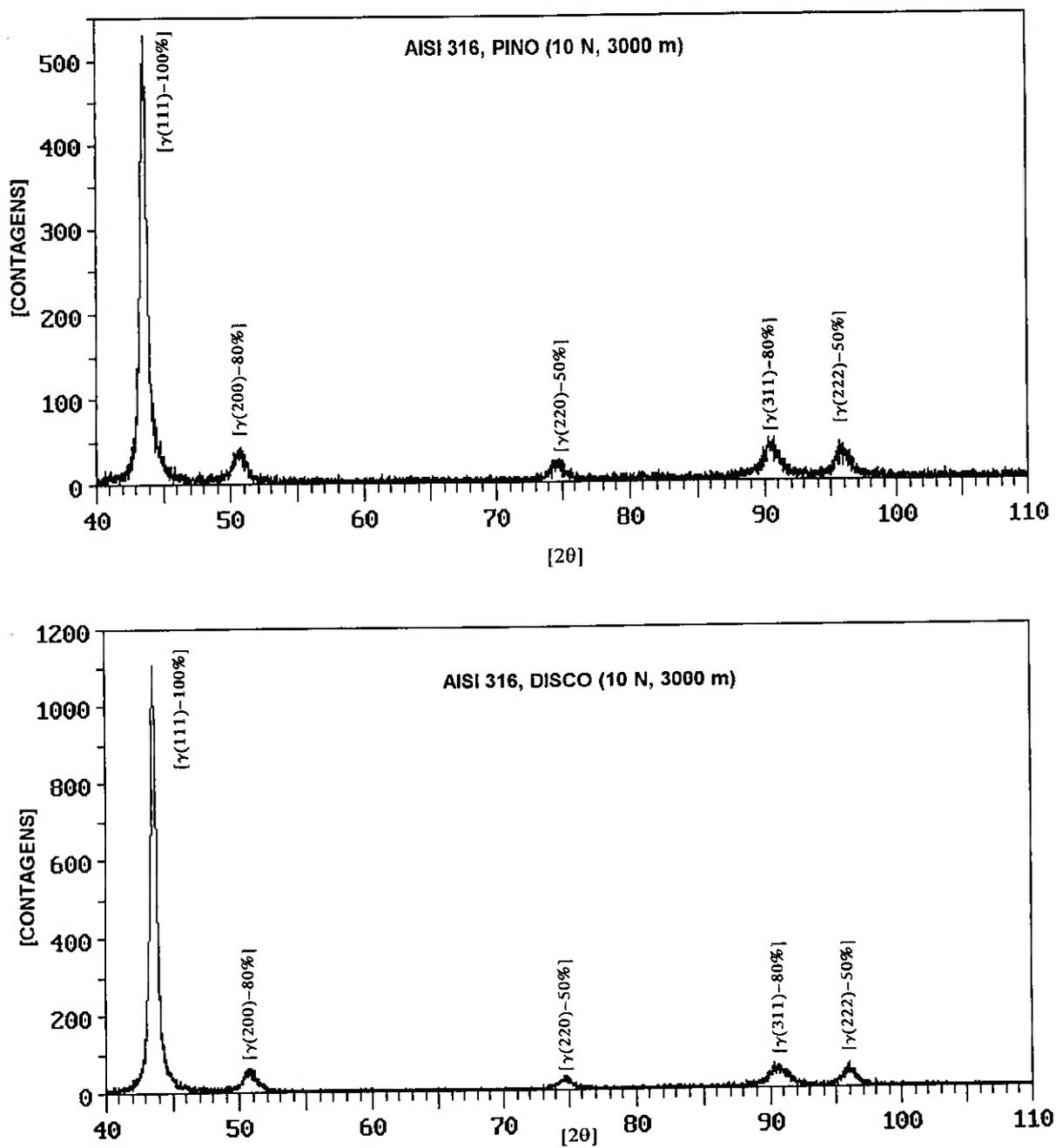


Figura 5. 11. Espectros de difração de raios-X do pino e disco do aço AISI 316. Carga 10 N, distância 3000 m.

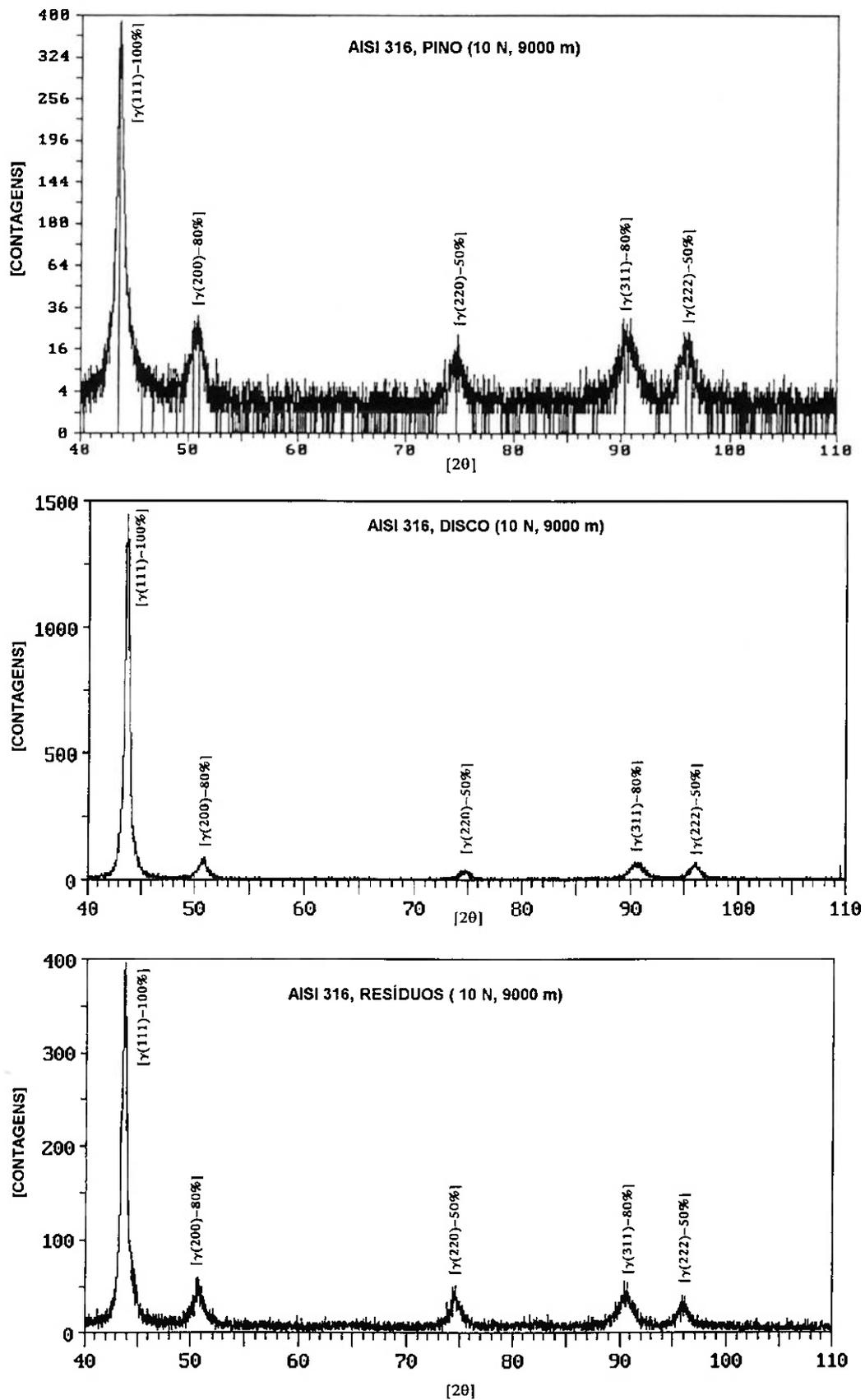


Figura 5. 12. Espectros de difração de raios-X do pino, disco e dos resíduos de desgaste do aço AISI 316. Carga 10 N, distância 9000 m.

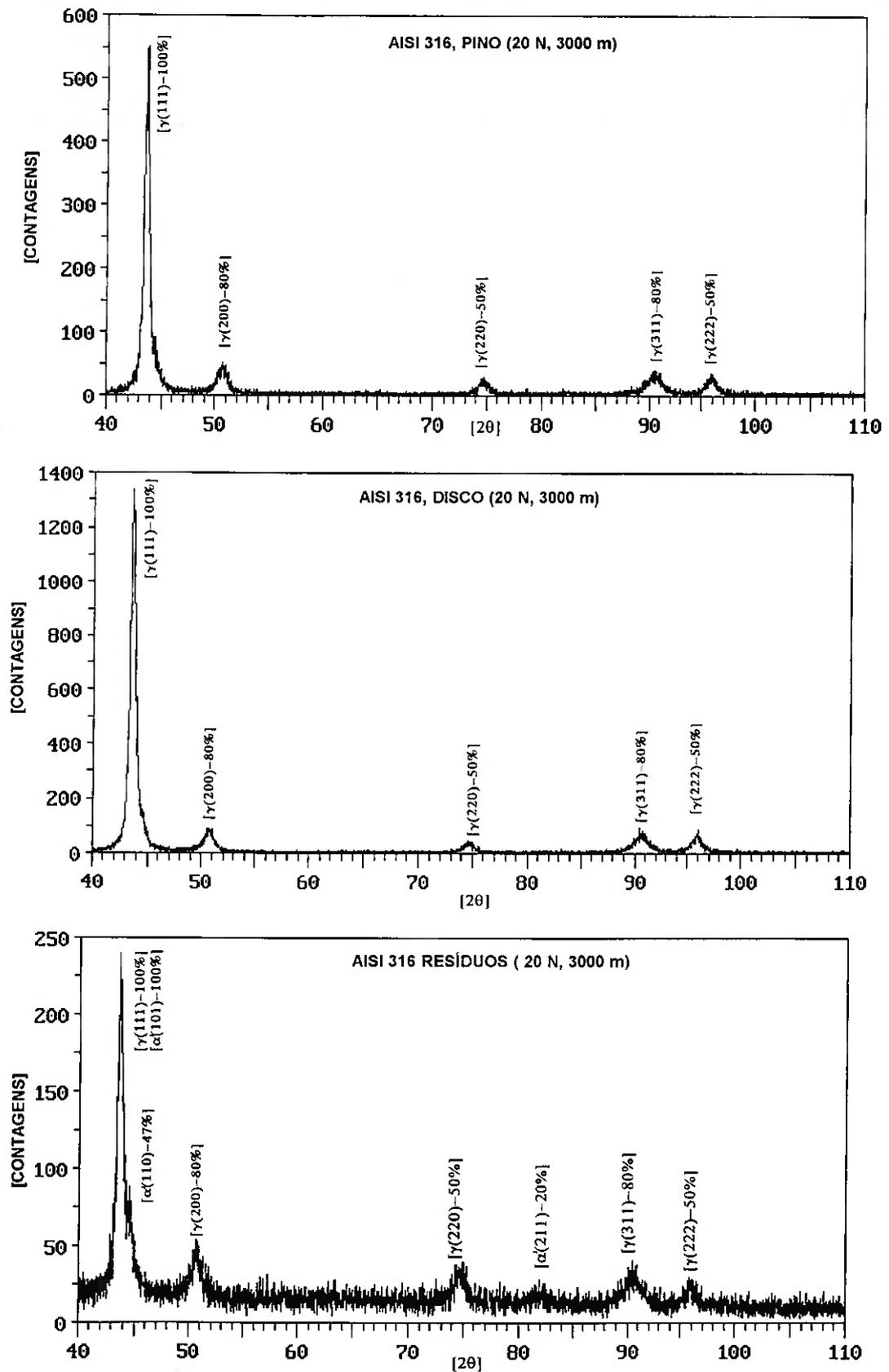


Figura 5. 13. Espectros de difração de raios-X do pino, disco e dos resíduos de desgaste do aço AISI 316. Carga 20 N, distância 3000 m.

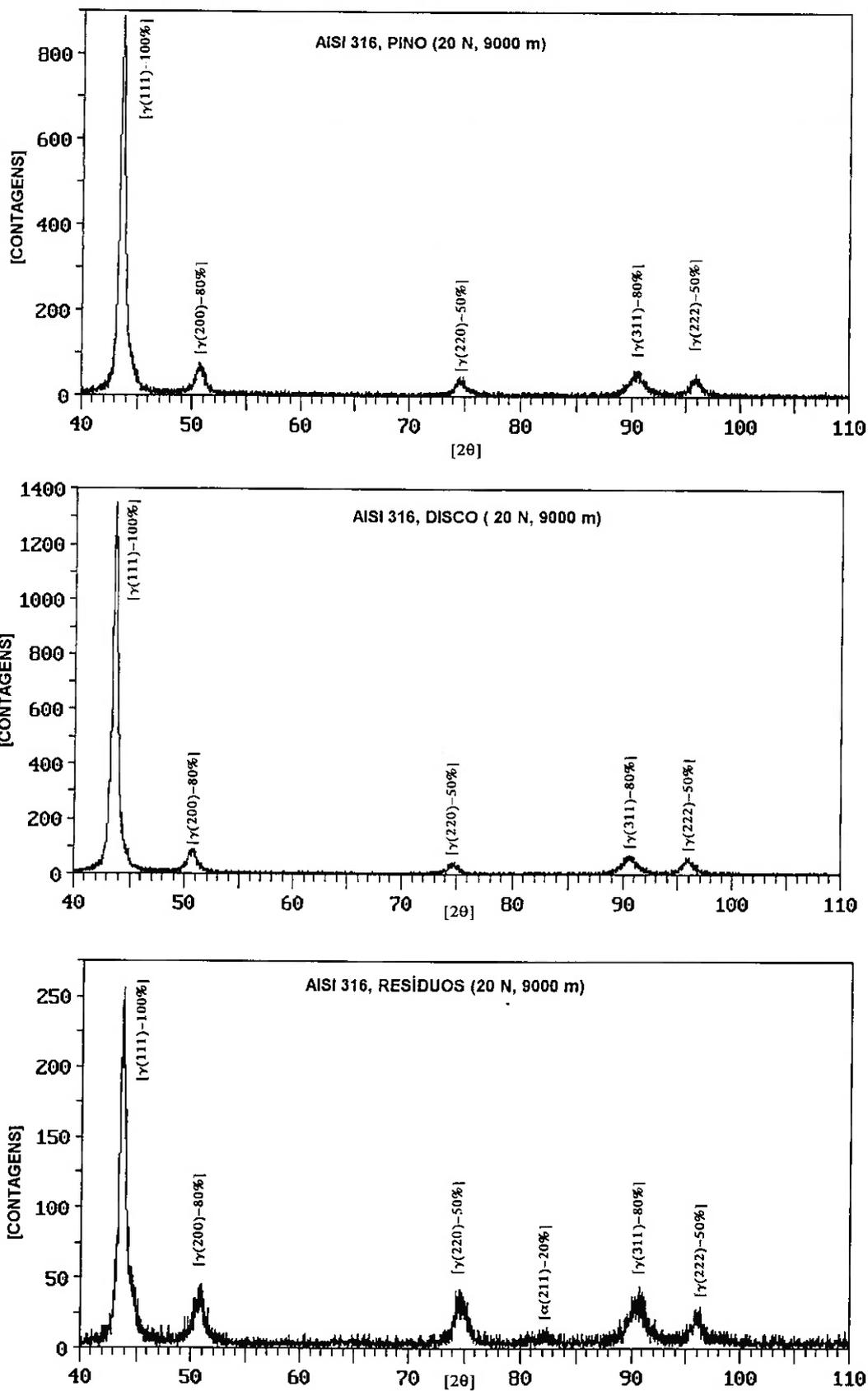


Figura 5. 14. Espectros de difração de raios-X do pino, disco e dos resíduos de desgaste do aço AISI 316. Carga 20 N, distância 9000 m.

### 5.5.2 Análise quantitativa das fases presentes

No caso do aço AISI 316 com carga de 20 N não foi detectada a fase martensítica nem no pino nem no disco conforme mostram os difratogramas das Figura 5. 5,..., e Figura 5. 14. Não entanto, esta transformação deve estar ocorrendo tanto no pino como no disco pois nos resíduos de desgaste foi detectada a presença da martensítica. Isto indica que quase toda a martensita formada foi arrancada das superfícies desgastadas durante o deslizamento. Obteve-se para a carga de 20 N 13,11 % de martensita com distância de 3000 m e com 9000 m a quantidade de martensita foi de 8,01 %.

Na Tabela 5. 4 apresenta-se a quantidade de martensita obtida para o aço AISI 304 após os ensaios de desgaste. No aço AISI 304 foi detectada a presença de martensita tanto nas superfícies dos pinos e discos quanto nos resíduos de desgastes, cujos valores foram maiores do que os correspondes ao aço AISI 316.

A menor quantidade de martensita detectada no aço AISI 316 em relação ao aço AISI 304 está relacionada com sua estabilidade estrutural a qual depende da composição química. Utilizando a equação de Angel<sup>33</sup> (Equação (3. 1), página 42) e os dados da composição química (Tabela 4. 1, página 58), pode-se comparar a estabilidade da austenita de ambos aços. Segundo esta Equação, a temperatura  $M_{d30}$  para o aço AISI 304 é de 16,9 °C e para o aço AISI 316  $M_{d30} = 46,7$  °C (material do pino) e  $- 62,1$  °C, (material do disco). Estes dados corroboram que o aço AISI 316 tem uma maior estabilidade estrutural do que o aço AISI 304 devido a que sua composição química favorece a diminuição da temperatura  $M_{d30}$ . A diminuição da temperatura  $M_{d30}$  é

causada principalmente pelo molibdênio elemento que mais determina a diferença de composição química entre os dois aços estudados.

Tabela 5. 4. Quantidade de martensita do aço AISI 304 após ensaios de desgaste

Carga (N)	Distância (m)	Pino	Disco	Resíduos
10	3000	25,91 **	38,20 ± 4,83	*
	9000	19,31 ± 5,68	25,61 ± 2,76	37,93 **
20	3000	17,39 ± 2,60	18,17 ± 1,05	31,67 ± 1,48
	5000	14,44 ± 2,86	14,87 ± 1,27	27,37 ± 2,52
	7000	13,70 ± 2,96	16,49 ± 2,03	24,68 ± 1,12
	9000	15,34 ± 3,09	20,08 ± 1,37	32,39 ± 5,47

Notas: (\*) Quantidade de resíduos de desgaste insuficiente para a análise de raios-X.

(\*\*) A quantidade de martensita indicada corresponde para uma repetição da análise de raios-X

Os resultados apresentados na Tabela 5. 4 mostram que praticamente o teor de martensita não depende da distância percorrida e da carga aplicada tanto para o pino como para o disco dentro dos limites de erro experimental.

## 5.6 Microscopia óptica

### 5.6.1 Superfície

As superfícies desgastadas dos aços inoxidáveis austeníticos AISI 304 e AISI 316 apresentaram o mesmo aspecto para todas as condições de ensaio. Observou-se apreciável deformação plástica, riscos de abrasão e transferência de material, conforme mostra a Figura 5. 15. A presença de material aderido foi detectada em regiões muito localizadas das superfícies desgastadas do aço AISI 316, contrariamente ao observado no aço AISI 304, onde o material aderido foi encontrado em muitas regiões. As regiões

riscadas possuem um aspecto brilhante e uma superfície lisa. Na regiões onde houve material transferido notou-se a formação de camadas do material deformado.

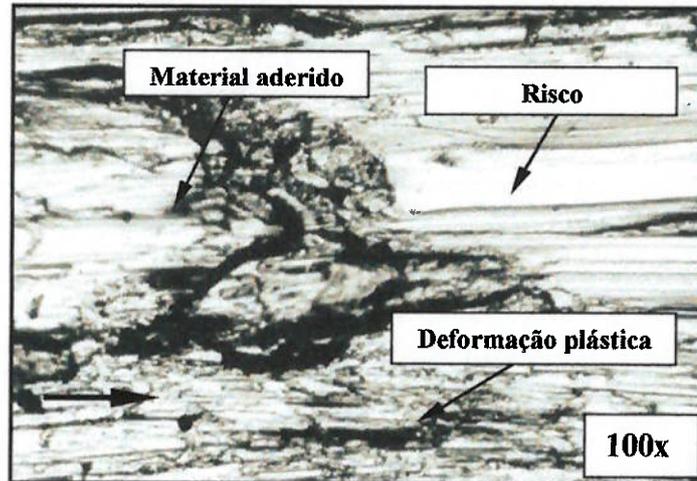


Figura 5. 15. Centro da pista de desgaste do disco de aço AISI 304. Carga de 20 N e distância de 9000 m.

### 5.6.2 Partículas de desgaste

Foram coletadas as partículas de desgaste do aço AISI 316 correspondentes aos períodos de *running-in* e estável do ensaio interrompido com carga normal de 20 N e distância de 9000 m. As observações indicaram características diferentes de ambos tipos de partículas. A maior parte das partículas do período de *running-in* tinham um tamanho muito maior do que as correspondentes período estável. As partículas do *running-in* (vide Figura 5. 16) tinham forma de lâminas entretanto, as partículas do período estável apresentaram uma forma irregular, encontrando-se algumas em forma de agulhas, arredondadas e outras em forma de lâminas irregulares, (vide Figura 5. 17).

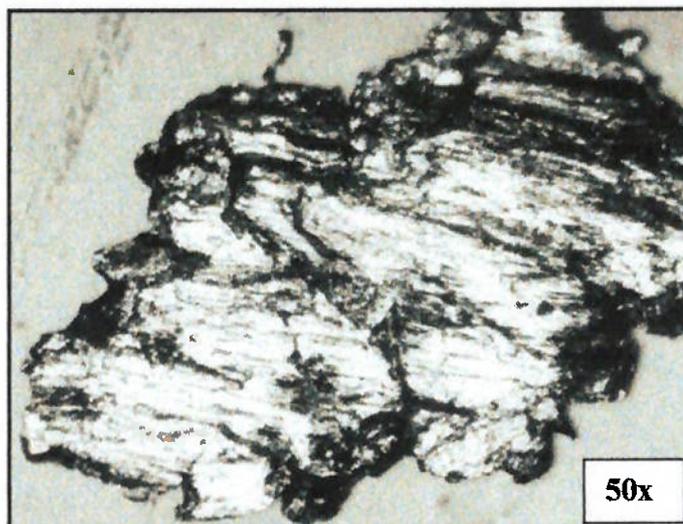


Figura 5. 16. Partícula de desgaste do aço AISI 316 correspondente ao período de *running-in* do ensaio interrompido. Carga de 20 N e distância total de 9000 m.

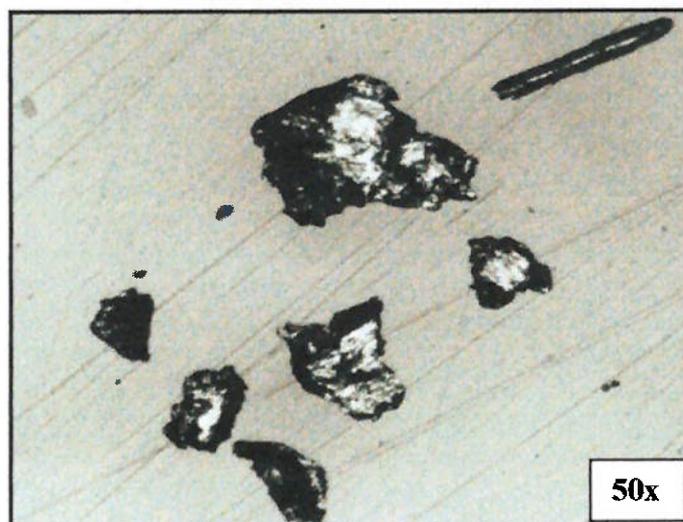


Figura 5. 17. Partículas de desgaste do aço AISI 316 do período estável do ensaio interrompido. Carga de 20 N e distância total de 9000 m.

### 5.6.3 Seção longitudinal

O exame metalográfico das seções longitudinais revelou a presença de deformação plástica embaixo da superfície desgastada com uma orientação na direção do deslizamento. Conforme mostra a Figura 5. 18, a região sub-superficial consiste de uma camada, próxima à superfície, fina e deformada. Abaixo desta camada observa-se uma região com uma microestrutura similar à do material inicial.

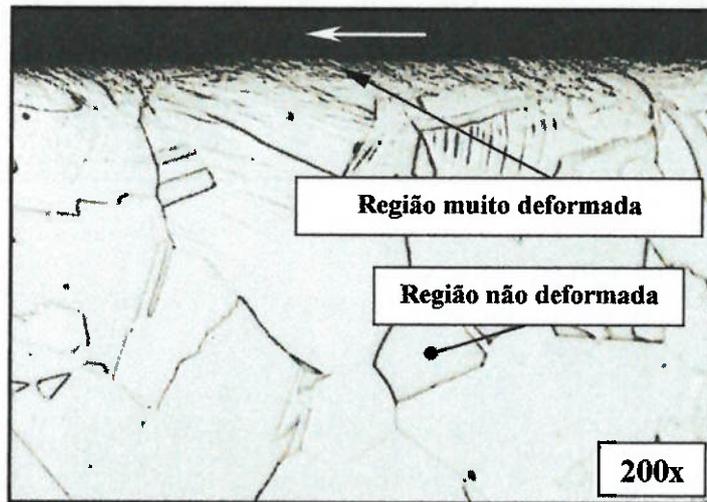


Figura 5. 18. Seção longitudinal do disco desgastado de aço AISI 304. Carga de 20 N e distância de deslizamento de 9000 m.

Segundo as observações de Heilmann<sup>22</sup> a região mais próxima da superfície desgastada é constituída por material aderido proveniente de ambas superfícies e dos resíduos de desgaste. Isto deve comprovar-se mediante a observação desta região por microscopia eletrônica de varredura devido a que a microscopia óptica não possibilita a detecção de seus detalhes.

Ainda segundo Heilmann<sup>22</sup> embaixo da camada de material transferido deve existir uma camada com uma microestrutura de grãos deformados na direção do deslizamento e com células de discordâncias. A microscopia eletrônica de transmissão é a técnica apropriada para a observação de defeitos como as discordâncias<sup>54</sup> porém não é objetivo deste trabalho.

Uma terceira região deve ser observada embaixo da camada deformada com estrutura de células de discordâncias e corresponde com uma região não deformada cuja microestrutura é similar à do material inicial<sup>22</sup>.

## 5.7 Microscopia eletrônica de varredura

### 5.7.1 Superfície

O exame das superfícies desgastadas mostrou a ocorrência de deformação plástica conforme o observado na microscopia óptica. Na região deformada o material está disposto em forma de camadas superpostas, (vide Figura 5. 19). Além da deformação plástica, foram observados os detalhes dos riscos de abrasão observados na microscopia óptica. Como mostra a Figura 5. 20, na ponta do risco o material acumula-se em forma de proa, e o mesmo aparece forma camadas superpostas.

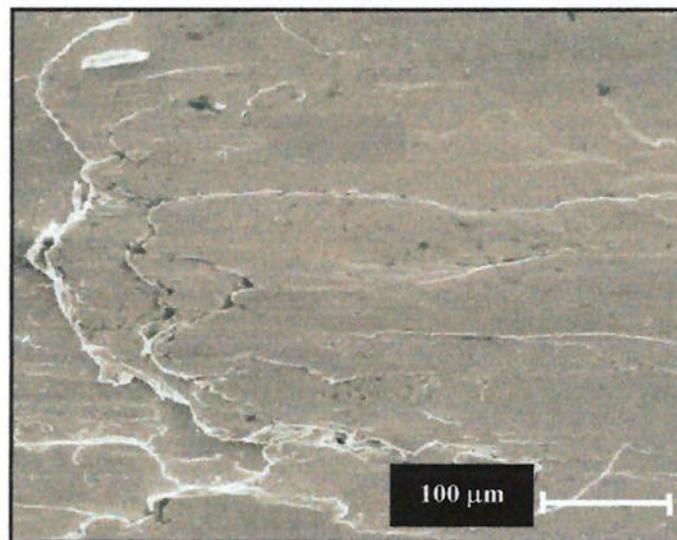


Figura 5. 19. Superfície desgastada do disco de aço AISI 316 mostrando uma região deformada onde o material formou camadas superpostas.

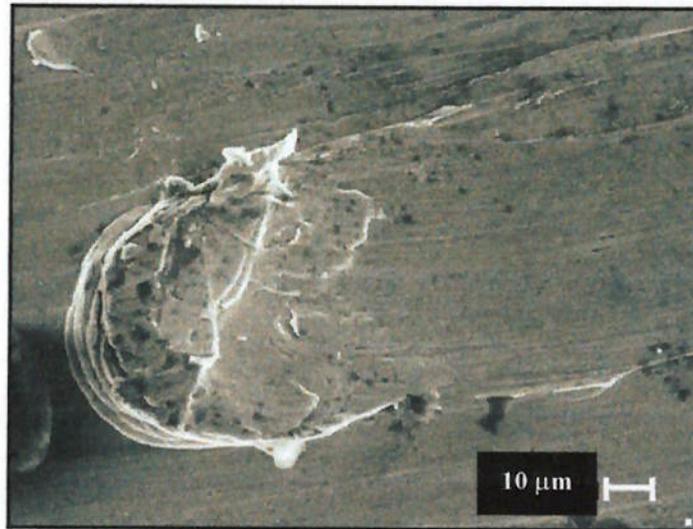


Figura 5. 20. Acumulação de material na ponta de um risco de abrasão. Figura correspondente à superfície desgastada do disco de aço AISI 316. Carga 20 N e distância de deslizamento de 9000 m.

Smith<sup>4</sup>, em estudos sobre os mecanismos de desgaste do aço inoxidável austenítico AISI 316 deslizando contra ele mesmo, indicou que o desgaste deste aço ocorre também mediante um processo de formação de proas. As proas formadas tem uma estrutura de múltiplas camadas e surgem pela acumulação do material transferido. A ductilidade do material propicia a formação de uma proa com camadas em forma de placas.

A formação de proas é um dos mecanismos do desgaste abrasivo e pode estar presente também no desgaste adesivo, de acordo com o modelo de Rigney<sup>20</sup> apresentado no item 3.2.5 d) deste trabalho. Segundo a definição de desgaste abrasivo, a formação de proas é provocada por uma superfície dura ou por partículas duras. Segundo os resultados do deste trabalho, propõem-se que, no desgaste por deslizamento, o encruamento do aço AISI 316 conduz à formação de partículas duras que, quando ficam retidas na interface de deslizamento, podem arrancar parte do material da superfície, formando uma ranhura em cuja ponta acumula-se o material em forma de proa.

### 5.7.2 Partículas de desgaste

A Figura 5. 21 mostra as partículas de desgaste do aço AISI 316 do período de *running-in* do ensaio realizado de maneira interrompida com uma carga 20 N e distância de deslizamento de 9000 m. Observam-se partículas em forma de placas irregulares, cujo tamanho superou 1 mm na direção do eixo maior e na direção de eixo menor chegou até 800  $\mu\text{m}$ .

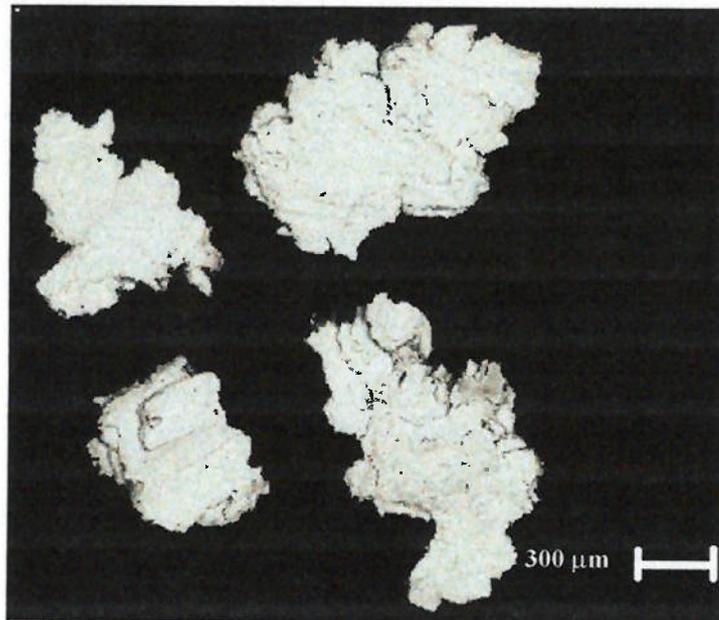


Figura 5. 21. Partículas de desgaste do período de *running-in* (1000 m). Ensaio interrompido, carga de 20 N, distância de deslizamento de 9000 m, aço AISI 316 .

As partículas do período estável tiveram características diferentes em relação às do *running-in*. Na Figura 5. 22 observam-se partículas de diferentes morfologias, algumas em forma de lâminas irregulares, outras esféricas ou em forma de bastão. Estas partículas tinham dimensões até seis vezes menores do que as partículas do *running-in* com tamanhos entre 50  $\mu\text{m}$  até 250  $\mu\text{m}$  aproximadamente. A aparência das superfícies dos fragmentos de desgaste indicam a ocorrência de alguns eventos na da interface de deslizamento antes de serem eliminados como resíduos de desgaste. Tal é o caso das

partículas em forma de bastão, mostrada na Figura 5. 23. Esta forma indica que logo após o fragmento de material ser arrancado de uma das superfícies em deslizamento, o mesmo fica na interface entre os corpos e é deformado e enrolado, até sair da interface. Partículas como as mostradas na Figura 5. 23 também foram detectadas em estudos realizados por Chen<sup>21</sup> em ensaios com pinos de cobre deslizando contra discos de ferro (vide Figura 3. 10).

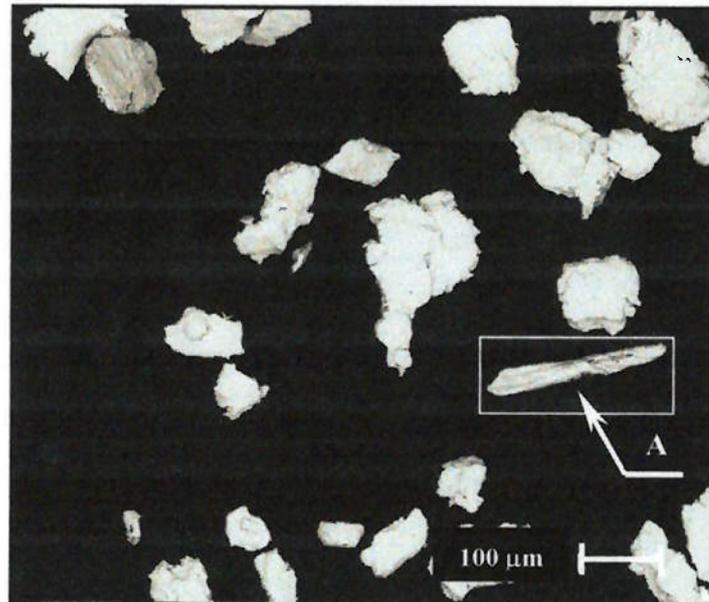


Figura 5. 22. Partículas de desgaste do período estável do ensaio interrompido. Aço inoxidável AISI 316, carga de 20 N e distância de deslizamento de 9000 m. Observam-se partículas em forma de placas, esféricas e em forma de bastão.

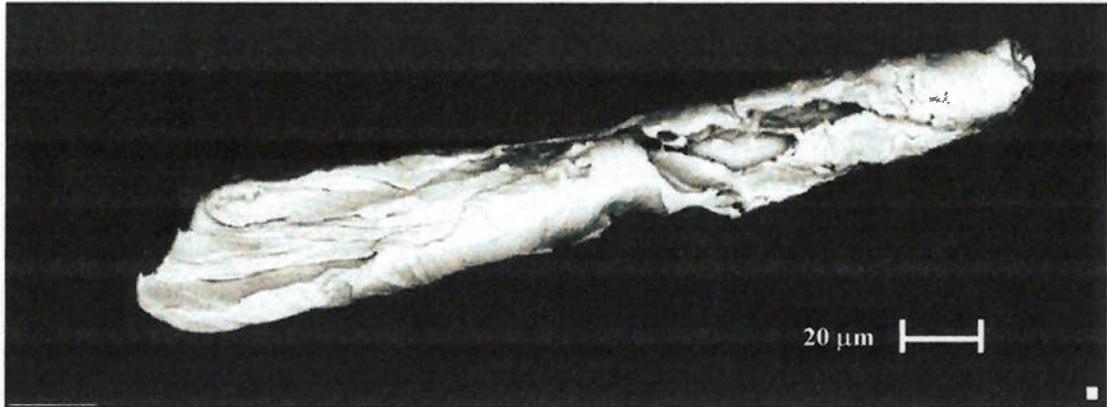


Figura 5. 23. Partícula de desgaste (A) da Figura 5. 22. Carga de 20 N e 9000 m de distância total. O aspecto da partícula indica que esta foi deformada e enrolada antes de sair da interface de deslizamento como resíduo de desgaste.

### 5.7.3 Seção longitudinal

A Figura 5. 24 apresenta as características das regiões localizadas embaixo da superfície de desgaste. Observa-se próximo à superfície desgastada uma região de material aderido composta de camadas superpostas alinhadas na direção do deslizamento. Estas observações confirmam os resultados de Heilmann<sup>22</sup>, sobre a presença de uma camada de material aderido na superfície desgastada. Observa-se também na Figura 5. 24 uma trinca a qual propaga-se paralela à superfície sofrendo depois uma pequena inclinação até chegar ao topo da superfície. A profundidade de propagação da trinca corresponde aproximadamente à espessura da camada mais próxima da superfície. Isto pode indicar que a nucleação e propagação das trincas sub-superficiais ocorre na interface entre a camada aderida e a camada inferior. Entretanto, em outras regiões da sub-superfície foram observadas trincas paralelas à superfície a uma profundidade menor em relação à superfície, isto é dentro da camada aderida. As características das trincas geradas indicam que o desgaste por deslizamento do aço inoxidável austenítico ocorre por um processo de delaminação segundo a teoria apresentada por Suh<sup>13</sup> que leva à formação das partículas laminares observadas.

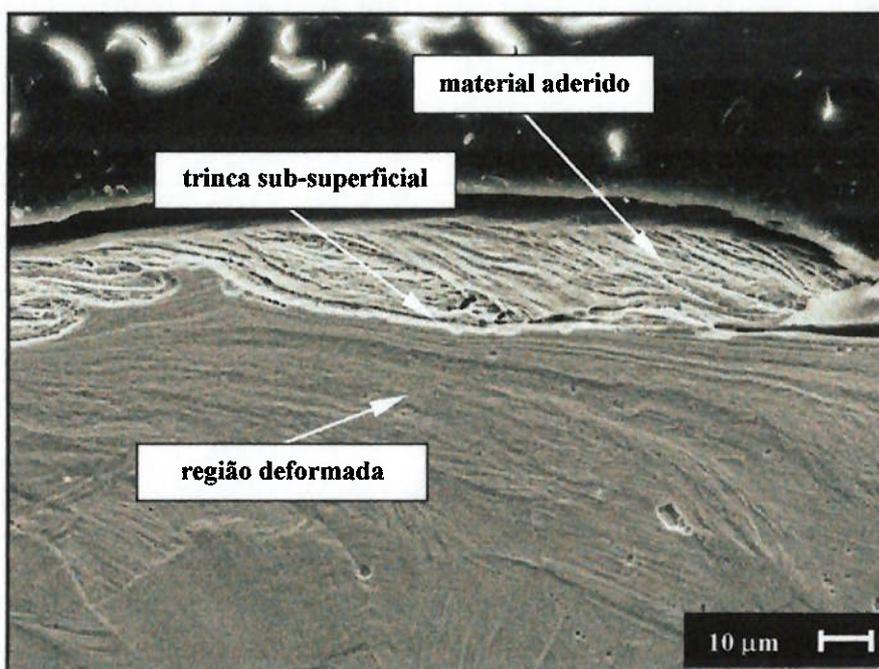


Figura 5. 24. Seção longitudinal mostrando a presença de uma camada de material aderido, embaixo da qual aparece uma camada de grãos deformados na direção do deslizamento. Observa-se também a presença de uma trinca na camada aderida. Seção longitudinal do pino de aço AISI 316 para uma carga normal de 20 N e distância total de 9000 m.

A espessura da camada aderida variou ao longo da superfície e em algumas regiões não houve presença desta região. Isto é próprio das seções longitudinais devido a que a deformação plástica da superfície ocorre de forma não homogênea. A espessura máxima medida da camada aderida foi de 30  $\mu\text{m}$ , aproximadamente. Nas medições de microdureza obtiveram-se os valores máximos de dureza na região mais próxima da superfície os quais foram localizados na mesma profundidade para a qual foi observada a camada de material aderido. Isto confirma a grande deformação plástica residual existente nesta camada.

Na Figura 5. 24 observa-se, abaixo da camada de material aderido uma camada cuja microestrutura apresenta uma orientação contornos de grãos na direção do

deslizamento. Nesta região os valores de dureza foram menores em relação à camada aderida.

## 5.8 Microdureza

Os resultados das medições de microdureza são apresentados na Figura 5. 25. Observa-se um aumento da dureza com a diminuição da profundidade a partir da superfície. A região mais perto da superfície é a região mais encruada, cuja dureza atingiu valores entre 500 kgf/mm<sup>2</sup> e 570 kgf/mm<sup>2</sup> para de aço AISI 304. A região mais perto da superfície no aço AISI 316 teve uma dureza menor em comparação com o aço AISI 316, com valores entre 385 kgf/mm<sup>2</sup> e 480 kgf/mm<sup>2</sup>.

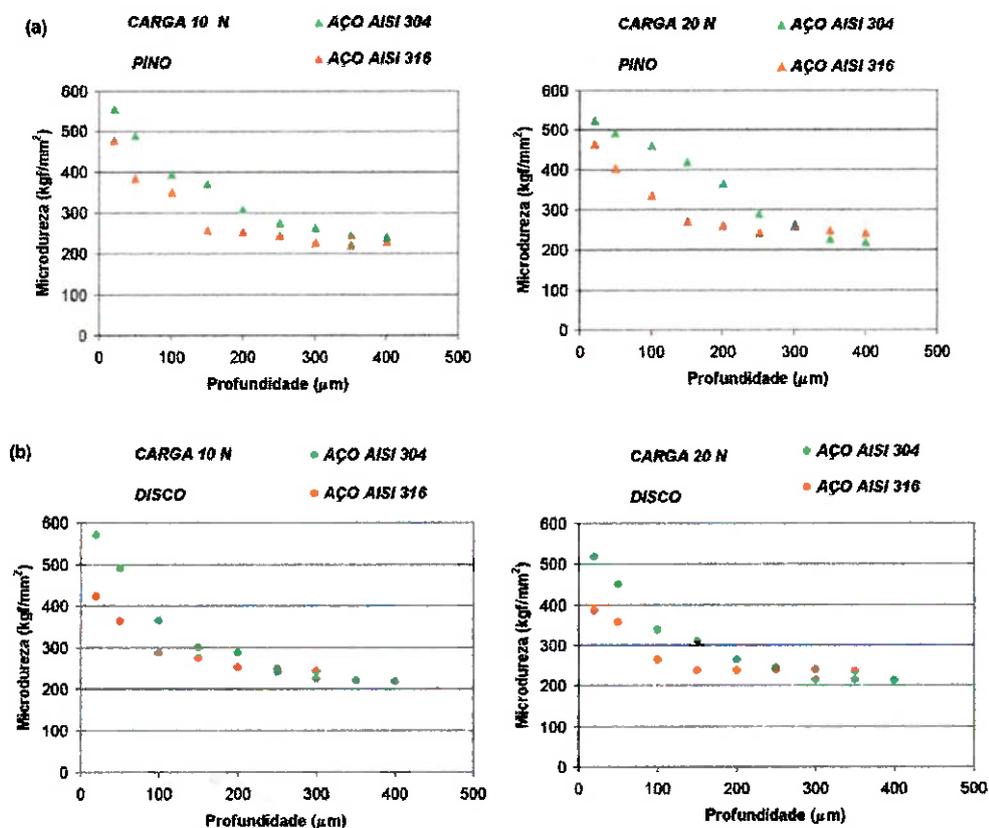


Figura 5. 25. Perfis de microdureza da seção longitudinal do pino e disco dos aços inoxidáveis austeníticos AISI 304 e AISI 316 para carga de 10 N e 20 N e distância de 9000 m. Medidas de microdureza realizadas com carga de 10 g.

### 5.9 Desgaste, transformação martensítica e gradiente de dureza

A partir dos resultados de desgaste, apresentados na Tabela 5. 3, página 72, juntamente como os dados da quantidade de martensita induzida por deformação plástica, apresentados na Tabela 5. 4, página 88 e os perfis de microdureza, apresentados, Figura 5. 25, página 98, pode-se resumir o comportamento do desgaste dos aços inoxidáveis austeníticos AISI 304 e AISI 316.

Os resultados de raios-X, mostraram que no aço AISI 304 a transformação da austenita em martensita  $\alpha'$ , por deformação plástica, ocorreu para todas as condições de ensaio estudadas. Entretanto, no aço AISI 316 a transformação martensítica ocorreu somente para a condição de ensaio mais severa.

A quantidade de martensita detectada foi maior no aço AISI 304 do que no aço AISI 316. A diferença entre as quantidades de martensita  $\alpha'$  nos dois materiais está relacionada com a estabilidade estrutural, isto é, o aço AISI 304 teve maior tendência à formação de martensita e, portanto, é menos estável do que o aço AISI 316.

No aço AISI 304, o deslizamento produz uma camada dura, produto do encruamento e da formação de martensita  $\alpha'$ , cujo material base é muito mais mole. Os perfis de microdureza apresentados na Figura 5. 25 mostram a diferença de dureza entre a camada dura e o material base. Quanto ao desgaste dos materiais estudados, para o disco e para o pino na condição de ensaio de 10 N e 9000 m, o aço AISI 304 desgastou-se mais do que o aço AISI 316. A causa disto poderia ser a presença de uma camada superficial muito dura que não pode ser suportada pelo material base, levando à fratura desta camada e portanto ao maior desgaste do aço AISI 304 em relação ao AISI 316.

Destes resultados pode-se afirmar que a ocorrência da transformação martensítica diminui a resistência ao desgaste dos aços inoxidáveis austeníticos e que a resistência ao desgaste destes materiais é influenciada basicamente pelo gradiente de dureza das regiões sub-superficiais. Isto confirma o critério de Hsu<sup>1</sup>, sobre a baixa resistência ao desgaste dos aços inoxidáveis austeníticos que sofrem transformação martensítica induzida por deformação plástica.

A não variação da quantidade de martensita nos resíduos e na superfície desgastada do pino e do disco de aço AISI 304, em função da carga normal e da distância, pode estar relacionada com a temperatura de contato e com o nível de deformação, porém estes dois fatores não foram analisados no presente trabalho. Não entanto, a taxa de transformação martensítica parece diminuir até que a transformação não ocorre mais, chegando-se até um valor máximo de martensita. Este valor máximo de martensita deve ser menor a medida que a temperatura no contato for maior.

A deformação e temperatura de contato também influenciam na transformação martensítica do aço AISI 316. Existem resultados na literatura reportando a presença de martensita induzida por deformação no aço AISI 316 durante ensaios de desgaste por deslizamento cujos valores foram superiores a um 40 %<sup>4</sup>.

## 6 CONCLUSÕES

Nas condições de carga de 10 N e 20 N e distâncias de 3.000 m, 5.000 m, 7.000 m e 9.000 m e em sistema de ensaio do tipo pino-sobre-disco as conclusões sob o comportamento do desgaste por deslizamento dos aços inoxidáveis austeníticos são as seguintes:

- 1.- O coeficiente de atrito é influenciado pelo mecanismo de adesão, transferência de material, deformação plástica, interação das partículas na interface de deslizamento.
- 2.- A magnitude de desgaste dos aços inoxidáveis austeníticos depende da carga normal, e da distância de deslizamento, sendo que um aumento da carga ou da distância de deslizamento produz um aumento da perda de massa de ambos corpos em contato.
- 3.- No desgaste adesivo dos aços inoxidáveis austeníticos acontece apreciável deformação plástica e transferência de material. Observa-se também mecanismos típicos de abrasão como riscos e formação de proas.
- 4.- O destacamento da camada aderida da superfície de desgaste ocorre mediante a formação e crescimento de trincas que surgem na superfície ou abaixo desta.
- 5.- No desgaste adesivo formam-se partículas de desgaste irregulares, cuja forma e tamanho depende da forma de interação entre estas partículas e da direção de propagação das trincas.
- 6.- A quantidade de martensita detectada nos resíduos de desgaste do aço inoxidável austenítico AISI 304 permaneceu constante com a variação da carga e da distância de deslizamento.

- 7.- No processo de desgaste a microestrutura e dureza da sub-superfície variam em função da profundidade em relação à superfície desgastada e são afetadas pela presença da fase martensita induzida por deformação plástica e pela magnitude do encruamento do material.
  
- 8.- A dureza das regiões sub-superficiais influencia na magnitude do desgaste e na estabilidade da camada superficial com estrutura martensítica. Isto é, o material sofrerá um desgaste maior, se uma região sub-superficial, mais próxima à superfície desgastada, endurecida fortemente devido ao encruamento e/ou à presença da martensita, não pode ser suportada pela regiões menos encruadas mais afastadas da superfície desgastada.

## 7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Tomando como base a revisão bibliográfica realizada e os resultados apresentados, sugerem-se os seguintes temas para trabalhos futuros:

- 1.- Estudo das transições na taxa de desgaste dos aços inoxidáveis austeníticos para altas cargas e com variações da velocidade de deslizamento.
- 2.- Análise do efeito da transformação martensítica induzida por deformação plástica no comportamento do desgaste dos aços inoxidáveis austeníticos em função da carga normal e da velocidade de deslizamento.
- 3.- Análise da influência da magnitude da deformação plástica e da temperatura de contato na quantidade de martensita induzida por deformação durante o desgaste por deslizamento.
- 4.- Análise do efeito do tipo de material do contra-corpo no mecanismo de desgaste presente nos aços inoxidáveis.
- 5.- Instrumentação das máquinas de ensaio de desgaste modelos TE79 e TE67 para a medição da força normal e de força de atrito.
- 6.- Análise dos sinais de força de atrito e de força normal e de sua correlação com o desempenho tribológico dos aços inoxidáveis austeníticos.

## ANEXO A

### Análise quantitativa do espectro de difração de raios-X

A análise quantitativa mediante difração está baseada no fato de que a intensidade de uma fase em particular contida em uma mistura de fases depende da concentração desta fase dentro da mistura<sup>55</sup>. A intensidade total difratada de um pico de raios-X recebe o nome de intensidade integrada e é a área embaixo do pico depois de subtrair-lhe o fundo. Analiticamente:

$$I = \left( \frac{I_0 e^4}{m^2 c^4} \right) \left( \frac{\lambda^3 A}{32 \pi r} \right) \left( \frac{1}{v^2} \right) \left[ |F^2| P \left( \frac{1 + \cos^2 2\theta}{\sin^2 \theta \cos \theta} \right) \right] \left( \frac{e^{-2M}}{2\mu} \right) \quad (\text{A. 1})$$

Onde:

I: intensidade integrada por unidade de comprimento

$I_0$ : intensidade do raio incidente

e, m: carga e massa do elétron

c: velocidade da luz

$\lambda$ : comprimento de onda da radiação incidente

r: raio do goniômetro

A: área de seção transversal do raio incidente

v: volume da célula unitária

F: fator estrutura

P: fator multiplicidade

$\theta$ : ângulo de Bragg

$e^{-2M}$ : fator temperatura

$\mu$ : coeficiente de absorção linear (incluído no fator de absorção  $1/2\mu$ )

$(1+\cos^2\theta)/(\sin^2\theta \cos\theta) = L$ : fator Lorentz (polarização)

Na Equação A1 consideram-se as constantes K e R, sendo que

$$K = \left( \frac{I_0 e^4}{m^2 c^4} \right) \left( \frac{\lambda^3 A}{32\pi r} \right) \text{ e } R = \left( \frac{1}{v^2} \right) \left[ |F^2| p \left( \frac{1 + \cos^2 2\theta}{\sin^2 \theta \cos \theta} \right) \right] (e^{-2M}). \text{ Portanto, a intensidade}$$

integrada é dada por:

$$I = \frac{KR}{2\mu} \tag{A. 2}$$

A intensidade integrada pode ser definida para um pico de difração específico da fase austenita, e a Equação A.2 pode ser reescrita somente em termos desta fase. Neste caso a intensidade integrada I é  $I_\gamma$ , a intensidade de um pico de difração específico correspondente à austenita e o lado direito da Equação A.2 tem que ser multiplicado por  $V_\alpha$ , a fração volumétrica da austenita na mistura, obtendo-se:

$$I_\gamma = \frac{KR_\gamma V_\gamma}{2\mu_m} \tag{A. 3}$$

e para o caso da martensita

$$I_\alpha = \frac{KR_\alpha V_\alpha}{2\mu_m} \tag{A. 4}$$

Onde:

$\mu_m$ : coeficiente de absorção linear da mistura de fases

$V_\alpha$ : fração volumétrica da martensita

A divisão das duas equações acima da:

$$\frac{I_{\gamma}}{I_{\alpha}} = \frac{R_{\gamma} V_{\gamma}}{R_{\alpha} V_{\alpha}} \quad (\text{A. 5})$$

A fração volumétrica da austenita  $V_{\gamma}$  pode ser obtida da Equação A.4, juntamente com a relação  $V_{\gamma} + V_{\alpha} = 1$ , resultando em

$$V_{\gamma} = \frac{\left(\frac{R_{\alpha}}{R_{\gamma}}\right) I_{\gamma}}{I_{\alpha} + \left(\frac{R_{\alpha}}{R_{\gamma}}\right) I_{\gamma}} \quad (\text{A. 6})$$

Segundo Miller<sup>56</sup>, a relação  $R_{\alpha}/R_{\gamma}$  tem um valor de 1,4, obtido experimentalmente, e é válido para o cálculo da fração volumétrica de fases em uma amostra contendo uma mistura das fases austenita e martensita. Portanto

$$V_{\gamma} = \frac{1,4I_{\gamma}}{I_{\alpha} + 1,4I_{\gamma}} \quad (\text{A. 7})$$

onde:

$I_{\gamma}$ : intensidade integrada da austenita (área abaixo do pico). Equivalente à média das intensidades da austenita para os planos (220) e (311);

$$I_{\gamma} = \frac{I_{\gamma(220)} + I_{\gamma(311)}}{2}$$

$I_{\alpha}$ : intensidade integrada da ferrita do plano (211)

A quantidade de martensita pode ser determinada a partir da relação  $V_{\gamma} + V_{\alpha} = 1$ .

**ANEXO B****Cartões das fases austenita e martensita**

31-0619

Wavelength= 1.54056

(Fe,C)	2 $\theta$	Int	h	k	l
Iron	43.472*100	1	1	1	1
	50.673* 80	2	0	0	0
	74.677* 50	2	2	0	0
	90.673* 80	3	1	1	1
	95.940* 50	2	2	2	2
	117.711 30	4	0	0	0

Rad.: CoKa  $\lambda$ : 1.7902 Filter: d-sp:  
 Cut off: Int.: Estimation I/lor.:  
 Ref: Goldschmidt, Metallurgia, 40, 103 (1949)

Sys.: Cubic S.G.: Fm3m (225)  
 a: 3.60 b: c: A: C:  
 $\alpha$ :  $\beta$ :  $\gamma$ : Z: 0.386 mp:  
 Ref: Ibid.

Dx: 7.730 Dm: SS/FOM:  $\delta$ -6( .181, 6)

O assigned because average  $\Delta 2 \theta$  is 0.181. Density 8.0 was calculated for 0.75 wt.% C. Material: 13/12 type of stainless steel. The lattice-dimension allows for variations observed. Approximately correct for austenite in most stainless steels. Cu type. Also called: austenite.PSC: cF4. To replace 23-298. Mwt: 562.67. Volume[CD]: 46.66.

CO.08Fe1.92

2 $\theta$  Int h k l

Carbon Iron

44.021*100	1	0	1
44.841*47	1	1	0
62.721*7	0	0	2
65.303*11	2	0	0
80.383*11	1	1	2
82.119*20	2	1	1
97.097*6	2	0	2
99.438*3	2	2	0
111.388	5	1	0
116.426	5	3	0
117.063	5	3	1
134.882	4	2	2
161.168	10	2	1

Rad.: CuK $\alpha$ 1 $\lambda$ : 1.5405 Filter: d-sp: Calculated

Cut off: Int.: Calculated I/Cor.: 7.450

Ref: Calvert, L., Lakes Entrance, Victoria, Australia, Private Communication, (1993)

Sys.: Tetragonal

S.G.: I4/mmm (139)

a: 2.856 b: c: 2.960 A: C: 1.0364

 $\alpha$ :  $\beta$ :  $\gamma$ : Z: 1 mp:

Ref: Roberts, C., J. Met., 5, 203 (1953)

Dx: 7.471 Dm: SS/FOM $\frac{1}{2}$   $\bar{F}$ =114(.0088, 13)

Unit cell reference also gives variation of lattice parameter

of austenite as a function of carbon content. In type.

Also called: martensite.PSC: t12. Mwt: 108.63. Volume[CD]:

24.14.

C0.09Fe1.91

2 $\theta$  Int h k l

Carbon Iron

43.882*	100	1	0	1
44.881*	48	1	1	0
62.202*	7	0	0	2
65.344*	12	2	0	0
79.923*	11	1	1	2
82.060*	20	2	1	1
96.683*	6	2	0	2
99.518*	3	2	2	0
110.234	5	1	0	3
116.405	5	3	0	1
117.188	5	3	1	0
134.325	4	2	2	2
158.224	10	2	1	3

Rad.: CuK $\alpha$ 1 $\lambda$ : 1.5405 Filter: d-sp: Calculated

Cut off: Int.: Calculated I/cor.: 7.426

Ref: Calvert, L., Lakes Entrance, Victoria, Australia, Private Communication, (1993)

Sys.: Tetragonal

S.G.: I4/mmm (139)

a: 2.854 b: c: 2.983 A: C: 1.0452

 $\alpha$ :  $\beta$ :  $\gamma$ : Z: 1 mp:

Ref: Roberts, C., J. Met., 5, 203 (1953)

Dx: 7.364

Dm:

SS/FOM $\frac{1}{2}$ F-116(.0086, 13)

Unit cell reference also gives variation of lattice parameter of austenite as a function of carbon content. In type.

Also called: martensite.PSC: tI2. Mwt: 107.75. Volume[CD]: 24.30.

34-0529

Wavelength= 1.54056

e-Fe	2 $\theta$	Int	h	k	l
Iron	42.611*	20	1	0	0
	46.034*	80	0	0	2
	49.496*	100	1	0	1
	64.677*	10	1	0	2
	77.249*	10	1	1	0
	87.589*	10	1	0	3

Rad.: MoK $\alpha$   $\lambda$ : 0.7106 Filter: Zr BetaM d-sp:

Cut off: Int.: Estimation I/Cor.:

Ref: Takahashi, T., Bassett, Science, 145, 483 (1964)

Sys.: Hexagonal

S.G.: P6<sub>3</sub>/mmc (194)

a: 2.45(1) b: c: 3.93(1) A: C: 1.6041

 $\alpha$ :  $\beta$ :  $\gamma$ : Z: 2 mp:

Ref: Ibid.

Dx: 9.079 Dm: 9.100 SS/FOM:  $\bar{\mu}^2=8(.124, 6)$ 

Pure iron powder mixed with NaCl (as internal standard) was placed in a diamond anvil where X-ray diffractions were taken. The pressure applied was 192 kbar. Mg type. NaCl. PSC: hP2. Mwt: 55.85. Volume[CD]: 20.43.

**REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

---

- <sup>1</sup> HSU, K.L. et al. Friction, wear and microstructure of unlubricated austenitic stainless steels. **Wear**, n.60, p.13-37, 1980.
- <sup>2</sup> YANG, Z.Y. et al. Sliding wear of 304 and 310 stainless steels. **Wear**, n.105, p.73-86, 1985.
- <sup>3</sup> RIGNEY, D.A. Some thoughts on sliding wear. **Wear**, n.152, p.187-192, 1992.
- <sup>4</sup> SMITH, A.F. The friction and sliding wear of unlubricated 316 stainless steel at room temperature in air. **Wear**, n.96, p.301-318, 1984.
- <sup>5</sup> PETERSON, M.B. Classification of wear processes. In: **Wear control handbook**. New York, p.9-15, 1980.
- <sup>6</sup> NORMA DIN 50320: Análise sistemática dos processos de desgaste. Classificação dos fenômenos de desgaste. **Metalurgia & Materiais**, 53, p.619-622, 1997.
- <sup>7</sup> ARCHARD, J.F.; HIRST, W. The wear of metals under unlubricated conditions. **Proceedings Royal Society of London**. 236A, p.397-410, 1956.
- <sup>8</sup> HUTCHINGS, I.M. **Tribology: friction and wear of engineering materials**. London, Cap.5, p.86-92, 1992.
- <sup>9</sup> QUINN, T.F.J. Review of oxidational wear, part I: the origins of oxidational wear. **Tribology International**, v.16, n.5, p.257-271, 1983.
- <sup>10</sup> ZUM, G.K-H. **Tribology series: microstruture and wear of materials**. v.10, 1987.
- <sup>11</sup> RABINOWICZ, E. **Friction and wear of materials**, Cap.5, p.109-124, 1965.
- <sup>12</sup> GATES, J.D. Two body and three-body abrasion: a critical discussion. **Wear**, v.214, p.139-146, 1998.
- <sup>13</sup> SUH, N.P. The delamination theory of wear. **Wear**, n.25, p.11-124, 1973.
- <sup>14</sup> ASM HANBOOK: friction, lubrication and wear technology. v.18, p.710-724, 1992.
- <sup>15</sup> SUH, N.P. An overview of the delamination theory of wear. **Wear**, n.44, p.1-16, 1977.
- <sup>16</sup> JAHANMIR, S.; SUH, N.P. Mechanics of subsurface void nucleation in delamination wear. **Wear**, n.44, p.17-38, 1977.
- <sup>17</sup> JAHANMIR, S.; SUH, N.P. Microscopic obsevation of the wear sheet formation by delamination. **Wear**, n.28, p.235-249, 1974.

- 
- <sup>18</sup> KAYABA, T. The analysis of adhesive wear mechanism by successive observations of the wear process in SEM. *Wear of materials*, p.45-56, 1979.
- <sup>19</sup> SASADA, T. The behavior of adhered fragments interposed between sliding surfaces and the formation process of wear particules. *Wear of Materials*, p.72-80, 1979.
- <sup>20</sup> RIGNEY, D.A. et al. Wear processes in sliding systems. *Wear*, n.100, p.195-219, 1984.
- <sup>21</sup> CHEN L.H.; RIGNEY, D.A. Transfer during unlubricated sliding wear of selected metals systems. *Wear*, v.105. p.47-61, 1985.
- <sup>22</sup> HEILMANN, P. Sliding wear and transfer. *Wear*, n.91, p.171-190, 1983.
- <sup>23</sup> HULL, D. Introduction to dislocations, Oxford, Pergamon, 1969.
- <sup>24</sup> WERT, J.J. The role of microstructure in subsurface damage induced by sliding contact. *Key Engineering Materials*. vol. 33, p.101-134, 1989.
- <sup>25</sup> RICE, S.L. et al. A survey of the development of subsurface zones in the wear of materials. *Key Engineering Materials*. v.33, p.77-100, 1989.
- <sup>26</sup> HAUDEN, W.; MOFFATT, W.G.; WULFF, J.. *Propiedades mecánicas*, New York, John Wiley, 1968.
- <sup>27</sup> KATO, K. et al. Dislocation density cell structure produced in the subsurface layer of aluminum during sliding wear. *Wear of Materials*, p.463-470, 1985.
- <sup>28</sup> NUTT, S.R. A study of the friction and wear behavior of titanium under dry sliding conditions. *Wear of Materials*. p.426-433, 1983.
- <sup>29</sup> HIRTH, J.P; RIGNEY, D.A. Crystal plasticity and the delamination theory of wear. *Wear*, n.39, p.131-141, 1976.
- <sup>30</sup> RIGNEY, D.; GLAESER, W. The significance of near surface microstructure in the wear process. *Wear*, n.46, p.241-350, 1978.
- <sup>31</sup> PADILHA, A.F. *Materiais de Engenharia: microestrutura e propriedades*, São Paulo, Hemus, 1997.
- <sup>32</sup> SCHRAMM, R.E.; REDD, R.P. Stacking fault energies of seven commercial austenitic stainless steels. *Metallurgical Transactions*, v.6A, p.1345-1351, 1975.

- 
- <sup>33</sup> ANGEL.T. Formation of martensite in austenitic stainless steels: effects of deformation, temperature, and composition. **Journal of the Iron and Steel Institute**. n.162, p.165-174, 1954.
- <sup>34</sup> LLEWELLYN, D.T. Work hardening effects in austenitic stainless steels. **Materials Science and Technology**, v.13, p.389, 1997.
- <sup>35</sup> DIETER, G.E. **Metalurgia Mecânica**, ed.Guanabara, Cap.6, p.166-212, 1981.
- <sup>36</sup> RAMAN, G.S.; PADMANABHAN, K.A. Tensile deformation-induced martensitic transformation in AISI 304L austenitic stainless steels. **Journal of Materials Science Letters**, v. 13, p.389-392, 1994.
- <sup>37</sup> MANGONON, L.; GARETH, T. The martensite phases in 304 stainless steel. **Metalurgical Transactions**, v.1, p.1577-1586, 1970.
- <sup>38</sup> MANGONON, L.; GARETH, T. The martensite phases in 304 stainless steel. **Metalurgical Transactions**, v.1, p.1587-1594, 1970.
- <sup>39</sup> VARMA, S.K. et al. Effect of grain size on deformation-induced martensite formation in 304 and 316 stainless steels during room temperature tensile testing. **Journal of Materials Science Letters**, v13, p. 107-111, 1994.
- <sup>40</sup> MENG, H.C; LUDEMA, K.C. Wear models and predictive equations: their form and content. **Wear**. n.181-183, p.443-457.
- <sup>41</sup> PARETKAR, R.K. et al. An approximate generalized experimental model for dry sliding adhesive wear of some single-phase copper-base alloys. **Wear**, n.197, p.17-37, 1996.
- <sup>42</sup> ARCHARD, J.F. Contact and rubbing of flat surfaces. **Journal of Applied Physic**. n.24, 1953, p.981-988.
- <sup>43</sup> JIANG, J. et al. A mathematical model for sliding wear of metals at elevated temperatures. **Wear**. v.181-183, p.20-31, 1995.
- <sup>44</sup> HIRST, W.; LANCASTER, J.K. Surface film formation and metallic wear. **Journal of applied physics**. v.27, n.9, p.1057-1065, 1956.
- <sup>45</sup> WELSH, N.C. The dry wear of steels, the general pattern of behavior.Part I. **Phil. Transactions**. A, v.257, p.31-50, 1965.
- <sup>46</sup> TOMPSOM, M.A.; STOBO, J.J. Wear of unlubricated sliding metal surfaces. **Journal of the Australian Institute of Metals**. v.19, n.4, p.214-228, 1974.

- 
- <sup>47</sup> DUMBLETON, J.H.; DOUTHETT, J.A. The unlubricated adhesive wear resistance of meta-stable austenitic stainless steels containing silicon. *Wear*, v.42, p.305-332, 1977.
- <sup>48</sup> WELSH, N.C. The dry wear of steels, interpretation and special features. Part II. *Phil. Transactions. A*, v.257, p.51-70, 1965.
- <sup>49</sup> METALS HANDBOOK: Metallography and Microstructures. 9.ed. ASM..9v, 1985.
- <sup>50</sup> Norma A262-91, Standard practices for detecting susceptibility to intergranular attack in austenitic stainless steels. In: **ANNUAL BOOK OF ASTM STANDARDS: Metals Test Methods and Analytical Procedures. (Wear and Erosion; Metal Corrosion)**, v.03.02, p.1-18, 1992.
- <sup>51</sup> Norma G99-90, Standard test method for wear testing with a pin-on-disk apparatus. In: **ANNUAL BOOK OF ASTM STANDARDS: Metals Test Methods and Analytical Procedures. (Wear and Erosion; Metal Corrosion)**, v.03.02, p.387-391, 1992.
- <sup>52</sup> **Manual TE 79 Multi-Axis Tribometer Operating Instructions. PLINT AND PARTNERS.**
- <sup>53</sup> MARSHALL, P. Austenitic stainless steels: microstructure and mechanical properties, Cap.1, p.23-74, 1984.
- <sup>54</sup> PADILHA, A.F.; AMBROZIO, F.. *Técnicas de análise microestrutural*, ed.Hemus, São Paulo, Cap.4, p.85-112, 1985.
- <sup>55</sup> CULLITY, B.D. *Elements of X-ray diffraction*, 3<sup>a</sup> ed., 1967, London, Addison-Wesley.
- <sup>56</sup> MILLER, R.L. A rapid X-ray method for the determination of retained austenite, *Transactions of the ASM*, v.57, 1964.