

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL DA
TESE DEFENDIDA POR FELIPE TOLOI
GASTALDO E APROVADA
PELA COMISSÃO JULGADORA EM 15/07/2010

ORIENTADOR

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE
MECÂNICA**

Felipe Toloí Gastaldo

**Efeitos do Tratamento de Superfície a Laser na
Microestrutura e na Resistência ao Desgaste do
Aço Inoxidável Martensítico**

Campinas, 2010

Felipe Toloí Gastaldo

Efeitos do Tratamento de Superfície a Laser na Microestrutura e na Resistência ao Desgaste do Aço Inoxidável Martensítico

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Materiais e Processo de Fabricação

Orientadora: Prof^a. Dra. Maria Clara Filippini Ierardi

Campinas
2010

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

G217e Gastaldo, Felipe Toloí
Efeitos do tratamento de superfície a laser na microestrutura e na resistência ao desgaste do aço inoxidável martensítico / Felipe Toloí Gastaldo. -- Campinas, SP: [s.n.], 2010.

Orientador: Maria Clara Filippini Ierardi.
Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Fusão a laser. 2. Aço inoxidável. 3. Desgaste mecânico. 4. Aço - Corrosão. 5. Tribologia. I. Ierardi, Maria Clara Filippini. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.

Título em Inglês: Effects of laser surface treatment on the microstructure and wear resistance of martensitic stainless steel

Palavras-chave em Inglês: Laser fusion, Stainless steel, Mechanical wear, Steel - Corrosion, Tribology

Área de concentração: Materiais e Processos de Fabricação

Titulação: Mestre em Engenharia Mecânica

Banca examinadora: Amauri Garcia, Necesio Gomes Costa

Data da defesa: 16/07/2010

Programa de Pós Graduação: Engenharia Mecânica

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE
MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS**

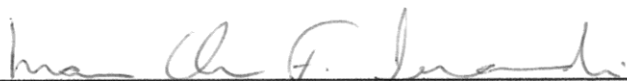
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADÊMICO

**Efeitos do Tratamento de Superfície a Laser na
Microestrutura e na Resistência ao Desgaste do
Aço Inoxidável Martensítico**

Autor: Felipe Toloí Gastaldo

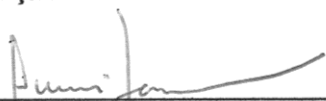
Orientador: Profa. Dr^a Maria Clara Filippini Ierardi

A banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação:



Profa. Dr^a Maria Clara Filippini Ierardi

Instituição: Universidade Estadual de Campinas – Faculdade de Engenharia Mecânica



Prof. Dr.º Amauri Garcia

Instituição: Universidade Estadual de Campinas – Faculdade de Engenharia Mecânica



Prof. Dr.º Necesio Gomes Costa

Instituição: Universidade Federal de Itajubá – Instituto de Engenharia Mecânica

Campinas, 16 de Julho de 2010

Dedicatória

Dedico este trabalho a minha família em especial aos meus pais, Irineu Gastaldo e Valdete Aparecida Toloi, pela minha excelente formação e pelo apoio incondicional em todos esses anos.

Agradecimentos

A Deus pela minha vida.

Aos meus pais e a minha namorada, Marina Garbi Vergueiro, pelos gestos e palavras de conforto nos momentos difíceis e pelas risadas em todos os outros momentos.

À minha orientadora Profa. Dr^a Maria Clara Filippini Ierardi, pela oportunidade, apoio, amizade e confiança em mim depositada nestes dois anos.

Ao Prof. Dr. Necésio Gomes Costa, que me incentivou durante toda essa jornada e pela amizade.

Às professoras Dr^a Cecília Zavaglia, Dr^a Célia Marina de Alvarenga Freire e ao professor Dr. Amauri Garcia pelas sugestões e discussões durante o desenvolvimento do trabalho e pela amizade.

À minha colega de sala e amiga Maria Aparecida Larosa, pelos ensinamentos, pela paciência e pela amizade construída neste período.

A Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Capes e à FAPESP pelo apoio financeiro.

A todos os outros colegas do DEMA, em especial ao Felipe Bertelli e ao Fábio Gatamorta pela companhia nos congressos, à Guinea, à Andrea pelas risadas dadas pelos corredores da FEM, tornando mais alegre os momentos de trabalho, e finalmente ao Laércio Gomes que proporcionou conversas extremamente engraçadas sobre casos e acasos do seu querido Estado do Pará.

Aos técnicos do DEMA/FEM/UNICAMP: Eduardo, Claudenete e João pelo apoio em seus respectivos laboratórios.

A todos os professores e colegas do Departamento de Engenharia de Materiais da Faculdade de Engenharia Mecânica da UNICAMP, que ajudaram de maneira direta e ou indireta em meu trabalho.

À toda equipe do DEDALO/IEAv/CTA, São José dos Campos, em especial aos professores Dr. Milton S. F. Lima e Dr. Rudmar Riva.

Ao professor do IPEN/ USP, Dr. Nelson Batista de Lima.

MUITO OBRIGADO!

"Nossas dúvidas são traidoras e nos fazem perder o que, com frequência,
poderíamos ganhar, por simples medo de arriscar."

William Shakespeare

Resumo

No presente trabalho o aço inoxidável martensítico ASTM 487 CA6NM utilizado na fabricação de eixos de turbinas, foi submetido ao tratamento de superfície por refusão a laser com o intuito de analisar as modificações microestruturais resultantes e seus efeitos na resistência ao desgaste e à corrosão. A caracterização das amostras antes e depois do tratamento foi feita por microscopia óptica, microscopia eletrônica de varredura, difração de raios-X e microdureza Vickers. Para avaliar o comportamento das amostras tratadas e não tratadas foram executados ensaios de desgaste micro abrasivo e para analisar a resistência à corrosão, ensaios eletroquímicos. O tratamento resultou em uma camada refundida homogênea com dois tipos de carbonetos de cromo e estrutura martensítica temperada. A dureza do material após o tratamento aumentou 34%, a resistência à corrosão apresentou aumento significativo e os testes realizados para avaliar a resistência ao desgaste indicaram tendência de melhora.

Palavras chave: Tratamento de superfície por fusão a laser, aço inoxidável martensítico, resistência ao desgaste micro abrasivo, resistência à corrosão.

Abstract

In this work, the martensitic stainless steel ASTM 487 CA6NM, used in many turbines parts like the hub, was subjected to laser surface melting treatment. The purpose is to analyse the microstructural changes resulting from the laser treatments, and consequently, their effects on the micro abrasive wear and corrosion tests. The microstructural characterization was performed by optical microscopy, scanning electron microscopy, Vickers microhardness and X-ray diffraction. In order to analyse the corrosion and wear resistances, electrochemical and micro abrasive wear tests were carried out before and after the treatment. The laser treatment resulted in a homogeneous layer with two types of chromium carbides and quenched martensitic structure. The steel microhardness after the laser surface melting increased by 34%, the corrosion resistance had a significant improvement and the wear resistance presented a tendency to improve.

Keywords: Laser surface melting treatment, martensitic stainless steel, micro abrasive wear resistance, corrosion resistance.

Lista de Ilustrações

Figura 2.1 – Microestrutura do aço inoxidável ferrítico recozido.....	4
Figura 2.2 – Micrografia de aço inoxidável austenítico revenido.....	5
Figura 2.3 – Micrografia ótica de aço inoxidável duplex, evidenciando as ilhas de austenita (γ) presentes na matriz ferrítica(α).	6
Figura 2.4 – Matriz de aço inoxidável martensítico (41 HRC)	8
Figura 2.5– Diagrama de Schaeffler.....	9
Figura 2.6 – Porcentagem de artigos publicados em diversos países no período de 1990 – 2003. 12	
Figura 2.7 – Comprimentos de onda operacionais dos principais tipos de laser.....	14
Figura 2.8 – Secção transversal do aço AISI 420 após tratamento térmico de têmpera a laser evidenciando a zona temperada – ZT, a zona termicamente afetada – ZTA e o material base – MB.....	16
Figura 2.9 – Esquema do processo de refusão da superfície a laser.....	17
Figura 2.10 – Ferro fundido vermicular refundido a laser. Camada homogênea com trincas ocasionadas pelos altos valores de potência e da taxa de resfriamento.....	18
Figura 2.11 – Interação entre o tempo e a densidade de potências necessárias para realizar diversas modificações com laser.	18
Figura 2.12 – Tipos de contato durante o desgaste abrasivo. (a) Dois corpos em meio aberto (b) Dois corpos em meio fechado. (c) Três corpos em meio aberto. (d) Três corpos em meio fechado.	21
Figura 2.13 – Os cinco processos de desgaste abrasivo.	22
Figura 2.14 – Exemplos dos três processos de desgaste abrasivo, observados através de um microscópio eletrônico de varredura. (a) Microcorte. (b) Formação de cunhas. (c) Microsulcamento.	23
Figura 2.15 – (a) Representação esquemática do desgaste abrasivo a dois corpos. [Hutchings, 1992] (b) Morfologia do desgaste abrasivo a dois corpos. [Trezona, 1999]	25
Figura 2.16 – (a) Representação esquemática do desgaste abrasivo a três corpos. [Hutchings, 1992] (b) Morfologia do desgaste abrasivo a três corpos. [Trezona, 1999]	26

Figura 2.17 – Ocorrência do desgaste por micro rolamento. (a) e (b) força normal constante 1,25 N; (c) e (d) força normal constante 5 N. Distância de rolamento 100 m.	27
Figura 2.18 – Diagrama esquemático do ensaio de microabrasão.	28
Figura 2.19 – Calota esférica formada pelo ensaio de microabrasão.	28
Figura 2.20 – Representação esquemática da curva de polarização para um aço inoxidável.	33
Figura 3.1 – Equipamento de laser a fibra Nd – YAG, instalado no IEAv.	35
Figura 3.2 – Processo de tratamento de superfície do aço inoxidável martensítico.	36
Figura 3.3 – Representação esquemática das trilhas processadas a laser em uma amostra de aço inoxidável martensítico ASTM 487M.	37
Figura 3.4 – Representação da sobreposição das trilhas formadas por passadas de laser consecutivas.	38
Figura 3.5 – Representação esquemática da célula de corrosão utilizada.	40
Figura 3.6 – Máquina de desgaste micro-abrasivo.	42
Figura 3.7 – Calota formada pelo ensaio de desgaste por microabrasão.	43
Figura 4.1 – Imagens obtidas via MEV, das seções transversais das trilhas, a fim de obter o parâmetro ideal para realização do tratamento de superfície com fusão a laser. (a) Apresenta uma poça no formato de “keyhole”; (b) Apresenta uma poça no formato de meia lua, onde sua profundidade é bem menor que sua largura.	44
Figura 4.2 – Estrutura do aço inoxidável ASTM 487 CA6NM. MO	45
Figura 4.3 – Difrátograma das amostras de aço inoxidável martensítico ASTM A 487M sem e com tratamento de superfície por fusão a laser.	46
Figura 4.4 – Imagem obtida via MEV da região fundida pelo tratamento de superfície com laser, apresentando a martensita refinada e os carbonetos de cromo.	47
Figura 4.5 – Análise obtida via MEV – EDS do carboneto de cromo presente na região refundida do aço inoxidável martensítico.	47
Figura 4.6 – Perfil de microdureza Vickers obtido para o aço inoxidável martensítico após o tratamento de superfície com laser.	48
Figura 4.7 – Representação do volume de desgaste em função da carga normal aplicada, para o aço inoxidável martensítico antes e após a refusão por laser.	49

Figura 4.8 – Calota produzida após o ensaio de desgaste por microabrasão no aço inoxidável martensítico antes de ser submetido ao tratamento de superfície por fusão a laser. Carga de 1 N.	50
Figura 4.9 – Calota produzida após o ensaio de desgaste por microabrasão no aço inoxidável martensítico após ser submetido ao tratamento de superfície por fusão a laser. Carga de 1 N.....	51
Figura 4.10 – Calota produzida após o ensaio de desgaste por microabrasão no aço inoxidável martensítico antes de ser submetido ao tratamento de superfície por fusão a laser. Carga de 2 N.	52
Figura 4.11 – Calota produzida após o ensaio de desgaste por microabrasão no aço inoxidável martensítico após ser submetido ao tratamento de superfície por fusão a laser. Carga de 2 N.....	53
Figura 4.12 – Calota produzida após o ensaio de desgaste por microabrasão no aço inoxidável martensítico antes de ser submetido ao tratamento de superfície por fusão a laser. Carga de 3 N.	54
Figura 4.13 – Calota produzida após o ensaio de desgaste por microabrasão no aço inoxidável martensítico após ser submetido ao tratamento de superfície por fusão a laser. Carga de 3 N.....	55
Figura 4.14 – Curvas de polarização do aço inoxidável ASTM 487M	56

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 – Diversos tipos de aplicação dos aços inoxidáveis [Callister, 2007].	3
Tabela 2.2 – Diferentes áreas que utilizam o sistema a laser no período de 1990 - 2003.	11
Tabela 3.1 – Composição Química do Aço Inoxidável Martensítico ASTM 487 CA6NM	34
Tabela 3.2 – Valores de potência, velocidade e defocagem utilizados para obtenção do parâmetro ideal de recobrimento para o tratamento de superfície por fusão a laser.	37
Tabela 3.3 – Parâmetros escolhidos para o recobrimento total das amostras.....	37
Tabela 3.4 – Parâmetros utilizados nos ensaios de corrosão eletroquímica.	40
Tabela 3.5 – Parâmetros utilizados para o ensaio de desgaste microabrasivo antes e após o tratamento de superfície por fusão a laser.	42
Tabela 4.1 – Valores de potencial e corrente de corrosão obtidos nos ensaios eletroquímicos do aço inoxidável ASTM 487M.	57

Lista de abreviaturas e Siglas

A – Área da secção transversal	[m ²]
d – Diâmetro da calota esférica	[m]
d – Distância de deslizamento	[m]
E _{corr} – Potencial de corrosão	[mV]
h – Altura da calota esférica	[m]
I _{corr} – Densidade de corrente de corrosão	[μA/cm ²]
K – Coeficiente de desgaste	[m ³ /Nm]
L – Carga	[N]
L – Distância percorrida pela esfera de desgaste	[m]
p – Profundidade de penetração	[m]
Q – Taxa de desgaste	[m ³ /m]
R – Raio da esfera de desgaste	[m]
V – Volume da calota esférica	[mm ³]
W – Volume de desgaste	
HV – Dureza Vickers	

DEMA – Departamento de Engenharia de Materiais

FEM – Faculdade de Engenharia Mecânica

LABIOMECH – Laboratório de Biomecânica

UNICAMP – Universidade Estadual de Campinas

M - Martensita

ZF – Zona Fundida

ZTA – Zona termicamente afetada

AISI – American Iron and Steel Institute

MO – Microscopia óptica

MEV – Microscopia Eletrônica de varredura

EDS – Espectroscopia de Energia Dispersiva

ECS – Eletrodo de Calomelano Saturado

CCC – Cúbico de Corpo Centrado

CFC – Cúbico de Face Centrada

MB – Metal Base

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1	AÇO INOXIDÁVEL	3
2.1.1	AÇO INOXIDÁVEL FERRÍTICO	4
2.1.2	AÇO INOXIDÁVEL AUSTENÍTICO.....	5
2.1.3	AÇO INOXIDÁVEL DUPLEX	6
2.1.4	AÇO INOXIDÁVEL MARTENSÍTICO	7
2.2	TRATAMENTO TÉRMICO DE SUPERFÍCIE POR FUSÃO A LASER.....	10
2.2.1	LASER.....	10
2.2.2	TRATAMENTO TÉRMICO DE SUPERFÍCIE COM LASER	15
2.3	DESGASTE	19
2.3.1	DESGASTE ADESIVO	19
2.3.2	DESGASTE CORROSIVO	20
2.3.3	DESGASTE DA SUPERFÍCIE FADIGADA	20
2.3.4	DESGASTE ABRASIVO E MICRO ABRASIVO.....	20
2.4	ENSAIO DE CORROSÃO	32
3	MATERIAIS E MÉTODOS	34
3.1	AÇO INOXIDÁVEL MARTENSÍTICO ASTM 487 CA6NM.....	34
3.2	O TRATAMENTO DE SUPERFÍCIE POR REFUSÃO A LASER.....	35
3.3	ANÁLISE DA MICROESTRUTURA	38
3.4	ENSAIO DE CORROSÃO ELETROQUÍMICO	39
3.5	ENSAIO DE DESGASTE MICRO-ABRASIVO.....	40
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	44
4.1	MICROESTRUTURA E DUREZA.....	44

4.2 RESISTÊNCIA AO DESGASTE MICRO ABRASIVO.....	48
4.3 RESISTÊNCIA À CORROSÃO	56
5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	58
5.1 CONCLUSÕES.....	58
5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	59
REFERÊNCIAS	60

1. INTRODUÇÃO

O aço inoxidável martensítico possui excelentes propriedades mecânicas, ótima resistência ao desgaste e a corrosão e pode ser endurecido facilmente por tratamento térmico. Por isto, este material é utilizado na fabricação de diversos componentes de turbinas, como por exemplo, as pás, o rotor e o eixo. Estes componentes sofrem deterioração por desgaste, por corrosão ou por ambos os fenômenos, se fazendo necessário um aumento da vida útil do mesmo, evitando gastos com manutenção e até mesmo a substituição.

O presente trabalho tem como objetivo melhorar ainda mais as características acima mencionadas do aço inoxidável martensítico ASTM 487M, temperado e revenido, utilizado na fabricação de eixos de turbinas. Como sugestão, podemos citar os tratamentos de superfície. Dentro destes tratamentos, vamos destacar o tratamento de superfície por fusão a laser. Este tratamento de superfície vem sendo muito utilizado, pois entre as muitas vantagens, podemos destacar a alta confiabilidade com relação à repetibilidade, extremamente limpo para o meio ambiente, uma ferramenta muito rápida e muito eficiente. Características como dureza, refino de grão, redução de defeitos e dissolução de carbonetos são algumas das transformações obtidas pelo tratamento de fusão a laser.

Os tratamentos de superfície por fusão a laser foram realizados no Instituto de Estudos Avançados do CTA de São José dos Campos, com um equipamento de laser a fibra, a fim de obter o parâmetro ótimo de tratamento de superfície, valores de velocidade de varredura e defocagem do feixe de laser foram testados, após 21 trilhas testes, foi definido o parâmetro ideal, 400W de potência, 600mm/min de velocidade e o foco do laser foi defocado em 18mm, foi utilizado como gás de proteção o Argônio a uma vazão de 20l/min. Realizou-se uma sobreposição de trilhas de laser, com objetivo de recobrir por completo a superfície do material.

Com o intuito de caracterizar este tratamento de superfície, foi feita uma análise da microestrutura, identificando as fases presentes na mesma e um perfil de micro dureza. Na etapa seguinte foram feitos ensaios de desgaste micro abrasivo do tipo esfera sobre placa, utilizando

uma solução abrasiva de carboneto de silício e água destilada em uma concentração de 250g/l e ensaios de corrosão eletroquímicos de passivação em solução de cloreto de sódio e água destilada.

Os resultados obtidos nos ensaios de desgaste e corrosão se mostraram satisfatórios, ou seja, houve uma melhora na resistência do material que teve sua superfície tratada por fusão a laser, comprovando os benefícios do tratamento para o aço em questão.

Neste trabalho, o aço inoxidável martensítico ASTM 487 CA6NM, temperado e revenido foi submetido a tratamento de superfície por fusão a laser com os seguintes objetivos:

- Analisar o efeito dos parâmetros de processamento por laser na microestrutura do aço em questão, determinando assim os parâmetros ótimos de processamento;
- Caracterizar a microestrutura dos revestimentos obtidos a partir dos parâmetros ótimos de processamento;
- Analisar a resistência ao desgaste abrasivo à escala micro e a resistência a corrosão do material antes e depois do tratamento por laser;
- Correlacionar a microestrutura com as propriedades: resistência ao desgaste microabrasivo e resistência à corrosão.

O presente trabalho iniciou-se com uma revisão da literatura que é apresentada no capítulo 2. No capítulo 3 é apresentada a metodologia utilizada no trabalho, os resultados obtidos são vastamente discutidos no capítulo 4 e no capítulo 5 são apresentadas as conclusões do trabalho e, finalizando são apresentadas algumas sugestões para trabalhos futuros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Aço Inoxidável

Os aços inoxidáveis são altamente resistentes à corrosão em diversos ambientes. Seu elemento de liga predominante é o cromo com teores superiores a 11% e sua resistência à corrosão pode ser aumentada com a adição de níquel e molibdênio. Os aços inoxidáveis podem ser divididos em classes, com base na fase constituinte predominante na sua microestrutura – austeníticos, ferríticos, martensíticos e duplex. Uma ampla faixa de propriedades mecânicas, combinadas com uma excelente resistência à corrosão, torna os aços inoxidáveis muito versáteis nas suas possíveis aplicações. A Tabela 2.1 apresenta algumas aplicações dos aços inoxidáveis [Callister, 2007].

Tabela 2.1 – Diversos tipos de aplicação dos aços inoxidáveis [Callister, 2007].

Tipo do Aço Inoxidável	Aplicações
Ferrítico	Componentes de exaustão automotivos, tanques para pulverizadores agrícolas, válvulas (alta temperatura) e câmeras de combustão.
Austenítico	Equipamentos para processos químicos e de alimento, vasos criogênicos e construções com solda.
Martensítico	Canos de rifles, peças de motores a jato, mancais, eixos e material cirúrgico.

Os aços inoxidáveis austeníticos e ferríticos são endurecidos a frio, pois não são tratáveis termicamente. Os aços inoxidáveis austeníticos são os mais resistentes à corrosão, devido aos seus altos teores de cromo e também às adições de níquel e não são ferromagnéticos. Alguns aços inoxidáveis são usados com frequência em temperaturas elevadas e ambientes severos, pois resistem à oxidação e mantêm as suas integridades mecânicas sob tais condições [Callister, 2007].

2.1.1 Aço Inoxidável Ferrítico

São essencialmente ligas de ferro e cromo com estrutura cristalina cúbica de corpo centrado – CCC. O teor de cromo presente nesses aços está na faixa de 10,5 a 30%. Algumas ligas podem conter molibdênio, silício, alumínio, titânio e nióbio para conferir características particulares ao produto final. Por exemplo, o enxofre e selênio podem ser adicionados para aumentar a usinabilidade. Os aços inoxidáveis ferríticos são ferromagnéticos e possuem boa ductilidade e conformabilidade, mas a altas temperaturas são menos resistentes que os aços inoxidáveis austeníticos. A micrografia típica de um aço inoxidável ferrítico com ataque químico eletrolítico com 60% de HNO_3 é na Figura 2.1 onde podem ser observados os grãos de ferrita [ASM Metals Handbook, vol 1, 2005].

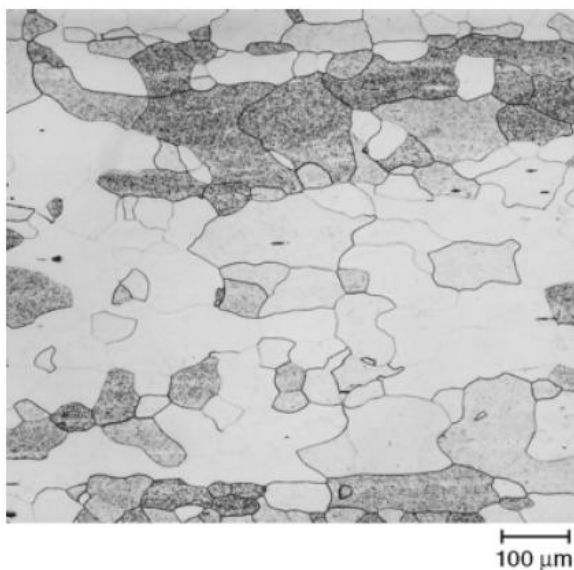


Figura 2.1 – Microestrutura do aço inoxidável ferrítico recozido. [ASM Metals Handbook, vol 9, 2004].

2.1.2 Aço inoxidável Austenítico

O aço inoxidável austenítico apresenta uma estrutura de cúbica de face centrada – CFC. Essa estrutura proporciona o uso de elementos austenitizantes como, por exemplo, o níquel, manganês e nitrogênio. São essencialmente não magnéticos e possuem excelentes propriedades criogênicas. O teor de cromo presente pode variar de 16 a 26%, o de níquel no máximo 35% e o de manganês no máximo 15%. Os da série 2xx possuem nitrogênio, 4 a 15,5% de manganês, e no máximo 7% de níquel. Os da série 3xx possuem grandes quantidades de níquel e mais de 2% de manganês. A resistência à corrosão pode ser aumentada com a adição de molibdênio, cobre, silício, alumínio, titânio e nióbio, conferindo também uma maior resistência à formação da corrosão por pites. O enxofre e o selênio podem ser adicionados para melhorar a usinabilidade da liga. A micrografia típica de um aço inoxidável austenítico pode ser observada na Figura 2.2 e é constituída essencialmente de grãos de austenita [ASM Metals Handbook, vol 1, 2005].



Figura 2.2 – Micrografia de aço inoxidável austenítico revenido.
[ASM Metals Handbook, vol 9, 2004].

2.1.3 Aço Inoxidável Duplex

O aço inoxidável duplex apresenta uma estrutura mista entre o CCC ferrítico e o CFC austenítico. A proporção exata entre as fases vai depender da composição e do tratamento térmico empregado. A maioria destas ligas é elaborada com proporções iguais de cada fase e no estado recozido. Os principais elementos presentes são o cromo e o níquel, mas o nitrogênio, molibdênio, cobre, silício e tungstênio podem ser adicionados para controlar o balanço estrutural, conferindo assim uma maior resistência à corrosão [ASM Metals Handbook, vol 1, 2005].

A resistência à corrosão dos aços inoxidáveis duplex se assemelha a do aço inoxidável austenítico com elementos de liga similares. Entretanto este aço possui uma maior resistência mecânica e maior resistência à corrosão sob tensão. A tenacidade das ligas duplex está entre os aços inoxidáveis austeníticos e ferríticos.

A Figura 2.3 apresenta a microestrutura de um aço inoxidável duplex, tendo a ferrita como fase primária, caracterizada por ilhas de austenita precipitada em uma matriz ferrítica.

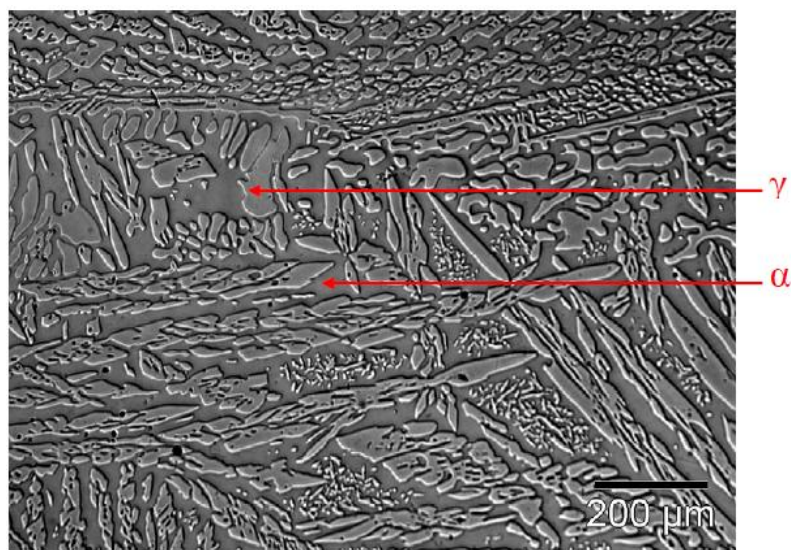


Figura 2.3 – Micrografia ótica de aço inoxidável duplex, evidenciando as ilhas de austenita (γ) presentes na matriz ferrítica (α).

[Nascimento, 2007].

2.1.4 Aço Inoxidável Martensítico

Segundo o ASM Metals Handbook, vol 1, [2005] os aços inoxidáveis martensíticos são essencialmente ligas de ferro, cromo e carbono, sendo o teor de cromo na faixa de 10,5 a 18%, são ferromagnéticos, endurecíveis por tratamentos térmicos e geralmente só resistem à corrosão em ambiente não muito agressivo. Possuem estrutura cúbica de corpo centrado e quando endurecidos apresentam estrutura martensítica. O cromo e o carbono são equilibrados para garantir a estrutura martensítica após o endurecimento.

Excessos de carbonetos podem estar presentes para aumentar a resistência ao desgaste ou manter arestas cortantes. Elementos como o nióbio, silício, tungstênio e vanádio podem ser adicionados para modificar a temperabilidade. Pequenas quantidades de níquel podem ser adicionadas para melhorar a resistência à corrosão. O enxofre e o selênio podem ser adicionados para melhorar a usinabilidade [ASM Metals Handbook, vol 1, 2005].

O aumento da dureza destes aços está relacionado com o teor de carbono que pode variar amplamente e com estabilidade da ferrita- δ à temperatura de austenitização. O aumento da temperabilidade deste aço está relacionado com o aumento dos níveis de cromo presente. Com o aumento do teor de carbono a estrutura martensítica torna-se mais fina, e a quantidade de austenita retida aumenta, mas sem causar danos, a menos que temperaturas muito altas de austenitização tenham sido utilizadas. A Figura 4 apresenta a microestrutura de um aço inoxidável martensítico atacado com reagente Villela [ASM Metals Handbook, vol 9, 2004].



Figura 2.4 – Matriz de aço inoxidável martensítico (41 HRC)
[ASM Metals Handbook, vol 9, 2004].

Para os aços inoxidáveis martensíticos o tratamento de superfície por refusão a laser traz inúmeros benefícios: causa a dissolução dos carbonetos, refina a microestrutura e homogeneiza os elementos de liga resultando assim em um aumento da dureza, da tenacidade e da resistência ao desgaste. A resistência à corrosão também pode ser melhorada dependendo da microestrutura formada, que por sua vez, está diretamente relacionada aos parâmetros de laser utilizados para o tratamento, como por exemplo, a potência e a velocidade. O ideal para aumentar a resistência à corrosão era a criação de uma região refundida homogênea [Kwok et al., 2002; Escudero e Belló, 1992; Conde et. al., 2000].

Uma das ferramentas comumente utilizada para representar o efeito de diferentes elementos na microestrutura dos aços inoxidáveis é o Diagrama de Schaeffler-DeLong, apresentado na Figura 2.5. O diagrama mostra os limites de campos das fases austenita, ferrita e martensita em termos de níquel e cromo equivalentes, à temperatura ambiente, após resfriamento brusco a partir de temperaturas na faixa de 1100°C. Ele foi inicialmente desenvolvido para soldagem, com intuito de prever a microestrutura da solda, e determinar aspectos tais como, se o depósito irá conter uma pequena quantidade de ferrita, prever a composição do eletrodo para evitar a formação de ferrita ou evitar a formação de martensita quando se quer máxima ductilidade. No entanto, o seu uso tem se estendido para outras aplicações além da soldagem com a introdução do efeito de outros elementos nas equações de cromo e níquel equivalente. Ainda que o uso do

diagrama tenha se estendido bastante, a leitura deve ser feita cuidadosamente, pois não se especificam temperaturas nem velocidades de resfriamento [Ochoa, 2007].

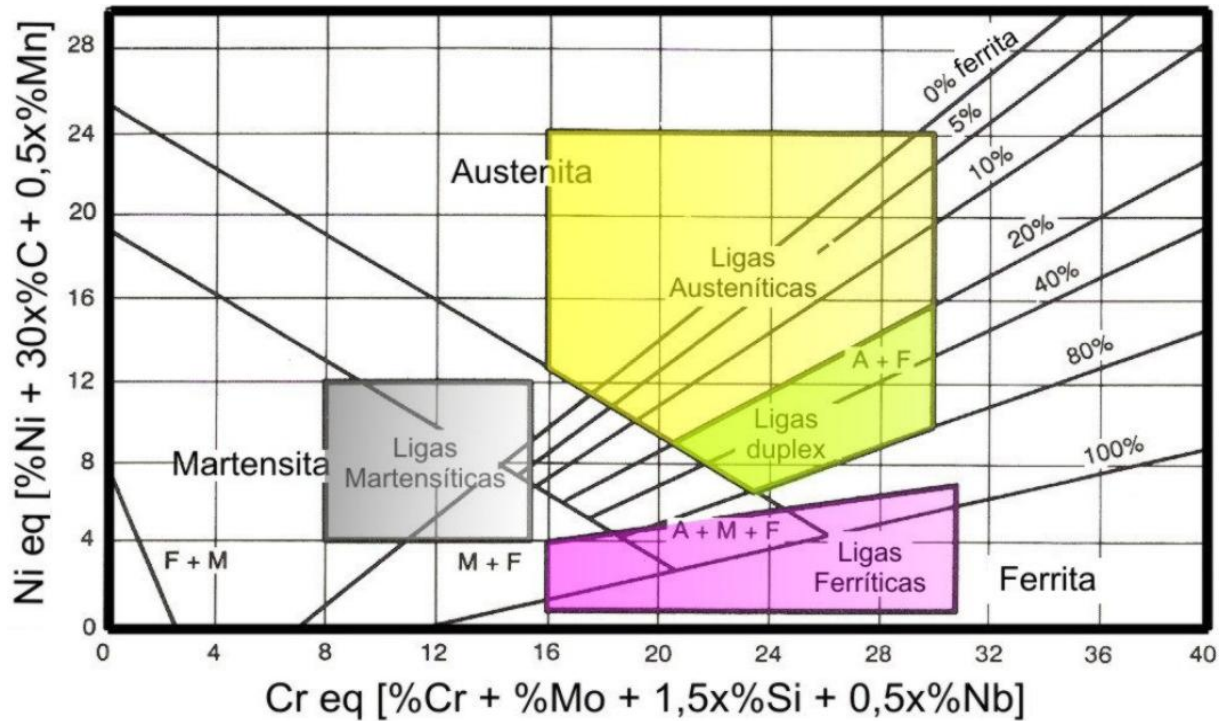


Figura 2.5– Diagrama de Schaeffler.
[Ochoa, 2007]

2.2 Tratamento térmico de superfície por fusão a laser

2.2.1 Laser

O laser é um amplificador óptico, análogo a um amplificador eletrônico. O amplificador eletrônico produz um grande sinal de saída a partir de um pequeno sinal de entrada. Ou seja um pequeno sinal de luz é amplificado produzindo um feixe de luz com características peculiares que tornam o laser uma ferramenta de aplicação estratégica nas mais diversas áreas [Maillet, 1987].

O laser e os sistemas utilizando laser vêm revolucionando a alta tecnologia e dando uma enorme contribuição para a pesquisa básica e aplicada em diferentes áreas. Embora os dispositivos baseados em laser ainda não tenham atingido totalmente as expectativas iniciais, importantes avanços em comunicação, óptica, medicina, indústria e outros campos de interesse têm sido alcançados com a sofisticação crescente dos sistemas a laser.

Os sistemas a laser com potências variando de 0,5 a 10 kW podem ser utilizados para modificar ou adaptar metalurgicamente a estrutura da superfície, mantendo o substrato do material sem alterações de suas propriedades. Essa transformação da superfície pode ocorrer de três maneiras diferentes. A primeira pode ser atribuída ao endurecimento da superfície por tratamento térmico de têmpera. A segunda maneira é a refusão da superfície resultando em um refino da estrutura devido ao rápido resfriamento. Finalmente a terceira seria a adição de elementos de liga na poça fundida, alterando assim a composição da camada formada na superfície [ASM Metals Handbook, vol 13, 1992].

Muitos países desenvolvidos têm feito investimentos em seus programas de pesquisa com sistemas a laser apresentando resultados promissores que podem ser avaliados através das várias publicações resultantes. Na Tabela 2.2 pode ser observado o número de publicações em diferentes áreas. As maiores áreas com publicações são a óptica, a química, a biologia, a fotônica, a ciência dos materiais e a usos industriais para pesquisa e aplicações objetivas. A indústria

óptica vem se mostrando no topo das publicações devido à crescente necessidade mundial de enviar grandes quantidades de informações pelos cabos de fibra óptica [Golnabi, 2006].

Na distribuição por países, 24,1 % das publicações, resultaram de trabalhos dos pesquisadores dos Estados Unidos, seguido pelo Japão, Alemanha e China, conforme dados apresentados na Figura 2.6.

Segundo Golnabi [2006], o processamento de materiais utilizando os sistemas a laser possui maiores aplicações na: soldagem, perfuração, endurecimento e a gravação, com um total de 5954 publicações. A soldagem aparece no topo da lista seguida por aplicações relacionadas ao endurecimento de superfícies.

Tabela 2.2 – Diferentes áreas que utilizam o sistema a laser no período de 1990 - 2003.
[Adaptado de Golnabi, 2006]

Escopo da pesquisa a laser	Número de artigos publicados
Ópticos	95715
Químicos	37865
Biológicos	16958
Fotônicos	17297
Indústria	4242
Comunicação	2427
Ciência dos Materiais	295
Ciência da vida	139
Ciência de superfície	113
Aeroespacial	83

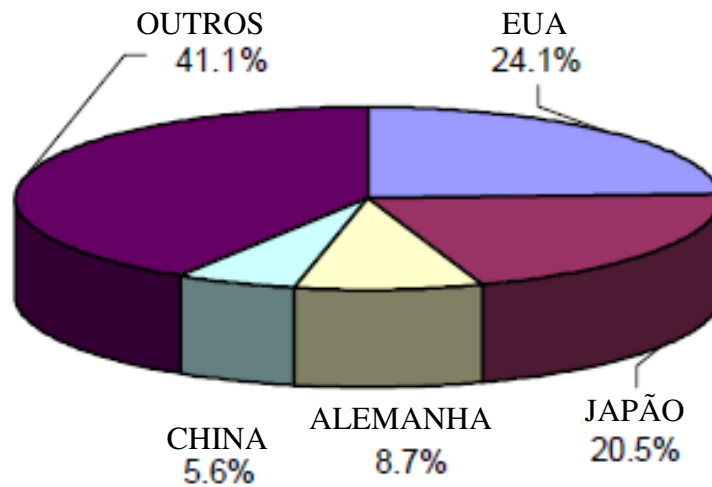


Figura 2.6 – Porcentagem de artigos publicados em diversos países no período de 1990 – 2003, relativos à processamento de materiais por laser.
[Adaptado de Golnabi, 2006]

2.1.2. Os tipos de lasers

Atualmente, existem centenas de tipos de lasers que demonstraram sua viabilidade em laboratório, funcionando em diversos meios ativos com diferentes comprimentos de ondas. Os principais lasers são agrupados em quatro famílias de acordo com o tipo de meio ativo empregado:

- Lasers de isolantes dopados;
- Lasers de corantes;
- Lasers de semicondutores;
- Lasers a gás.

Nos *lasers de isolantes dopados*, a radiação proveniente de uma lâmpada flash ou de arco excita opticamente a emissão de átomos introduzidos sob a forma de íons metálicos (Cr^{3+} , Vd, etc) e de terras raras (Nd^{3+} , Sm, etc) em uma matriz sólida isolante de cristal ou de vidro. Devido

ao aparecimento de deslocamentos atômicos no cristal, a rede cristalina aceita uma pequena quantidade de átomos dopantes introduzidos, da ordem de 10^{19} átomos/cm³, mas suficientes para fornecer potências elevadas. Os representantes mais expressivos deste grupo são o laser de rubi, de Nd³⁺:YAG e o de vidro dopado com neodímio [Maillet, 1987].

Os *lasers de corantes* operam com um meio ativo contendo um corante orgânico diluído em um solvente líquido, retirando energia da radiação emitida por outras fontes ópticas (lâmpadas flash ou lasers), dependendo essencialmente das características da fonte óptica de bombeamento. Corantes orgânicos complexos como a rodamina e a fluoresceína dissódica dissolvidas em solução de álcool, são alguns exemplos deste tipo de laser [Maillet, 1987].

Nos *lasers semicondutores*, a radiação é emitida no interior de uma junção p-n em um diodo de tipo semiconductor. O condutor do tipo 'p' tem deficiência de elétrons livres em sua estrutura cristalina, provocando um excesso de vacâncias carregadas positivamente. Em contrapartida, um material semiconductor do tipo 'n' tem excesso de elétrons livres. Se duas placas, uma do tipo 'p' e outra do tipo 'n', são unidas, tem-se o que se denomina uma junção p-n. Através da aplicação de uma corrente elétrica nesta junção, obtém-se pulsos de luz controlados pela variação da corrente da fonte de energia. As faces do laser semiconductor são clivadas ao longo dos planos cristalinos para formar superfícies reflexivas paralelas que agem como espelhos do mecanismo de retroalimentação [Maillet, 1987].

Os *lasers a gás* constituem a maior parte utilizada na indústria e funcionam com base em uma excitação, geralmente de natureza elétrica, mas ocasionalmente também de natureza química, de meios atômicos neutros, ionizados ou moleculares, apresentando dois modos de funcionamento: contínuo e pulsado. Tanto do ponto de vista industrial quanto científico, o laser de dióxido de carbono (CO₂) é o mais importante dos lasers a gás. O laser de CO₂ pode fornecer potências contínuas que vão de fração de watt até dezenas de kilo watts para aplicações em processamento de materiais, em um grande número de comprimentos de ondas contido na faixa de 9,6 a 10,6 μm devido às transições entre níveis rotacionais-vibracionais da molécula de CO₂.

Como observado no caso do laser de $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$, o comprimento de onda de cada tipo de laser depende das propriedades de seu meio ativo. A Figura 2.7 mostra o comprimento de onda dos principais lasers, contido entre a região ultravioleta e a de microondas [Maillet, 1987].

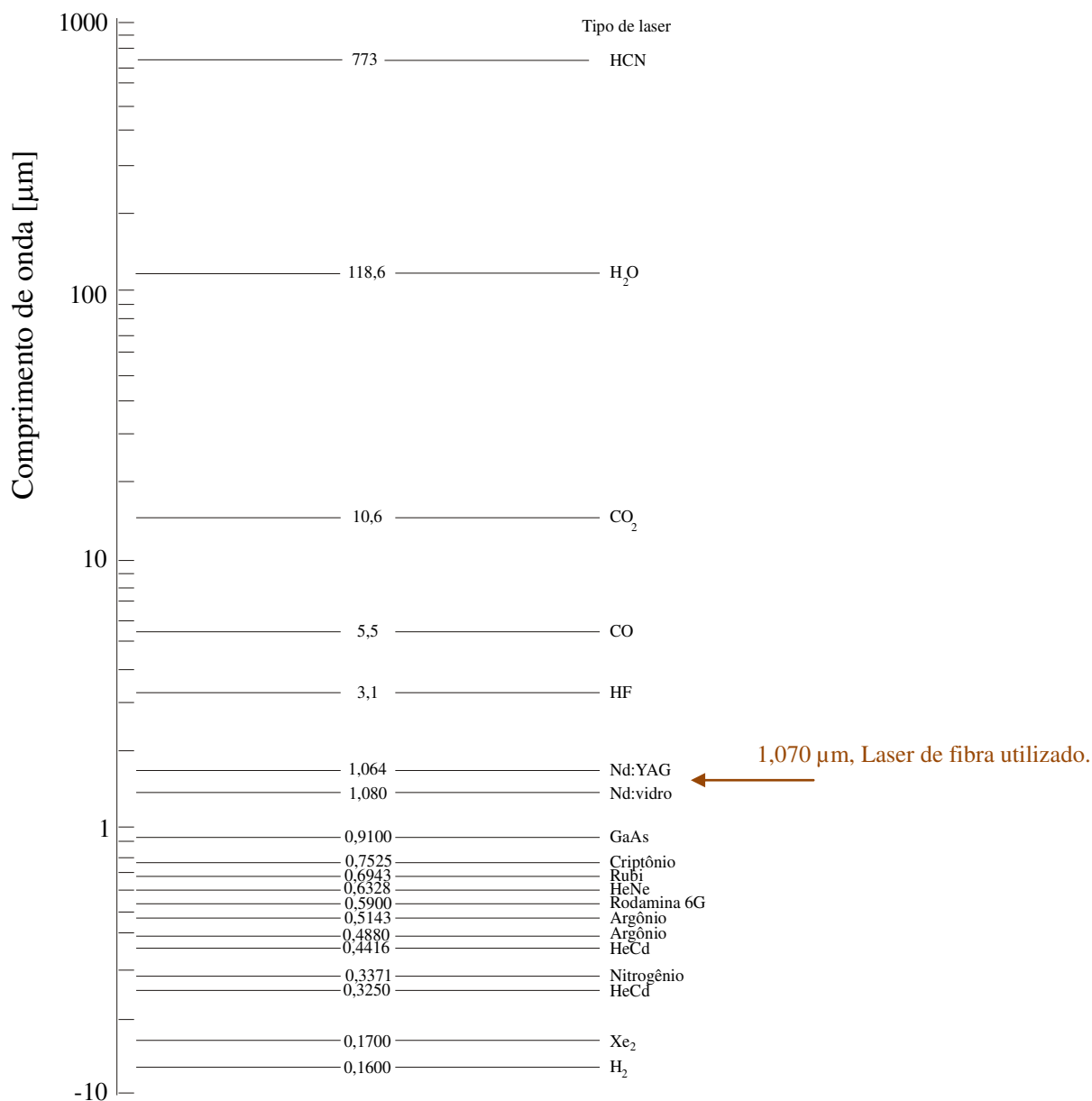


Figura 2.7 – Comprimentos de onda operacionais dos principais tipos de laser.
[Adaptado de Laser Institute of America, 1985]

Os lasers capazes de atingir altas potências podem ser utilizados para o tratamento de superfície de materiais como, aço, ferro fundido, alumínio, magnésio, titânio e em outras ligas

metálicas. As características da superfície destes materiais, como tamanho de grão, defeitos, variações na composição e tensões residuais determinam suas características de resistência à corrosão, fadiga e desgaste. A otimização destas propriedades vem sendo buscada pela utilização de tratamentos a laser [Akgun, Urgan e Çakir, 1995; Allan, 1979]. O uso do laser em aplicações industriais proporciona processos extremamente rápidos, ambientalmente corretos, aplicações localizadas, com excelente controle de parâmetros, garantindo precisão e repetibilidade [Brizmer, Kigerman e Etsion, 2003; Meijer, 2004; Dubey e Yadava, 2008].

2.2.2 Tratamento térmico de superfície com laser

Uma das muitas aplicações do laser em processamento de materiais é o tratamento de superfície. A alta densidade de potência do raio laser permite aquecer a superfície muito mais rapidamente do que fontes convencionais, não há a necessidade de vácuo e proporciona altas taxas de resfriamento devido ao aquecimento localizado. Os equipamentos para processamento de materiais com laser são facilmente automatizados, proporcionando o tratamento nas regiões de interesse com economia de tempo e custos de operação.

A têmpera a laser acontece quando a taxa de resfriamento é rápida o suficiente para dar um endurecimento devido a formação de martensita. É utilizada para modificar propriedades mecânicas e metalúrgicas da peça. Como vantagens têm-se a precisão da camada tratada, pode ser realizado em peças acabadas, o calor é concentrado na região de interesse gerando assim baixa distorção na peça, alta velocidade de processamento além de uma microestrutura refinada e uma superfície com maior dureza. A Figura 2.8 apresenta a micrografia de um aço inoxidável martensítico AISI 420 após têmpera superficial realizada por laser e podemos notar que a camada resultante é formada pela sobreposição dos passes de laser, com o intuito de gerar uma camada homogênea de espessura praticamente constante e da ordem de 90µm. Abaixo desta camada temperada está a zona termicamente afetada – ZTA que possui cerca de 120µm e na parte inferior o metal base – MB. Para evitar as perdas por reflexão, a rugosidade superficial pode ser

aumentada, por exemplo, através do jateamento com granalhas de ferro [Von Allmen, 1987; Crafer e Oakley, 1993; Steen, 1998; Migliore, 1998; Haake e Zediker, 2000].

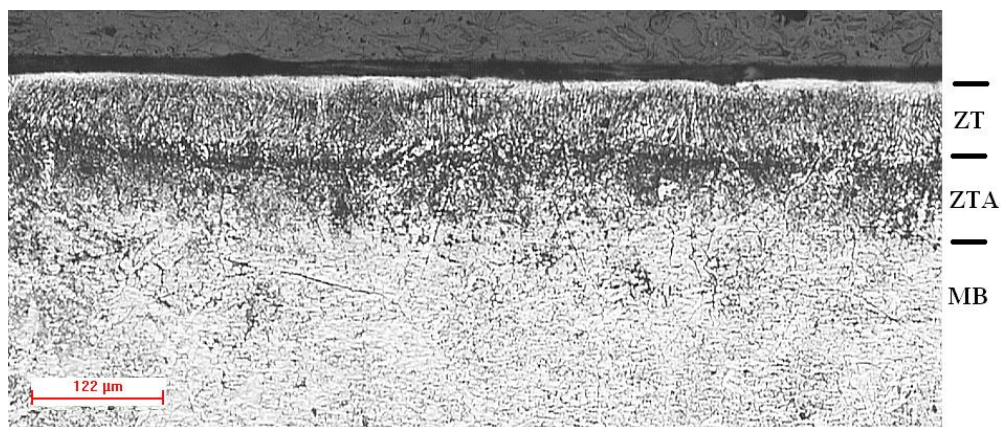


Figura 2.8 – Secção transversal do aço AISI 420 após tratamento térmico de têmpera a laser evidenciando a zona temperada – ZT, a zona termicamente afetada – ZTA e o material base – MB [Larosa M. A., 2006].

A refusão a laser acontece quando o feixe de laser aquece a superfície do material a uma temperatura maior que a de fusão do material, originando uma poça líquida nesta região. Este processo é seguido pelo rápido resfriamento da poça podendo resultar em microestruturas muito refinadas, homogêneas e com a dissolução de precipitados, alterando assim as características de resistência à corrosão e ao desgaste [Burakowski e Wierzchon, 1999; Pan et al., 1998].

A Figura 2.9, apresenta um esquema de como é realizada a refusão a laser. É importante lembrar que a camada fundida sofre diferentes taxas de resfriamento a diferentes profundidades durante a solidificação, devido às características de transferência de calor na poça e em direção ao substrato. A taxa de resfriamento está diretamente ligada à taxa de dissipação de calor. Neste caso, o calor absorvido é função da densidade de potência, da velocidade de varredura do laser e da capacidade de absorção do material tratado [Akgun, Urgen e Çakir, 1995].

A modificação microestrutural obtida na solidificação após o tratamento a laser depende de vários parâmetros, mas principalmente da velocidade de solidificação e da composição química do material. [Ierardi et al., 1999] A Figura 2.10, apresenta a microestrutura resultante de um tratamento térmico de refusão a laser em ferro fundido de grafite compactada. É possível observar que a potência utilizada, a alta taxa de resfriamento, a grande quantidade de carbono na matriz proporcionaram uma camada refundida homogênea e houve a formação de trincas na camada, uma vez que o material não suportou as tensões internas geradas na solidificação, evidenciando que os parâmetros do laser testados não foram ideais.

Na Figura 2.11, pode-se observar diversas aplicações possíveis de processamento de materiais com laser. Variando a densidade de potência e o tempo de interação podem ser realizadas operações de têmpera, refusão, corte e ainda soldagem de materiais. Ainda, como outras aplicações, podem ser citadas: a produção de ligas de superfície e a produção de revestimentos.

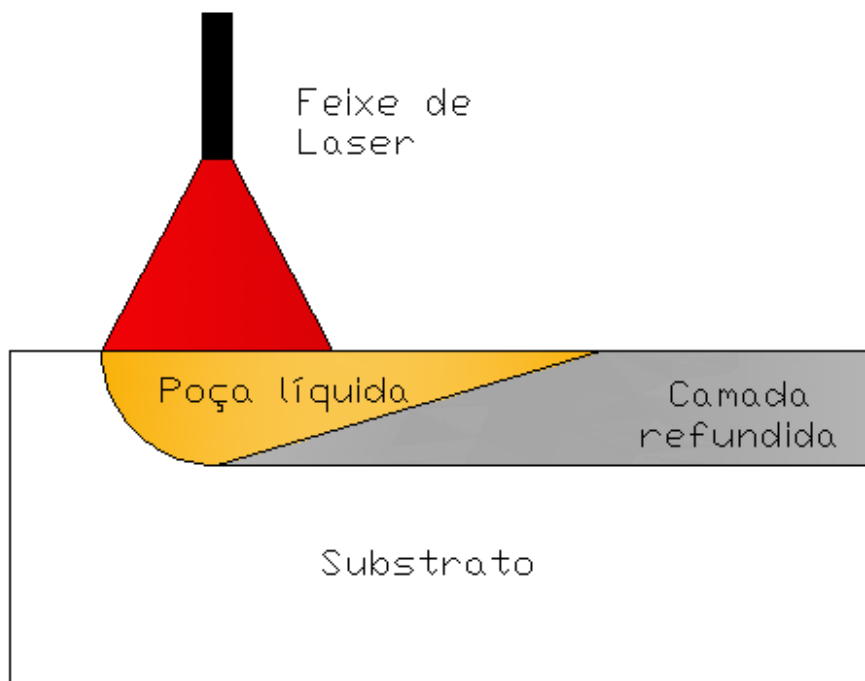


Figura 2.9 – Esquema do processo de refusão da superfície a laser.

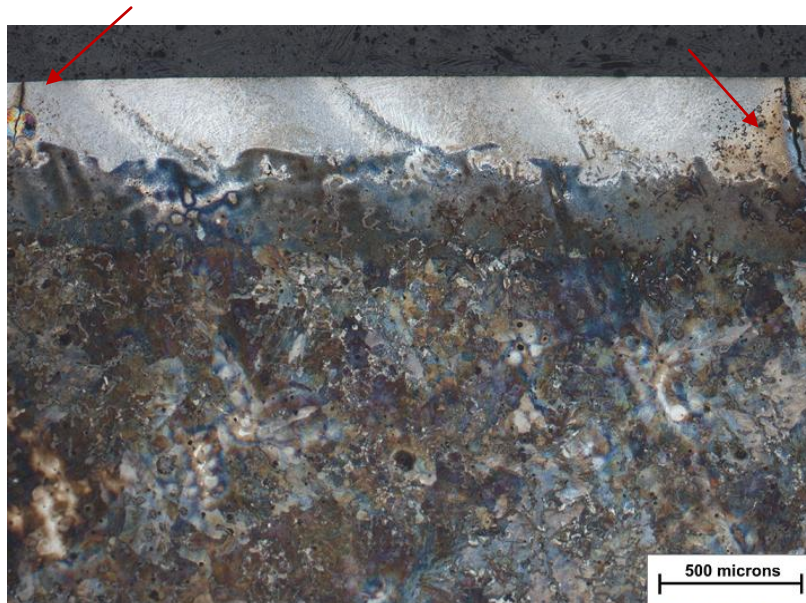


Figura 2.10 – Ferro fundido vermicular refundido a laser. Camada homogênea com trincas ocasionadas pelos altos valores de potência e da taxa de resfriamento.
[Arquivo próprio]

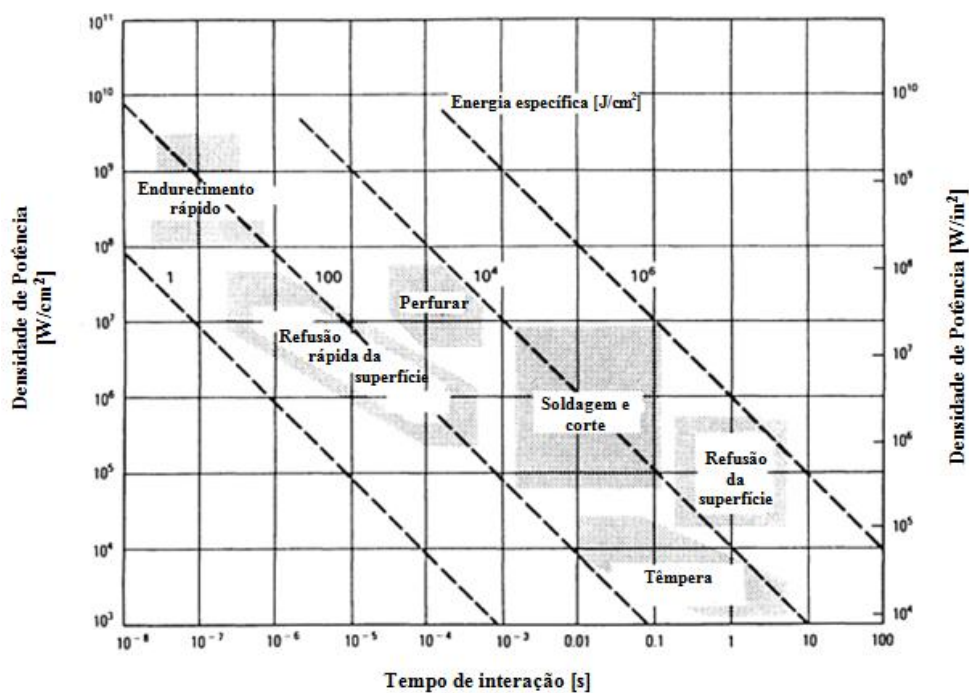


Figura 2.11 – Interação entre o tempo e a densidade de potência necessária para realizar diversas modificações com laser.
[Adaptado de ASM Metals Handbook, vol. 4, 1991]

2.3 Desgaste

O desgaste, segundo as normas DIN 50320 [1997] e a ASTM G40-10 [2010], pode ser descrito como a “perda progressiva de massa da superfície de um corpo sólido causada por ação mecânica”. Os diferentes tipos de desgaste podem ocorrer pela ação do movimento relativo entre um sólido com outro sólido, líquido ou gás.

Podemos ainda definir o desgaste como sendo a remoção de material da superfície sólida, resultado de uma ação mecânica. É uma característica do processo de desgaste a pequena remoção de material, deste modo, por exemplo, a obsolescência e a fratura de algum componente podem não ser visíveis já o desgaste, por ser silencioso, não é detectado com inspeções casuais, demandando uma análise mais criteriosa [Rabinowicz, 1995].

Burwell [1957] sugere que o desgaste seja atribuído a quatro mecanismos diferentes, cada um obedecendo suas próprias regras, mas um mecanismo pode afetar o outro e, assim, dificultar a identificação do primeiro tipo de desgaste. O desgaste pode ser classificado por: Desgaste adesivo, Desgaste abrasivo, Desgaste corrosivo e Desgaste da superfície fadigada.

2.3.1 Desgaste Adesivo

O desgaste adesivo acontece quando duas superfícies planas e polidas deslizam entre si, e fragmentos de material se transferem de uma superfície para outra devido à formação de junções na fase sólida. As junções adesivamente formadas são cisalhadas e parte do material menos resistente é transferido ou pode permanecer entre as superfícies se tornando partículas abrasivas soltas [Rabinowicz, 1995].

O princípio do desgaste adesivo é a grande força adesiva gerada pelo contato entre os átomos. Durante esse contato, uma pequena porção começa a interagir com seu similar da outra face, então existe a probabilidade pequena, mas real, de ocorrer uma falha quando esse contato for interrompido [Rabinowicz, 1995].

2.3.2 Desgaste Corrosivo

O desgaste corrosivo surge quando o deslizamento entre as superfícies ocorre em um meio corrosivo. Na ausência do deslizamento, os produtos da corrosão formam uma camada na superfície. Esse filme tende a diminuir ou até mesmo parar a corrosão. Entretanto, a atuação do desgaste no deslizamento remove esse filme e permite que o efeito corrosivo volte a atuar sobre a superfície [Rabinowicz, 1995].

2.3.3 Desgaste da Superfície Fadigada

O desgaste da superfície fadigada pode ser observado durante repetidos deslizamentos na mesma região. Os ciclos repetitivos de esforços que o material sofre, podem induzir a formação de trincas superficiais ou subsuperficiais que eventualmente irão resultar na quebra da superfície com a formação de diversos fragmentos, deixando assim vários pites na superfície. Normalmente, este tipo de desgaste ocorre com maior incidência em deslizamentos do tipo vai e vem [Rabinowicz, 1995].

2.3.4 Desgaste Abrasivo e Micro Abrasivo

O desgaste abrasivo acontece quando uma superfície dura e áspera, ou uma superfície macia contendo partículas duras, desliza contra outra superfície macia, formando assim uma série de sulcos nesta superfície. As partículas desprendidas dos sulcos pelo movimento relativo geralmente ficam soltas e podem influenciar no desgaste [Rabinowicz, 1995].

O custo resultante da abrasão é muito elevado e varia de 1 a 4% do gasto bruto da indústria. Esse efeito pode ser evidentemente observado nos diversos ramos da mineração e na indústria agropecuária [ASM Metals Handbook, vol. 18, 1992].

A taxa de desgaste das superfícies afetadas depende das características da superfície e da presença do abrasivo entre essas superfícies, da velocidade de contato, e das condições ambientais. Por exemplo, uma pessoa que anda com um calçado convencional com sola de borracha em um piso mais resistente vai perceber que com o tempo, seu calçado vai apresentar desgaste e o piso não [ASM Metals Handbook, vol. 18, 1992].

O desgaste abrasivo pode ser categorizado de acordo com o tipo de contato. Os tipos de contato incluem o desgaste por dois corpos e o por três- corpos, somados com o tipo de contato gerado pelo meio, e podem ser classificados em aberto(livre) ou fechado(forçado). Essa classificação é exemplificada na Figura 2.12 [ASM Metals Handbook, vol. 18, 1992].

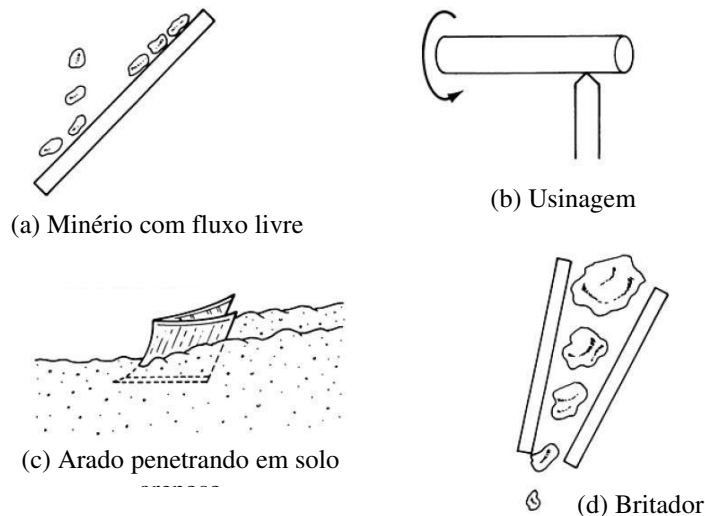


Figura 2.12 – Tipos de contato durante o desgaste abrasivo. (a) Dois corpos em meio aberto (b) Dois corpos em meio fechado. (c) Três corpos em meio aberto. (d) Três corpos em meio fechado.

[ASM Metals Handbook, vol. 18, 1992]

Diversos mecanismos foram propostos para explicar como o material é removido da superfície durante a abrasão. Esses mecanismos são fratura, fadiga e derretimento. Devido à

complexidade da abrasão, nenhum destes mecanismos é responsável sozinho pela perda de massa. A Figura 2.13 retrata alguns desses processos que podem ocorrer quando um único tipo de abrasivo percorre a superfície. Eles são microsulcamento, formação de cunhas, microcorte, microfadiga e microtrincamento [ASM Metals Handbook, vol. 18, 1992].

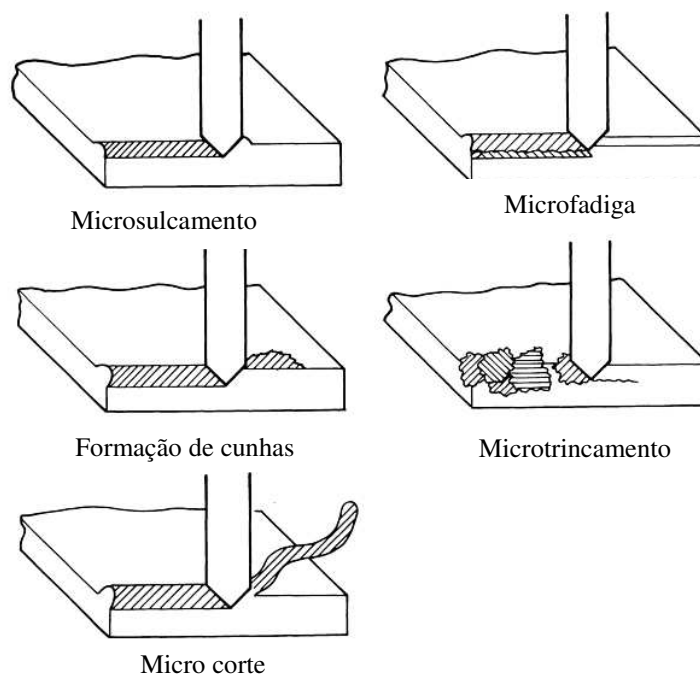


Figura 2.13 – Os cinco processos de desgaste abrasivo.
[ASM Metals Handbook, vol. 18, 1992].

A formação de sulcos é caracterizada pelo deslocamento de material da parte da cratera formada para o lado de fora da mesma. Isso acontece para pequenas cargas e não resulta em qualquer perda de material. O perigo surge perto da região superficial, onde existe o acúmulo de tensões geradas pelo trabalho a frio. Se sucessivas colisões acontecerem na região fragilizada pelo trabalho a frio, ocorrerá falha por microfadiga [ASM Metals Handbook, vol. 18, 1992].

A maneira mais severa de desgaste para os materiais dúcteis é o processo de microsulcamento e microcorte. Durante esse processo, o abrasivo remove uma lasca de material, semelhante à máquina de usinagem. Isso resulta em remoção de material, mas uma quantidade muito pequena com relação ao tamanho da ranhura. Para os materiais frágeis, o principal mecanismo é microtrincamento que ocorre quando tensões altamente concentradas são impostas

pelas partículas abrasivas ocasionando a formação de grandes rebarbas que são arrancadas devido à propagação de trincas. As partículas pontiagudas possuem um ângulo crítico que determina a transição entre a formação de sulcos e o micro corte. Esse ângulo depende do material que será agredido, sendo, ângulos na faixa de 45° para o cobre e 85° para o alumínio [ASM Metals Handbook, vol. 18, 1992].

Para materiais dúcteis os mecanismos de formação de sulco, de formação de cunha e o de microcorte podem ser observados na Figura 2.14. Pode ser observado que o grau de penetração é crítico para determinar a transição entre os mecanismos acima citados [ASM Metals Handbook, vol. 18, 1992].

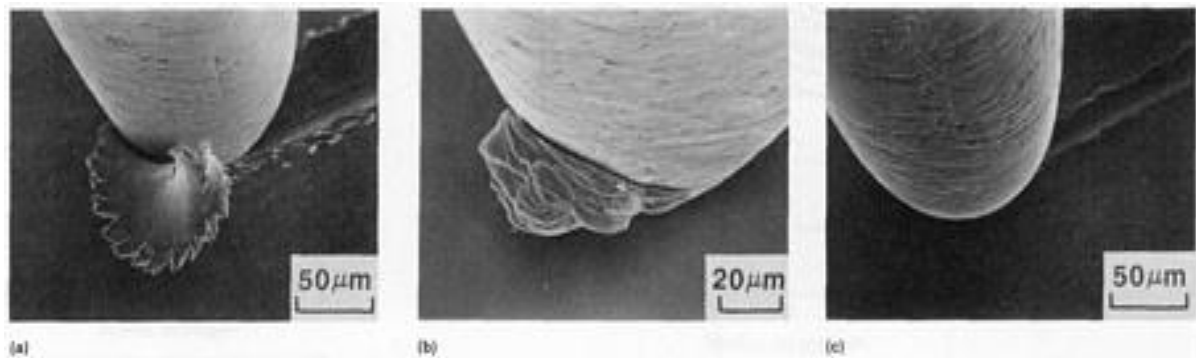


Figura 2.14 – Exemplos dos três processos de desgaste abrasivo, observados através de um microscópio eletrônico de varredura. (a) Microcorte. (b) Formação de cunhas. (c) Microsulcamento.

[ASM Metals Handbook, vol. 18, 1992].

Segundo o ASM Metals Handbook, vol. 18, 1992 quando uma partícula abrasiva passa removendo material da superfície, o máximo volume que ela pode remover é:

$$W = A \cdot d \quad (1)$$

Onde W é o volume de material removido, A é a área da seção transversal da ranhura e d é a distância de deslizamento. A seção transversal da ranhura depende da forma da partícula abrasiva e da profundidade da penetração, p :

$$A = k_1 \cdot p \quad (2)$$

onde k_1 é uma constante que depende do formato da partícula. A profundidade da penetração p depende da forma da partícula, da carga L , e da dureza H do material.

$$p = k_2 \cdot \frac{L}{H} \quad (3)$$

Muitos fatores afetam k_1 : a possibilidade da formação de sulcos ser maior que a formação de cortes; a partícula abrasiva pode rolar e evitar o desgaste; a partícula abrasiva quebrar e alterar as condições finais do ensaio. As equações 1, 2 e 3 podem ser combinadas, formando:

$$W = k_3 \cdot \frac{L \cdot d}{H} \quad (4)$$

A equação 4 é comumente conhecida como a equação de Archard, que foi derivada para desgaste adesivo, mas pode ser utilizada com sucesso para avaliar o desgaste abrasivo.

A resistência ao desgaste é representada por R que pode ser definida como o inverso do volume de desgaste:

$$R = \frac{1}{W} \quad (5)$$

Materiais frágeis possuem um modo adicional de desgaste abrasivo, chamado fratura. Isso ocorre quando as forças aplicadas pelas partículas abrasivas excedem o limite de tenacidade à fratura do material. É o modo frequentemente predominante nos materiais cerâmicos e é ativo em materiais como o ferro fundido branco [ASM Metals Handbook, vol. 18, 1992].

No caso de materiais compósitos, a resistência ao desgaste depende dos diferentes parâmetros microestruturais tais como: dureza, forma, tamanho, fração em volume e distribuição da fase de reforço, propriedades da matriz e da ligação interfacial entre a fase de reforço e a matriz. [Zum-Gahr, 1998].

Segundo Kato [2000], o desgaste dos materiais é baseado nas seguintes características dos mesmos: rugosidade, dureza, ductilidade e formação de filme óxido. Novas tecnologias para combater o desgaste devem levar em conta as características mencionadas.

O desgaste abrasivo pode ser classificado como desgaste abrasivo a dois corpos ou por riscamento e desgaste abrasivo a três corpos ou desgaste por rolamento. A Figura 2.15 apresenta o mecanismo de desgaste por dois corpos onde a abrasão acontece em duas superfícies, a primeira que será a amostra que sofrerá maior porção de desgaste e a segunda que tem movimento relativo com a primeira, com um contato direto ou indireto onde as forças são transmitidas entre os dois corpos. Ou seja, as partículas abrasivas presentes no processo de desgaste estão incrustadas em uma das superfícies.

O sistema de abrasão por três corpos, Figura 2.16, possui as duas superfícies citadas acima e ainda um terceiro corpo, que pode ser algum material sólido totalmente separado dos outros dois corpos, que estará presente na interface gerada pelos outros dois corpos [Trezona, Allsopp e Hutchings, 1999].

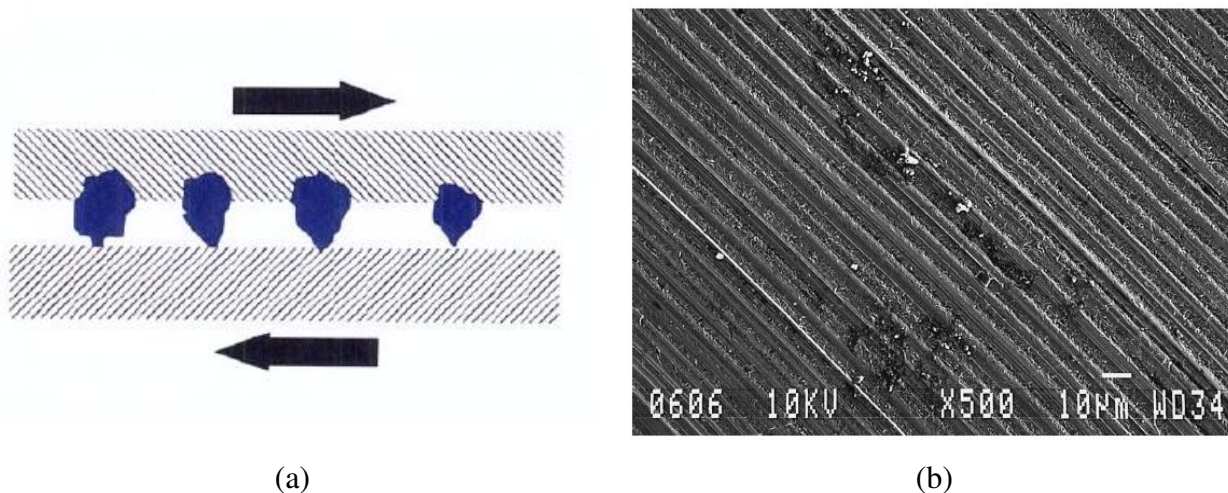


Figura 2.15 – (a) Representação esquemática do desgaste abrasivo a dois corpos [Hutchings, 1992]; (b) Morfologia do desgaste abrasivo a dois corpos [Trezona, Allsopp e Hutchings, 1999].

Para o sistema abrasivo de dois corpos a superfície desgastada apresenta sulcos paralelos, indicando uma direcionalidade do desgastes, ou seja, as partículas abrasivas estavam alojadas em

uma das duas superfícies, Figura 2.15(b). De maneira geral, a superfície submetida a um desgaste abrasivo a três corpos, apresenta seus sulcos e riscos de maneira aleatória, evidenciando que as partículas abrasivas se encontram dispersas, livres, entre as superfícies, Figura 2.16 (b).

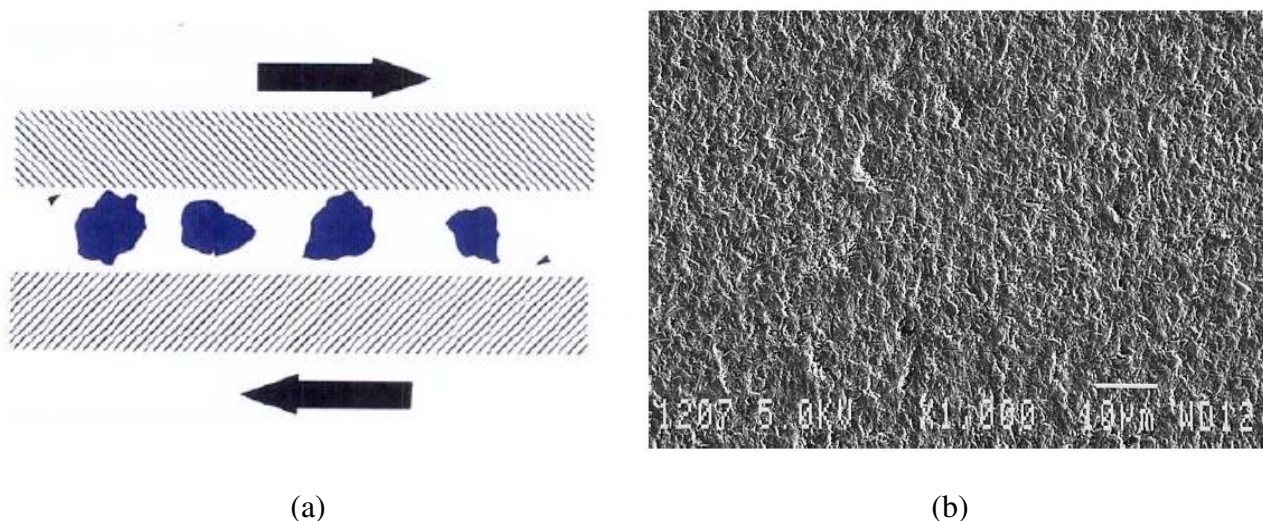


Figura 2.16 – (a) Representação esquemática do desgaste abrasivo a três corpos [Hutchings, 1992]; (b) Morfologia do desgaste abrasivo a três corpos [Trezona, Allsopp e Hutchings, 1999].

Segundo Cozza, Tanaka e Souza [2009], pode existir um tipo de desgaste chamado de abrasão por micro rolamento que é um fenômeno que acontece entre os riscos produzidos no desgaste por dois corpos.

Esta descrição fica evidenciada na Figura 2.17 onde a distância percorrida no ensaio foi de 100 m, (a) e (b) são imagens de diferentes magnitudes da amostra submetida a uma força de 1,25 N. Já (c) e (d) para força de 5 N. A presença da abrasão por micro rolamento é menor para pequenas distâncias de rodagem, ou seja, ela tende a aumentar com o aumento da rodagem. Levando em consideração a severidade do ensaio, quanto menos severo for o ensaio, maior a possibilidade das partículas abrasivas estarem rolando entre a esfera e a amostra, promovendo assim um aumento do desgaste por micro rolamento. As setas indicam as regiões onde fica evidenciado esse tipo de desgaste [Cozza, Tanaka e Souza, 2009].

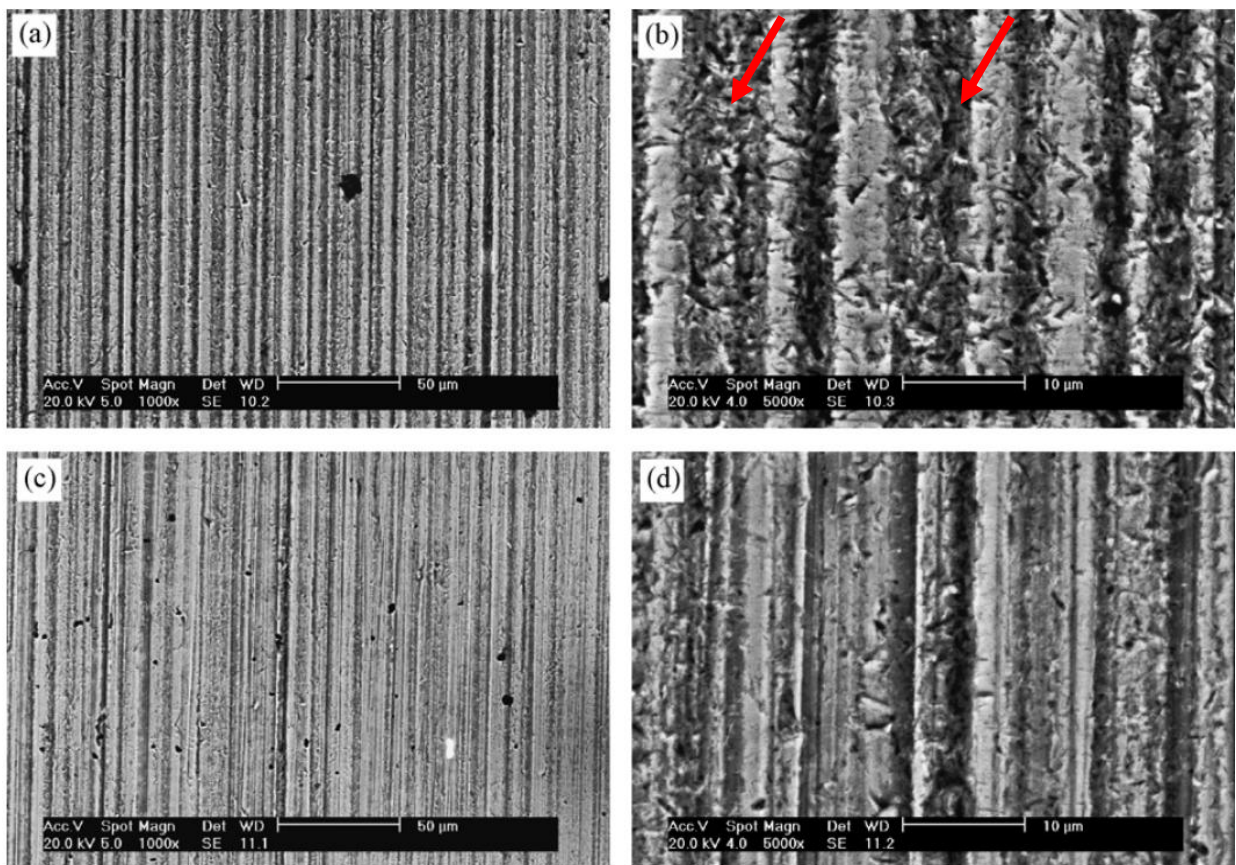


Figura 2.17 – Ocorrência do desgaste por micro rolamento. (a) e (b) força normal constante 1,25 N; (c) e (d) força normal constante 5 N. Distância de rolamento 100 m.
 [Cozza, Tanaka e Souza, 2009]

Segundo Rutherford e Hutchings [1996], para o ensaio de microabrasão é necessária uma pequena área da amostra para o teste, juntamente com uma pequena profundidade de penetração, significando que o teste de microabrasão pode ser ideal para estudos de pequenas amostras de materiais e componentes de engenharia de superfície.

O modelo de teste de microabrasão segundo Rutherford e Hutchings [1996] pode ser observado na forma esquemática, Figura 2.18, onde a esfera gira contra uma amostra na presença de uma solução de partículas abrasivas. Essa técnica é adequada para avaliação da resistência ao desgaste de superfície de diversos componentes de engenharia. Este ensaio é capaz de operar com amostras muito pequenas, de superfícies planas ou curvas e ainda permite estudar revestimentos finos.

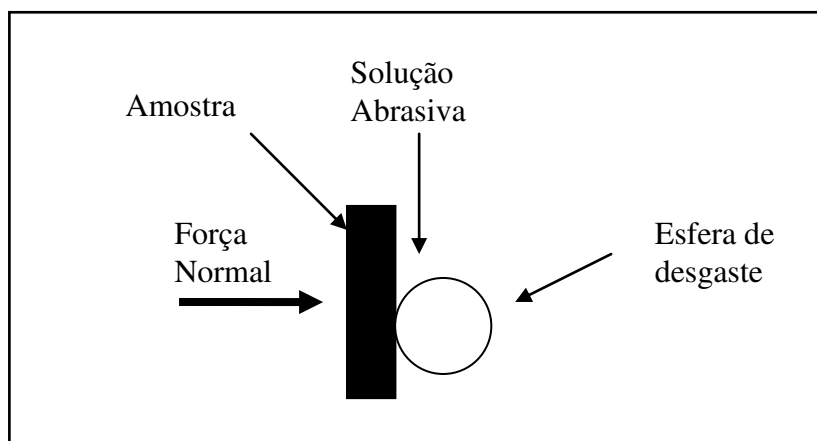


Figura 2.18 – Diagrama esquemático do ensaio de microabrasão.

Para utilizar o método de microabrasão para avaliar a resistência ao desgaste abrasivo é imprescindível a presença da abrasão a dois ou três corpos. As equações que permitem calcular o coeficiente de desgaste a partir do volume do material removido foram estabelecidas por Rutherford e Hutchings [1996], no caso de amostras planas e para o cálculo independente do coeficiente de desgaste k de um filme e ou do substrato.

No ensaio de desgaste por microabrasão, do tipo esfera sobre placa, uma calota esférica é gerada sobre a superfície da amostra ensaiada, (Figura 2.19), devida a perda de material, no contato da esfera amostra e sobre a ação do abrasivo. De acordo com o volume da calota esférica é possível determinar o coeficiente de desgaste do material. [Allsopp e Hutchings, 2001; Colaço, Pina e Vilar, 1999; Pinto, 2004].

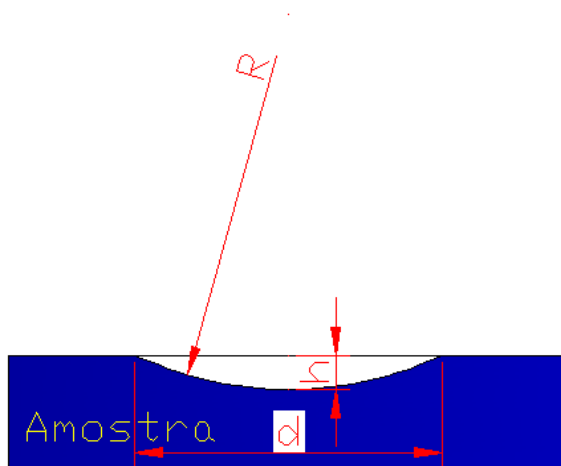


Figura 2.19 – Calota esférica formada pelo ensaio de microabrasão.

O volume V da calota pode ser obtido da seguinte maneira:

$$V = \frac{\pi}{3} \cdot h^2 \cdot (3 \cdot R - h) \quad (6)$$

Onde R é o raio de curvatura (raio da esfera) e h é a altura.

Mas,

$$\left(\frac{d}{2}\right)^2 + (R - h)^2 = R^2 \quad (7)$$

Ou seja,

$$\frac{d^2}{4R} - 2h + \frac{h^2}{R} = 0 \quad (8)$$

Se $R \gg h$ vem,

$$h \approx \frac{d^2}{8R} \quad (9)$$

$$V = \frac{\pi}{3} \cdot \frac{d^4}{64R^2} (3R - h) \quad (10)$$

Mas, sendo $R \gg h$:

$$V = \frac{\pi d^4}{64R} \quad (11)$$

A partir da equação 11 pode-se estabelecer as seguintes equações relacionadas com o diâmetro da calota esférica d :

➤ Taxa de desgaste Q dada por $Q = \frac{V}{L}$, sendo L a distância percorrida pela esfera de raio

R :

$$Q = \frac{\pi d^4}{64RL} \quad (12)$$

➤ Coeficiente de desgaste K dado por $K = \frac{Q}{F_N}$, sendo F_N a força normal aplicada à superfície da amostra:

$$K = \frac{\pi d^4}{64RF_N L} \quad (13)$$

Segundo Colaço, Pina e Vilar [1999], os parâmetros de ensaio e os resultados obtidos no ensaio de microabrasão são: distância de ensaio, velocidade de rotação da esfera, carga aplicada e tipo de abrasivo. O ensaio pode ser reprodutível, desde que a distância rodagem seja superada e o valor mínimo adotado não seja inferior a 100 metros. Os resultados ainda estão relacionados com a carga aplicada e a granulometria das partículas abrasivas.

Segundo Hutchings [1998], o teste de desgaste micro-abrasivo produz informações importantes na avaliação do tratamento superficial, podendo ser empregado de modo satisfatório no processo de caracterização de superfícies tratadas termicamente.

De acordo com Cozza et al. [2007], com o aumento do tempo do ensaio de microabrasão e consequentemente da distância percorrida, existe também o aumento do diâmetro da calota formada. Sabendo que a severidade do teste é a força normal aplicada dividida pela área da calota, quanto maior o diâmetro da calota maior é sua área projetada e menor a severidade do teste, pois a força normal não varia durante o ensaio.

$$S_{teste} = \frac{F_N}{A_{Proj}} \times v \quad (14)$$

onde v é a velocidade tangencial da esfera de desgaste.

A presença do desgaste micro abrasivo por dois corpos, três corpos ou misto, está relacionada com a distância percorrida durante o ensaio que, quanto maior, maior a tendência de predominância do desgaste por três corpos pois, no início do teste, a pressão de contato é máxima e a área é mínima e as partículas abrasivas ficam incrustadas na esfera de desgaste gerando o desgaste por dois corpos (alta severidade). No momento em que essa área de contato aumenta, a pressão irá diminuir, existindo então uma maior tendência das partículas abrasivas deslizarem entre a amostra e a esfera (menor severidade) [Cozza et al., 2007].

2.4 Ensaio de corrosão

A maioria dos materiais apresenta algum tipo de interação com os mais diferentes meios, em maior ou menor grau. Este comportamento compromete a utilidade do material devido à deterioração de suas propriedades mecânicas.

Todo tipo de corrosão que ocorre na presença de umidade faz parte da chamada corrosão úmida. A umidade, juntamente com a presença de sais e poluentes gasosos, forma uma solução eletrolítica, ou seja, uma solução que contém íons. Esta solução aquosa é condutora de eletricidade, sendo chamada de eletrólito. Portanto na corrosão úmida o material metálico encontra-se em contato com um eletrólito [Gemelli, 2001].

Estudos comprovaram que o tratamento de superfície por fusão a laser tem sido muito bem empregado e com resultados satisfatórios, tanto com aços inoxidáveis, quanto com ligas de ferro-alumínio e ainda com aços ligados ao cromo [ASM Metals Handbook, vol.13, 1992].

Em condições ambientais específicas, alguns metais e ligas normalmente ativos, perdem sua reatividade química tornando-se extremamente inertes. Esse fenômeno, denominado passividade é exibido pelo cromo, ferro, níquel, titânio e muitas de suas ligas. O comportamento passivo resulta da formação de um filme óxido muito fino altamente aderente sobre a superfície do metal e que serve como barreira de proteção contra uma corrosão adicional. Os aços inoxidáveis são extremamente resistentes à corrosão em meio a uma grande variedade de atmosferas. Apresentam no mínimo 11% de cromo que, em solução sólida com o ferro, minimiza a formação de ferrugem e, ao invés disso, é formada uma película protetora sobre a superfície em atmosferas oxidantes, ocorrendo, portanto, o fenômeno de passivação [Callister, 2007].

Ainda, segundo Callister [2007], o fenômeno da passivação pode ser explicado em termos de curvas de potencial de polarização em função do logaritmo da densidade de corrente. A curva de polarização típica de um metal que se passiva terá o formato mostrado na Figura 2.20. Em

valores de potencial relativamente baixos, dentro da região ativa, o comportamento é linear, como acontece para os metais normais. Com o aumento do potencial, a densidade de corrente diminui rapidamente até um valor muito baixo, o qual permanece independente do potencial, sendo esta região denominada passiva. Finalmente, em valores de potenciais ainda maiores, a densidade de corrente aumenta novamente em função do potencial, na região transpassiva [Sedriks, 1996; Beddoes et al., 1999].

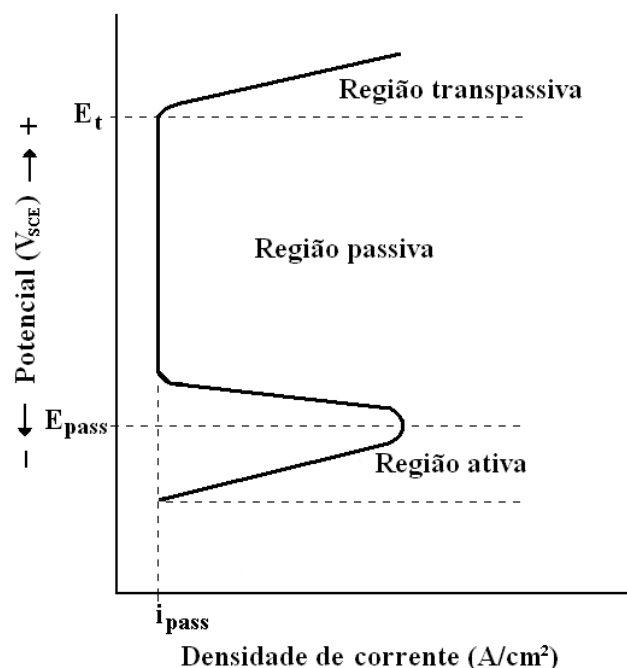


Figura 2.20 – Representação esquemática da curva de polarização para um aço inoxidável. [Adaptado de Sedriks, 1996]

O tratamento de superfície por refusão a laser em aço inoxidável martensítico produz uma zona tratada que depende dos parâmetros utilizados, gerando assim uma camada homogênea que se produzida com sobreposição de 50% possui uma resistência ainda maior à corrosão e a formação de pites [Escudero e Belló, 1992; Van Ingelgem et al., 2007].

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Aço inoxidável martensítico ASTM 487 CA6NM

Foram adquiridas amostras de aço inoxidável martensítico ASTM 487 CA6NM, temperado e revenido cuja composição química é apresentada na Tabela 3.1. A fim de verificar a composição do material fornecido, foi feita uma análise de composição química via espectrometria de absorção atômica. A composição química resultante também pode ser observada na Tabela 3.1 e pode-se concluir que o aço recebido pode realmente ser classificado como o ASTM 487.

Tabela 3.1 – Composição Química do Aço Inoxidável Martensítico ASTM 487 CA6NM (%).

ELEMENTO	ANÁLISE	ASTM A 487M
C	0,03	0,06
Si	0,40	1,00
Mn	0,74	1,00
P	0,03	0,04
S	0,003	0,03
Cr	12,75	11,5 – 14,0
Ni	3,78	3,5 – 4,5
Cu	0,21	0,5
Mo	0,4	0,4 – 1,0
V	0,037	0,05
W	0,02	0,1

As amostras para ensaio foram cortadas nas dimensões 80 x 30 x 8 [mm]. Previamente ao tratamento de superfície de fusão com laser, fez-se necessária a preparação das superfícies com o mesmo procedimento utilizado na preparação de amostras para metalografia. As amostras foram lixadas com lixa 1200 mesh, o jateamento foi feito com granalha de ferro e a limpeza com jato de ar proporcionando superfícies limpas, com rugosidade uniforme, paralela e de característica opaca visando assim diminuir a reflexão do laser, aumentando a eficiência do tratamento.

3.2. O tratamento de superfície por refusão a laser

O laser utilizado no tratamento de superfície é um laser a fibra dopada com Itérbio (Yb – fiber laser), bombeado por diodos, emitindo radiação no comprimento de onda de 1070nm, com 2000W de potência máxima. O laser tem uma fibra primária de 50µm de diâmetro, acoplada a uma fibra secundária (de processo) com 100µm de diâmetro. Com o sistema óptico instalado o diâmetro feixe focalizado é de aproximadamente 100µm. A cabeça do laser está acoplada a uma mesa de coordenadas CNC (Computer Numerical Control) de três eixos, com velocidade de processamento de até 200mm/s área útil de processo 450mm x 450mm. O sistema de processamento permite a utilização de diferentes gases de proteção: N₂, O₂, Ar e He. O laser, Figura 3.1, se encontra instalado no IEAV – Instituto de Estudos Avançados do CTA – ITA, em São José dos Campos – SP. A Figura 3.2, apresenta o feixe de laser durante um dos processos de tratamento sobre a amostra de aço inoxidável martensítico. Todos os ensaios foram realizados com o modo contínuo.



Figura 3.1 – Equipamento de laser a fibra Nd – YAG, instalado no IEAv.

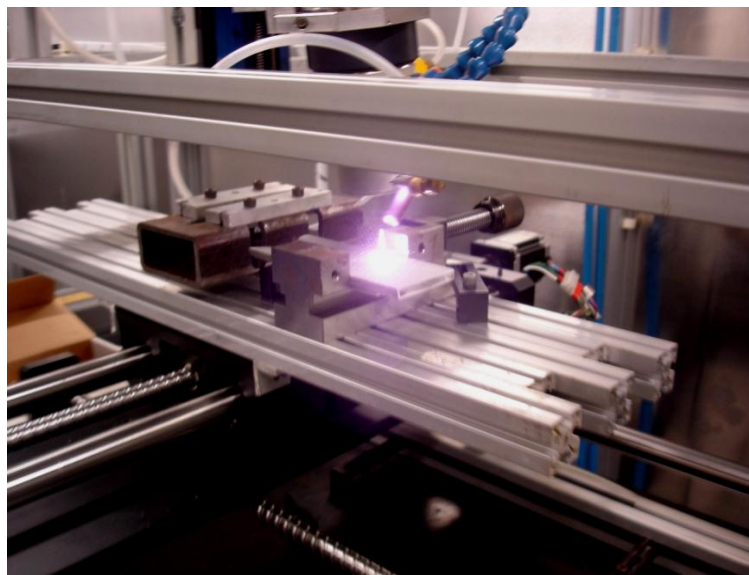


Figura 3.2 – Processo de tratamento de superfície do aço inoxidável martensítico.

A fim de se obter o tratamento de superfície no aço inoxidável martensítico ASTM 487 CA6NM se fez necessário uma completa investigação de todas as variáveis de processo do laser, tais como potência, velocidade e defocagem. Para que estes parâmetros sejam determinados, foram realizadas trilhas, Figura 3.3, com vários conjuntos de potência, velocidade e defocagem. Os valores utilizados para tal investigação são apresentados na Tabela 3.2. Como podemos observar a potência se manteve constante a 400W, a velocidade variou de 600mm/min a 1200mm/min e a defocagem para cada conjunto potência e velocidade variou 6 a 18mm, sendo produzidas 21 trilhas que foram criteriosamente analisadas com relação ao seu formato e dimensões, microestrutura e dureza para a definição do conjunto ótimo a ser utilizado para recobrimento total da amostra.

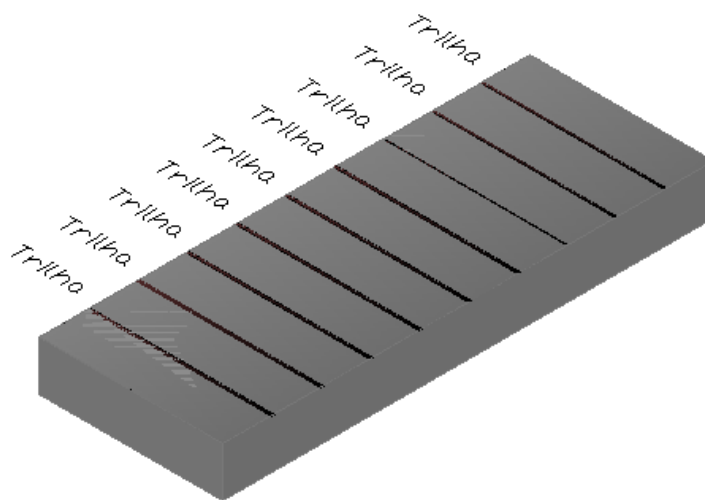


Figura 3.3 – Representação esquemática das trilhas processadas a laser em uma amostra de aço inoxidável martensítico ASTM 487M.

Tabela 3.2 – Valores de potência, velocidade e defocagem utilizados para obtenção do parâmetro ideal de recobrimento para o tratamento de superfície por fusão a laser.

Parâmetro	Intensidade	Unidade
Potência	400	[W]
Velocidade	600, 1000 e 1200	[mm/min]
Defocagem	6, 8, 10, 12, 14, 16 e 18	[mm]

Para se conseguir um recobrimento total da amostra e garantir uma espessura homogênea de tratamento foi necessário fazer uma sobreposição de trilhas de 60% conforme esquematizado na Figura 3.4. Os parâmetros escolhidos para recobrimento total são apresentados na Tabela 3.3, 400W de potência, 600mm/min de velocidade, defocagem de 18mm e com 1s de parada entre as trilhas para resfriamento. Foi utilizado, durante o tratamento, argônio como gás de proteção, evitando a formação de poros e óxidos e garantindo a qualidade da camada formada.

Tabela 3.3 – Parâmetros escolhidos para o recobrimento total das amostras de aço inoxidável martensítico

Potência	Velocidade	Defocagem	Tempo de parada entre trilhas
400 [W]	600 [mm/min]	18 [mm]	1 [s]

Tilhas Sobrepostas



Figura 3.4 – Representação da sobreposição das trilhas formadas por passadas de laser consecutivas.

As amostras obtidas pelo tratamento a laser foram cortadas com auxílio de uma serra circular com refrigeração e embutidas em baquelite para observação das microestruturas formadas nas secções transversais à direção de deslocamento do feixe de laser, possibilitando obter as dimensões das poças formadas pelas trilhas de laser.

3.3. Análise da microestrutura

As superfícies das amostras foram submetidas ao processo tradicional de preparação de amostras para metalografia, até o polimento final com pasta de diamante de $1\mu\text{m}$. Depois de devidamente polidas as amostras foram atacadas quimicamente com reagente Villela (50ml de HCl e 10g de ácido pícrico em 1000ml de álcool etílico) por 10s. As microestruturas foram primeiramente analisadas em um microscópio óptico – MO, pertencente ao LABIOMECC, UNICAMP, depois analisadas por um microscópio eletrônico de varredura – MEV, pertencente a FEM, UNICAMP.

A análise da microdureza Vickers foi realizada por um microdurômetro pertencente ao LABIOMECH, UNICAMP e, baseando-se na norma ASTM E 384, 2008, foi criado um perfil de dureza, analisando assim a região tratada pelo laser, a zona termicamente afetada pelo tratamento e seu substrato. A análise de difração de raios-X, foi realizada no IPEN – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – USP – SP, nas amostras recobertas pelo parâmetro ideal e nas amostras sem tratamento, como recebidas.

3.4. Ensaio de corrosão eletroquímico

O ensaio eletroquímico realizado foi o de passivação com o interesse de obter os valores de corrente e potencial para formação do filme de proteção. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Degradação de Materiais e Desenvolvimento de Revestimentos do DEMA/FEM da UNICAMP. O equipamento utilizado para o levantamento das curvas de passivação foi o Potentiostat/Galvanostat Modelo 237A da EG&G Princeton Applied Research.

As amostras foram ensaiadas em célula eletroquímica em presença do eletrodo de calomelano saturado, utilizado como eletrodo de referência, juntamente com o contra eletrodo de platina, como pode ser observado na representação esquemática da Figura 3.5. As amostras com e sem tratamento foram ensaiadas em uma solução de água destilada e NaCl com concentração de 3,5% em peso. Cada amostra foi ensaiada por três vezes com o intuito de observar a reprodutibilidade dos resultados e , conforme os parâmetros apresentados na Tabela 3.4, a velocidade de varredura adotada foi de 1mV/s, e o potencial variou de -0,1 a 3V.

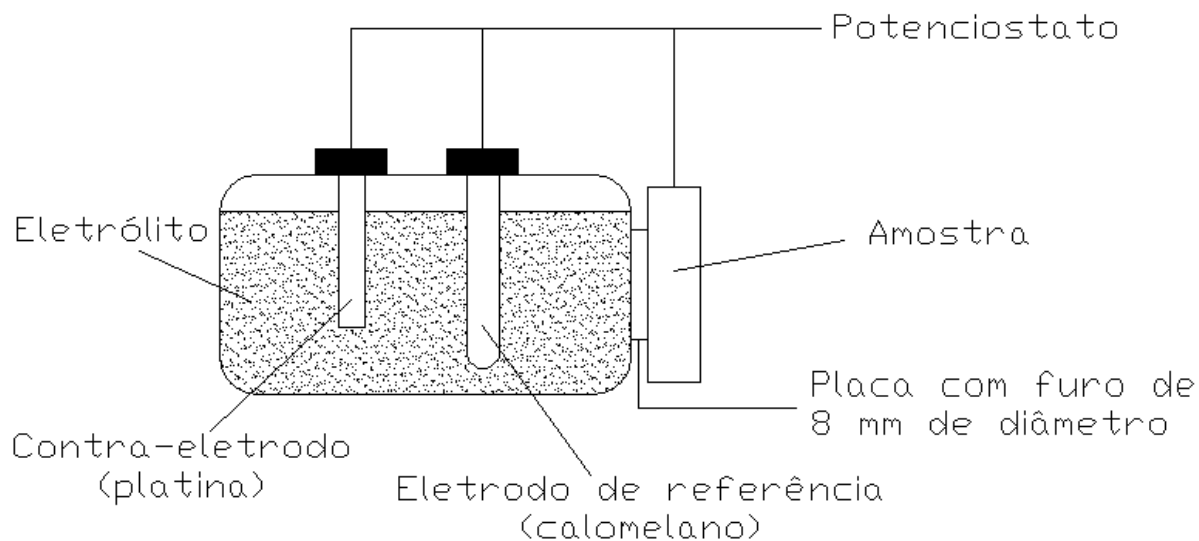


Figura 3.5 – Representação esquemática da célula de corrosão utilizada.

Tabela 3.4 – Parâmetros utilizados nos ensaios de corrosão eletroquímica.

<i>Parâmetros</i>	<i>Potencial Inicial [V]</i>	<i>Potencial final [V]</i>	<i>Velocidade de Varredura [mV/s]</i>
Valores	-0,1	3	1

3.5. Ensaio de Desgaste micro-abrasivo

Para identificar a influência do tratamento de superfície de fusão a laser nas propriedades de desgaste abrasivo do aço inoxidável martensítico ASTM 487M foram realizados ensaios de desgaste micro abrasivo. Para tal procedimento foi utilizada uma máquina de desgaste por microabrasão do tipo esfera sobre placa apresentada na Figura 3.6 O equipamento foi construído pela Prof^a. Dr^a. Maria Aparecida Pinto em seu projeto de pós-doutorado – Processo FAPESP 03/11255-8.

O ensaio de desgaste por microabrasão consiste em uma esfera metálica de aço inoxidável de 25mm de diâmetro que gira contra a amostra na presença de líquido abrasivo. Antes do ensaio

de desgaste por microabrasão, para eliminar qualquer irregularidade na rugosidade da amostra, o que poderia mascarar o resultado, as mesmas foram lixadas até a lixa 1200 mesh e polidas com pasta de diamante 1µm. Após a preparação, a amostra é fixada e forçada contra a esfera rotativa previamente atacada com reagente químico Villela durante 10 segundos a fim de produzir uma fina camada que ajuda no arrastamento das partículas abrasivas [Trezona, Allsopp e Hutchings, 1999]. A força normal variou de 1 a 3N, conforme a Tabela 3.5, e para proporcionar a atmosfera de desgaste micro-abrasivo, foi utilizado o Carboneto de Silício-SiC, com partículas de até 5µm (F1200), e água destilada na concentração de 250g/l. Foram realizadas três calotas para cada conjunto de parâmetros.

O ensaio de desgaste foi realizado em amostras sem tratamento térmico de superfície e comparado com o desgaste realizado nas amostras após o tratamento de superfície utilizando a fusão por laser. Com isso foi possível confrontar os resultados obtidos e analisar qual o mecanismo, o tipo de desgaste presente e calcular o volume de desgaste em cada caso, para cada força normal aplicada. A equação utilizada para medir o volume de desgaste é equivalente a equação de Archad para desgaste:

$$V = \frac{\pi \cdot b^4}{64 \cdot R} [mm^3]$$

Para avaliar o tipo de desgaste presente na calota que pode ser observada na Figura 3.7, e quais eram suas dimensões após o ensaio de desgaste por microabrasão, foram utilizadas imagens obtidas pelo MEV.



Figura 3.6 – Máquina de desgaste micro-abrasivo.

Tabela 3.5 – Parâmetros utilizados para o ensaio de desgaste micro-abrasivo antes e após o tratamento de superfície por fusão a laser.

Parâmetros	Intensidade	Unidade
Força normal aplicada	1, 2 e 3	[N]
Material da esfera	AISI 420	-
Diâmetro da esfera	25	[mm]
Velocidade da esfera	100	[rpm]
Abrasivo	5	[μm]
Concentração do abrasivo	250	[g/l]
Distância percorrida	180	[m]

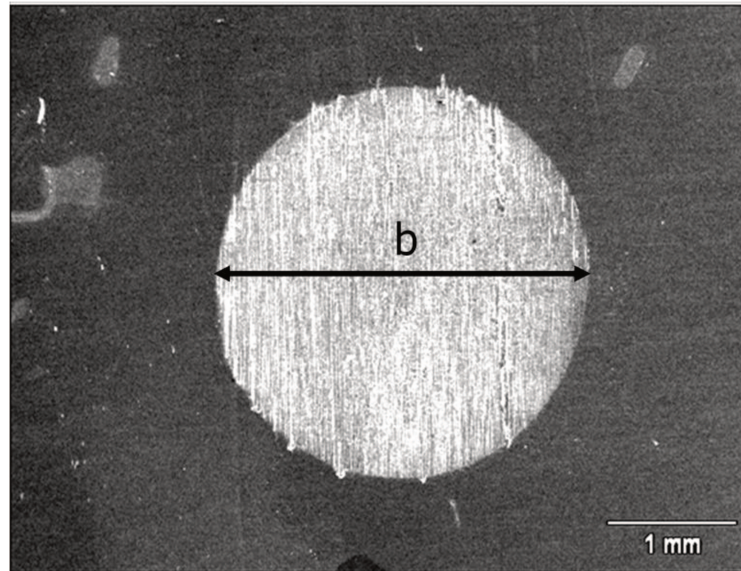


Figura 3.7 – Calota formada pelo ensaio de desgaste por microabrasão.

4. Resultados e Discussões

4.1. Microestrutura e Dureza

O primeiro passo para o tratamento de superfície por refusão a laser do aço inoxidável ASTM 487 CA6NM foi a determinação dos parâmetros ideais de tratamento e uma série de experimentos foi realizada. As Figuras 4.1 (a) e (b) apresentam dois dos resultados preliminares obtidos após a fusão com laser. Neste caso foram avaliadas dimensões e formato da poça de fusão oriundas das secções transversais das trilhas.

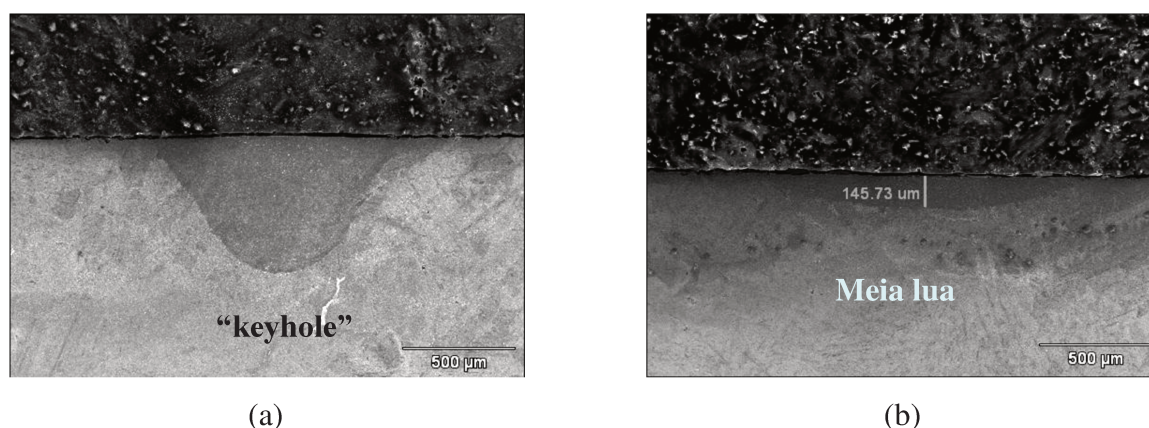


Figura 4.1 – Imagens obtidas via MEV, das secções transversais das trilhas, a fim de obter o parâmetro ideal para realização do tratamento de superfície com fusão a laser. (a) Apresenta uma poça no formato de “keyhole”; (b) Apresenta uma poça no formato de meia lua, onde sua profundidade é bem menor que sua largura.

[Arquivo próprio]

Para a definição dos parâmetros são decisivos o formato e as dimensões da poça. No caso da Figura 4.1 (a), pode ser observado um formato tendenciado a um “keyhole” onde a profundidade da poça fundida é praticamente igual a sua largura. Já na Figura 4.1 (b), pode ser observado o formato buscado, de meia lua, onde a largura da região fundida é bem maior que sua profundidade. Outro fator importante analisado foi a ausência de poros e trincas oriundas das tensões interna.

O parâmetro ideal do laser para recobrimento total das amostras foi 400W de potência, 600mm/min de velocidade, 18mm de defocagem, sobreposição de trilhas de 60%, gerando assim uma camada praticamente homogênea. A Figura 4.2 apresenta a micrografia da secção transversal da amostra tratada onde se pode notar a região fundida, a zona termicamente afetada – ZTA e o substrato do material. Foi possível definir muito bem as regiões apresentadas pelo aço inoxidável martensítico após o tratamento de superfície com fusão por laser. A porção mais clara é a zona fundida, que apresentou uma estrutura martensítica muito refinada. A zona termicamente afetada – ZTA possui uma espessura maior que a zona fundida e também apresenta uma estrutura martensítica. Por último o substrato do material, que manteve suas características iniciais inalteradas, temperado e revenido com estrutura martensítica.



Figura 4.2 – Estrutura do aço inoxidável ASTM 487 CA6NM. MO

A fim de determinar as fases presentes na microestrutura do substrato e da zona fundida foram realizadas difração de raios-X e imagens via MEV-EDS. Para o caso do substrato, o difratograma resultante, Figura 4.3, apresentou picos relativos à martensita (M) e ao carboneto de cromo Cr_7C_3 (C1) que estão presentes também no difratograma correspondente à região tratada, sendo que, nesse caso, surgiu o carboneto de cromo Cr_{23}C_6 (C2). Pode-se notar a ausência de austenita retida, fato que se deve à velocidade de varredura do feixe de laser. Segundo Conde et

al. [2000], quanto maior a velocidade de varredura do feixe de laser maior a porção de austenita retida. A austenita retida em grandes proporções reduz drasticamente os benefícios do tratamento de superfície por fusão a laser porque a austenita retida é instável e pode sofrer transformações causando variação dimensional, fragilidade e trincas [Colaço e Vilar, 1998].

A Figura 4.4, apresenta a imagem obtida via MEV da martensita refinada e de alguns carbonetos na região fundida pelo tratamento de superfície de fusão com laser e ausência de austenita retida. Este resultado está compatível com o obtido por Kaluba, Kaluba e Taillard [1999].

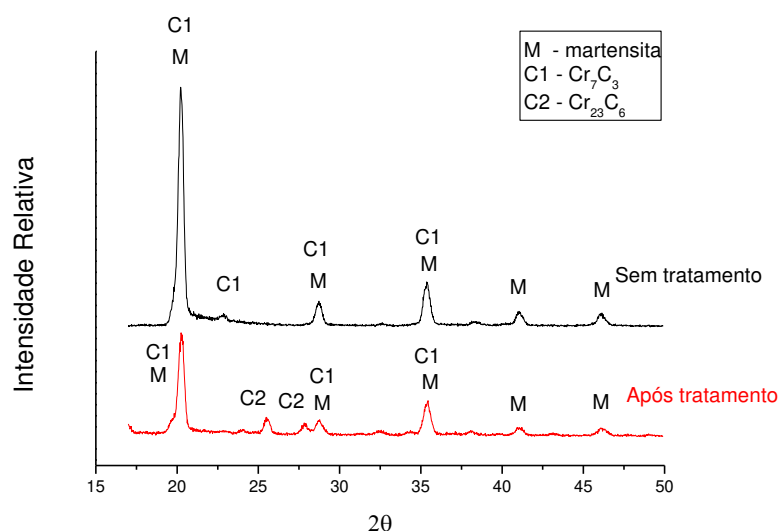


Figura 4.3 – Difratograma das amostras de aço inoxidável martensítico ASTM 487 sem e com tratamento de superfície por fusão a laser.

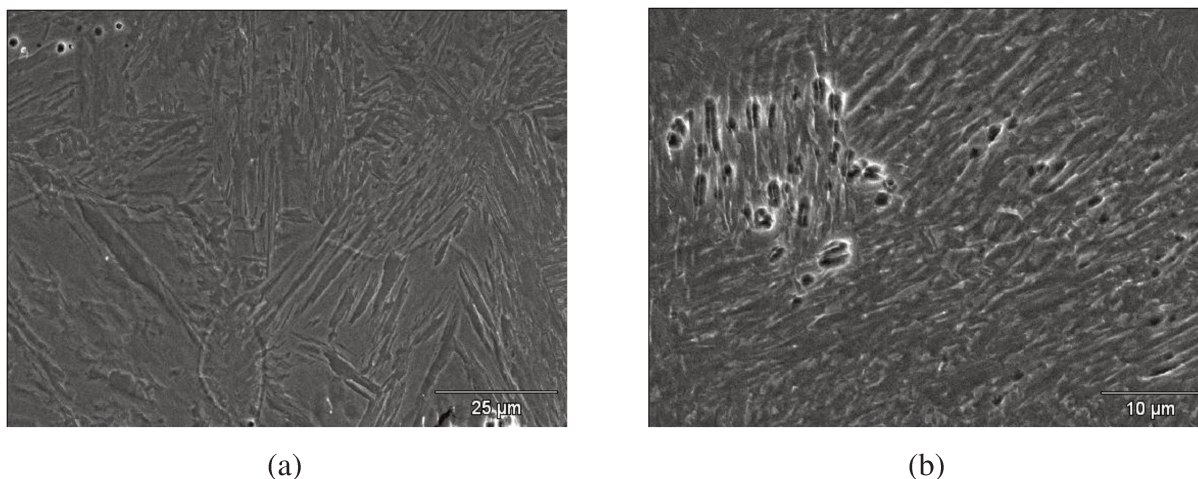


Figura 4.4 – Imagem obtida via MEV da região fundida pelo tratamento de superfície com laser, apresentando a martensita refinada e os carbonetos de cromo.

Visando comprovar que as pequenas esferas que aparecem na Figura 4.4 em meio a estrutura martensítica refinada eram de fato carbonetos de cromo, uma análise via MEV – EDS foi realizada e seu resultado é apresentado na Figura 4.5. O espectrômetro gerado pela análise evidencia o pico relativo ao elemento cromo, confirmando a presença de carboneto de cromo na região refundida.

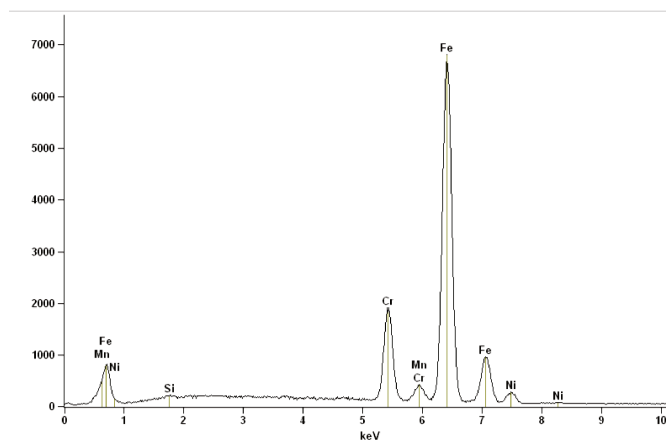


Figura 4.5 – Análise obtida via MEV – EDS do carboneto de cromo presente na região refundida do aço inoxidável martensítico.

Para finalizar esta primeira etapa de caracterização realizou-se um perfil de microdureza Vickers, de acordo com a norma ASTM E 384, 2008 e apresentada na Figura 4.6, estabelecendo a variação da microdureza na zona fundida, na ZTA e no substrato. A dureza média do material na

zona fundida foi 416 HV e no substrato 310 HV. Isso representou um aumento de dureza entre a zona fundida e o substrato de aproximadamente 34%.

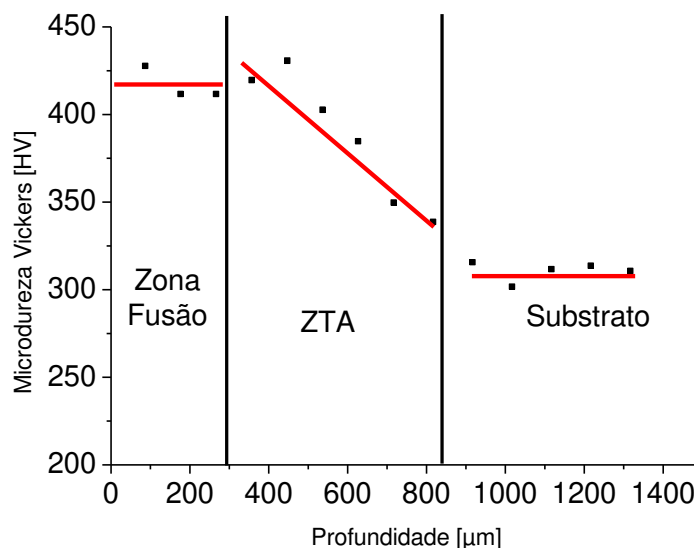


Figura 4.6 – Perfil de microdureza Vickers obtido para o aço inoxidável martensítico após o tratamento de superfície com laser.

4.2. Resistência ao Desgaste Micro Abrasivo

Um estudo de resistência ao desgaste micro-abrasivo foi realizado a fim de avaliar a influência do tratamento na resistência ao desgaste abrasivo para o aço inoxidável martensítico em questão antes e depois do tratamento de superfície de fusão por laser. Os resultados do ensaio de resistência ao desgaste micro-abrasivo são apresentados através de um gráfico na Figura 4.7, que representa a taxa de volume de material perdido durante o ensaio em função do diâmetro da calota produzida pelo ensaio para as diversas cargas (forças normais) que foram aplicadas [Stack e Mathew, 2003].

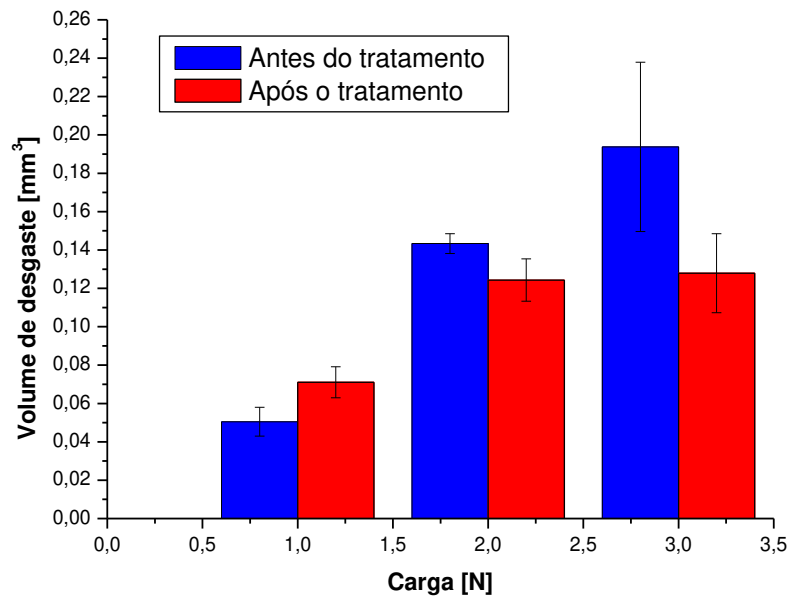


Figura 4.7 – Representação do volume de desgaste em função da carga normal aplicada, para o aço inoxidável martensítico antes e após a refusão por laser.

Foram avaliadas três cargas, 1N, 2N e 3N, para as amostras com e sem tratamento de superfície com laser. Alterando a carga normal aplicada ocorre variação no volume de desgaste e pode ocorrer também variação no mecanismo de desgaste envolvido.

Segundo Trezona, Allsopp e Hutchings [1999], para baixas concentrações de partículas abrasivas, abaixo de $0,01\text{g/cm}^3$ o volume de desgaste independe da carga aplicada mas, como neste caso, a concentração de abrasivo foi constante e de 250g/cm^3 , portanto a carga tem total influência no volume de desgaste.

Para a carga normal de 1N, o volume de desgaste mostrou-se superior na amostra após o tratamento de superfície com laser. Neste caso devido a força normal ser de baixa intensidade, a dureza obtida na superfície do material não influenciou no aumento da resistência ao desgaste abrasivo. O mecanismo de desgaste para a amostra sem tratamento é dois corpos, Figura 4.8, ou seja, as partículas de SiC ficaram endentadas na esfera de desgaste produzindo assim sulcos paralelos na amostra. Para a amostra com tratamento de superfície, o desgaste é misto, ou seja, parte dois corpos e parte três corpos, Figura 4.9. Parte das partículas rolaram soltas entre as

superfícies produzindo assim uma grande deformação, múltiplos sulcos sem direcionalidade e de espessuras e profundidades diferentes. Neste caso o fenômeno de desgaste por dois corpos tende a aparecer no centro da calota e o três corpos na periferia da calota [Trezona, Allsopp e Hutchings, 1999].

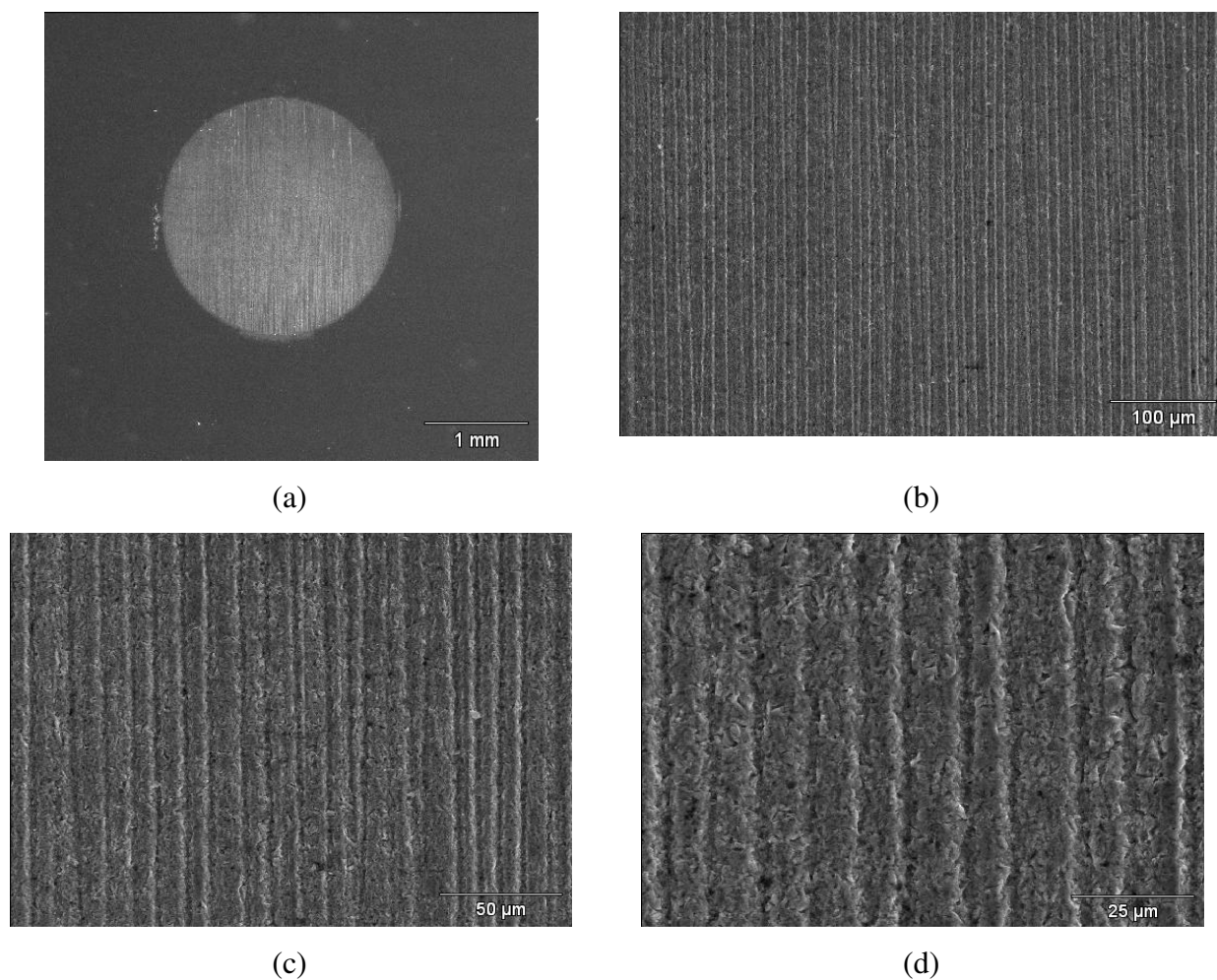


Figura 4.8 – Calota produzida após o ensaio de desgaste por microabrasão no aço inoxidável martensítico antes de ser submetido ao tratamento de superfície por fusão a laser. Carga de 1N.

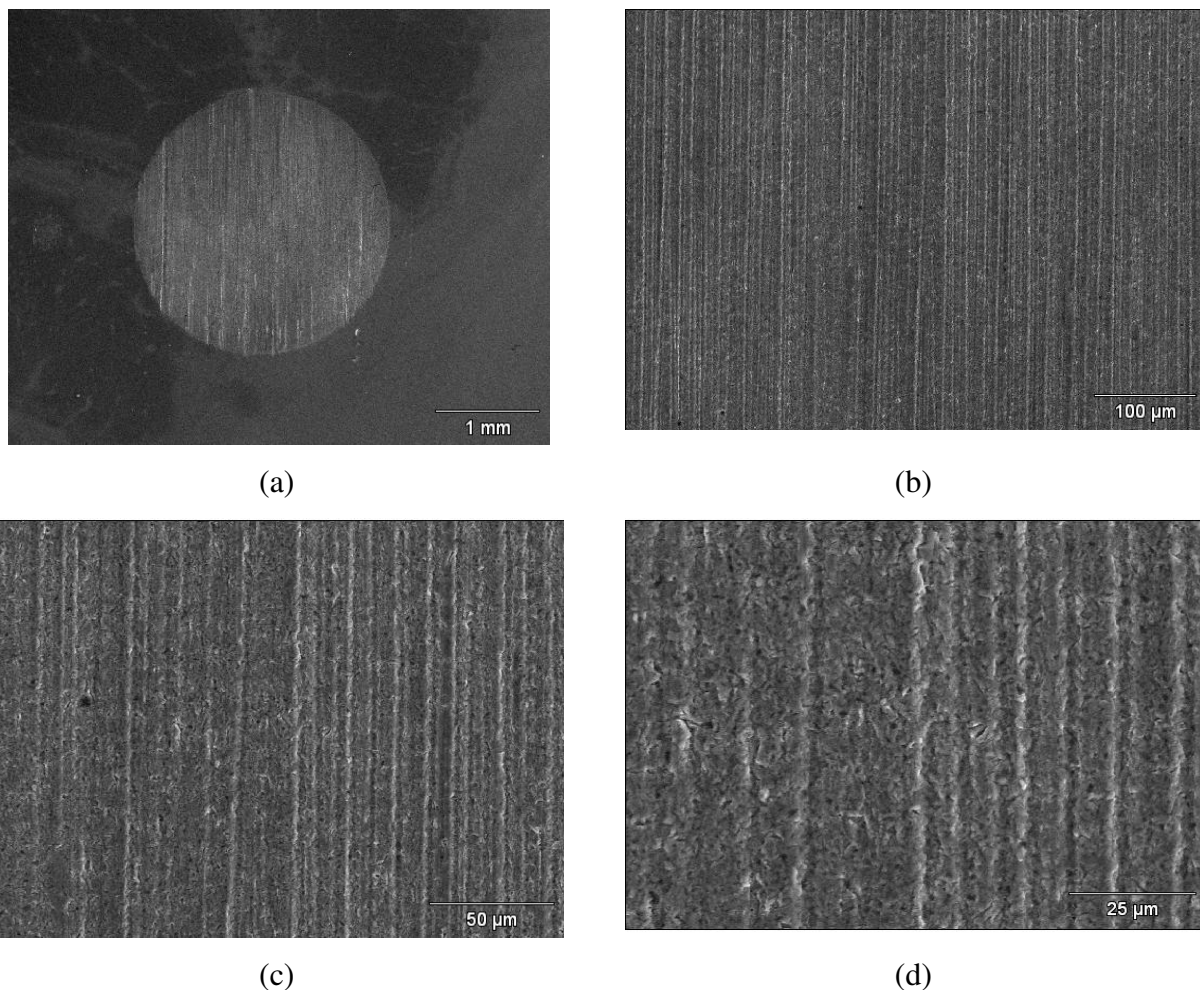


Figura 4.9 – Calota produzida após o ensaio de desgaste por microabrasão no aço inoxidável martensítico após ser submetido ao tratamento de superfície por fusão a laser. Carga de 1N.

Analisando a Figura 4.7, para as cargas de 2N e 3N o tratamento de superfície com fusão apresentou uma melhora na resistência ao desgaste, ou seja, teve um volume de desgaste inferior. Nos dois casos as calotas formadas pelo ensaio de microabrasão pela esfera de desgaste e as partículas de SiC, indicaram uma tendência, mesmo que pequena, a um formato oval. Isso acontece para altos valores de força normal, gerando assim uma deformação plástica desigual no início do teste. Esse fato prejudica a medição do diâmetro da calota e, por esse motivo, não se estendeu o teste para cargas superiores a 3N.

Imagens das calotas produzida nas amostras que foram submetidas ao desgaste abrasivo com força normal de 2N sem tratamento podem ser observadas na Figura 4.10. A Figura 4.11 apresenta as amostras após tratamento de superfície por fusão a laser depois do ensaio de

desgaste por microabrasão com carga de 2N. Observando as imagens com ampliações gradativas, fica evidente que o mecanismo de desgaste em ambos os casos é o mesmo, um misto entre dois corpos e três corpos, com presença predominante do desgaste abrasivo por dois corpos, riscos paralelos em espaçamentos praticamente constantes. Neste caso, a dureza superficial da camada fundida pelo tratamento de superfície a laser foi muito importante para garantir uma maior resistência ao desgaste, uma vez que retarda a deformação plástica que ocorre no início do teste devido à força normal aplicada [Quercia et al., 2001].

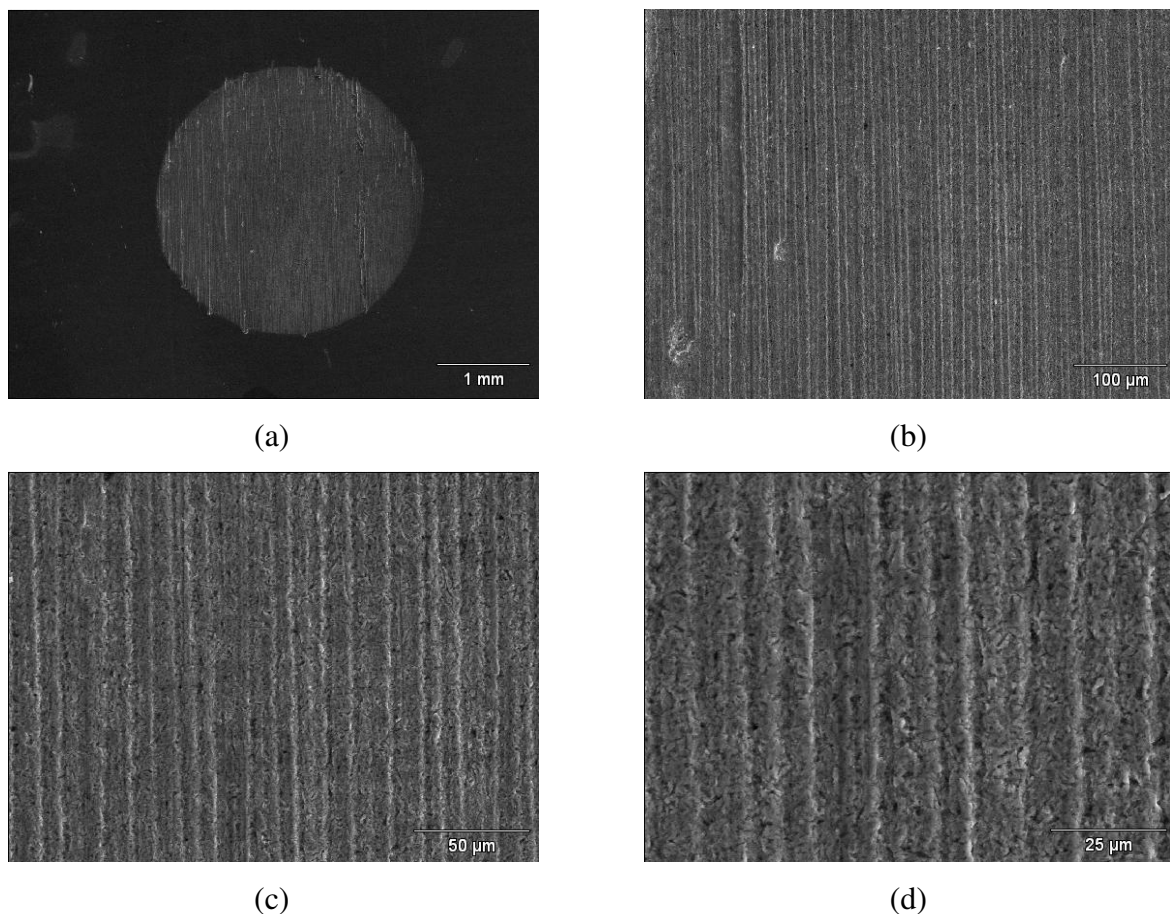


Figura 4.10 – Calota produzida após o ensaio de desgaste por microabrasão no aço inoxidável martensítico antes de ser submetido ao tratamento de superfície por fusão a laser. Carga de 2N.

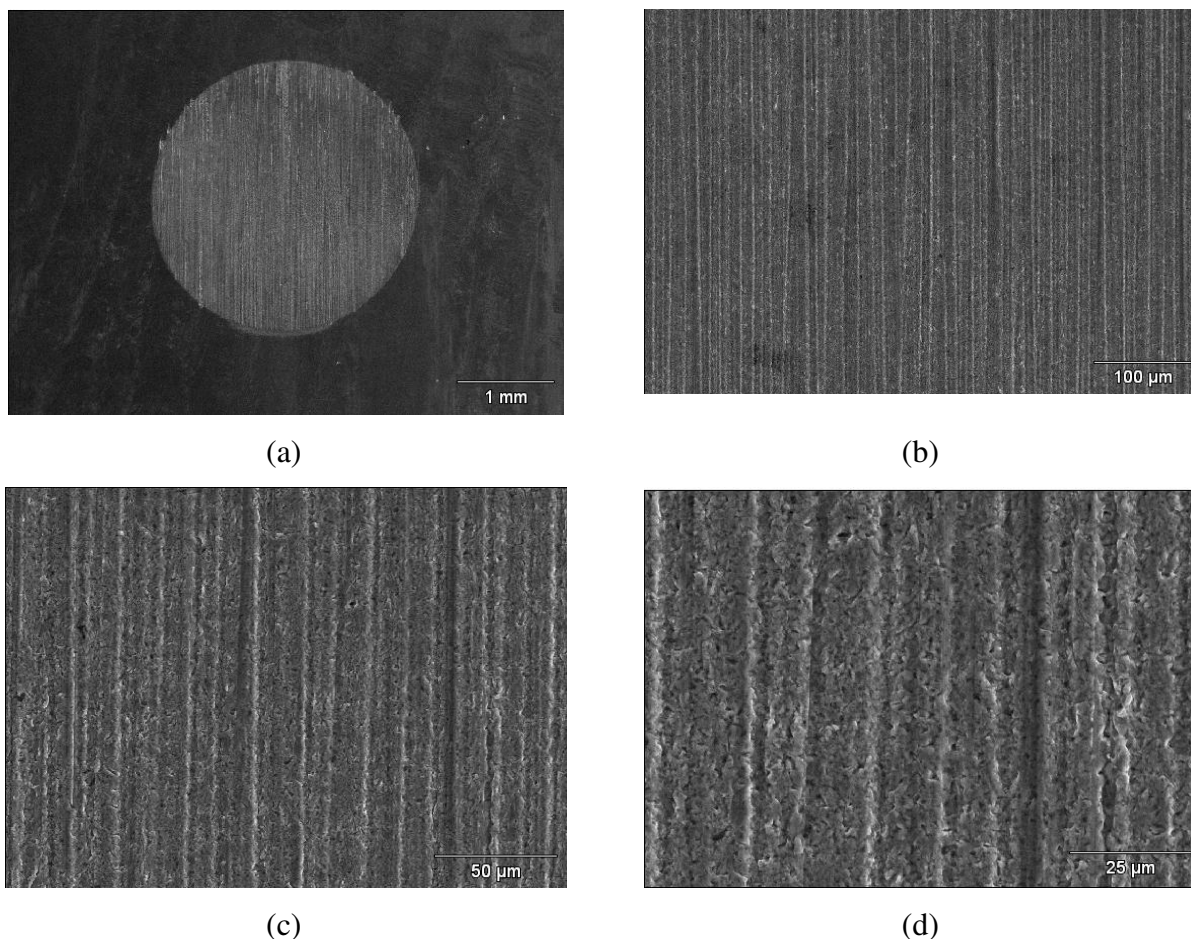


Figura 4.11 – Calota produzida após o ensaio de desgaste por microabrasão no aço inoxidável martensítico após ser submetido ao tratamento de superfície por fusão a laser. Carga de 2N.

No caso das amostras submetidas ao desgaste micro-abrasivo com carga de 3N, de acordo com o gráfico apresentado na Figura 4.7, observa-se um menor volume de desgaste para as amostras que foram submetidas ao tratamento de superfície por refusão a laser. Estes resultados podem ser observados nas Figuras 4.12 e 4.13. A Figura 4.12 apresenta imagens obtidas via MEV da calota e do mecanismo de desgaste envolvido no caso da amostra sem o tratamento de superfície e a Figura 4.13 apresenta imagens da calota e do mecanismo de desgaste para a amostra que teve sua superfície submetida à refusão por laser.

Como já foi mencionado, a amostra sem tratamento apresentou um pior resultado com relação a resistência ao desgaste abrasivo na escala micro. Mais uma vez a dureza da superfície da amostra tratada teve grande importância. O mecanismo de desgaste apresentado pela amostra sem tratamento de superfície na Figura 4.12 é um misto entre o desgaste por três corpos e por

dois corpos, como no caso anterior para a carga de 2N. Neste caso o tipo de desgaste abrasivo foi diferente, evidenciado pela grande deformação plástica nas rebarbas (debris) de desgaste, ocasionando a presença simultânea do microsulcamento, do microcorte e da microfadiga, causando um maior nível de desgaste. Segundo Zum-Gahr [1998], a perda de massa pode ocorrer devido à ação de muitas partículas abrasivas ou repetidas ações de uma mesma partícula e então o material pode ser sulcado para o lado repetidamente pela passagem das partículas e pode se quebrar por um ciclo de fadiga. Na Figura 4.12 (b) fica evidenciada essa deformação plástica que ocasionou a microfadiga.

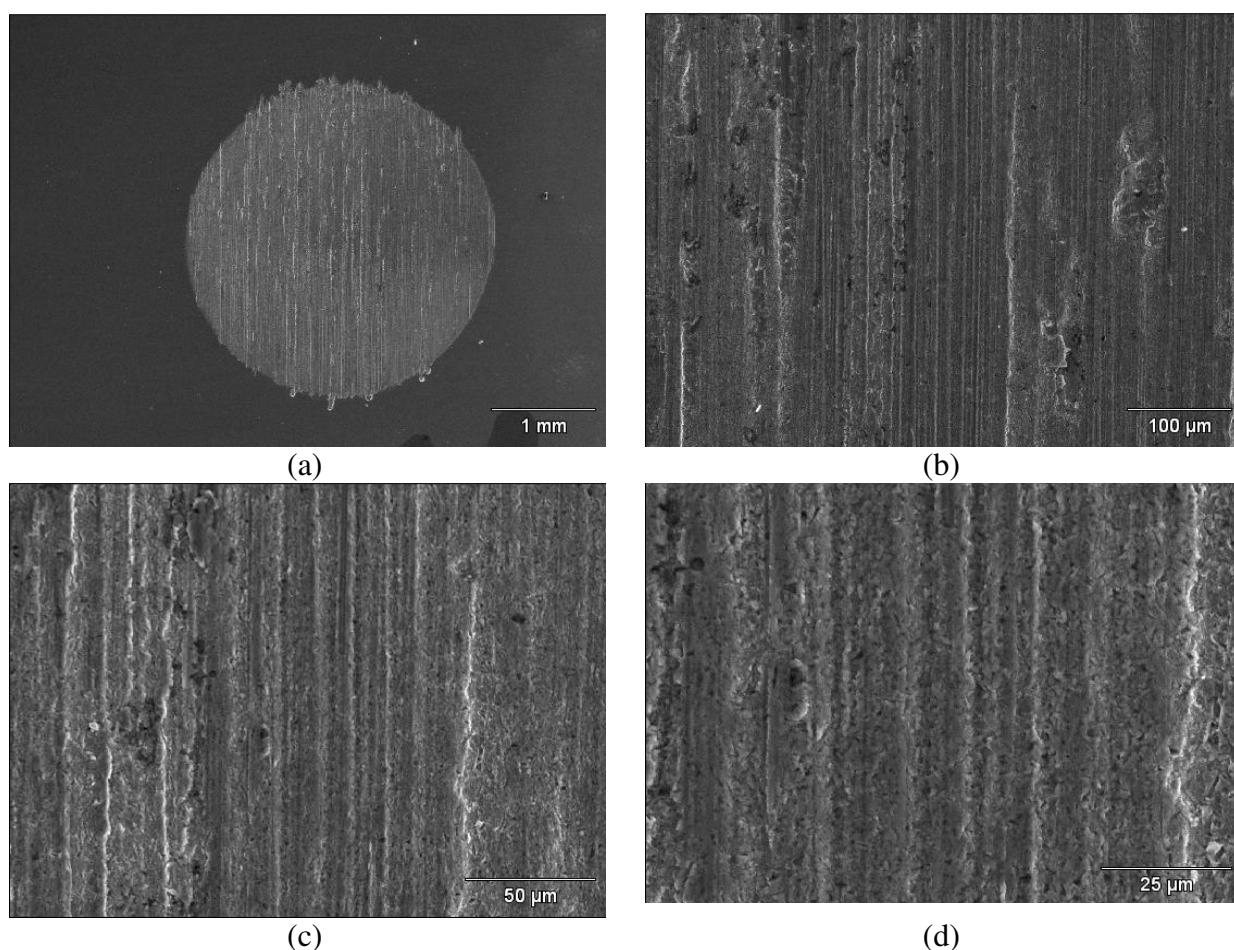


Figura 4.12 – Calota produzida após o ensaio de desgaste por microabrasão no aço inoxidável martensítico antes de ser submetido ao tratamento de superfície por fusão a laser. Carga de 3N.

Para a amostra de aço inoxidável martensítico que foi submetida ao tratamento de superfície por fusão a laser e ao ensaio de desgaste micro-abrasivo com carga de 3 N, os mecanismos e tipos de desgaste estão representados na Figura 4.13. Mais uma vez ficou

evidenciada a presença dos dois mecanismos de desgaste, dois corpos e três corpos, mas com uma tendência maior para o desgaste por dois corpos que, como já foi explanado, tem uma tendência menos danosa que o desgaste por três corpos. Outro motivo para um melhor resultado nesta amostra é o fato da deformação plástica presente em grande quantidade na amostra anterior ser muito menor neste caso, Figura 4.12 (b), ou seja, o desgaste por microfadiga é bem menor, ficando assim apenas o desgaste por microsulcamento e microcorte.

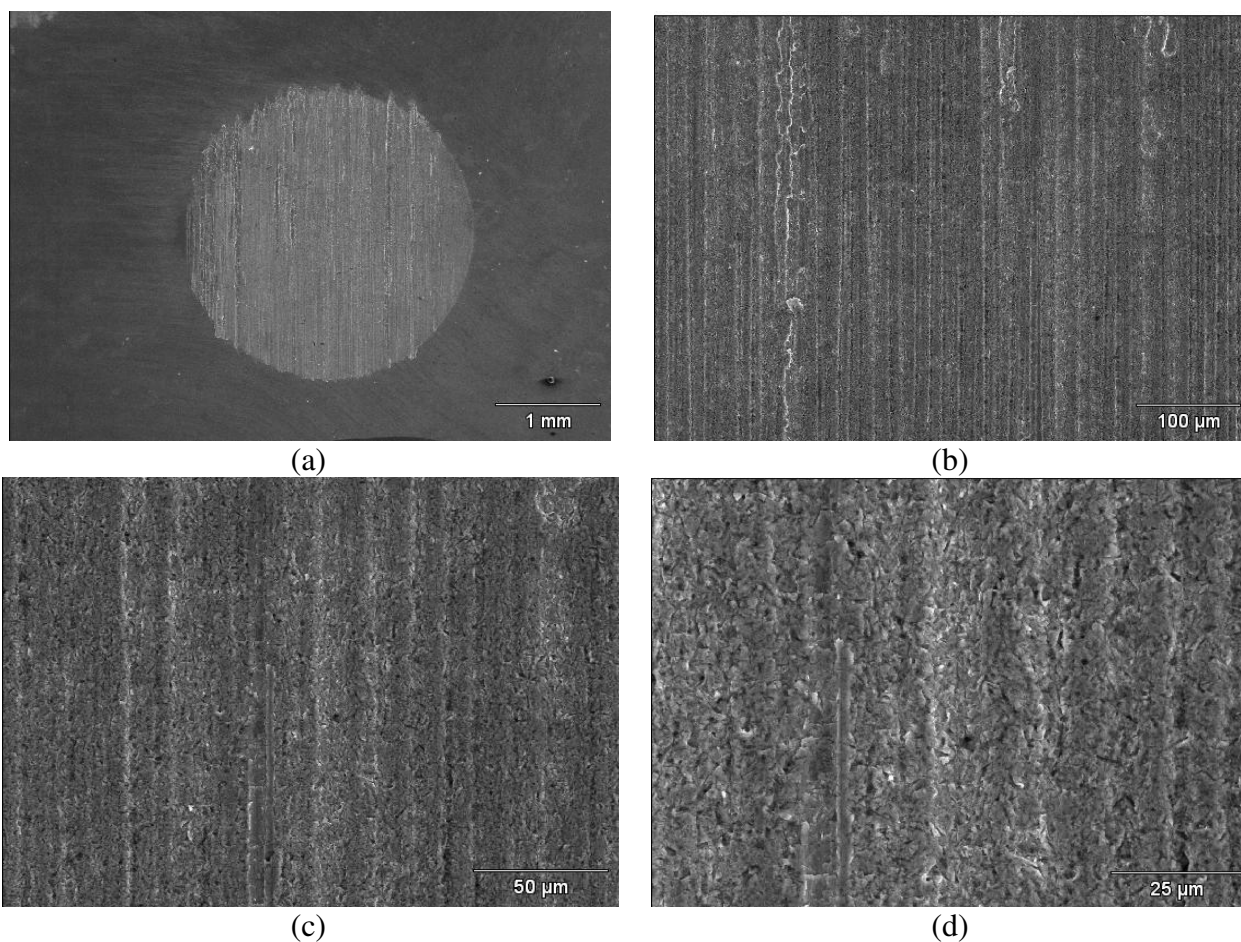


Figura 4.13 – Calota produzida após o ensaio de desgaste por microabrasão no aço inoxidável martensítico após ser submetido ao tratamento de superfície por fusão a laser. Carga de 3N.

4.3. Resistência à Corrosão

Analizando os resultados dos ensaios de corrosão eletroquímicos executados, foi feita uma avaliação simplificada e qualitativa do comportamento em corrosão do aço inoxidável ASTM 487M antes e depois do tratamento de superfície por refusão a laser, na tentativa de identificar os diferentes comportamentos em função da microestrutura formada.

A Figura 4.14 apresenta os resultados das curvas de polarização experimentais para o aço antes e depois do tratamento de superfície. Pode se observar que o material depois do tratamento apresentou um menor valor para a densidade de corrente de corrosão $I_{\text{corr}} = 5,6 \times 10^{-7} \mu\text{A}/\text{cm}^2$ em um potencial de corrosão mais alto $E_t = 0,25\text{mV}$, evidenciando assim uma maior resistência à corrosão. Este comportamento pode ser atribuído à maior homogeneidade da microestrutura.

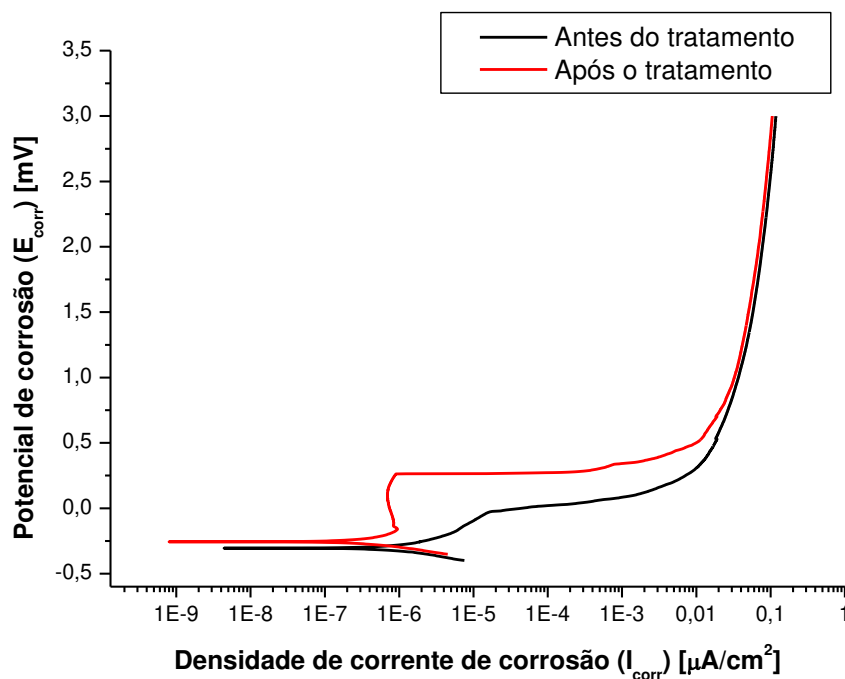


Figura 4.14 – Curvas de polarização do aço inoxidável ASTM 487M.

A Tabela 4.1 apresenta os valores de corrente de passivação, potencial de passivação e potencial transpassivo, evidenciando o já descrito sobre as curvas da Figura 4.14.

Tabela 4.1 – Valores de potencial e corrente de corrosão obtidos nos ensaios eletroquímicos do aço inoxidável ASTM 487M.

	$I_{corr} [\mu A/cm^2]$	$E_{pass} [mV]$	$E_t [mV]$
Antes do tratamento	$5,662 \times 10^{-6}$	- 0,19	- 0,03
Após o tratamento	$9,383 \times 10^{-7}$	- 0,16	+ 0,25

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1. Conclusões

- O tratamento de superfície por refusão a laser no aço Inoxidável martensítico ASTM 487M, promoveu a formação de uma camada refundida homogênea, que apresentou as seguintes fases: martensita temperada (M) e dois carbonetos de cromo o Cr_7C_3 (C1) e o Cr_{23}C_6 (C2).
- A superfície tratada apresentou um refino acentuado da microestrutura que proporcionou um aumento da dureza de 34%.
- No ensaio eletroquímico de passivação as amostras tratadas apresentaram a formação do filme passivo, aumento do potencial de corrosão e diminuição da densidade de corrente em relação às amostras não tratadas, o que indica uma tendência de melhora da resistência a corrosão das amostras tratadas.
- No caso das amostras tratadas, a resistência ao desgaste apresentou tendência de melhora para as cargas de 2N e 3N. Os mecanismos de desgaste presentes foram abrasão a dois corpos, abrasão a três corpos e misto.
- No ensaio de desgaste com força normal de 3N a amostra tratada apresentou maior resistência ao desgaste por microfadiga.

5.2. Sugestões para Trabalhos Futuros

- Com o intuito de mapear melhor o desgaste micro abrasivo deste aço inoxidável pode-se fazer ensaios com outros abrasivos, como por exemplo, a alumina, variando-se o tamanho das partículas e com maior variação das cargas de ensaio
- Fazer outros tipos de ensaio de corrosão, como por exemplo, ensaio de potencial de formação de pites para comprovar a eficiência do tratamento de superfície por laser na resistência à corrosão do aço inoxidável martensítico ASTM 487.

Referências

ADACHI, K., HUTCHINGS, I. M. Wear-mode mapping for the micro-scale abrasion test. **Wear**, v. 255, p. 23-29, 2003.

AKGUN, O. V., URGUN, M. and ÇAKIR, A. F. The effect of heat treatment on corrosion behavior of laser melted 304L stainless steel. **Material Science and Engineering A**, v. 203, p. 324-331, 1995.

ALLAN, G. K. Solidification of austenitic stainless steel. **Ironmaking and Steelmaking**, v. 22, 1995.

ALLSOPP, D. N., TREZONA, R. I., HUTCHINGS, I. M. The effects of ball conditions in micro-scale abrasive wear test. **Tribology Letters**, v. 5, p. 159-264, 1998.

ASM METALS HANDBOOK, vol. 1. **Properties and Selection Irons, Steel, and High-Performance Alloy**, 2005.

ASM METALS HANDBOOK, vol. 4. **Heat Treating**, 1991.

ASM METALS HANDBOOK, vol. 9. **Metallography and Microstructure**, 2004.

ASM METALS HANDBOOK, vol. 18. **Friction, Lubrication, and Wear Technology**, 1992.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM A487/A 487M-07: Standard Specification for Steel Castings Suitable for Pressure Service**. USA, 2007.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E 384-08a: Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials**. USA, 2008.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM G40-10: Standard Terminology Relating to Erosion and Wear**. USA, 2010.

BEDDOES, J., PARR, J. G. **Introduction to stainless steel**. USA: ASM International, 1999, 315p.

BRIZMER, V., KIGERMAN, Y. and ETSION, I. A laser surface textured parallel thrust bearing, **Tribology Transactions**, v. 46, n.3, p. 397-403, 2003.

BURAKOWSKI, T. and WIERZCHON, T. **Surface engineering of metals: principles, equipment, technologies**. New York: CRC Press, p.592, 1999.

BURWELL JR., J.T. Survey of possible wear mechanisms. **Wear**, v. 1, n. 2, p. 119-141, 1957.

CALLISTER JR., W. D. **Ciência e engenharia de materiais uma introdução**, Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2007, 705p.

CESCHINI, L. et al. Friction and wear behavior of sintered steels submitted to sliding and abrasion tests, **Tribology International**, v. 39, p. 748-755, 2006.

COLPAERT, H. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. São Paulo, Editora Edgard Blücher, 2008, 652p.

CONDE A. et al. Corrosion behaviour of steels after laser surface melting. **Materials and Design**, v.21, n.5, p. 441-445, 2000.

COLAÇO, R., VILAR, R. Effect of the processing parameters on the proportion of retained austenite in the laser surface melted tool steels. **Journal of Materials Science Letters**, v. 17, p. 563-567, 1998.

COLAÇO, R., VILAR, R. Stabilisation of retained austenite in laser surface melted tool steel. **Materials Science & Engineering A**, v.385, p. 123-127, 2004.

COLAÇO, R., PINA, C., VILAR, R. Influence of the processing conditions on the abrasive wear behaviour of laser surface melted tool steel. **Scripta Materialia**, v. 41, n. 7, p. 715-721, 1999.

COZZA, R. C. et al. Relationship between test severity and wear mode transitions in micro-abrasive wear tests. **Wear**, v. 263, p. 111-116, 2007.

COZZA, R. C., TANAKA, D. K., SOUZA, R. M. Friction coefficient and abrasive wear modes in Ball-cratering tests conducted at Constant normal force and Constant pressure – Preliminary results. **Wear**, v. 267, p. 61-70, 2009.

CRAFER, R.C., OAKLEY, P.J. **Laser processing in manufacturing**. London: Chapman & Hall, p.292, 1993.

DIN 50320. Análise sistemática dos processos de desgaste. Classificação dos Fenômenos de desgaste, **Metalurgia & Materiais**, v. 53, p. 619-622, 1997.

DUBEY, A. K., YADAVA, V. Laser beam machining – A review. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, v. 48, p. 609-628, 2008.

ESCUDERO, M. L., BELLÓ, J. M. Laser surface treatment and corrosion behaviour of martensitic stainless AISI 420 steel. **Materials Science and Engineering**, v.158, n.2, p. 227-233, 1992.

GEE, M. G. The use of PC scanners in micro-abrasion wear testing. **Wear**, v. 259, p. 1448-1452, 2005.

GEE, M. G. et al. Progress towards standardization of ball cratering. **Wear**, v. 255, p. 1-13, 2003.

GEMILLI, E. **Corrosão de materiais metálicos e sua caracterização**. Rio de Janeiro: LTC, 2001, 178p.

GOLNABI, H., MAHDIEH, M. H. Trend of laser research developments in global level. **Optics & Laser Technology**, v.38, p.122-131, 2006.

HAAKE, J., ZEDIKER, M. Laser Processing. **Advance Materials & Processes**, v. 158, n.4, p.35-37, 2000.

HUTCHINGS, I.M. Abrasive and erosive wear tests for thin coatings: a unified approach. **Tribology International**, v.31, n.1-3, pp.5-15, 1998.

HUTCHINGS, I.M. **Tribology – Friction and Wear of Engineering Materials**. London: Edward Arnold, 1992, 273p.

IERARDI, M. C. F. et al. Structural aspects and mechanical properties induced by laser remelting of tool steel. **Laser in Engineering**, v. 9, p.47-56, 1999.

KALUBA, W. J., KALUBA, T., TAILLARD, R. The austenitizing behavior of high nitrogen martensitic stainless steels. **Scripta Materialia**, v. 41, p. 1289-1293, 1999.

KATO, K. Wear in relation to friction – a review, **Wear**, v. 241, p. 151-157, 2000.

KIMURA, M. et al. Effect of retained austenite on corrosion performance for modified 13% Cr steel pipe, **Corrosion Science**, v. 57, n.5, p. 433-439, 2001.

KWOK, C. T. et al. Effect of processing conditions on the corrosion performance of laser surface-melted AISI 440C martensitic stainless steel. **Surface & Coatings Technology**, v.166, p. 221-230, 2003.

KWOK, C. T., MAN, H. C., CHENG, F. T. Cavitation erosion and pitting corrosion behavior of laser surface-melted martensitic stainless steel UNS S42000. **Surface & Coatings Technology**, v.126, p. 238-255, 2000.

LAROSA, M. A. **Influência de tratamentos superficiais a laser em aços inoxidáveis utilizados em instrumentais cirúrgicos**, 2005, p.102, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas.

LASER INSTITUTE OF AMERICA. **Fundamentals of laser – professional advancement course**. Toledo, Ohio, 1985.

MAILLET, H. **O Laser**. São Paulo, Editora Manole, 1987.

MAHMOUDI, B. et al. Laser surface hardening of AISI 420 stainless steel treated by pulsed Nd:YAG laser. **Materials & Design**, v. 31, p. 2553-2560, 2010.

MEIJER, J. Laser beam machining (LBM), state of the art and new opportunities. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 149, p.2-17, 2004.

MIGLIORE, L.R. Heat treating whit lasers (Heat Treating Progress). **Advanced Materials & Processes**, v.154, n.2, p.H25, 1998.

NASCIMENTO, A.M. **Obtenção por tratamento a laser e caracterização de compósito superficial em aços inoxidáveis duplex fundidos**, 2007, 142p. Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas.

OCHOA, D.M.L. **Estudo do desgaste erosivo-corrosivo de aços inoxidáveis de alto nitrogênio em meio lamacento**, 2007, 176p. Tese de Doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

PAN, T. et al. The improvement of localized corrosion resistance in sensitized stainless steel by laser surface remelting. **Surface and Coatings Technology**, v.102, p.245-255, 1998.

PINTO, M. A. **Deposição de revestimentos compósitos metal-cerâmico WC-Co por fusão a laser: avaliação da resistência ao desgaste e corrosão**. 2004, p.109. Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas.

QUERCIA, G. et al. Friction and wear behavior of several hard materials. **International Journal of Refractory Metals & Hard Materials**, v. 19, p. 359-369, 2001.

RABINOWICZ, E. **Friction and wear of materials**. New York: John Wiley & Sons, 1995, 315p.

RUTHERFORD, K. L., HUTCHINGS, I. M. A micro abrasive wear test, with particular application to coated systems. **Surface & Coatings Technology**, v. 79, p. 231-239, 1996.

SEDRIKS, A. J. **Corrosion of stainless steels**. Virginia: John Wiley & Sons, 1996, 437p.

SHIPWAY, P. H., HODGE, C. J. B. Microabrasion of glass – the critical role of ridge formation. **Wear**, v. 200, p. 90-97, 2000.

STACHOWIAK, G. W. Particle angularity and its relationship to abrasive and erosive wear. **Wear**, v. 241, p. 214-219, 2000.

STEEN, W. M. **Laser material processing**. London: Springer-Verlag, 1998, p.346.

STACK, M. M., MATHEW, M. Micro-abrasion transitions of metallic materials. **Wear**, v. 255, p.14-22, 2003.

STACK, M. M., MATHEW, M. Mapping the micro-abrasion resistance of WC/Co based coatings in aqueous conditions. **Surface & Coatings Technology**, v. 183, p. 337-346, 2004.

TREZONA, R. I., ALLSOPP, D. N., HUTCHINGS, I. M. Transitions between two-body and three-body abrasive wear: influence of test conditions in the microscale abrasive wear test. **Wear**, v.98, p. 205-214, 1999.

VAN INGELGEM, Y. et al. Influence of laser hardening on the corrosion resistance of martensitic stainless steel, **Electrochimica Acta**, v. 52, p.7796-7801, 2007.

VON ALLMEN, M. **Laser-beam interactions with materials**. Berlin: Springer-Verlag, 1987, 232p.

XIE, Y., BHUSHAN, B. Effects of particle size, polishing pad and contact pressure in free abrasive polishing. **Wear**, v. 200, p. 281-295, 1996.

ZUM-GAHR, K. H. Abrasive wear of white cast irons. **Wear**. v. 64, p. 175-194, 1980.

ZUM-GAHR, K. H. et al., Optimizing fracture toughness and abrasion resistance in white cast irons. **Metallurgical Transaction A**, v. 11A, p. 613-620, 1980.

ZUM-GAHR, K. H. Wear by hard particles. **Tribology International**. v. 31, n.10, p. 587-596, 1998.