

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL DA
TESE DEFENDIDA POR.....E APROVADA PELA
COMISSÃO JULGADORA EM.....
.....
ORIENTADOR

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

Tratamento Superficial a Laser dos Aços AISI 1045 e AISI 4340: Transformações Microestruturais e Propriedades

Autor: Evaldo Júlio Ferreira Soares
Orientador: Maria Clara Filippini Ierardi

07/05

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

Tratamento Superficial a Laser dos Aços AISI 1045 e AISI 4340: Transformações Microestruturais e Propriedades

Autor: Evaldo Júlio Ferreira Soares
Orientador: Maria Clara Filippini Ierardi

Curso: Engenharia Mecânica
Área de concentração: Ciências dos Materiais

Tese de doutorado apresentada à comissão de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, como requisito para obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica.

Campinas, 2005
S.P. – Brasil

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

So11t Soares, Evaldo Júlio Ferreira
Tratamento superficial a laser dos aços AISI 1045 e AISI
4340: transformações microestruturais e propriedades / Evaldo
Júlio Ferreira Soares.--Campinas, SP: [s.n.], 2005.

Orientador: Maria Clara Filippini Ierardi.
Tese (Doutorado) - Universidade Estadual de Campinas,
Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Raios laser. 2. Aço tratamento térmico. 3.
Revestimentos. I. Ierardi, Maria Clara Filippini.
II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de
Engenharia Mecânica. III. Título.

Titulo em Inglês: Laser surface treatment of steels AISI 1045 and AISI 4340:
microstructural transformations and properties.

Palavras-chave em Inglês: Laser beam, Heat treatment of steel e Surface coatings

Área de concentração: Materiais e Processos

Titulação: Doutor em Engenharia Mecânica

Banca examinadora: Amauri Garcia, Célia Marina Alvarenga Freire, Margarita Ballester
Cardone e Luiz Carlos Casteletti

Data da defesa: 13/07/2005

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

TESE DE DOUTORADO

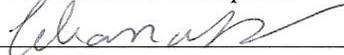
**Tratamento Superficial a Laser dos Aços AISI
1045 e AISI 4340: Transformações
Microestruturais e Propriedades**

Autor: Evaldo Júlio Ferreira Soares

Orientador: Prof^ª. Dr^ª Maria Clara Filippini Ierardi



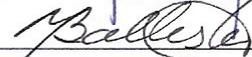
Prof^ª. Dr^ª Maria Clara Filippini Ierardi, Presidente
Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP



Prof^ª. Dr^ª. Célia Marina de Alvarenga Freire
Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP



Prof. Dr. Amauri Garcia
Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP



Prof^ª. Dr^ª Margarita Ballester Cardone
Instituto de Física Gleb Wataghin (IFGW) - UNICAMP



Prof. Dr. Luiz Carlos Casteletti
Escola de Engenharia de São Carlos (EESC) - USP

Campinas, 13 de julho de 2005

DEDICATÓRIA

A você meu filho, **João Victor**, que de mim esteve tão distante durante a realização deste trabalho, mas que ficou sempre presente em meus pensamentos. Que à distância nos aproxime e, o tempo vai mostrar que valeu a pena todo este sacrifício.

AGRADECIMENTOS

A Deus, sempre presente em minhas orações nos momentos de maior aflição e que me deu forças para prosseguir quando as adversidades pareciam ser intransponíveis.

A meus pais, Evandro e Ivete, que me apoiaram em todos os momentos e alicerçaram minha formação sem a qual não teria chegado até aqui.

A minha tia Maria Helena Ferreira cujo apoio moral e emocional foram fundamentais no meu distanciamento para poder concretizar este trabalho.

A minha orientadora, Prof^ª. Maria Clara pelo apoio e orientação dados ao longo de todo o trabalho e pela confiança em mim depositado na realização do mesmo.

Aos colegas Adalberto Cruz Lima José Eduardo Spinelli, Wisley Riuper, Maria Elisiane de Souza e José Roberto P Rodrigues que tiveram participação ativa e cuja ajuda foi fundamental na realização deste trabalho.

Aos funcionários Sérgio, Claudinete, Geraldo e Rita cujo apoio nos laboratórios foi decisivo na obtenção dos resultados que subsidiaram este trabalho.

Aos colegas, José Hilton Ferreira, Otávio Fernandes de Lima Rocha, Noé Cheung, Maria Aparecida Pinto, Maria Aparecida Larosa, Iracema Rodrigues, Alex Maia do Nascimento e Daniel Rosa cuja convivência e apoio moral foi importante nos momentos difíceis no período de realização do trabalho.

A Universidade Estadual de Campinas pela oportunidade de poder realizar este trabalho nesta importante instituição e a PROAP/FEM que custeou a compra do material usado nos experimentos.

A empresa TMS-Combustol, na pessoa do Eng. MSc João Carlos Vendramim, que possibilitou a realização dos tratamentos termoquímicos utilizados em amostras deste trabalho.

A Escola de Engenharia de São Carlos – USP, na pessoa do prof. Luiz Carlos Casteletti, pela realização dos ensaios de Desgaste Micro-abrasivo.

Ao Centro Federal de Educação Tecnológica do Pará - CEFET/Pa pela minha liberação funcional para realizar este doutorado.

Ao Centro de Perícias Renato Chaves – CPCRC, pela minha liberação funcional o que me permitiu realizar este doutorado.

A Secretaria de Ciência Tecnologia e Meio Ambiente que me concedeu uma bolsa de estudo me possibilitando custear minha pesquisa.

A todos aqueles que contribuíram direta ou indiretamente para realização deste trabalho.

A meu filho João Victor pela compreensão com que encarou minha ausência no período do trabalho.

RESUMO

Soares, Evaldo Júlio Ferreira, Tratamento Superficial a Laser dos Aços AISI 1045 e AISI 4340 : Transformações Microestruturais e Propriedades, Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2005, 150 p. Tese (Doutorado).

A melhoria nas propriedades superficiais dos materiais tem sido buscada incessantemente pelas indústrias de transformação. A utilização do laser para tratamento térmico e refusão, entre outros processos, tem possibilitado grandes avanços nesta área. Muito se tem trabalhado na determinação dos parâmetros operacionais do laser e a resultante destas influências sobre as propriedades dos materiais. Os objetivos deste trabalho são estudar os efeitos destes parâmetros operacionais sobre a profundidade da camada superficial e a caracterização microestrutural das amostras submetidas a tratamento térmico a laser. Foram feitos experimentos usando os aços AISI 1045 e AISI 4340, a partir de amostras recozidas, temperadas e nitretadas. Foi utilizado um laser de CO₂, pertencente ao LNLS, com potência nominal de 1 kW, desfocado em 2 mm, velocidade de deslocamento do feixe variando de 3000 a 10000 mm/min. Os resultados confirmam o laser como um instrumento eficaz na aplicação dos tratamentos superficiais. Para o aço AISI 1045, verifica-se que as amostras nitretadas apresentam maior profundidade da poça resultante após tratamento a laser. Já para o aço AISI 4340 as amostras endurecidas são as que se apresentam com maiores profundidades de poça. Para ambos os casos, as amostras recozidas apresentam os menores valores de profundidade da poça. Os ensaios de corrosão demonstram, com exceção das amostras nitretadas, uma tendência de elevação na nobreza do potencial eletroquímico do material. Quanto à resistência ao desgaste, com exceção das amostras nitretadas, do aço AISI 4340, todas as amostras apresentaram melhora após submetidas aos tratamentos propostos.

Palavras-chave: raio laser, engenharia de superfície, tratamento térmico.

ABSTRACT

Soares, Evaldo Júlio Ferreira, Laser Surface Treatment of Steel AISI 1045 and AISI 4340 : Transformations Microstructurals and Properties, Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2005, 150 p. Tese (Doutorado).

The industry development during last decades has allowed significant improvements concerning materials surface properties. Laser application for thermal treatment and remelting has also permitted important advances in this area. A lot of work has been spent in order to understand the influence of the operational laser parameters on the products' performance. The main objective of this study is to examine the effects of such parameters on the surface layer depth and on the typical microstructural arrangement of the treated samples. Thus, experiments were carried out using the steels AISI 1045 and AISI 4340, which were annealed, tempered and nitrated. Further, It was used a CO₂'s laser equipment, with nominal power of 1kW (defocusing of 2mm) and scan speed varying from 3000 mm/min to 10000 mm/min. The results confirmed the laser as an effective technique for surface treatments application. For steel AISI 1045, it was verified that nitrated samples presented the deepest liquid pool as consequence of the laser treatment. However, for steel AISI 4340, the hardened samples presented the deepest liquid pool. In both cases the annealed samples presented the lowest values concerning such parameter. The corrosion tests demonstrated that, except for the nitrated samples, a tendency of electrochemical potential increasing could be observed for all other studied conditions. Concerning wear resistance, excepting steel AISI 4340 nitrated samples, the others shown an improvement after the proposed treatment.

Keyword: *laser beam, surface engineering, and heat treatment.*

Índice

Lista de Figuras	xiii
Lista de tabelas	xxii
Nomenclaturas.....	xxiii
Capítulo 1	1
Introdução e Objetivos.....	1
1.1 Introdução.....	1
1.2 Objetivos	4
Capítulo 2	5
A Engenharia de Superfície e o laser.....	5
2.1 Considerações iniciais	5
2.2 O laser	5
2.2.1 Histórico	5
2.2.2 Tipos de laser	7
2.2.3 Principais parâmetros do laser.....	9
2.3 A Engenharia de Superfície.....	14

2.3.1 O surgimento como ciência.....	14
2.3.2 A importância do estudo da superfície.....	15
2.4 O laser aplicado à Engenharia de Superfície.....	16
2.4.1 Têmpera Superficial	18
2.4.2 Refusão Superficial	19
2.4.3 Soldagem a Laser	20
2.4.4 Adição de um elemento de liga – “ <i>Alloying</i> ”	22
2.4.5 Cobertura com uma camada de proteção com auxílio do laser – <i>Cladding</i>	23
2.4.6 Outras Aplicações	24
2.5 Ensaaios Superficiais	25
2.5.1 Ensaio de difração de Raios X	25
2.5.2 Ensaio de Corrosão.....	27
2.5.3 Desgaste Superficial.....	36
2.6 Pré-tratamento nos aços utilizados para tratamento a laser.....	44
Capítulo 3	45
Materiais e Métodos	45
3.1 Considerações iniciais	45
3.2 Procedimento experimental e materiais e equipamentos utilizados.....	45
3.2.1 Preparação das amostras para o tratamento com laser.....	45
3.2.2 Definição dos parâmetros do laser	51

3.2.3 Definição da distância focal utilizada	52
3.2.3 Desenvolvimento do sistema de injeção de gás para proteção da superfície	56
3.2.4 Sobreposição de trilhas.....	58
3.3 Ensaio de difração de raios X.....	59
3.4 Ensaio de Corrosão	60
3.5 Ensaio de impedância eletroquímica.....	61
3.6 Ensaio de Desgaste.....	62
Capítulo 4	64
Resultados e Discussão.....	64
4.1 Considerações Iniciais.....	64
4.2 Resultados e discussão do ensaio de Trilha Simples.....	64
4.2.1 Dimensões das trilhas a laser	64
4.2.2 Microestrutura ótica e eletrônica.....	73
4.2.3 Ensaio de microdureza	81
4.2.4 Análises da primeira etapa	87
4.3 Resultados e discussão dos ensaios de trilhas sobrepostas	88
4.3.1 Microestruturas Óticas e Eletrônicas.....	88
4.3.2 Difração de Raios X.....	101
4.3.3 Resultado dos ensaios de corrosão	112
4.3.4 Resultado dos ensaios de desgaste	129

Capítulo 5.....	133
Conclusões.....	133
5.1 Conclusões deste trabalho	133
5.2 Sugestões para trabalhos futuros	136
Referências Bibliográficas	137
Artigos.....	137
Teses.....	143
Livros	143
Normas	144
Sites - Internet	145

Lista de Figuras

Figura 1.1 – Equipamento de Laser tipo CO ₂ pertencente ao LNLS usado nos experimentos e operado através de comando computacional.....	4
Figura 2.1 - Desenho esquemático do primeiro laser óptico construído por Maiman em 1960, consistindo de um cristal de Rubi rodeado por um tubo helicoidal de flash e fechado dentro de uma cavidade cilíndrica de alumínio polida, resfriada por ventilação forçada (home.achilles.net).	6
Figura 2.2 – Diferentes posições do ponto focal sendo: a) dentro da peça de trabalho alcançando máxima penetração; b) sobre a superfície e c) com o feixe desfocado.	11
Figura 2.3 – Reflexão, absorção e transmissão de um feixe de laser que atingiu uma superfície.	17
Figura 2.4 – Figura esquemática para um tratamento de material por aquecimento a laser.	18
Figura 2.5 Princípio de deposição a laser com deposição coaxial de pó (Acker, 2005).	24
Figura 2.6 – Difração de raios X por um cristal (Padilha, 1996).	25
Figura 2.7 – Esquema de funcionamento de um difratômetro de raios X (Padilha, 1996).	27
Figura 2.8 - Representação das retas de Tafel para determinar a densidade da corrente de corrosão. E_{cor} é o potencial de corrosão e i_{cor} a densidade de corrente de corrosão (Bezerra, 2001).....	32
Figura 2.9 - Circuito elétrico equivalente de uma interface metal-eletrólito.	33

Figura 2.10- Módulo da impedância em função da frequência do sinal aplicado no teste de espectroscopia de impedância eletroquímica (Wolyneec, 2003).	34
Figura 2.11 - Fase do sinal medido no teste de espectroscopia de impedância eletroquímica em função da frequência (Wolyneec, 2003).	35
Figura 2.12 – Junção de desgaste idealizada (Stoeterau, 2004)	38
Figura 2.13 – Diagrama esquemático do dispositivo de ensaio (Gant,2004).	41
Figura 2.14–Típica cratera oriunda do ensaio de micro-abrasão (http://www.npl.co.uk).	41
Figura 2.15 – Esfera de ensaio perfurando a camada do revestimento (Stoeterau, 2004).	42
Figura 3.1 –Microestrutura do aço AISI 1045 e 4340 no estado recebido. (Nital 3%).....	46
Figura 3.2 – Aço AISI 4340 recozido (Nital 3%).	47
Figura 3.3 - Efeito do corte a laser sobre as laterais das amostras (Nital 3%).	48
Figura 3.4 – Forno tipo mufla utilizado nos tratamentos térmicos das amostras.	48
Figura 3.5 – Microestrutura do aço AISI 1045 temperado, mostrando martensita fina.	49
Figura 3.6 – Microestrutura do aço AISI 1045 mostrando camada nitretada com aumento de a) 100X e b) 400X (Ataque nital 3%).	50
Figura 3.7 – Microestrutura do aço AISI 4340 mostrando camada nitretada com aumento de a) 100X e b) 400X (Ataque nital 3%).	50
Figura 3.8 – Equipamento a Laser de CO2 pertencente ao LNLS utilizado nos experimentos.	51
Figura 3.9 – Esquema adotado para manter a mesma energia desprendida por feixe de laser desfocado.....	53
Figura 3.10 – Esquema de seccionamento da amostra após realização da trilha.	54
Figura 3.11 – Esquema mostrando o dimensionamento da seção transversal da trilha do laser.	55

Figura 3.12 – As três possíveis situações após o feixe de laser	55
Figura 3.13 – Esquema da localização das medidas de microdureza.....	56
Figura 3.14 – Esquema de dispositivo de injeção de gás desenvolvido.....	57
Figura 3.15 – Sistema de injeção de gás fixado junto ao cabeçote.	58
Figura 3.16 – Esquema de sobreposição das trilhas.....	59
Figura 3.17 – Difratorômetro de Raios X.....	60
Figura 3.18 – Conjunto experimental utilizado nos ensaios de corrosão.....	61
Figura 3.19 – Máquina de desgaste microabrasivo.	62
Figura 3.20 – Corpo de prova sendo pressionado contra a esfera em rotação formando a calota de desgaste.....	63
Figura 4.1 – Profundidade X velocidade de varredura para trilha simples, aço AISI 1045 recozido jateado com Al ₂ O ₃ e diferentes potências.	65
Figura 4.2 – Largura X velocidade de varredura para trilha simples, aço AISI 1045 recozido jateado com Al ₂ O ₃ e diferentes potências	66
Figura 4.3 – (Nital 3%) Trilha simples com potência de 1000W e velocidade de 3000 mm/min.	67
Figura 4.4 – (Nital 3%) – Trilha simples com potência de 500 W e velocidade de 8000 mm/min.....	67
Figura 4.5 – Relação entre velocidade e profundidade a partir de diferentes tipos de jateamento.....	68
Figura 4.6 – Profundidade da poça para diferentes velocidades e substratos do aço AISI 1045... ..	70
Figura 4. 7 – Profundidade de trilha para diferentes substratos do aço AISI 4340.....	71
Figura 4.8 - Profundidade da camada tratada para os diferentes aços recozidos.	72

Figura 4.9 – Profundidade da camada tratada para os diferentes aços carbonitretados.	73
Figura 4.10 – Trilhas do aço AISI 1045 com potências de: a) 1000 W e b) 900 W e velocidade de 4000 e 5000 mm/min respectivamente, jateadas com Al ₂ O ₃ e atacadas com nital 3%.....	74
Figura 4.11 – Trilhas do aço AISI 1045 jateadas com Al ₂ O ₃ e microesfera de vidro e tratadas a laser com potência de 500 W e: a) $v = 10 \cdot 10^3$ mm/min e b) $3 \cdot 10^3$ mm/min.	74
Figura 4.12 – Microestrutura da trilha do aço AISI 1045 jateado com Al ₂ O ₃ , potência de 500 W e velocidade de $6 \cdot 10^3$ mm/min, atacada com reativo de Vilela.....	75
Figura 4.13 – Detalhe da Figura 4.12.....	75
Figura 4.14 - Microestrutura da trilha do aço AISI 1045, jateado com Al ₂ O ₃ , potência de 500 W e velocidade de $8 \cdot 10^3$ mm/min, atacada com reativo de Vilela.....	76
Figura 4.15 – Detalhe da Figura 4.14.....	76
Figura 4 16 – Amostras pré-temperadas do aço AISI 1045, com potência de 500 W, jateadas com Al ₂ O ₃ e velocidade de: a) $3 \cdot 10^3$ mm/min e b) $5 \cdot 10^3$ mm/min.....	77
Figura 4 17 – Amostras pré-nitretadas do aço AISI 1045, com potência de 500 W, jateadas com Al ₂ O ₃ e velocidade de a) $3 \cdot 10^3$ mm/min e b) $6 \cdot 10^3$ mm/min.	77
Figura 4.18 – Trilhas do aço AISI 4340 como recebido: a) $v = 3 \cdot 10^3$ mm/min; b) $v = 10^4$ mm/min (Ataque com nital 3%).	78
Figura 4.19– Região da interface trilha-substrato com a transformação da estrutura bainítica.	79
Figura 4.20 - Trilhas do aço AISI 4340 recozido apresentando : a) $v = 3 \cdot 10^3$ mm/min; b) $v = 8 \cdot 10^3$ mm/min (Ataque com nital 3%)......	79
Figura 4.21 – Microestrutura da trilha do aço AISI 4340 recozido, $v = 10^4$ mm/min sendo a) Zona de transição obtida em MO e b) Zona da poça obtida pelo MEV.	80
Figura 4.22 – Trilhas das amostras nitretadas: a) $v = 3 \cdot 10^3$ mm/min e b) $v = 8 \cdot 10^3$ mm/min.	80

Figura 4.23 – Amostra pré-nitretada, interface substrato-zona tratada: a) MO; b) MEV.....	81
Figura 4.24 - Perfil de dureza do aço AISI 1045 jateado com dois abrasivos, $v = 8.10^3$ mm/min.	82
Figura 4.25 – Perfil de dureza do aço AISI 1045 para dois diferentes materiais de jateamento, $v=10.10^4$ mm/min.....	83
Figura 4.26 – Perfil de microdureza do aço AISI 4340 com substratos diferentes, $v = 8.10^3$ mm/min.....	84
Figura 4.27 - Perfil de microdureza do aço AISI 4340, substratos diferentes e $v = 10^4$ mm/min.	85
Figura 4.28 – Perfil de dureza dos aços AISI 1045 e AISI 4340 recozidos e jateados com Al_2O_3 e com $v = 8.10^3$ mm/min.....	86
Figura 4.29 – Perfil de dureza para os aços AISI 1045 e AISI 4340 recozidos e jateados com Al_2O_3 e com $v = 10^4$ mm/min.....	87
Figura 4.30 – Sobreposição de trilha do aço AISI 1045 recozido para $v = 8.10^3$ mm/min e Nital 3% sendo: a) vista geral e b) uma imagem ampliada da poça na sobreposição.....	89
Figura 4.31 – Imagem da trilha sobreposta feita sobre o aço AISI 1045 como recebido e para $v = 10.10^3$ mm/min.....	89
Figura 4.32 – Imagens feitas pelo MEV: a) na trilha b) no substrato do aço AISI 1045 recozido	90
Figura 4.33 – Sobreposição de trilha do aço AISI 1045 modificado a laser após temperado.....	90
Figura 4.34 – Sobreposição de trilha do aço AISI 1045 pré-tratado por têmpera.....	91
Figura 4.35 – Imagens de diferentes regiões do aço AISI 1045 pré-temperado e tratado a laser com $v = 8.10^3$ mm/min feita pelo MEV sendo: a) poça; b) substrato e c) transição Poça/Substrato.....	92
Figura 4.36 – Sobreposição de trilha do aço AISI 1045 pré-nitretado e tratado a laser com $v = 8.10^3$ mm/min. Ataque com nital 3%.....	93

Figura 4.37 – Imagens feitas pelo MEV do aço AISI 1045 nitretado e tratado com $v = 10.10^3$ mm/min sendo: a) superfície da amostra e b) região da poça. Ataque com Vilela.....	94
Figura 4.38 –Imagem ampliada da trilha do aço AISI 1045 nitretado e tratado a laser.....	94
Figura 4.39 – Sobreposição de trilha do aço AISI 4340 pré-recozido e tratado a laser com $v = 8.10^3$ mm/min sendo: a) Trilhas sobrepostas; b) Imagem ampliada da zona de transição; c) superfície da amostra a). Ataque com nital 3%.....	95
Figura 4.40 – Imagem feita pelo MEV da trilha do aço AISI 4340 pré-recozido e tratado a laser sendo a) região da poça; b) substrato ; c) superfície	96
Figura 4.41 – Sobreposição de trilha do aço AISI 4340 como recebido, tratado a laser com $v=8.10^3$ mm/min: a) Sobreposição das trilhas; b) transição ; c) superfície. Ataque nital 3%.....	97
Figura 4.42 Imagem da trilha do aço AISI 4340 como recebida feita pelo MEV sendo: a) região da poça do laser; b) superfície do aço AISI 4340 como recebido com c) uma ampliação de “a”.	98
Figura 4.43 - Sobreposição de trilha do aço AISI 4340 nitretado e tratado a laser com $v = 8.10^3$ mm/min. Ataque com nital 3%.	99
Figura 4.44 – Detalhes da Figura 4.43 sendo: a) região da trilha do aço AISI 4340 e b) superfície da mesma amostra.	100
Figura 4.45 – Imagem feita pelo MEV da região da trilha do aço AISI 4340 nitretado e tratado a laser com $v = 8.10^3$ mm/min..	100
Figura 4.46 – Difratoograma do aço AISI 1045 como recebido e não tratado a laser.	101
Figura 4.47 – Difratoograma do aço AISI 1045 pré-temperado e não tratado a laser.	102
Figura 4.48 – Difratoogramas gerados pelo Match: a) pré-recozido; b) pré-temperado.....	102
Figura 4.49 - Difratoograma do aço AISI 1045 nitretado e não tratado a laser.	103
Figura 4.50 – Difratoograma do aço AISI 1045 recozido, sem e com tratamento superficial a laser com velocidade do feixe de 8.10^3 mm/min.	104

Figura 4.51 - Difratoograma do aço AISI 1045 temperado e tratado superficialmente a laser com velocidade do feixe de 8.10^3 mm/min.	105
Figura 4.52 - Difratoograma do aço AISI 1045 nitretado, tratado a laser e $v = 8.10^3$ mm/min.	105
Figura 4.53 - Difratoograma do aço AISI 4340 como recebido.	106
Figura 4.54 – Difratoograma do aço AISI 4340 recozido.	107
Figura 4.55 – Difratoograma do aço AISI 4340 nitretado.	107
Figura 4.56 – Comparação dos difratogramas do aço AISI 4340 não tratados a laser sendo: a) recebido e nitretado; b) recebido e recozido.	108
Figura 4.57 – Difratoograma do aço AISI 4340 como recebido, tratado a laser, $v = 8.10^3$ mm/min.	108
Figura 4.58 - Difratoograma do aço AISI 4340 pré-recozido, tratado a laser, $v = 8.10^3$ mm/min.	109
Figura 4.59 – Difratoogramas comparativos do aço AISI 4340 com a) pré-recozido antes e depois de tratado a laser e b) recebido antes e depois de tratado a laser.	110
Figura 4.60 - Difratoograma do aço AISI 4340 nitretado e tratado a laser com velocidade de varredura do laser de 8.10^3 mm/min.	111
Figura 4.61 – Comparação entre os difratogramas do aço AISI 4340 apenas nitretado com o posteriormente tratado a laser e velocidade de varredura do feixe de 8.10^3 mm/min.	111
Figura 4.62 – Curvas de polarização das amostras do aço AISI 1045 não tratadas a laser. Resultados obtidos pela técnica de extrapolação de Tafel.	113
Figura 4.63 – Curvas de polarização das amostras do aço AISI 1045 recozido sem e com tratamento a laser. Resultados obtidos pela técnica de extrapolação de Tafel.	114
Figura 4.64 – Gráficos de Bode para o aço AISI 1045 recozido sem e com tratamento a laser para $v = 8.10^3$ mm/min e 10.10^3 mm/min.	115

Figura 4.65 – Gráficos de Bode para o aço AISI 1045 recozido para ensaios pós-polarização.....	116
Figura 4.66 – Curvas de polarização das amostras temperadas do aço AISI 1045 sem e com tratamento a laser. Resultados obtidos pela técnica de extrapolação de Tafel.....	117
Figura 4.67 – Gráficos de Bode para o aço AISI 1045 temperado sem e com aplicação do laser para $v = 8.10^3$ mm/min e 10.10^3 mm/min.	118
Figura 4.68 – Curvas de polarização das amostras nitretadas do aço AISI 1045 sem e com tratamento a laser. Resultados obtidos pela técnica de extrapolação de Tafel.....	119
Figura 4.69 – Gráficos de Bode para o aço AISI 1045 nitretado sem e com aplicação do laser para $v = 8.10^3$ mm/min e 10.10^3 mm/min..	120
Figura 4.70 – Curvas de polarização das amostras do aço AISI 4340 sem tratamento a laser. Resultados obtidos pela técnica de extrapolação de Tafel.	121
Figura 4.71 – Curvas de polarização das amostras do aço AISI 4340 recozidas sem e com tratamento a laser. Resultados obtidos pela técnica de extrapolação de Tafel.....	122
Figura 4.72 – Gráficos de Bode para o aço AISI 4340 recozido sem e com aplicação do laser para $v = 8.10^3$ mm/min e 10.10^3 mm/min.	123
Figura 4.73 – Curvas de polarização das amostras do aço AISI 4340 nitretadas sem e com tratamento a laser. Resultados obtidos pela técnica de extrapolação de Tafel.....	124
Figura 4.74 – Gráficos de Bode para o aço AISI 4340 como recebido sem e com aplicação do laser para $v = 8.10^3$ mm/min e 10.10^3 mm/min.....	125
Figura 4.75 – Curvas de polarização das amostras do aço AISI 4340 nitretadas sem e com tratamento a laser. Resultados obtidos pela técnica de extrapolação de Tafel.....	126
Figura 4.76 – Gráficos de Bode para o aço AISI 4340 apenas nitretado sem e com aplicação do laser para $v = 8.10^3$ mm/min e 10.10^3 mm/min.....	127

Figura 4.77 – Gráficos de Bode para o aço AISI 4340 apenas nitretado para ensaios pós-polarização	128
Figura 4.78 – Calota formada pelo ensaio de desgaste de microabrasão	129
Figura 4.79 – Ensaio de micro-abrasão do aço AISI 1045 sem e com tratamento a laser.	130
Figura 4.80 – Ensaio de microabrasão do aço AISI 4340 sem e com tratamento a laser.	132

Lista de tabelas

Tabela 2.1 – Índice de refração e ângulo de Brewster de alguns materiais (Steen, 1996)	14
Tabela 2.2 - Densidades de potência de diferentes processos de soldagem (Steen, 1993).....	21
Tabela 2.3 - Comprimento de onda das radiações mais utilizadas em difração de raios X.....	26
Tabela 2.4 – Classificação do desgaste.....	37
Tabela 3.1 - Composição química dos aços AISI 1045 e 4340 - %massa.....	46
Tabela 3.2 – Dureza das amostras após os tratamentos preliminares realizados.....	50
Tabela 3.3 – Seqüência de ensaios do aço AISI 1045 para potência e substrato variados.....	54
Tabela 3.4 – Seqüência de ensaios do aço AISI 4340 para substrato variado.....	54
Tabela 3.5 – Ensaios de sobreposição.....	58
Tabela 3.6 – Parâmetros usados no ensaio de difração de Raios X.....	60
Tabela 4.1 – Dimensão da trilha do aço AISI 1045 recozido e jateado em Al ₂ O ₃	65
Tabela 4.2 – Dimensões da região tratada do aço AISI 1045 com diferentes jateamento.....	68
Tabela 4.3 – Dimensões da região tratada do aço AISI 1045, diferentes substratos e P=500W...69	
Tabela 4.4 – Dimensões da região tratada do aço AISI 4340, diferentes substratos e P=500W...70	
Tabela 4.5 – Perfil de microdureza do aço AISI 1045.....	82
Tabela 4.6 – Perfil de microdureza de aços AISI 4340.....	84
Tabela 4.7 – Potencial de circuito aberto das amostras do aço AISI 1045.....	112
Tabela 4.8 – Potencial de circuito aberto das amostras do aço AISI 4340.....	112
Tabela 4.9 – Resultados do ensaio de micro-abrasão do aço AISI 1045.....	130
Tabela 4.10 – Resultados do ensaio de micro-abrasão do aço AISI 4340.....	131

Nomenclaturas

Letras Latinas

b	diâmetro da cratera	(μm)
C_{dc}	capacitância da dupla camada	(Farad)
d	espaçamento planar	(\AA)
d_{F}	diâmetro focal	(mm)
E_{cor}	potencial de corrosão	(Volt)
E_{J}	Energia desprendida	(Joule/ mm^2)
ω_{max}	frequência máxima	(Hz)
E_{J1}	Energia desprendida para o feixe incidente focado	(Joule/ mm^2)
E_{J2}	Energia desprendida para o feixe incidente defocado sobre a amostra	(Joule/ mm^2)
E_{r}	Energia refletida	(Joule/ mm^2)
H	dureza superficial da aspereza mais mole	(Vickers)
I_{cor}	densidade de corrente de corrosão	($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)
K	coeficiente de desgaste	(mm/Nm^2)
K'	coeficiente de desgaste adimensional	-
L	largura da poça do laser	(μm)
n	índice de refração	-
P	potência do laser	(watt)
p	profundidade da poça do laser	(μm)
Q	taxa de desgaste	(%)
R	raio da esfera	(mm)
R	refletância	(%)
R_{e}	resistência entre os eletrodos de referência e de trabalho	(ohm)
R_{p}	resistência à polarização da reação eletroquímica	(ohm)
ΔE	polarização	(Volt)
Δi	densidade de corrente aplicada	($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)
S	coeficiente de absorção	-
V	volume da cratera	(mm^3)
v	velocidade de varredura do feixe do laser	(mm/min)
W	carregamento	(Kg)
Z	impedância do circuito	(ohm)

Letras Gregas

ϕ	ângulo de fase	(°)
α	ângulo de incidência do feixe do laser	(°)
λ	comprimento de onda	(Å)
ω	frequência do sinal aplicado	(Hz)
θ	inclinação da reta anódica	(°)
γ	inclinação da reta catódica	(°)
θ'	ângulo de difração	(°)
β_a	inclinação anódica	-
β_c	inclinação catódica	-
ϕ_{\max}	ângulo de fase máximo	(°)

Abreviações

EIE	espectroscopia de impedância eletroquímica	-
HB	dureza Brinell	-
HRC	dureza Rockwell escala C	-
HV	dureza Vickers	-
MEV	microscopia eletrônica de varredura	-
MO	microscopia óptica	-
RA	rugosidade média	(μm)
RMS	rugosidade média quadrática	(μm)

Capítulo 1

Introdução e Objetivos

1.1 Introdução

Nas últimas décadas, o desenvolvimento da tecnologia do laser vem se tornando uma poderosa ferramenta aplicada à Engenharia de Superfície. O laser, cuja invenção data do início da década de 60 e que a princípio parecia não oferecer grande utilidade, logo alcançaria com a construção de novas e poderosas máquinas, a plena utilização nos mais variados campos de utilização. Desde a medicina, passando pelas artes gráficas, equipamentos de som e entretenimentos, hoje encontramos sua aplicação largamente difundida nas mais diversas áreas da ciência (Steen, 1996).

Assim como o laser, a engenharia que trata especificamente de superfície também é considerada nova. Sabemos que o interesse humano na melhoria das propriedades superficiais do material vem desde os primórdios dos tempos, pois o homem logo viu que ao proteger a superfície ele evitava a degradação dos objetos produzidos (Burakowski, 1999). Porém, esta ciência é resultado do movimento ocorrido após a Segunda Grande Guerra em que foram criadas algumas áreas de conhecimento, conectadas com a pesquisa aplicada às ciências afins tais como: engenharia espacial, engenharia de processo, engenharia de corrosão e engenharia de materiais.

A Engenharia dos Materiais foi criada nos anos 60, nos Estados Unidos, abrangendo a investigação sobre a estrutura dos materiais objetivando a obtenção e melhoria de novos produtos procurando prever e reproduzir industrialmente as propriedades dos materiais. Nela se estuda a

estrutura e a forma de diferentes materiais incluindo compósitos, não se excluindo também os problemas decorrentes de modificações nas propriedades superficiais dos mesmos. Devido a esta situação, criou-se então um novo campo de interesse científico a fim de estudar os fenômenos de superfície, tendo suas primeiras investigações realizadas na Inglaterra nos anos 70, sendo que em seguida, surgiram publicações especializadas sobre o assunto. Em meados dos anos 80, a mudança da denominação do V Congresso Internacional de Tratamento Térmico realizado em Budapeste para Congresso Internacional de Tratamento Térmico e de Engenharia de Superfície, consagra e consolida a nova ciência.

A integração entre a tecnologia do laser e a indústria de transformação foi quase que seguida à invenção do primeiro. Logo se estava utilizando a poderosa fonte de calor do laser para aplicações em corte de chapas e soldagem, hoje totalmente incorporada nos processos de manufatura principalmente da indústria automobilística e, a partir do fim da década de 70 e começo dos anos 80, iniciou-se de maneira sistemática a pesquisa da utilização do laser no tratamento de superfície.

Desde o princípio, o laser mostrou-se um importante instrumento a ser utilizado na tecnologia de melhoria das propriedades superficiais dos materiais, devido a suas várias vantagens entre as quais:

- Permite tratamento térmico localizado e preciso podendo ser utilizado em alta escala
- Possui alta velocidade de processamento com paradas e partidas rápidas
- Distorção no material muito baixa devido à baixa energia específica
- Não requer pré-aquecimento, com exceção de peças com massas muito pequenas
- Processo com pouca ou nenhuma contaminação
- Pode ser realizada com controle computacional, a longa distância
- Necessita de pouco ou nenhum acabamento posterior

Muitas destas vantagens também podem ser conseguidas por outros métodos como o tratamento térmico por feixe de elétrons, porém este requer uma atmosfera a vácuo e emite raios-X. O Laser é, antes de tudo, um processo quimicamente limpo que produz uma zona tratada localizada onde é requerida e conseqüentemente uma baixa distorção no material ao qual aquela

luz de alta intensidade foi aplicada.

Os estudos desenvolvidos atualmente na área de Engenharia de Superfície, diversificaram a aplicação do Laser nos mais diferentes materiais, tais como: aços comuns, ferramenta, inoxidáveis e ligas especiais não ferrosas principalmente ligas de alumínio, titânio com aplicações cada vez mais abrangentes em instrumentos odontológicos e, em processos variados como tratamentos térmicos de têmpera, revenimento e recozimento em materiais ferrosos e não ferrosos (Ganeev, 2001), refusão, revestimento pela formação de uma camada ou através de adição de elemento de liga com materiais metálicos (Anjos, 1996), cerâmicos e compósitos, deposição química a vapor, etc.

O Grupo de Pesquisa em Solidificação do Departamento de Materiais da Faculdade de Engenharia Mecânica da Unicamp tem desenvolvido esforços conjuntamente com outros institutos de pesquisa e com auxílio do Laboratório Nacional de Luz Sincrotron o qual permitiu o uso de suas instalações e seu laser, visto na Figura 1.1, na pesquisa e desenvolvimento de tecnologia aplicada do Laser em processos de tratamento térmico, refusão (Pinto, 2002) revestimento cerâmico (Ierardi, 1997) e utilizando modelamento matemático (Cheung, 2002) como ferramenta de previsão dos fenômenos ocorridos e em cujo contexto este trabalho se insere. Nele procuramos avançar na pesquisa por meio do estudo comparativo entre dois aços distintos, com substratos pré-tratados e diferentes acabamentos superficiais através não só de trilha simples, mas de trilha sobreposta o que permitirá estudar, além os efeitos operacionais do Laser sobre o substrato as propriedades mecânicas e químicas resultantes da operação realizada.

A grande quantidade de trabalhos já publicados envolvendo a aplicação do Laser sobre os mais diversificados materiais procura dissertar na sua grande maioria, sobre os efeitos dos parâmetros operacionais sobre o material existindo, por conseguinte, uma enorme lacuna quanto aos efeitos desta técnica sobre as propriedades mecânicas e químicas dos materiais. Este trabalho, que utiliza materiais com aplicações usuais em outras técnicas de tratamento superficial denominadas como técnicas convencionais, busca acrescentar informações sobre este aspecto metalúrgico.



Figura 1.1 – Equipamento de Laser tipo CO₂ pertencente ao LNLS usado nos experimentos e operado através de comando computacional.

1.2 Objetivos

Os objetivos deste trabalho são:

- Submeter os aços SAE 1045 e SAE 4340 a tratamento superficial com laser, sem refusão, a partir da definição de parâmetros operacionais: potência e velocidade de varredura do feixe.
- Avaliar a influência de pré-tratamentos de têmpera, recozimento, nitretação e jateamentos de óxido de alumínio e microesfera de vidro na eficiência do tratamento a laser.
- Avaliar a microestrutura, dureza, resistência à corrosão e desgaste resultante dos tratamentos realizados.

Capítulo 2

A Engenharia de Superfície e o laser

2.1 Considerações iniciais

Neste capítulo procura-se definir uma linha de pensamento correspondente às etapas de trabalho em consonância com outros capítulos. Inicialmente, pesquisa-se sobre o laser, seus princípios, sua origem e evolução, tipos e principais parâmetros operacionais, pois se busca deste o início conhecer o equipamento em que se opera o processo de modificação superficial. Em seguida busca-se ter o um melhor entendimento da engenharia de superfície e a contextualização da pesquisa a ser realizada. Partindo-se para a junção destes dois fatores a ver: o laser e a engenharia de superfície. Finaliza-se o capítulo com um estudo sobre os principais ensaios realizados e a importância dos mesmos na análise de materiais superficialmente modificados.

2.2 O laser

A palavra laser é um acrônimo do termo inglês “**L**ight **A**mplification via **S**timulated **E**mission of **R**adiation”. O equipamento que emite a luz do laser, o raio laser, é composto basicamente, de três partes principais (Rubahn, 1999): i. Uma fonte de energia externa; ii. O meio ativo que pode ser sólido, líquido ou gasoso; iii. Um oscilador óptico composto de dois espelhos sendo um 100% reflexivo e outro 99% reflexivo.

2.2.1 Histórico

A invenção do primeiro Laser foi anunciada por Maiman em julho de 1960 usando como

meio ativo um cristal de rubi, visto na Figura. 2.1. Porém, um longo caminho teve que ser percorrido anteriormente. Foi o físico Albert Einstein que, em 1917, descreveu a teoria da emissão estimulada, o que futuramente viria ser o princípio de funcionamento do laser. Só na década de 1940 é que, com o advento da Segunda Guerra Mundial, os cientistas militares da época colocaram em prática os princípios propostos por Einstein devido ao interesse na radiação por microondas utilizada no desenvolvimento da tecnologia do radar. Passado este momento histórico, os engenheiros utilizaram estes conhecimentos militares em busca da criação de equipamento de emissão de microondas. Foi Charles H. Townes, em 1954 juntamente com outros cientistas, o criador do MASER (**M**icrowave **A**mplification by the **S**timulated **E**mission of **R**adiation), um equipamento de emissão de microondas e que viria encontrar utilidade em sistemas de comunicação por microondas. Um estudo paralelo e, na mesma época também foi desenvolvido por Basov e Prokhorov do Instituto Lebedev de Moscou. Após a criação do MASER, Towner e outros engenheiros acreditaram na possibilidade da criação de um maser óptico através do uso de energia de alta frequência como estímulo à criação de um poderoso raio de luz. Apesar do pioneirismo de Towner e seus contemporâneos, deve-se a Theodore Maiman a invenção do Laser.

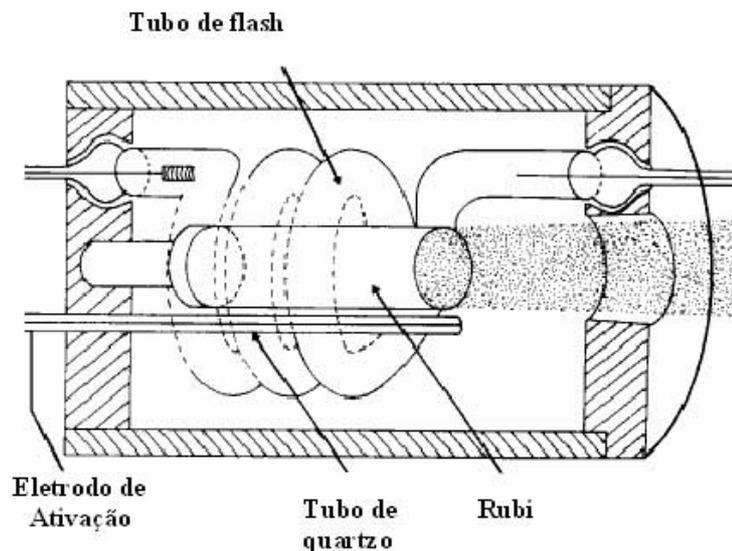


Figura 2.1 - Desenho esquemático do primeiro laser óptico construído por Maiman em 1960, consistindo de um cristal de Rubi rodeado por um tubo helicoidal de flash e fechado dentro de uma cavidade cilíndrica de alumínio polida, resfriada por ventilação forçada

(<http://home.achilles.net>).

Convém salientar que, embora já em 1947, Gabor tenha desenvolvido a teoria da holografia o que requeria a utilização da luz de laser para sua realização, este a princípio parecia uma invenção tecnológica sem um propósito, pois não era poderoso suficiente para uso militar e não servia para transmissão de comunicação na atmosfera pela sua impossibilidade de penetrar em nuvens e chuva. Logo a seguir, entretanto, outros engenheiros desenvolveram novos e poderosos lasers, utilizando outros meios ativos, produzindo poderosas fontes de calor o que fez com que este logo encontrasse aplicação nos mais variados campos da ciência. Então, ele é utilizado nas áreas de medicina, de comunicações, militar, industrial, de artes gráficas, etc. Na área industrial e automobilística foi usado com sucesso em corte de chapas metálicas e soldagem em que sobressaíram a precisão, velocidade e automação do processo. Estima-se que, nos meados da década de oitenta, mais de dois mil lasers já haviam sido inventados nos mais diferentes países com aproximadamente um terço destes inventos encontrando aplicação industrial.

2.2.2 Tipos de laser

Atualmente existem muitas centenas de tipos de lasers que demonstram sua viabilidade em laboratório, funcionando em vários meios ativos e comprimentos de onda (Marllet, 1987). Entretanto somente algumas dezenas de lasers são fabricados industrialmente. Os principais lasers são agrupados em quatro famílias de acordo com o meio ativo empregado.

- Lasers de isolantes dopados;
- Lasers de corantes;
- Laser 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 à aparição de deslocamentos atômicos no cristal, a rede cristalina aceita uma pequena quantidade de átomos introduzidos sendo da ordem de 10^{19} átomos/cm, mas suficiente para fornecer potências elevadas. Os representantes mais expressivos deste grupo são o laser de rubi, de Nd^{3+} :YAG e o de vidro dopado com neodímio.

Os lasers de corante 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 lasers.

Nos lasers semicondutores, a radiação é emitida no interior de uma junção p-n em um diodo de tipo semicondutor. 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 semicondutor do tipo “n” tem excesso de elétrons livres. Se duas placas, uma do tipo “p” e outra do tipo “n”, forem unidas, tem-se o que se denomina uma junção p-n. Através da aplicação de uma corrente elétrica nesta junção, obtêm-se pulsos de luz controlados pela variação da corrente da fonte de energia. As faces do laser semicondutor são clivadas ao longo dos planos cristalinos para formar superfícies reflexivas paralelas que agem como espelhos do mecanismo de retro-alimentação.

Os lasers a gás constituem a maior parte utilizada na indústria e funcionam com base em uma excitação, geralmente de natureza elétrica mas ocasionalmente 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 kilowatts 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.

No que se refere ao método de bombeamento, qualquer fonte de energia, até mesmo um outro laser, pode ser utilizada como fonte exterior de excitação que conduz os átomos do meio ativo para seus níveis energéticos superiores.

Existem vários métodos de bombeamento, sendo classificados como:

- Bombeamento óptico:
 - incoerente: lâmpada flash, lâmpada de arco
 - coerente: outro laser
- Bombeamento eletrônico:
 - descargas elétricas (contínuas, rádio-frequência, etc)
 - feixe de elétrons
- Bombeamento térmico
 - expansão hidrodinâmica
- Bombeamento químico
 - combustões químicas exotérmicas (chamas)
 - combustões rápidas (explosões)
- Bombeamento por injeção de portadores
- Bombeamento por partículas pesadas
 - Feixes de íons
 - produtos de fissão de um reator
- Bombeamento por radiação ionizante
 - explosão nuclear
 - fonte de raios X

2.2.3 Principais parâmetros do laser.

Em virtude da grande variedade de equipamentos a laser, com cada um possuindo suas próprias características construtivas, torna-se extremamente complexo definir uma configuração geral de parâmetros operacionais que possa ser aplicada de forma ampla. Por isto procuramos focalizar nosso estudo nos mais usuais e relacionados com a engenharia de materiais e suas transformações. Neste caso, as principais variáveis de um processo a laser são:

2.2.3.1 Potência do laser

A potência está relacionada com o comportamento do feixe do laser que pode ser contínuo ou pulsado e cuja influência na potência é descrita a seguir:

➤ **Efeitos na potência contínua** – Em um laser de potência contínua existe a possibilidade de se controlar a potência de saída. A partir do momento em que entra em operação, a potência do laser ascende linearmente para um valor nominal de potência P . Existem dois problemas principais neste tipo laser: uma penetração profunda ou a falta de penetração. A velocidade de tratamento máxima para uma dada espessura aumenta com o crescimento da potência. A profundidade do tratamento é inversamente proporcional à velocidade para um dado modo, tamanho de diâmetro do foco, e potência.

➤ **Efeitos na potência pulsada** – Para um laser do tipo pulsado a potência média é menor do que de um laser de potência contínua, pois a potência depende da duração do pulso e do intervalo entre os pulsos. O uso de potência pulsada permite mais duas variáveis: frequência de repetição de pulso (FRP) e percentual de cobertura, que são fatores que devem ser considerados. A velocidade de tratamento em função da potência é determinada pela relação entre o tamanho do ponto focal, a FRP e o percentual de cobertura. Neste caso, a velocidade é independente da potência. Já a profundidade é função da potência. Todavia, uma potência muito elevada ocasionará a evaporação e ejeção de material e até mesmo a perfuração, se a chapa for fina.

Porém independente do tipo de laser, o valor médio da potência pode ser controlado eletronicamente e ser condicionado ao tipo de operação a laser se assim for necessário.

2.2.3.2 Ponto focal

O ponto focal é definido como a área perpendicular de menor diâmetro ao feixe em que a densidade de potência é máxima. Ele é uma característica do equipamento. Dependendo do processo industrial a ser aplicado existe uma variação de sua posição quanto à peça de trabalho. Para processos de soldagem existem sugestões de que o ponto focal deveria se localizar dentro da peça de trabalho a uma profundidade ao redor 1 mm, para uma máxima penetração. O que se

considera neste caso é a necessidade de se ter densidade de potência suficiente para gerar um "buraco de fechadura" e após ser gerado, deve-se ter uma potência que mantenha o "buraco de fechadura" e aumente a penetração. Assim os parâmetros principais a serem considerados seriam a profundidade da posição focal e o tamanho mínimo do ponto.

No caso de processos de tratamento superficial, a localização e a forma do ponto focal em relação à peça de trabalho irá influenciar na densidade de potência a ser imputada pelo equipamento. O foco do feixe, conforme observado na Figura 2.2 pode ser localizado abaixo, sobre ou acima da superfície da peça, este último muito utilizado em processos de tratamento por atingir uma maior área e melhor condição de tratamento e juntamente com o tempo de exposição, a radiação exerce um fator primordial sobre a profundidade fundida ou tratada.

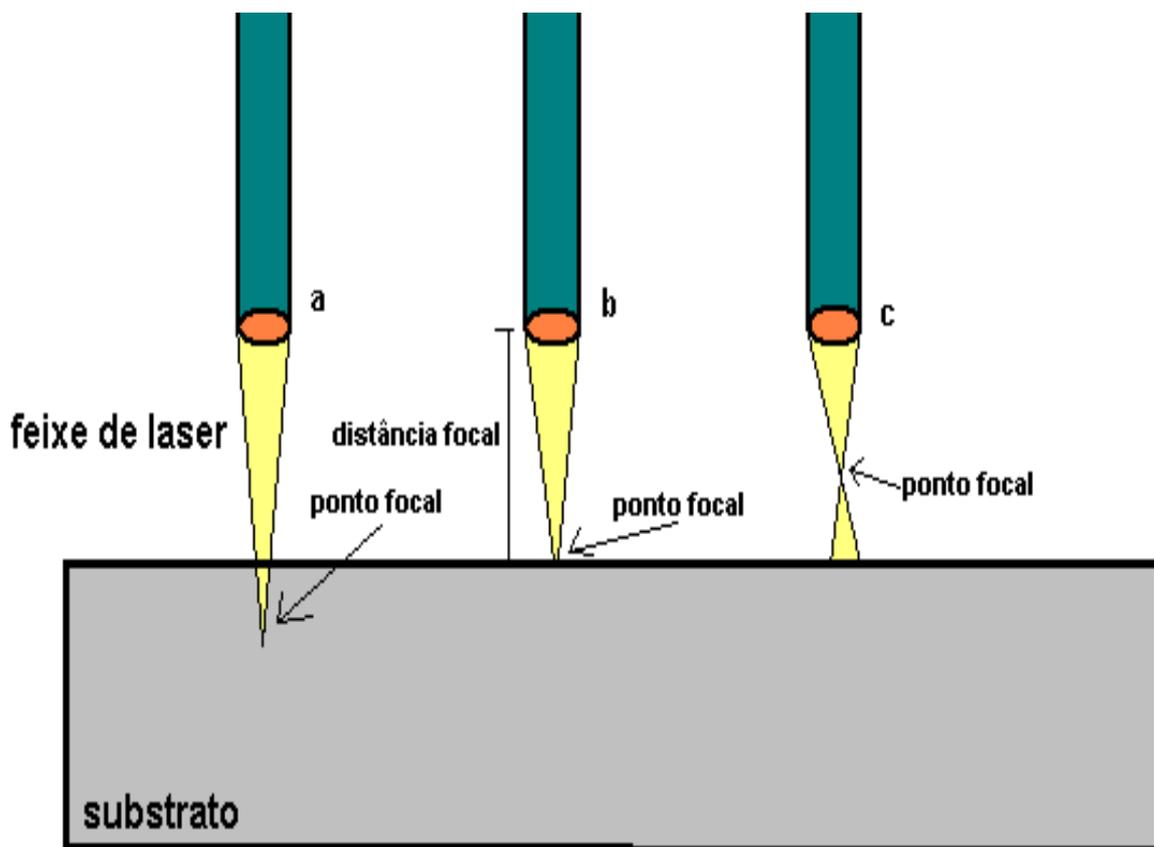


Figura 2.2 – Diferentes posições do ponto focal sendo: a) dentro da peça de trabalho alcançando máxima penetração; b) sobre a superfície e c) com o feixe defocado.

2.2.3.3 Distância focal

A distância focal é uma característica de cada equipamento de laser que é definida pela sua estrutura construtiva, principalmente do sistema de lentes, sendo conceituada como a distância entre a lente de convergência e o ponto focal, vista também na Figura 2.2. Quando o ponto focal encontra-se exatamente sobre o substrato dizemos que o feixe está focado no material, pois haverá uma coincidência entre a distancia focal e a distância entre a lente e a peça de trabalho. Nesse caso a área atingida na varredura terá o diâmetro do ponto focal. Porém, quando o ponto focal se encontrar abaixo ou acima da superfície do material dizemos que o feixe está defocado e a área atingida no passe do feixe será maior que aquela do diâmetro do ponto focal. A densidade de potência para uma distância defocada do feixe será menor, o que vai influenciar na energia absorvida e também na temperatura alcançada. A determinação correta do deslocamento ascendente do ponto focal, quando se trabalha com um laser que possui um feixe de alta densidade de corrente e um ponto focal com diâmetro conhecido, permite determinar a área de varredura em cada passe e a velocidade de varredura do feixe possibilitando diferenciar operações de corte e de tratamento de refusão, têmpera, revenimento e recozimento além de outros. .

2.2.3.4 Velocidade de varredura do feixe

Os efeitos da velocidade de varredura do feixe sobre o processamento a laser são descritos principalmente através da equação geral do balanço de calor. Porém, além destes efeitos principais há alguns outros. Primeiramente haverá o efeito da velocidade do feixe sobre a trilha sendo que a altas velocidades haverá baixa penetração e em baixas, evaporação de material e, em segundo lugar haverá o problema da proteção gasosa sobre a trilha em altas velocidades, pois a partir de um determinado valor de velocidade a proteção poderá começar a perder sua eficiência por não acompanhar o deslocamento do feixe.

2.2.3.5 Densidade de potência

A densidade de potência de um laser é definida como a razão entre a potência demandada pelo laser e a área do diâmetro focal. Ela também é influenciada pelo tipo de laser, se contínuo ou

pulsado. Um laser de operação contínua permite um aquecimento mais suave do substrato do que um laser pulsado, sendo aplicado em processos que exigem uma potência mais baixa e com maior tempo de exposição, como os necessários para tratamentos térmicos a laser e também para produção de ligas superficiais e revestimentos. Os lasers de potência contínua podem produzir densidades de potência de até 10^{10} W/cm².

Nas aplicações industriais, especialmente nas de engenharia de superfície, operações com lasers pulsados são utilizadas com menos frequência do que as com processo contínuo, principalmente quando se exige uma aguda sensibilidade no gradiente de temperatura, como em processos de revestimentos de camadas, pois produz uma maior densidade de potência do que pelo modo contínuo. O setor industrial que utiliza este tipo de laser requer densidades de potência máxima de 10^8 W/cm² e em condições extremas 10^{16} W/cm².

2.2.3.6 Comprimento de onda

O comprimento de onda depende da forma de transição da emissão de energia estimulada. Ela pode ser ampliada segundo os princípios do efeito Doppler ou conforme uma maior quantidade de entrega como no laser de CO₂. Quanto menor o comprimento de onda maior poderá ser a absorção de energia que se dá através dos fótons, pois maior será o número de elétrons que pularão de níveis e então a refletividade cairá para um menor percentual da energia incidente. Muitos sistemas foram inventados desde o primeiro laser, porém poucos tem aplicabilidade comercial devido à incompatibilidade com a absorção necessária para processamento do material na indústria. A radiação produzida por um laser está entre as formas mais puras dentro do espectro de luz.

2.2.3.7 Ângulo de incidência

Em certos ângulos de incidência do feixe, os elétrons superficiais podem sofrer inibição no movimento vibratório, pois isto significa deixar a superfície. Caso isto ocorra, pode ocasionar uma perturbação no substrato o que prejudica a absorção dos fótons de luz. Deste modo, se o vetor elétrico estiver contido no plano de incidência, a vibração dos elétrons está propensa a interagir com a superfície e a absorção assim será elevada: agora, se o plano se encontrar em

determinados ângulos em relação ao plano de incidência, então a reflexão superficial poderá acontecer intensamente. Gutu et al (2002) desenvolveram um trabalho sobre a incidência oblíqua do feixe de laser sobre a camada tratada. Existe um ângulo particular, denominado ângulo de “*Brewster*” no qual o ângulo de reflexão coincide com o ângulo de refração. Quando isto ocorre, impossibilita o vetor elétrico do ângulo de incidência ser refletido, pois não haverá propriamente a componente deste ângulo. Neste caso ao ângulo de refração terá 90° do ângulo de incidência e obedecerá a lei de “*Snell*” a qual indica que o índice de refração é igual a tangente do ângulo de “*Brewster*”. Alguns valores para o índice de refração “n”, para o coeficiente de absorção “S” e para os ângulos de “*Brewster*” são dados na Tabela 2.1 a seguir.

Tabela 2.1 – Índice de refração e ângulo de Brewster de alguns materiais (Steen, 1996)

Material	Coeficiente de absorção “S”	Índice de refração “n” (radiação=1 μm)	Ângulo de “Brewster”
Al	8,50	1,75	60,2°
Fe	4,49	1,81	75,2°
Ti	3,48	2,88	70,8°
Vidro	-	1,50	56,3°

2.3 A Engenharia de Superfície

2.3.1 O surgimento como ciência

A expressão “Engenharia de Superfície” foi aplicada pela primeira vez, na década de 70 no Reino Unido (Burakowski, 1999) onde nesta mesma década foi fundada a Sociedade de Engenharia de Superfície em Abington. Antes disto os estudos inerentes ao assunto estavam incorporados à Engenharia dos Materiais, criada anos após a Segunda Grande Guerra, assim como outras muitas áreas de ciências, e que relacionava a investigação da estrutura dos materiais com o desenvolvimento e obtenção de novos materiais, que pudessem ter suas propriedades previstas e reproduzidas conforme as necessidades da produção industrial.

A partir do momento em que se diferenciou uma ciência específica para tratar dos fenômenos de superfície, foram também discutindo mais profundamente os problemas inerentes da Engenharia de Superfície, correlacionando-se os processos já conhecidos com as novas

tecnologias que iam rapidamente surgindo. Temos como exemplo daquele início os tratamentos de difusão superficial e sua correlação com a tecnologia a vácuo em sua aplicação na formação de camadas superficiais. No ano de 1985 foi publicada a primeira edição do periódico trimestral denominado “Engenharia de Superfície” pelo Instituto Wolson para Engenharia dos Materiais em conjunto com a Sociedade de Engenharia de Materiais. No ano de 1987 começaram a ser editados os periódicos “Surfacing Journal International” e “Surface Engineering” os quais publicam pesquisas envolvendo diversos temas sobre tecnologia de superfície tais como tecnologias de spray, formação de camada por PVD e CVD, feixe de elétrons, raio laser, implante de íons, processo por plasma ou convencional para formação de camada ligada e outras tecnologias de revestimento de superfícies. Outros periódicos surgiram para publicações mais específicas de revestimentos de superfície, tais como a ‘ Surface and Coating Technology’ .

Os ensaios considerados mais importantes em Engenharia de Superfície são aqueles que consistem na determinação das propriedades físicas e químicas da camada externa do substrato e que devem atingir uma significativa quantidade de amostras. Em alguns casos, deve-se combinar vários métodos investigativos tradicionais como ensaios tribológicos, resistência dos materiais e proteção contra corrosão feitos de maneira rigorosa, com investigação da estrutura cristalina em escala microscópica.

2.3.2 A importância do estudo da superfície

Da mesma maneira que em um organismo vivo, no qual a camada externa o protege das agressividades do meio ambiente, pode-se também aplicar esta similaridade na tecnologia em que o limite estrutural da superfície de um material o protege do meio que o cerca ou do próprio meio ambiente. Os organismos vivos estão sempre em processo evolutivo visando sempre melhorar estas barreiras de proteção. Diante disto o que impulsiona o desenvolvimento da engenharia de superfície sendo seu objetivo primordial de pesquisa é a melhoria da forma, da otimização do processo de produção e da resistência ao desgaste durante o serviço ou aplicação.

A superfície sólida de um material seja de uma ferramenta ou parte de uma máquina ou de um produto acabado, tem sido por muitos anos objeto de estudo de processos físicos e químicos,

sobre a qual sempre se requer melhores condições de uso. São requeridas sempre melhores propriedades de resistência à corrosão, ao desgaste, aos esforços de fadiga e boas condições de condução elétrica e térmica entre outras melhorias. Porém propor melhor condição anticorrosiva ou antidesgaste pode acarretar custos elevados de produção ou dificuldades de conformação como nos aços inoxidáveis austeníticos ou com aqueles ricos em carbeto.

A superfície de um sólido é usualmente caracterizada de maneira diferente da parte interna de um material. Esta diferença deriva principalmente devido a:

- Uma condição distinta de energia, ocasionada pelo elevado estado de energia e maior atividade de absorção;
- Uma combinação de efeitos mecânicos, térmicos, elétricos, físicos e químicos durante a produção do material;
- Ação do meio sobre ou do material sobre a superfície durante seu uso que pode agir de forma cíclica ou contínua oriundo de origem mecânica, térmica, física ou química.

O conceito de superfície pode diferir bastante dependendo do foco científico. Pode ser um conceito meramente matemático que diz que a superfície é uma figura geométrica bidimensional ou o conceito mecânico que diz ser a superfície o limite do corpo, o que é considerado um conceito muito geral, dependendo da escala, isto é, se molecular, micro ou macro ou o conceito físico-químico que diz ser a superfície uma interface entre duas fases distintas.

2.4 O laser aplicado à Engenharia de Superfície

Quando um laser atinge um substrato sob um ângulo α com a direção normal à superfície de um material opaco, o raio será parcialmente refletido, parcialmente absorvido e, nos materiais transparentes como o vidro, parcialmente transmitido com um percentual da luz sofrendo refração (Rubahn, 1996).

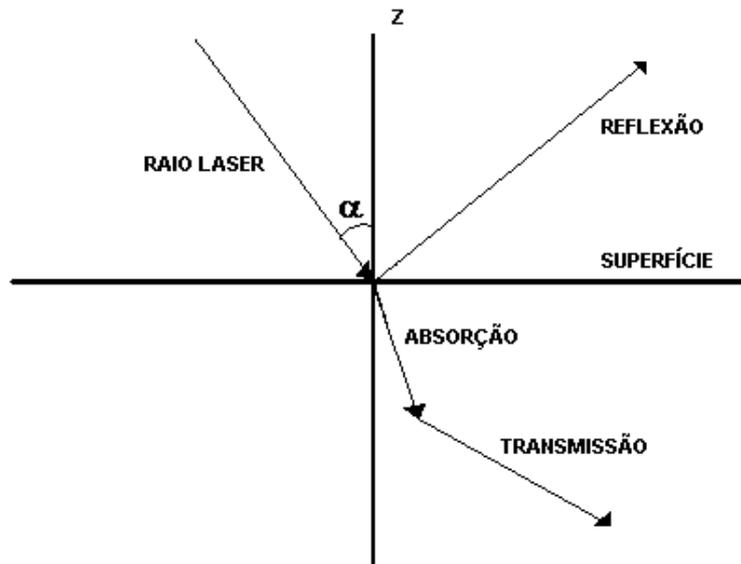


Figura 2.3 – Reflexão, absorção e transmissão de um feixe de laser que atingiu uma superfície.

A refletância, R' , definida como o percentual de energia que retorna da superfície, é dada pela razão entre as intensidades refletida (E_r) e incidente (E_i). No caso da luz do laser incidir sobre a normal ($\alpha=0$) em ambiente de vácuo, com índice de refração igual a um, tem-se:

$$R' = \frac{|E_r|^2}{|E_i|^2} = \left| \frac{\tilde{n} - 1}{\tilde{n} + 1} \right|^2 \quad 2.1$$

Com E_r significando a energia refletida e E_i a incidente e $\tilde{n} = n' + in''$ o índice complexo de refração. Como exemplo, considerando uma irradiação média do vidro $n \cong 1,5$ e considerando, uma incidência com $\alpha = 0^\circ$ a refletividade será de 0,04, isto é, para uma incidência normal sobre o vidro, 4% da luz será refletida para o ambiente.

Uma das primeiras aplicações do laser na indústria foi no corte de chapas metálicas. Este processo vem até hoje crescendo em suas aplicações, sendo que no Japão ele representa 80% de toda a indústria de corte de chapas. Porém a partir daí muitas outras aplicações do laser foram encontradas. Descreveremos as principais utilizações do laser na indústria de transformação.

2.4.1 Têmpera Superficial

As aplicações industriais da têmpera a laser (Bergmann, 1995) se devem especialmente à possibilidade de se obter o tratamento em uma região superficial com profundidade bem definida, alcançando-se altas temperaturas (devido a grande união entre eficiência e alta densidade de energia) e altas taxas de resfriamento. Isto permite a melhoria das propriedades tribológicas dos materiais como resistência ao desgaste, a resistência à fadiga e a resistência a corrosão. Se o aquecimento alcançado ficar abaixo da temperatura de transição não haverá têmpera, mas as propriedades do material poderão ficar bem homogêneas. Acima desta temperatura a têmpera ocorre nos aços com alto teor de carbono. A Figura 2.4 (Ganeev, 2002) mostra um esquema de equipamento típico (característico de laser de CO₂ de alta potência). O raio laser é dirigido através de sistema de elementos óticos para homogeneização do raio, sob um gás inerte sobre a amostra montada em uma mesa de trabalho controlada por computador. A taxa de resfriamento é geralmente rápida o suficiente para dar um endurecimento devido à formação da martensita. As principais vantagens deste processo são: o tratamento é localizado e a profundidade da camada acabada pode ser determinada com precisão; pode ser feito em peças acabadas; pode ser automatizado; o calor fica confinado na superfície o que acaba produzindo uma baixíssima distorção na peça; a alta velocidade do processamento a laser torna a produtividade também elevada; cria uma superfície rica em carbonetos, o que melhora propriedades de desgaste e a resistência à corrosão dos materiais.

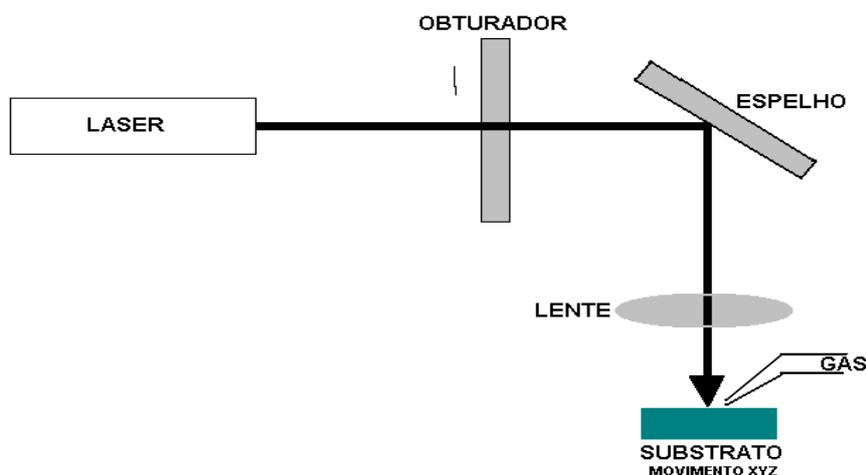


Figura 2.4 – Figura esquemática para um tratamento de material por aquecimento a laser.

As perdas por reflexão são minimizadas pelo aumento da rugosidade do substrato, através da oxidação ou do revestimento da camada superficial. Outra possibilidade está na irradiação do material de acordo com o ângulo de Brewster ($\alpha \approx 8^\circ$ para metais) com a luz polarizada paralela ao respectivo ângulo de incidência.

Entre os diversos trabalhos existentes sobre o assunto, pode-se destacar o de Ganeev (2002) que estudou o endurecimento superficial dos aços de baixo e médio teor de carbono com um laser de CO₂ de baixa potência; Heitkemper et al (2003) estudaram o comportamento da fratura e fadiga da camada superficial de um aço alto-nitrogênio tratado a laser; Pertek e Kulka (2003) limitaram seu estudo à caracterização de uma trilha simples feita por laser em uma superfície boretada do aço 41Cr4.

2.4.1.1 Tratamentos pré - têmpera.

Em muitos casos de têmpera, para se conseguir uma maior dureza superficial ou de uma maneira geral, melhores propriedades superficiais procura-se primeiramente proceder-se um tratamento térmico inicial ou um tratamento termoquímico. A alteração da camada superficial resulta, devido ao surgimento de carbonetos, nitretos ou outros elementos de liga, em melhorias após o tratamento final. Alguns trabalhos utilizando laser após um pré-tratamento foram realizados. Blawert et al. (1998) estudaram a influência dos parâmetros operacionais em um aço nitretado a partir de implante iônico; Cui et al. (2003) apresentaram um trabalho onde verificaram as características da corrosão devido a erosão por cavitação de uma liga NiTi modificada a laser após nitreção. Um trabalho que aplicou um novo método de nitreção de ligas ferrosas através do controle automático da atmosfera, e utilizado neste estudo, foi feito por Liliental, Tymowski e Tarfa (2005).

2.4.2 Refusão Superficial

A principal diferença entre este processo e de tratamento térmico a laser é que neste caso a superfície sofre refusão. Este processo apresenta características técnicas bem definidas tais como uma taxa de solidificação rápida, o que acaba produzindo uma estrutura extremamente refinada; uma baixa penetração térmica o que resulta em baixa distorção e a possibilidade de operar

próximo a materiais termicamente sensíveis e um acabamento superficial em torno de 25 µm. As principais aplicações industriais da refusão a laser são a estruturação e impermeabilização superficial, formação de liga superficial e nitretação, têmpera por fusão, soldagem (Duley, 1998), LPE e CVD a laser.

Muitos trabalhos estão sendo realizados no desenvolvimento de pesquisa com refusão superficial a laser e pode-se destacar os seguintes: Tomida et al (2003) estudaram a melhoria da resistência de uma liga fundida hiper eutética Al-Si através da refusão superficial com um laser de CO₂; O efeito da refusão superficial a laser sobre o comportamento da corrosão de uma chapa de titânio puro foi pesquisa por Sun et al (2003) a partir de um laser do tipo Nd-YAG; o mesmo tipo de laser foi utilizado por Lima et al (2003) para verificar as mudanças microestruturais provocadas pela evaporação de uma superfície oxidada de um aço ferramenta AISI M2, Grum e Sturm (2002) compararam a espessura da camada superficial de um ferro fundido nodular refundido com um laser de CO₂ com potência de 450 W; com uso também com um laser de CO₂ mais recentemente Colaço e Vilar (2004) investigam a estabilização da austenita retida em aços ferramenta AISI 420 fundidos superficialmente a laser; as características microestruturais da liga Cu-Mn refundida superficialmente a laser também foram investigadas por Yang et al (2004) usando um laser de CO₂ com 5KW de potência.

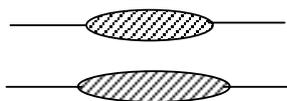
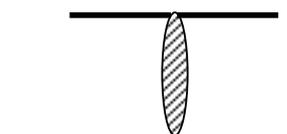
2.4.3 Soldagem a Laser

O raio laser concentrado é uma das mais altas fontes de densidade de potência disponíveis atualmente na indústria. Este é similar em densidade de potência ao processo por feixe de elétrons. Juntos, laser e feixe de elétrons representam parte da nova tecnologia de processo de alta densidade de potência. A Tabela 2.2 (Steen, 1993) compara a densidade de potência de vários processos de soldagem.

Com densidades destas magnitudes, praticamente todos os materiais sofrerão evaporação, se a energia emanada pelo laser puder ser absorvida. Assim, quando soldado desta maneira, uma cavidade normalmente é formada através da evaporação do material. Esta cavidade é então deslocada pelo material fazendo com que as paredes fundidas acompanhem atrás da mesma. O

resultado será, segundo a maneira pela o qual é conhecida, um solda do tipo "buraco de fechadura". Esta é caracterizada através de sua zona de fusão de lados paralelos e sua largura estreita.

Tabela 2.2 – Densidades de potência de diferentes processos de soldagem (Steen, 1993).

Processo	Intensidade da fonte de calor W/m ²	Perfil da região fundida
Soldagem a arco com proteção de fluxo	$5 \times 10^6 - 10^9$	
Soldagem a arco com proteção de gás	$5 \times 10^6 - 10^9$	
Plasma	$5 \times 10^6 - 10^8$	
Laser e Feixe de elétrons	$10^{10} - 10^{12}$	

Entre os mais diversos trabalhos em soldagem a laser pode-se citar: Sun e Kuo (1998) investigaram o preenchimento do intervalo dos passos de trilhas em chapas de aço e de inox soldados a laser com alimentação de arame; Chang e Na (2002) estudaram a previsão de uma solda a laser através de equações de calor.

2.4.3.1 Características operacionais:

Tzeng (2000) Carmignane, Mares e Toselli (1999) estudaram os principais parâmetros de processo e as influências destes sobre as propriedades da soldagem a laser, relacionadas abaixo:

- Propriedades elétricas - potência (pulsada ou contínua); tamanho e forma do ponto; polarização; comprimento de onda;
- Propriedades de transporte - velocidade; posição focal; geometria da junta; intervalo de tolerância;

- Propriedades do gás de proteção - composição; forma de proteção; pressão/velocidade de vazão;
- Propriedades do material - composição; condições da superfície

2.4.3.2 Soldagem de materiais diferentes recortados e emendados para estamparias.

A indústria tem desenvolvido um processo de soldagem de diferentes materiais recortados e emendados para estampagem, conhecidos no termo inglês como “*taylored blank*” (Tusek, J. et al. 2001; Kinsley, B. et al. 2001). O processo ocorre em geral, através de fusão por soldagem e também por soldagem com pressão, praticamente sem fusão. A soldagem por fusão pode ser realizada com ou sem adição de material de enchimento. As características desse processo em que as chapas recortadas para estampagem e emendadas são comparadas como, por exemplo, entre uma soldagem MIG e uma soldagem a laser de um aço inoxidável austenítico com um aço não-inoxidável ferrítico. Após a realização da soldagem, a dureza e as juntas soldadas geralmente são medidas. Nas juntas soldadas são revelados os perfis de profundidade. No final, as conclusões são relatadas. As investigações têm mostrado que o processo de estampagem de “blanks” emendados entre um aço inoxidável e um aço ferrítico de baixa liga não possibilita soldagem a laser ou pelo processo TIG entre si sem adição de material de enchimento. Um processo adequado e um material de enchimento devem ser selecionados. A finalidade de um material de enchimento é para compensar as diferenças de propriedades químicas e físicas de ambos os materiais (Vicentin, 1999). Kampus e Balie (2003) descreveram experimentos sobre estampagem profunda em estampas costuradas sem dispositivo de fixação e Cahn e Lee (2003) estudaram o efeito de estampas costuradas de diferentes espessuras sobre o diagrama de limite de conformação.

2.4.4 Adição de um elemento de liga – “*Alloying*”

Neste processo um outro material é adicionado a poça fundida formando uma liga superficial com a finalidade de melhorar as propriedades superficiais do material. As principais características deste processo são: uma espessura da camada formada variando de 1 a 200 μm e uma variedade de materiais pode ser ligada a diferentes tipos de substratos. Euh et al (2003)

verificaram o efeito do revenimento sobre a superfície de um aço Vanádio-Carbono endurecido com uma mistura de carvão de vanádio e um fluxo de MgO (50%) e CaO (50%) aplicado com feixe de elétrons; Thawari, Sundararajan e Joshi (2003) estudaram a adição de SiC_(P) aplicado com laser de CO₂ sobre um aço médio teor de carbono; Utilizando um fino pó de carvão de tungstênio Lo et al. (2003) trabalharam no melhoramento da resistência a erosão por cavitação do aço inoxidável AISI 316 e um laser de Nd:YAG foi usado neste trabalho. Zeng, Xie e Yung têm trabalhado com formação de liga sobre um aço SAE 1045 a partir de compósitos.

2.4.5 Cobertura com uma camada de proteção com auxílio do laser – *Cladding*

O objetivo deste processo é fundir uma liga que pode ser de origem metálica, cerâmica ou um compósito, na superfície de um substrato com um mínimo de diluição do substrato. Com isto obtém-se uma superfície dura, resistente ao desgaste e a corrosão (Garcia, 2001).

O processo, esquematizado na Figura 2.5, pode ser realizado colocando previamente o pó (material que se pretende reagir) sobre a superfície do substrato ou soprando o pó na poça fundida pelo laser, o qual pode ser produzido de diversas formas. Outra opção é aplicar o material em forma de fios ou folhas finas. Este processo é muito pesquisado atualmente. Zhang et al (2001) estudaram a melhoria de desempenho ao desgaste decorrente do revestimento a laser da liga Ni-Cr₃C₂ sobre um aço inoxidável; Yue et al (2001) realizaram um processo semelhante porém a partir do “cladamento” de um aço inox sobre o compósito ZK60/SiC; Kim e Peng (2001¹⁻²) estudaram o efeito da posição do tubo de injeção do pó na qualidade da camada formada; Uenishi e Kobayashi (1999) estudaram a formação da camada superficial do composto intermetálico Al₃Ti sobre uma liga de alumínio e sua compatibilidade com cerâmicos; Anjos, Vilar e Qiu (1997) realizaram um trabalho em que depositaram um aço inoxidável ASTM S31254 sobre uma chapa de aço carbono com uso de um laser de CO₂. O grupo de solidificação da FEM/UNICAMP também desenvolveu trabalhos nesta área em conjunto com outras instituições resultando em uma tese (Pinto, 2004) sobre deposição de cerâmico sobre uma chapa metálica com técnicas de adição por sopragem do pó o qual foi realizado conjuntamente com o Instituto Técnico de Portugal de Lisboa, possuidor do laser de CO₂ usado no processo experimental.

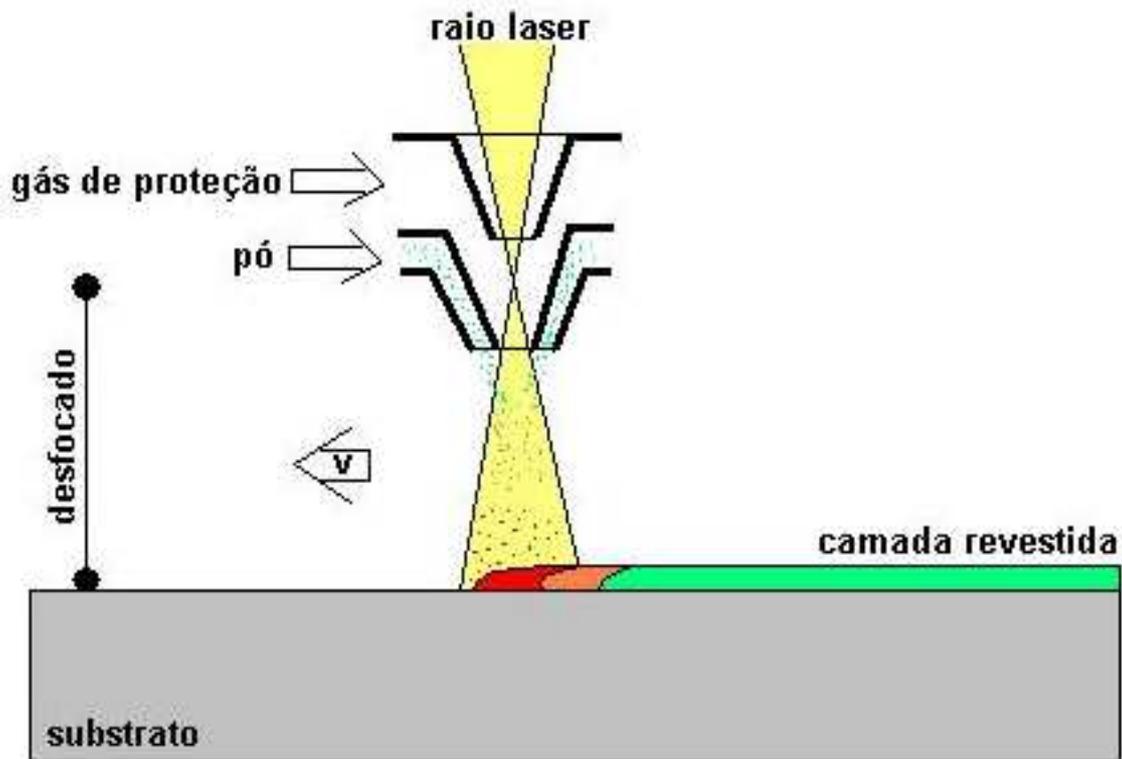


Figura 2.5 Princípio de deposição a laser com deposição coaxial de pó (Acker, 2005).

2.4.6 Outras Aplicações

A deposição química a partir de vapor (CVD-chemical vapor deposition) é um processo de deposição de materiais no qual um ou mais constituintes reagem na fase de gás ou vapor, perto ou sobre um substrato sólido, para gerar um revestimento sólido. As reações envolvidas durante a deposição pela técnica de CVD podem ser agrupadas em diversos tipos, entre os quais podemos citar: pirólise, redução, oxidação, hidrólise, etc, e devem ser ativadas para melhorar a produtividade do processo. O laser é usado em muitas aplicações como ativador da reação dos gases e pode também ser usado para aquecer a superfície do substrato, aumentando a taxa de revestimento em áreas selecionadas e também possibilitando modificar as estruturas dos revestimentos. O método tem sido muito usado na área de circuitos eletrônicos e filmes resistentes ao desgaste como TiC. Fu et al (2000) realizaram um trabalho em que comentam considerações sobre o abrandamento no processo de degradação superficial a partir de peças com aplicação de camadas por CVD.

2.5 Ensaios Superficiais

2.5.1 Ensaio de difração de Raios X

O método de difração de raios X é de grande importância na análise microestrutural principalmente quando se trata de estudo de modificações superficiais. Este método fornece informações sobre a natureza e os parâmetros do reticulado, assim como detalhes a respeito do tamanho, da perfeição e da orientação dos cristais. Muitos trabalhos envolvendo o estudo de superfícies resultantes de tratamentos térmicos em aços (Rocha, 2005), perda seletiva de material superficial (Imafiku, 2005), implante iônico (Marques, 2005; Caudron, 2000), e superfícies bombardeadas por aceleradores de partículas (Chen, 2004) utilizam o difratômetro como ferramenta fundamental na análise das modificações superficiais.

2.5.1.1 Lei de Bragg – Direção do feixe refratado

Se um feixe de raios X com uma dada frequência incidir sobre um átomo isolado, elétrons deste átomo serão excitados e vibrarão com a frequência do feixe incidente (Padilha, 1996). Estes elétrons vibrando emitirão raios X em todas as direções com mesma frequência do feixe incidente. Isto é, o átomo isolado espalha o feixe incidente de raios X em todas as direções. Entretanto, quando os átomos estão regularmente espaçados em um reticulado cristalino e a radiação incidente tem comprimento de onda da ordem deste espaçamento, ocorrerá interferência construtiva em certas direções e interferência destrutiva em outras. A Figura 2.6 abaixo mostra um feixe monocromático de raios X, com comprimento de onda λ incidindo com um ângulo θ em um conjunto de planos cristalinos com espaçamento d .

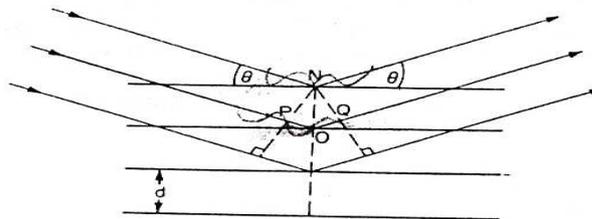


Figura 2.6 – Difração de raios X por um cristal (Padilha, 1996).

Só ocorrerá interferência construtiva entre os feixes refletidos se a distância extra percorrida por cada feixe for múltipla inteira de λ . Por exemplo, o feixe difratado pelo segundo plano de átomos percorre uma distância PO + PQ a mais que o feixe difratado pelo primeiro plano de átomos. A condição para que ocorra interferência construtiva é:

$$PO + PQ = n\lambda = 2d\text{sen}\theta' \quad 2.2$$

onde n é igual a 1, 2, 3, 4.....Esta equação é conhecida como lei de Bragg e os ângulos θ' para os quais ocorre difração são chamados ângulos de Bragg. Os principais elementos usados para fonte de radiação em ensaios de difração estão listados na Tabela 2.3 (Padilha, 1996). Verifica-se que os comprimentos de onda mais utilizados estão na faixa de 0,5 a 3 Å, ou seja, são da ordem dos espaçamentos interplanares para que possa ocorrer interferência.

Tabela 2.3 - Comprimento de onda, em Å, das radiações mais utilizadas em difração de raios X.

Elemento	K α *	K α 2	K α ₁	K β ₁
Cr	2,291000	2,293606	2,289700	2,084870
Fe	1,937355	1,939980	1,936042	1,756610
Co	1,790260	1,792850	1,788965	1,620750
Cu	1,541838	1,544390	1,540562	1,392218
Mo	0,710730	0,713590	0,709300	0,632288

O difratômetro é mostrado de maneira esquemática na Figura 2.7. O feixe de raios X é gerado pela fonte S, passa pelo colimador A e incide na amostra C, a qual está sobre o suporte H. A amostra sofre movimento de rotação em torno do eixo O, perpendicular ao plano da figura. O feixe difratado passa pelos colimadores B e F e incide no detector G, o qual está sobre o suporte E. Os suportes E e H são acoplados mecanicamente de modo que o movimento de 2 x graus do detector é acompanhado pela rotação de x graus da amostra. Este acoplamento assegura que o ângulo de incidência e o de reflexão serão iguais à metade do ângulo de difração. A área da amostra, que deve ter uma superfície plana, é iluminada pelo feixe geralmente em um diâmetro de aproximadamente 9 mm. A espessura da amostra, que pode ser alcançada pela penetração dos

raios X, é muito pequena, da ordem de 10 μm microns de profundidade evidenciando a importância de a superfície da amostra estar livre de tensões.

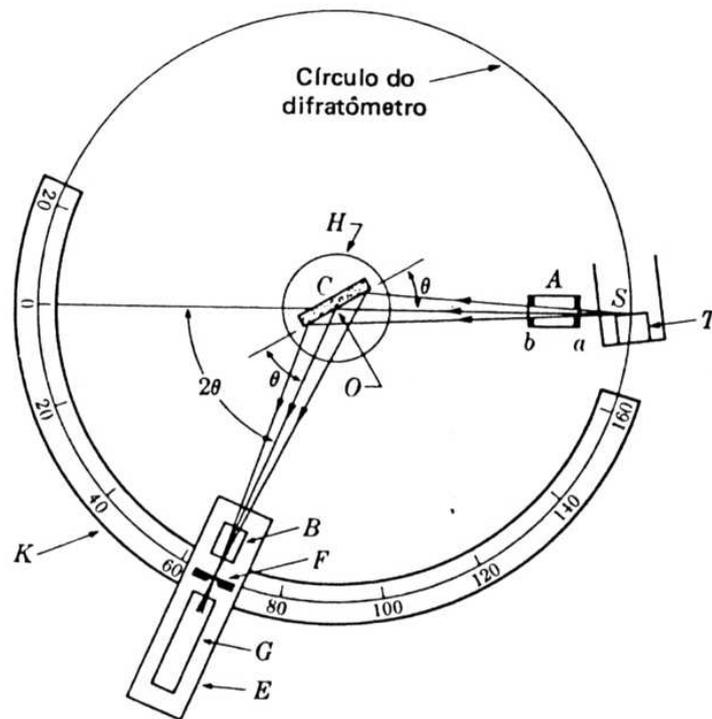


Figura 2.7 – Esquema de funcionamento de um difratômetro de raios X (Padilha, 1996).

2.5.2 Ensaio de Corrosão

O estudo dos fenômenos corrosivos é essencial para o desenvolvimento da engenharia de superfície, pois eles são fenômenos de interface que afetam principalmente os materiais inorgânicos (Gemelli, 2001). A corrosão pode ser definida como uma reação química ou eletroquímica entre um material, geralmente um metal, e o seu ambiente, acarretando a deterioração do material e alterando as suas propriedades. Considerando-se que a corrosão consiste numa interação do material com o meio em que se encontra, diferentes fatores podem interferir no processo de corrosão. O ambiente inclui não apenas a atmosfera gasosa ou o meio líquido ao redor da amostra, mas também a temperatura e suas variações e as condições específicas de fluxo. Isto significa que a corrosão é um comportamento do material num meio específico.

Pelo fato de a corrosão ser um processo indesejado, tem-se procurado melhorar a resistência à corrosão dos materiais até mesmo através de camadas decorativas ou de camadas resistentes ao desgaste. Várias técnicas específicas para a proteção contra corrosão também têm sido desenvolvidas, entre elas a deposição de camadas de natureza orgânica e de revestimentos metálicos (Fedrizzi et al., 2002; Rossi et al., 2002). Para que um determinado tipo de revestimento possa proporcionar uma boa proteção contra a corrosão faz-se necessário que o mesmo possua alta resistência à corrosão (Yoo et al, 2002), apresente uma estrutura livre de poros e tenha boa adesão. Além disso, os custos de produção desempenham um papel muito importante na escolha do processo de revestimento adequado para determinada aplicação.

2.5.2.1 Corrosão de um Revestimento Metálico e do Substrato

Entre os muitos conceitos de corrosão, pode-se defini-la como sendo o resultado da reação de um material ou de uma camada com o seu ambiente. No caso da corrosão metálica, os átomos se transformam de um estado dito metálico para um estado oxidado. Os produtos desse processo de corrosão podem se apresentar dissolvidos no meio ou sob a forma de um composto sólido. A explicação básica para a ocorrência do processo corrosivo é a tendência que determinado material apresenta de diminuir a sua energia livre quando em contacto com determinado meio.

A corrosão de metais manifesta-se em diferentes meios, porém o meio em que ela ocorre com maior frequência é o aquoso (Wolyneq, 2003). Neste meio, o mecanismo da corrosão é essencialmente eletroquímico, sendo o metal denominado de eletrodo e o meio corrosivo de eletrólito. O eletrólito é condutivo devido à presença de cátions e ânions dissolvidos. Sendo assim, a reação de corrosão pode ser representada por um circuito elétrico fechado, em que a corrente depende da condutividade elétrica do metal e da condutividade iônica do eletrólito. Portanto, a corrosão só se inicia após o contato elétrico direto entre o metal e o eletrólito. Em alguns casos, quando se forma uma camada não-condutora como produto da corrosão, como, por exemplo, o óxido de alumínio sobre o alumínio, cessa a corrente de corrosão, bloqueando o processo corrosivo.

A corrosão no meio aquoso envolve pelo menos duas reações simultaneamente. A

transferência de um átomo para a sua forma metálica origina elétrons livres que irão reduzir o agente oxidante correspondente. A reação de corrosão se processa até que o equilíbrio eletroquímico entre a superfície metálica e o meio aquoso seja atingido. Este equilíbrio é influenciado pelo tipo de material e pela atividade dos reagentes.

Quando a concentração do íon metálico no eletrólito é muito baixa, a corrente de corrosão é predominantemente anódica, isto é, o metal é corroído pela sua dissolução no eletrólito. Considerando um sistema fechado, a corrente existe até que o sistema atinja o seu estado de equilíbrio. No equilíbrio dinâmico, a soma das correntes anódica e catódica é igual a zero, ou seja, a taxa de dissolução do metal é igual à taxa de deposição do mesmo, de modo que nenhuma perda de massa é observada. Na prática, o estado de equilíbrio nunca é atingido, de modo que a corrosão se processa continuamente.

Na prática, quando diferentes metais estão presentes como componentes de ligas ou nos sistemas formados por um revestimento e seu substrato, as diferentes reações eletroquímicas ocorrem simultaneamente, resultando num potencial misto, também chamado de potencial do par galvânico. A corrosão de um sistema é então determinada pela relação dos respectivos metais em contato. Além disso, as condições do ambiente tais como o pH, a temperatura, a concentração do eletrólito e as condições hidrodinâmicas afetam o processo corrosivo.

No caso de um sistema formado por uma camada depositada sobre um substrato, a princípio, o processo corrosivo é limitado pela resistência à corrosão do material do revestimento em relação ao meio. Entretanto, isto é válido apenas para revestimentos totalmente densos que separam completamente o meio corrosivo do substrato. Na prática, tanto revestimentos quanto filmes finos apresentam poros, vazios e outros defeitos que surgem após a deposição. Esses defeitos permitem que o meio corrosivo entre em contato com o substrato ou com camadas intermediárias.

Dependendo da combinação dos materiais, o revestimento pode ser mais nobre ou menos nobre do que o material do substrato. No caso de um revestimento mais nobre, quando o meio corrosivo atinge o substrato, forma-se uma célula galvânica onde o substrato representa o anodo e

o revestimento representa o catodo. Como consequência tem-se uma corrosão local do substrato bastante acentuada. A densidade de corrente anódica é bastante elevada devido à pequena área superficial do substrato exposta, enquanto a descarga catódica de H^+ ou a redução do oxigênio ocorre em toda a superfície do revestimento. Isto explica por que os defeitos no revestimento podem ser tão danosos. Portanto, se não for possível depositar uma camada sem defeitos, deve-se procurar distribuí-los de forma homogênea, a fim de reduzir a corrosão local.

Quando o material do revestimento é menos nobre, observa-se uma proteção anódica do substrato. Neste caso, o revestimento é dissolvido de maneira uniforme e em virtude da área catódica ser relativamente pequena, tem-se também uma taxa de corrosão baixa.

Na prática, dois métodos para melhorar a resistência à corrosão são aplicados: a) um revestimento mais nobre protegendo um substrato menos nobre. Neste caso, o revestimento deve ter alta resistência à corrosão e não apresentar defeitos, caso contrário, a corrosão galvânica localizada pode degradar o substrato. Como exemplos, tem-se a deposição de cobre, níquel e cromo; b) um revestimento menos nobre, funcionando como eletrodo de sacrifício. Neste caso, a proteção contra a corrosão é garantida enquanto durar o revestimento. Como exemplos, tem-se os revestimentos de zinco e cádmio.

2.5.2.2 Tipos de ensaios aplicados à corrosão

Para se obter informações sobre o processo de corrosão de um material ao longo do tempo, têm-se procurado realizar ensaios de curta duração. O ambiente utilizado pode simular uma área tropical úmida, uma atmosfera salina de uma região litorânea, uma zona industrial etc.

Os ensaios em laboratório podem facilmente comparar o desempenho dos materiais nos mais variados ambientes agressivos. Estes testes consistem na exposição contínua do material com a possibilidade de se ajustar a agressividade do meio, de tal modo que resultados confiáveis possam ser obtidos num intervalo de tempo mais curto. Isto significa, portanto, que o mecanismo da reação de corrosão pode ser alterado pois será acelerado.

As amostras analisadas nos ensaios de curta duração normalmente são inspecionadas visualmente ou opticamente. Através destes ensaios, pode-se verificar se o revestimento ou o substrato foi corroído, o tipo de corrosão, se existir, e a localização dos ataques corrosivos. O aspecto e a coloração dos produtos da reação podem fornecer informações sobre o tipo de corrosão. A distribuição e a extensão da corrosão fornecem informações sobre as propriedades do revestimento (distribuição de defeitos) e sobre a sua qualidade (por exemplo, homogeneidade da espessura).

Em muitos casos, a imersão completa da amostra numa solução corrosiva representa a melhor simulação do processo corrosivo. Entretanto, as condições do ensaio devem ser bem controladas para assegurar a reprodutibilidade dos resultados. As soluções geralmente são escolhidas em função das condições reais do problema e são preparadas em alta concentração para acelerar o processo de corrosão. A maior parte das condições do ensaio é padronizada, tais como, composição da solução, temperatura, aeração e velocidade da solução, duração do ensaio e limpeza da amostra após o ensaio (ASTM G 31-72, 1999).

2.5.2.3 Teste de Polarização Eletroquímica ou Extrapolação de Tafel

O método de extrapolação da reta de Tafel tem sido utilizado com sucesso na determinação da taxa de corrosão do ferro comercialmente puro em diferentes meios ácidos. Entretanto, seu emprego para medir a taxa de corrosão de aços-carbono, que apresentam nesses meios uma taxa de corrosão maior, tem sido limitado, pois não se consegue obter trechos lineares bem definidos nas curvas de polarização. A ausência de um trecho linear bem definido na curva de polarização pode ser atribuída ou a adsorção específica ou a polarização de concentração ou a queda ôhmica. Quando uma dessas causas for responsável, pouco pode ser feito para viabilizar o emprego do método. Se a causa, no entanto, for a queda ôhmica, o problema pode ser contornado através de técnicas experimentais existentes para compensação dessa queda ou, através de procedimento de cálculo utilizando a técnica de regressão linear.

Uma aplicação do método de polarização é a determinação da densidade de corrente através do ensaio de extrapolação de Tafel. Teoricamente, a densidade de corrente e as curvas de

polarização podem ser calculadas através da equação abaixo:

$$\Delta i = i^* \left[\exp\left(\frac{2,3 \cdot \Delta E}{\beta_a}\right) - \exp\left(-\frac{2,3 \cdot \Delta E}{\beta_c}\right) \right] \quad 2.3$$

Onde Δi é a densidade de corrente aplicada, i^* é a densidade de corrente de corrosão, ΔE é a polarização, β_a e β_c são as inclinações anódica e catódica de Tafel.

Quando a polarização anódica for muito alta, o segundo termo da Equação 2.3 torna-se muito pequeno e quando a polarização é altamente catódica, o primeiro termo é que se torna bastante pequeno. Nestes casos, a Equação 3.2 pode ser reescrita da seguinte forma:

$$i_a = i^* \cdot \exp\left(\frac{2,3 \cdot \Delta E}{\beta_a}\right) \quad [i_c] = i^* \cdot \exp\left(-\frac{2,3 \cdot \Delta E}{\beta_c}\right) \quad 2.4$$

O gráfico da polarização em função do logaritmo da densidade de corrente apresenta um comportamento linear para determinados valores do potencial, conforme mostrado na Figura 2.8. A extrapolação dessas linhas retas até o potencial de circuito aberto pode ser utilizada para determinar a densidade de corrente do processo de corrosão. Ela permite determinar também a partir das retas de Tafel, os parâmetros β_a e β_c . Assim se a inclinação da reta anódica for θ e da catódica γ , então $\beta_a = \text{tg } \theta$ e $\beta_c = \text{tg } \gamma$.

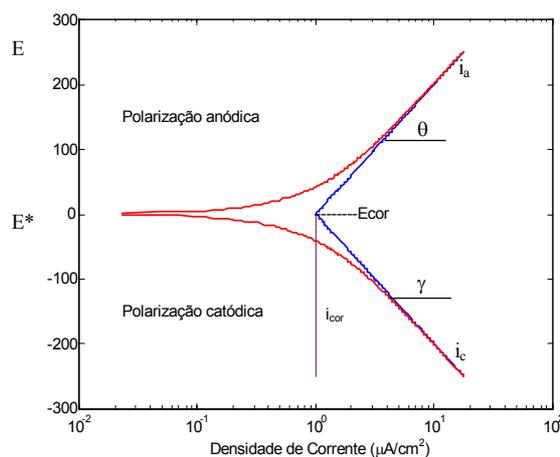


Figura 2.8 - Representação das retas de Tafel para determinar a densidade da corrente de corrosão. E_{cor} é o potencial de corrosão e i_{cor} a densidade de corrente de corrosão (Bezerra, 2001)

2.5.2.4 Ensaio de Impedância Eletroquímica

O método conhecido como método de impedância eletroquímica ou método de impedância AC, tendo sido também denominado por Mansfeld (1981) *apud* Wolymec (2003) de espectrometria de impedância eletroquímica. Ele apresenta diversas vantagens com relação ao de corrente contínua, isto é, o ensaio de polarização eletroquímica, e entre elas citamos as seguintes:

- Utilização de sinais muito pequenos que não perturbam as propriedades do eletrodo.
- Possibilidade de estudar reações de corrosão e medir taxas de corrosão em meio de baixa condutividade.
- A resistência de polarização e a capacitância da dupla camada podem ser determinadas numa mesma medida.

Uma das desvantagens é que ele determina somente a resistência à polarização sendo que os declives de Tafel têm que ser determinados pelo método descrito no item anterior.

Este ensaio consiste na aplicação de um potencial senoidal de pequena amplitude para medir a corrente gerada no sistema em função da amplitude do sinal aplicado e a sua fase. O processo de corrosão pode ser representado esquematicamente por um circuito elétrico equivalente. No caso de uma reação de corrosão simples, o circuito elétrico equivalente está mostrado na Figura 2.9 sendo que: R_e é a resistência elétrica entre o eletrodo de referência e o eletrodo de trabalho; R_p é a resistência à polarização da reação eletroquímica e C_{dc} é a capacitância da dupla camada.

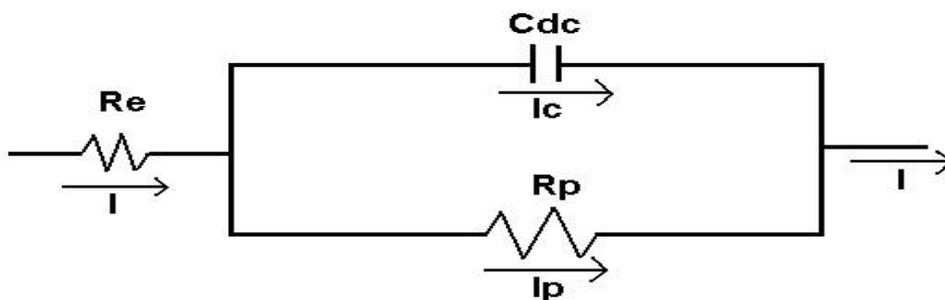


Figura 2.9 - Circuito elétrico equivalente de uma interface metal-eletrólito.

A impedância deste circuito pode ser calculada pela equação abaixo:

$$Z = R_e + \frac{R_p}{1 + \omega^2 \cdot R_p^2 \cdot C_{dc}^2} - j \frac{\omega \cdot R_p^2 \cdot C_{dc}^2}{1 + \omega^2 \cdot R_p^2 \cdot C_{dc}^2} \quad 2.5$$

Onde ω é a frequência do sinal aplicado.

A melhor maneira para visualizar R_e e R_p e analisar os resultados experimentais é através de representações gráficas e uma das mais utilizadas é a representação de Bode a qual consiste na representação de $\log |Z|$ versus $\log \omega$ e de $-\phi$ versus $\log \omega$ o que resulta nas figuras 2.10 e 2.11.

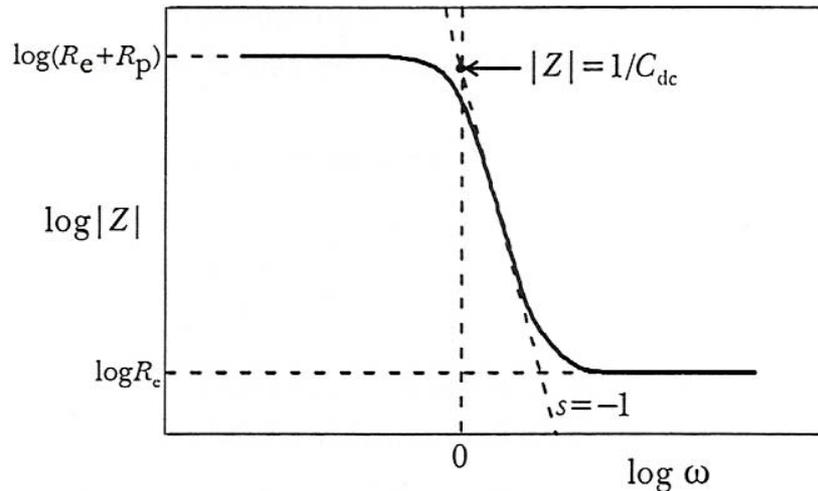


Figura 2.10 - Módulo da impedância em função da frequência do sinal aplicado no teste de espectroscopia de impedância eletroquímica (Wolyneec, 2003).

A figura 2.10 foi obtida da relação entre Z_r e Z_i dados pelos termos da equação 2.6 a seguir obtidos a partir da representação de Nyquist, para um semicírculo, dos valores de impedância onde Z_r e Z_i estão em função da resistência e da capacitância vistas na Figura 2.10 e da frequência.

$$|Z| = \sqrt{Z_r^2 + Z_i^2} \quad 2.6$$

O valor mínimo do módulo da impedância medido no ensaio de EIE é igual à resistência entre o eletrodo de trabalho e o eletrodo de referência, R_e dado pelo patamar horizontal inferior da curva, enquanto que o valor máximo da impedância é igual à soma das resistências $R_e + R_i$ e dado pelo patamar horizontal superior da curva. Para freqüências intermediárias, $[Z]$ é inversamente proporcional a ω e assim obtemos na região de transição entre os patamares horizontais uma reta de declive $s = -1$. O valor de C_{dc} pode ser determinado por meio da extrapolação desta reta para $\omega = 1$ ou, $\log \omega = 0$, pois neste caso $[Z] = 1/C_{dc}$. Esta representação é a base do sistema de monitoramento de corrosão.

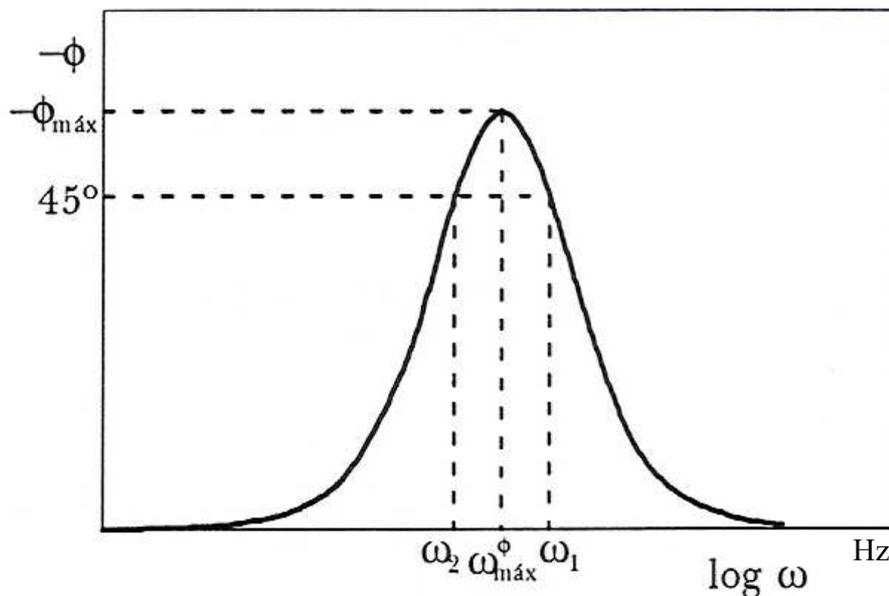


Figura 2.11 - Fase do sinal medido no teste de espectroscopia de impedância eletroquímica em função da frequência (Wolyneć, 2003).

A Figura 2.11 mostra o ângulo de fase máximo $\phi_{\text{máx}}$ e o valor de ω que o determina é designado como $\omega_{\text{máx}}$. Os valores ω_1 e ω_2 são os valores de ω para $\phi = 45^\circ$. Como nem sempre é possível realizar medidas em frequência muito baixa, a representação de Bode pode ser utilizada para extrapolar os dados de alta frequência para o ponto de inflexão em $\phi = 45^\circ$ e permitir a determinação de R_p .

2.5.3 Desgaste Superficial

Desgaste pode ser definido como uma mudança indesejável em dimensões de corpos motivada pela remoção gradual de partículas discretas de superfícies em contato e com movimento relativo devido, predominantemente, a ações mecânicas.

Apesar do desgaste ser um problema que abrange todos os ramos da engenharia, ele não recebe a devida atenção quando não está significativamente ligado a aspectos econômicos. Ele é definido pela OECD (Organização para Cooperação Econômica e Desenvolvimento) da ONU como sendo um dano progressivo que envolve a perda material, perda esta que ocorre na superfície de um componente como resultado de um movimento relativo a um componente adjacente.

Na realidade, a corrosão muitas vezes interage com o processo de desgaste modificando as características das superfícies sob desgaste, através da reação com o meio ambiente sendo o desgaste um processo complexo, proveniente de uma combinação de diferentes processos que podem estar correlacionados ou não. O desgaste pode ser classificado quanto a forma como se apresenta:

- Por adesão
- Por abrasão
- Por corrosão
- Por fadiga superficial

O desgaste por adesão é considerado o maior responsável pelos danos na maioria dos sistemas reais ou práticos. Deve-se salientar que os estudos sobre desgaste são relativamente recentes e uma análise quantitativa deste fenômeno encontra-se ainda em um estágio inicial. As incertezas associadas com previsão de volumes de desgaste são muito grandes de modo que as técnicas hoje utilizadas são mais apropriadas para decidir sobre alternativas de projetos do que tentar prever com precisão a vida de um sistema passível de sofrer desgaste.

A classificação pura e simples do desgaste é algo difícil não sendo relacionada a valores numéricos específicos, sendo em geral dividida em desgaste leve e desgaste severo. A Tabela 2.4 apresenta uma distinção entre ambas as classificações de desgaste.

Tabela 2.4 – Classificação do desgaste.

DESGASTE LEVE	DESGASTE SEVERO
Resulta em superfícies suaves, geralmente mais suaves que a original.	Resulta em superfícies ásperas com ranhuras profundas, em geral muito mais rugosas do que a original.
Produz partículas pequenas, na ordem de 0,01 mm de diâmetro.	Produz partículas grandes, tipicamente com diâmetro médio acima de 0,1 mm.
Alta resistência elétrica de contato, pouco contato metálico real.	Baixa resistência elétrica de contato, formação de contatos metálicos.

A equação de Archard (Stoeterau, 2004) é o ponto de partida natural para se iniciar os estudos sobre desgaste. Esta assume que o material a ser perdido é relacionado com a forma e o tamanho da área de contato nas asperezas, visto na Figura 2.12. Esta equação também relaciona o desgaste com o carregamento e a dureza da superfície do material, por meio de uma constante K.

$$Q = \frac{kW}{3H} = K \frac{W}{H} \quad 2.7$$

sendo $K = k/3$

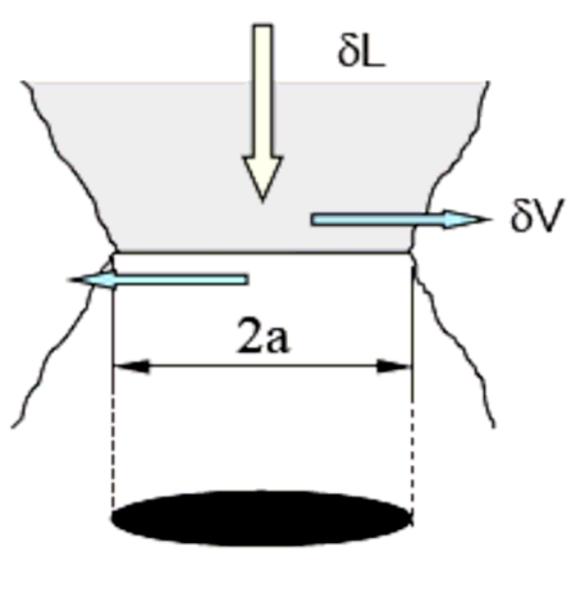


Figura 2.12 – Junção de desgaste idealizada (Stoeterau, 2004) .

A incerteza na determinação do coeficiente de desgaste K leva ao conceito de coeficiente de desgaste adimensional – K' . O coeficiente de desgaste K' é uma constante adimensional e seu conhecimento torna-se vital para qualquer tentativa de aplicar a equação 2.7. Em termos práticos de engenharia, determinar a exata dureza da superfície de contato mais externa de um componente esbarra em problemas de medição, principalmente na eliminação da influência das camadas adjacentes à superfície (camadas sub-superficiais), as quais mascaram os valores de dureza, e conseqüentemente do coeficiente K . O coeficiente de desgaste adimensional K' é definido como sendo a média entre o coeficiente de desgaste dimensional K e a dureza H , sendo geralmente expresso em mm^3/Nm . Adimensionalizando K' temos:

$$K' = \frac{K}{H} \quad 2.8$$

O que permite reescrever 2.7 como:

$$Q = K' \cdot W \quad 2.9$$

Sendo:

Q = taxa de desgaste

W = carregamento

H = dureza superficial da aspereza mais mole

K' = coeficiente de desgaste adimensional

2.5.3.1 Desgaste Abrasivo

Esta é a forma de desgaste que ocorre quando uma superfície rugosa e dura, ou uma superfície mole contendo partículas duras, desliza sobre uma superfície mais mole, e imprime (*ploughs*) uma série de ranhuras nesta superfície. O material das ranhuras é deslocado na forma de partículas de desgaste, geralmente soltas. O desgaste abrasivo pode ocorrer, também, em uma situação algo diferente, quando partículas duras e abrasivas são introduzidas entre as superfícies deslizantes, desgastando-as. O mecanismo desta forma de desgaste parece ser o seguinte: um grão abrasivo adere temporariamente em uma das superfícies deslizantes, ou mesmo é incrustado nela, e risca uma ranhura na outra.

As duas formas de desgaste, uma envolvendo uma superfície dura e rugosa e a outra um grão duro e abrasivo entre as superfícies, são conhecidas como processo de desgaste abrasivo de dois corpos e processo de desgaste abrasivo de três corpos, respectivamente. O desgaste abrasivo do tipo dois corpos não ocorre quando a superfície dura deslizante é lisa. O desgaste abrasivo do tipo três corpos não ocorre quando as partículas no sistema são pequenas, ou quando são mais moles que os materiais deslizantes. É, portanto, possível conseguir que um sistema seja, inicialmente, livre de desgaste abrasivo. Quando o deslizamento inicia, entretanto, o desgaste abrasivo pode se tornar um problema, porque os fragmentos de desgaste provenientes de outros processos de desgaste, freqüentemente endurecidos por oxidação, começam a se acumular no sistema. Em outros casos, partículas contaminantes podem ser introduzidas no sistema deslizante, provenientes do meio ambiente.

O desgaste abrasivo é amplamente utilizado em operações de acabamento. O tipo dois corpos é utilizado em limas, papel abrasivo, tecidos abrasivos e rebolos (rodas abrasivas), enquanto o tipo três corpos é usado para polimento e lapidação. Porém alguns ensaios foram desenvolvidos a partir destes princípios para análises de propriedades de revestimentos de materiais e uma transição entre eles tem sido estudada (Trezona, 1999). É a simplicidade e a repetibilidade do processo de desgaste abrasivo que faz seu uso tão atrativo.

2.5.3.2 Ensaio de desgaste por micro abrasão

O ensaio de desgaste por micro-abrasão, também conhecido por seu termo em inglês “ball cratering test”, começou a ser criado na década passada (Rutherford, 1996) sob o patrocínio da Comunidade Européia devido à necessidade de informações sobre as propriedades de resistência ao desgaste de revestimentos (Gee et. al., 2003), requeridos principalmente por fornecedores e por usuários a fim de se adquirir confiança no desempenho de peças com revestimentos produzidas pela indústria. Esta técnica se mostrou promissora com potencial para suprir essa necessidade. Ela pode ser usada para avaliar a resistência ao desgaste dos mais diversos tipos de revestimentos superficiais incluindo polímeros, revestimentos cerâmicos duros e finos, revestimentos metálicos e revestimentos provenientes de técnicas de spray térmico.

Este método de ensaio apesar de, atualmente, se encontrar largamente atualizado em diversos trabalhos científicos dos mais diversos tipos de materiais com revestimentos (Acker, 2005; Casteletti, 2004) ou simplesmente endurecidos superficialmente (Acselrad et al, 2004; Gant, 2004) devido à robustez das medidas de desgaste de revestimento e desempenho da fricção, ainda aguarda uma validação definitiva para o padrão de ensaio, pelo órgão europeu competente. Além de uma metodologia de ensaio aceita ele ainda necessita do desenvolvimento de métodos adicionais de análise e de comprovada relevância para os revestimentos industriais.

No ensaio, a amostra é pressionada pelo carregamento de um peso inoperante contra uma esfera de aço em rotação, conforme Figura 2.13. Uma pasta abrasiva goteja na interface do desgaste. Existem estudos para verificar a influência deste abrasivo e outros parâmetros sobre as condições do ensaio (Stachowiak, 2004; Adachi, 2004). Após um tempo determinado

previamente e, a produção de uma depressão circular ou cratera, o ensaio está finalizado e a cratera proveniente do desgaste é medida opticamente.

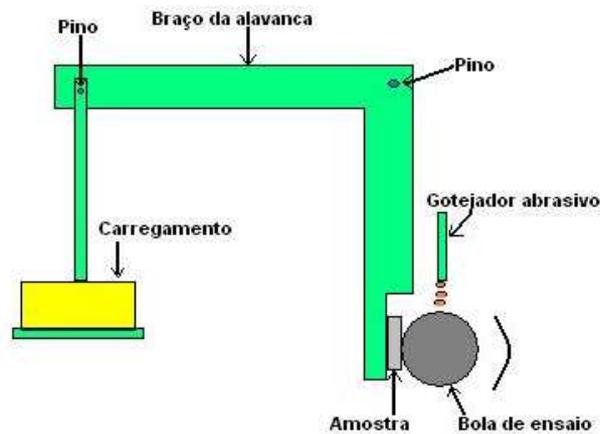


Figura 2.13 – Diagrama esquemático do dispositivo de ensaio (Gant,2004).

Um microscópio ótico também pode ser usado para fazer as medidas dos diâmetros interno e externo da cratera visto na Figura 2.14 a seguir. Deve-se tomar cuidado para girar o braço da carga para que ocorra o descolamento entre a esfera e a amostra de forma que a remoção não provoque deformações subseqüentes ao fim do ensaio.

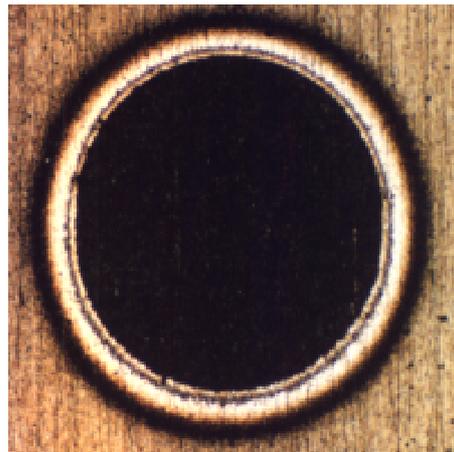


Figura 2.14—Típica cratera oriunda do ensaio de micro-abrasão (<http://www.npl.co.uk>).

2.5.3.3 Ensaio de micro abrasão sem perfuração do revestimento

O ensaio deve ser realizado, com um tempo pré-estabelecido de realização de modo que não ocorra nenhuma perfuração no revestimento. No caso em que venha ocorrer este fato, devemos medir o diâmetro da cratera e o diâmetro “b” após a camada perfurada “a”, isto é, da cratera no substrato, como mostrado na Figura 2.15 e pode ser verificado que entre os ensaios com perfuração e sem perfuração da camada revestida, poderão ocorrer taxas de desgaste diferenciadas.

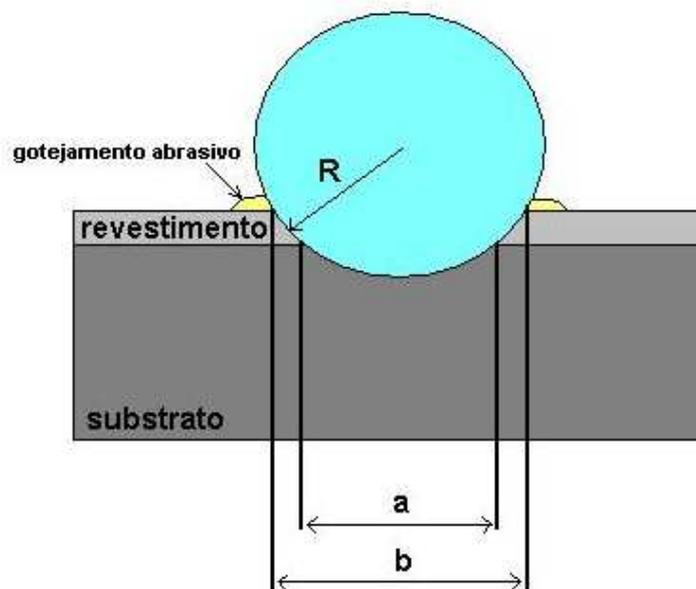


Figura 2.15 – Esfera de ensaio perfurando a camada do revestimento (Stoeterau, 2004).

Nos ensaios em que não ocorre perfuração para materiais monolíticos, ou para os ensaios onde não ocorra a perfuração do revestimento, e considerando $b \ll R$, o volume V da cratera é dado por:

$$V = \frac{\pi b^4}{64R} \quad 2.10$$

Onde:

V = volume da cratera (mm³)

b = diâmetro da cratera (mm)

R = raio da esfera (mm)

O resultado do ensaio supõe que a cratera tem a mesma forma da esfera e esta suposição já foi comprovada em muitos casos. A lei de desgaste de Archard indica que o volume do desgaste V é igual a KSN onde K é uma constante e definida como a taxa de desgaste, S é a distancia percorrida pelo perímetro da esfera sobre a amostra e N é a carga aplicada. Esta relação é correta, porém em alguns casos a taxa de desgaste é consideravelmente influenciada pelo número de voltas da esfera. Entretanto, se a lei de Archard for seguida, a taxa K de desgaste é dada pela seguinte equação:

$$K = \frac{\pi b^4}{64R} \frac{1}{SN} \quad 2.11$$

Com a realização do ensaio sem perfurar a camada de revestimento, a taxa de desgaste pode ser medida e comparada com os ensaios de outros revestimentos. Com o aumento do tempo de ensaio e conseqüentemente o aumento do número de revoluções da esfera, também ocorrerá o aumento da dimensão da cratera podendo vir a ocorrer a perfuração do revestimento. Porém para os casos de ensaios em um mesmo revestimento em que isto não ocorra, o resultado da equação 2.11 pode ser usado para o cálculo da taxa de desgaste deste revestimento.

O ensaio de desgaste micro-abrasivo também pode ser realizado sem o gotejamento abrasivo (Gee, Wicks; 2000), em muitos casos com sucesso, possibilitando uma melhor análise das propriedades tribológicas dos materiais. Nestes ensaios é comum devido a alta pressão de contato entre a esfera e o corpo de prova, haver um desprendimento de partículas o que acaba provocando a formação de acentuada ranhura no revestimento no sentido de movimento da esfera de ensaio.

2.6 Pré-tratamento nos aços utilizados para tratamento a laser

Os processos convencionais de tratamento térmico há muito utilizam pré-tratamentos térmicos e ou termoquímicos com objetivos de alcançar melhores resultados finais. Alguns trabalhos também têm sido realizados relacionando o laser e sua absorção superficial. Portanto, a preparação do substrato seja através de pré-tratamentos térmicos, ou por tratamentos termoquímicos faz-se necessário para o entendimento deste estudo. É também interessante comparar o resultado dos ensaios a laser com outros processos de tratamentos térmicos convencionais ou oriundos de novos processos.

A modificação do aço AISI 4340 através do laser já foi realizada por diversos pesquisadores como Fastow et al. (1990), que estudou a microestrutura e a microdureza da camada refundida por um laser de CO₂ estudando ainda as diversas zonas formadas pelos passes do laser. Mais recentemente Lee e Su (1999) apresentaram as propriedades e microestrutura do aço AISI 4340 temperado e revenido após tratamento térmico aplicado. Tohr, Neto e Vatavuk (2000) caracterizaram a camada branca de aços-carbono nitretados a partir de novas técnicas de nitratação.

Este trabalho procura correlacionar experimentos envolvendo variação de parâmetros operacionais do laser tais como potência e velocidade de varredura, e pré-tratamentos superficiais, e contribuir com um pouco mais de conhecimento sobre o assunto.

Capítulo 3

Materiais e Métodos

3.1 Considerações iniciais

A metodologia experimental aplicada neste trabalho foi dividida em duas etapas distintas: a primeira refere-se à determinação dos parâmetros operacionais do laser, associando os mesmos a tratamento com transformação no estado sólido e tratamentos com refusão superficial. Para tanto as amostras foram submetidas à variação de potência de 500 W a 1000 W e à velocidade de varredura do feixe do laser de 3000 mm/min a 10000 mm/min, produzindo o que se denomina “trilha simples” para análise da largura e da profundidade da trilha formada além da microestrutura e do perfil de dureza. A segunda etapa consiste, já de posse dos parâmetros operacionais do laser, da transformação sem refusão da superfície das amostras, através da sobreposição de trilhas sendo nesta etapa utilizada a injeção de gás de proteção para possibilitar o estudo de propriedades superficiais de corrosão e desgaste, além da análise microestrutural das trilhas sobrepostas. Desta maneira, o principal objetivo deste capítulo será descrever os materiais, equipamentos e procedimentos adotados durante as referidas etapas experimentais realizadas neste trabalho.

3.2 Procedimento experimental e materiais e equipamentos utilizados.

3.2.1 Preparação das amostras para o tratamento com laser.

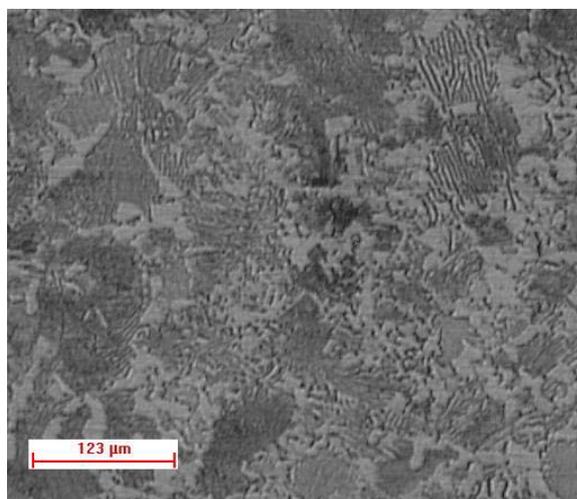
Foram selecionados para a realização deste trabalho os aços SAE 1045 e SAE 4340 por serem já usualmente utilizados em tratamentos térmicos pelos processos convencionais devido a seu teor médio de carbono ser superior a 0,4%, sendo usado na produção industrial. O aço SAE

1045 já foi utilizado anteriormente em trabalhos de pesquisa do grupo, possibilitando um comparativo de parâmetros e resultados mostrando-se fundamental nesta fase inicial de trabalho. Após aquisição das chapas com 1 m² de área e 6 mm de espessura, foram cortados corpos de prova e realizados ensaios de composição química dos materiais recebidos, pelo Centro de Tecnologia da UNICAMP e os resultados relacionados na Tabela 3.1, foram comparados com a norma ASTM A 29M - 99^{e1} e mostraram-se em conformidade com a norma citada.

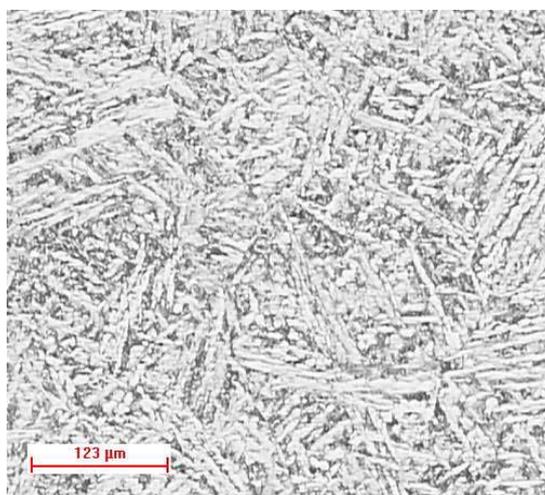
Tabela 3.1 - Composição química dos aços AISI 1045 e 4340 - %massa

	Fe	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	P	S
Aço 1045	98,53	0,45	0,77	0,14	0,04	0,02	-	0,02	0,01
Aço 4340	95,51	0,40	0,69	0,16	0,81	2,06	0,31	0,02	0,02

Além da composição química, os materiais foram analisados quanto à microestrutura, apresentadas na Figura 3.1. O aço AISI 1045, já obtido no estado recozido, apresenta uma microestrutura composta de ferrita e perlita granulares e dureza Brinell HB 168, típica dos aços 1045 recozidos. O aço AISI 4340, como recebido, apresenta uma estrutura bainítica, com agulhas ramificadas, e o ensaio de dureza realizado indicou um valor de 30 HRC equivalente a HB 285.



a) 1045



b) 4340

Figura 3.1 –Microestrutura do aço AISI 1045 e 4340 no estado recebido. (Nital 3%)

O aço 4340 foi submetido a recozimento a uma temperatura de 870 °C com um tempo de permanência de trinta minutos. O resfriamento se deu lentamente, de forma controlada, a uma taxa decrescente de 25 °C/h até 315 °C quando passou a ser resfriado ao ar. A microestrutura, como pode ser observado na Figura 3.2, apresenta ferrita e perlita granular e a dureza alcançada após o tratamento de recozimento atinge 20 HRC (HB 223). Para as medidas de microdureza foi utilizado um durômetro do tipo modelo PANTEC marca RBS, 220 V.

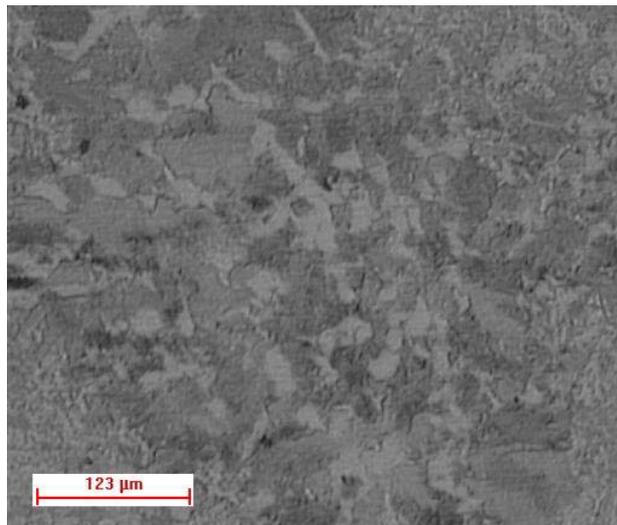


Figura 3.2 – Aço AISI 4340 recozido (Nital 3%).

Após caracterização do material, cortou-se amostras com dimensões de 65 X 12 mm² para uma espessura de chapa de 6 mm. As amostras foram cortadas a laser e para constatar que a área de tratamento é pouco afetada pelo laser, é feita uma análise da microestrutura de uma das amostras, conforme Figura 3.3, onde se nota as pequenas dimensões da região atingida pelo corte.

Para avaliação da influência dos diferentes estados de substratos, parte das amostras do aço AISI 1045 foi submetida a tempera, outra parte foi submetida a nitretação, juntamente com amostras do aço AISI 4340.

O tratamento de têmpera do aço 1045 foi realizado à temperatura de 815 °C e um tempo de permanência no forno de quinze minutos nesta temperatura seguido de resfriamento brusco em

água. O tratamento foi realizado, utilizando-se um forno tipo mufla marca EDG, modelo FC1 mostrado na Figura 3.4, com temperatura máxima de 950°C e os corpos de prova identificados através de punção e colocados distribuídos dentro do forno para otimizar o processo de aquecimento e posterior resfriamento brusco.

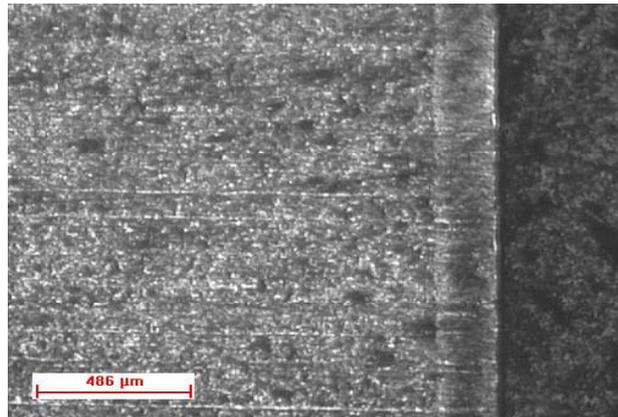


Figura 3.3 - Efeito do corte a laser sobre as laterais das amostras (Nital 3%).



Figura 3.4 – Forno tipo mufla utilizado nos tratamentos térmicos das amostras.

Após a realização da tempera, foram selecionadas amostras para a devida caracterização microestrutural, e medidas de dureza. Na Figura 3.5, verifica-se finas agulhas de martensita e o exame de dureza indicou valores médios em torno de HRC 52 (HB 514) o que, conforme especificado para aços temperados na norma ASTM A 321 - 90, demonstra ter sido o objetivo alcançado.

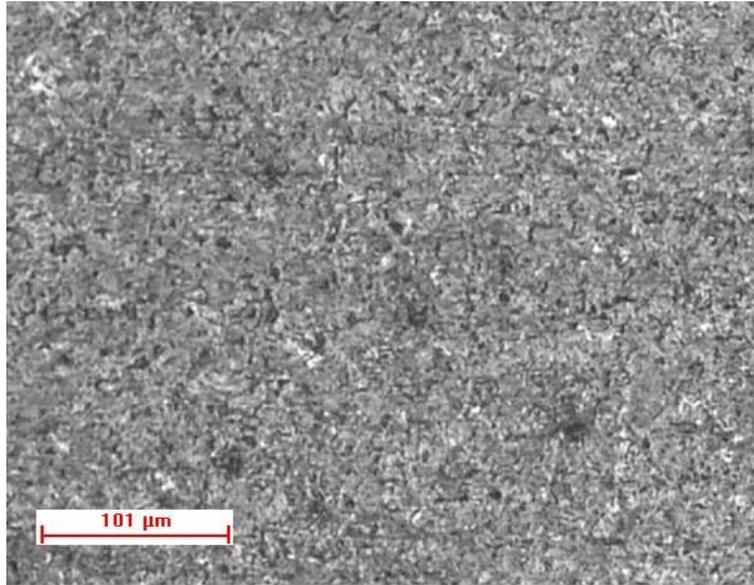


Figura 3.5 – Microestrutura do aço AISI 1045 temperado, mostrando martensita fina. (Nital3%).

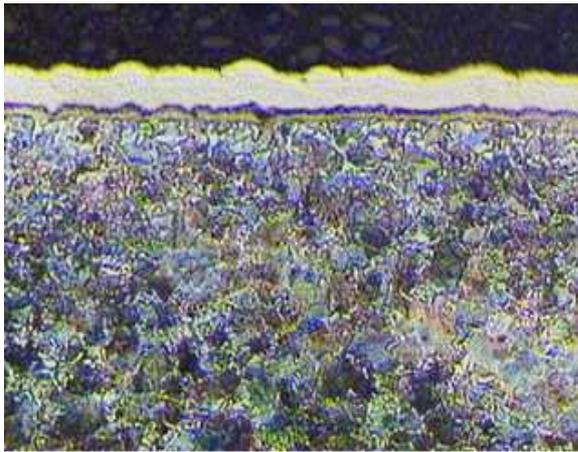
O tratamento termoquímico foi realizado na empresa Combustol, localizada na cidade de Jaguariúna/SP e o processo executado foi o de Nitretação a gás controlada e automática que tem o nome comercial para o processo de "NITREG-C", no qual todos os parâmetros do processo, temperatura, tempo, potencial de nitrogênio e vazão de gases, são controlados automaticamente. A temperatura foi de 520 °C, e o tempo de permanência na temperatura foi de 6 horas. O equipamento possui as dimensões de 800x1500 mm² e capacidade de 1500 kg. As condições utilizadas foram as mesmas para os dois tipos de aço.

Após os tratamentos térmicos e termoquímicos foi tirada a dureza superficial de amostras dos aços AISI 1045 e AISI 4340 cujos resultados estão apresentados na Tabela 3.2 comparados com os valores das amostras recebidas. Eles mostram que os tratamentos alcançaram seus objetivos estabelecidos de modificação superficial. Na Figura 3.6 vemos a micrografia do aço AISI 1045 nitretado com 100X e 400X de aumento que apresentou uma camada de 100 μm, e na Figura 3.7 vemos a micrografia com mesmas magnitudes do aço AISI 4340 apresentando-se também com uma camada de 100 μm, medidas ambas no microscópio Neophot.

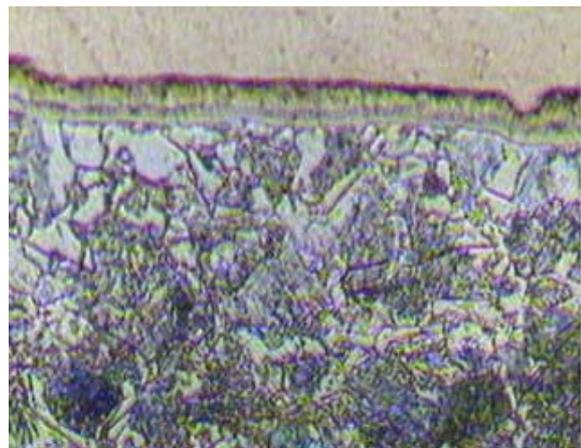
Tabela 3.2 – Dureza das amostras após os tratamentos preliminares realizados.

MATERIAL	RECOZIDO	ENDURECIDO	NITRETADO
AISI 1045	* HB 170	HB 514	** HB 179
AISI 4340	HB 202	* HB 285	*** HB 375

* como recebido ; considerando só a camada nitretada, os valores foram **66 HRC e ***70 HRC

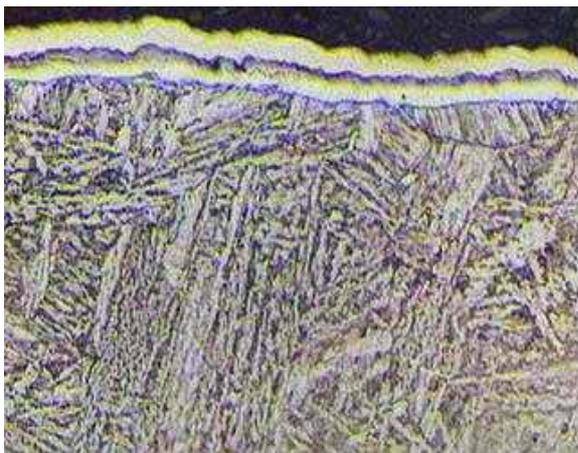


a) 100X

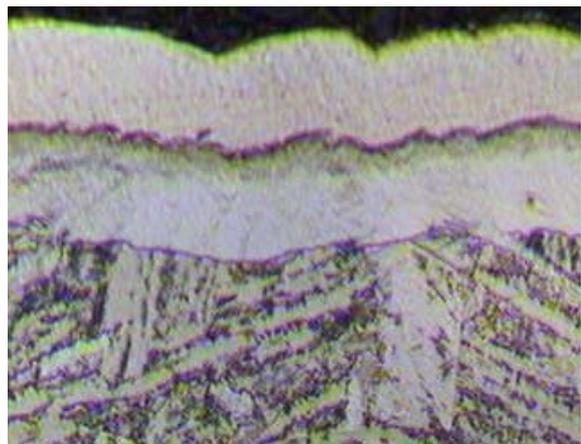


b) 400X

Figura 3.6 – Microestrutura do aço AISI 1045 mostrando a camada nitretada (Ataque nital 3%).



a) 100X



b) 400X

Figura 3.7 – Microestrutura do aço AISI 4340 mostrando camada a nitretada (Ataque nital 3%).

Para verificar a influência do acabamento da superfície da amostra sobre a reflexão do feixe de laser, ou em outras palavras, a influência da superfície sobre a interação do laser com o material, as amostras foram jateadas com pó de óxido de alumínio e com microesferas de vidro. Para este trabalho comparativo, foram selecionadas amostras de aço AISI 1045, recozidas que foram jateadas nas duas diferentes condições e em seguida realizaram-se ensaios de rugosidade com um equipamento rugosímetro marca Perthen e os resultados foram: para jateamento com Al_2O_3 RMS = 15,81 μm e RA = 3,46 μm ; e para microesfera de vidro RMS = 31,40 μm e RA = 1,89 μm . As amostras foram então submetidas ao ensaio de trilha simples a uma potência constante de 500 W e velocidade variando de 3000 mm/min a 10000 mm/min. Os resultados são apresentados juntamente com os resultados dos testes dos parâmetros do laser.

3.2.2 Definição dos parâmetros do laser

O Equipamento utilizado neste trabalho, pertence ao Laboratório Nacional de Luz Síncrotron e trata-se de um Laser do tipo CO_2 , trabalhando em modo contínuo, com potência máxima de 1000 W, velocidade do feixe do laser e diâmetro do foco variável. Possui uma mesa que se movimenta em X e o cabeçote do laser em YZ sendo visualizado na Figura 3. 8.



Figura 3.8 – Equipamento a Laser de CO_2 pertencente ao LNLS utilizado nos experimentos.

3.2.3 Definição da distância focal utilizada

Em trabalhos anteriores (Pinto, 2002), o laser trabalhou focado sobre a superfície da amostra e o ponto focal do feixe incidente com um diâmetro de 0,3 mm o que acabou gerando trilhas sobre as amostras da mesma grandeza. Devido este ponto focal ser um componente fixo relacionado à lente instalada no equipamento de trabalho utilizado em nossos experimentos, a variação da densidade de potência foi relacionada à potência estabelecida que teve de ser rebaixada até um parâmetro adequado e juntamente com a velocidade de varredura do laser poder gerar uma superfície sem evaporação de material, isto é, refundindo ou tratando termicamente a superfície. Com isso, no trabalho desenvolvido por Pinto, acabou-se utilizando como parâmetro uma potência mais baixa, de até 100 W, pois com potências mais elevadas, mesmo a baixas velocidades, ocorre a fusão superficial com perda do material. Estudando as características do equipamento, dos parâmetros do processo e da literatura científica correspondente e, para uma etapa seguinte, o revestimento superficial da amostra em uma área significativa, a qual só se torna possível e compensador do ponto de vista industrial, a partir de uma largura de trilha mais larga isto é, da ordem de 1 mm a 5 mm, optou-se por usar um feixe defocado de dois milímetros mas conservando-se a energia desprendida E_J constante. Para tanto, recalculam-se os valores de potência e as faixas de velocidade através das seguintes expressões matemáticas:

$$E_J \text{ (J/mm}^2\text{)} = P(W) / d_F(\text{mm}) \cdot v(\text{mm/s}) \quad (3.1)$$

$$E_{J1} = E_{J2} \quad (3.2)$$

Onde:

E_J = Energia desprendida (J/mm²)

P = Potência do laser (W)

d_F = diâmetro focal (mm)

v = velocidade de varredura do feixe do laser (mm/min)

E_{J1} = Energia desprendida pelo feixe incidente focado sobre a amostra (J/mm²)

E_{J2} = Energia desprendida pelo feixe incidente defocado sobre a amostra (J/mm²)

A Figura 3.9 mostra esquematicamente as mudanças realizadas nas condições de ensaio. Na condição inicial a potência é de 100 W, o diâmetro focal de 0,3 mm e velocidade variando na faixa de 5000 mm/min (83,3 mm/s), a 20000 mm/min (333,3 mm/s). O valor calculado de E_J varia de 12 J/mm² a 3 J/mm². Os resultados dos cálculos correspondem a uma faixa de potência de 500 W a 1000 W, e a faixa de velocidade entre 3000 mm/min a 10000 mm/min. Neste trabalho procurou-se estabelecer os parâmetros a fim de estudar os efeitos destes sobre as propriedades dos materiais.

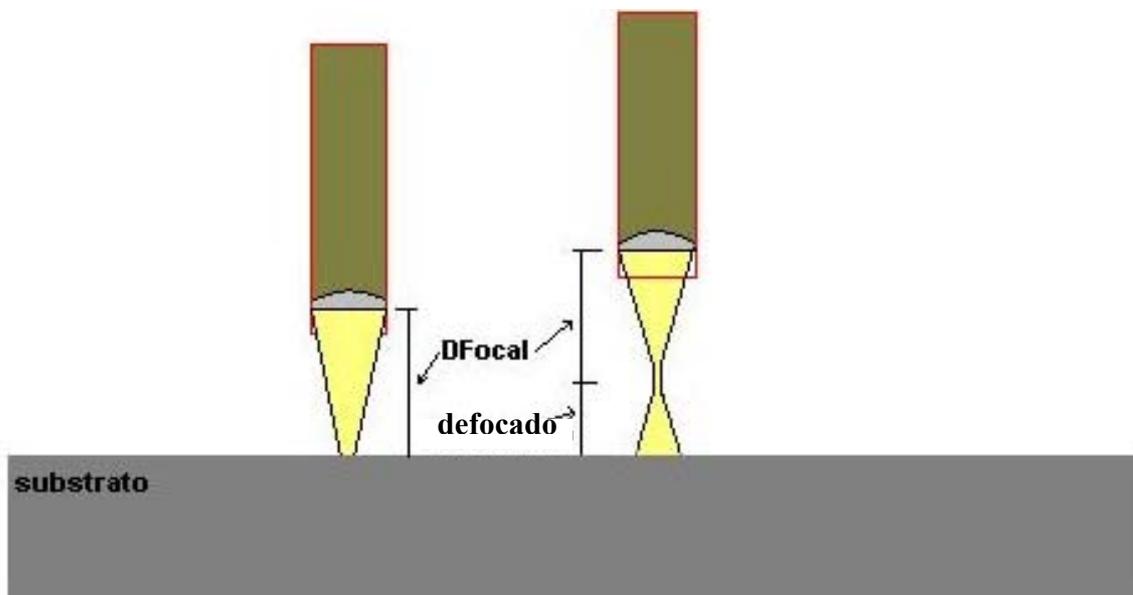


Figura 3.9 – Esquema adotado para manter a mesma energia desprendida por feixe de laser defocado.

As amostras foram submetidas inicialmente à faixa de potência variando de 500 W a 1000W e à faixa de velocidade de 3000 mm/min a 10000 mm/min. Para uma melhor aferição dos resultados e validade dos experimentos, os ensaios nas amostras são repetidos, isto é, para cada situação de ensaio pelo menos duas amostras foram feitas. Os ensaios são realizados de maneira não seqüencial, obedecendo a uma escolha ao acaso. Os resultados que apresentaram divergências foram repetidos e uma média ponderada de cada situação foi considerada para análise. As tabelas 3.3 e 3.4 apresentam a seqüência de variáveis utilizadas como parâmetros de ensaio tanto para o aço AISI 1045 (Tabela 3.3) quanto para o aço AISI 4340 (Tabela 3.4).

Tabela 3.3 – Seqüência de ensaios do aço AISI 1045 para potência e substrato variados.

MATERIAL AISI 1045	RECOZIDO						TEMPERADO						NITRETADO					
	Velocidade (10 ³ mm/min)						Velocidade (10 ³ mm/min)						Velocidade (10 ³ mm/min)					
POTÊNCIA	3	4	5	6	8	10	3	4	5	6	8	10	3	4	5	6	8	10
500 W	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
700 W													X	X	X	X	X	X
900 W	X	X	X	X	X	X												
1000 W	X	X	X	X	X	X												

Tabela 3.4 – Seqüência de ensaios do aço AISI 4340 para substrato variado.

MATERIAL AISI 4340	RECOZIDO						SEM TRATAMENTO						NITRETADO					
	Velocidade (10 ³ mm/min)						Velocidade (10 ³ mm/min)						Velocidade (10 ³ mm/min)					
POTÊNCIA	3	4	5	6	8	10	3	4	5	6	8	10	3	4	5	6	8	10
500 W	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X

Após a realização das trilhas, procedeu-se o corte da amostras transversal à direção de deslocamento do feixe e longe das extremidades, por ser uma região onde o feixe produz uma trilha estabilizada, conforme Figura 3.10 esquemática. Procedeu-se, a seguir, à preparação metalográfica da superfície com o embutimento a quente das amostras, lixamento de #100 a #1200, polimento com pasta de diamante de 6 µm a 1 µm com limpeza intermediária no ultrasom. Para observação no microscópio ótico a amostra foi atacada com nital 3% durante cinco segundos. Para a definição da dimensão das trilhas utilizou-se um microscópio ótico tipo Neophot 32 e sistema de aquisição de imagem Leica Q500MC, conforme mostra Figura 3.11.

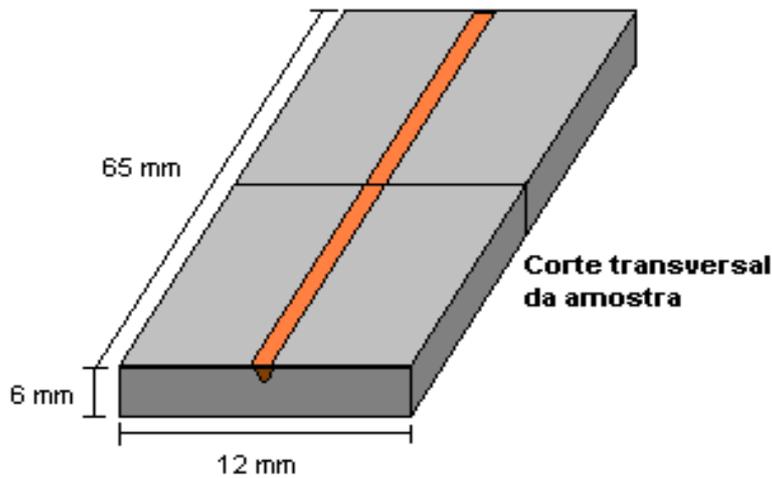


Figura 3.10 – Esquema de seccionamento da amostra após realização da trilha.

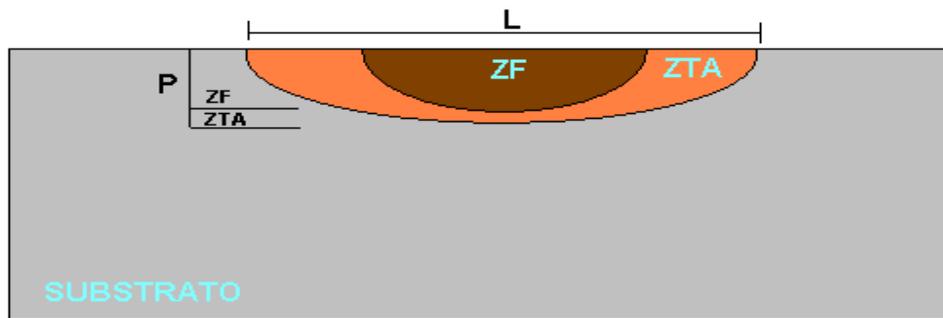


Figura 3.11 – Esquema mostrando o dimensionamento da seção transversal da trilha do laser.

As microestruturas, tanto das amostras recebidas quanto das amostras submetidas aos vários tratamentos propostos no presente trabalho foram obtidas no Laboratório de Caracterização do DEMA da FEM/UNICAMP e no Laboratório de Microscopia do LNLS. O objetivo principal desta análise foi definir o resultado do tratamento do feixe a laser sobre a superfície conforme mostra a Figura 3.12. A seguir são descritas as diversas etapas utilizadas neste caso específico.



Figura 3.12 – As três possíveis situações após o feixe de laser

Os corpos de prova para análise metalográfica foram embutidos a quente em baquelite após corte das amostras em uma máquina tipo Cut-off, sendo adicionada à camada superior uma resina especial e lixados até o grana 1200. Em seguida foi realizado o polimento com pasta de diamante na seqüência de 6, 3 e 1 μm de tamanho médio de partícula. Foi utilizado reativo de nital 3% para análises de microscopia ótica, pois ele permite a perfeita identificação entre a zona tratada e o substrato. O equipamento utilizado foi o Microscópio Neophot com o sistema de análise Leica Q500MC.

Para análise por microscopia eletrônica foi utilizado o reativo Vilela, por ter melhor se adequado a este tipo de análise por revelar a fina martensita resultante da modificação a laser. As amostras foram passadas no ultra-som para remoção dos detritos e para análise no MEV foram utilizados os seguintes equipamentos:

MEV DEMA/UNICAMP JEOL JXA 840 A

MET (LaB₆); EDS: JEOL JEM 3010 (Laboratório Nacional de Luz Sincrotron)

O perfil de microdureza foi levantado no microscópio Neophot equipado com dispositivo de microdureza sendo que as imagens e medições foram feitas com ajuda do sistema de aquisição de imagem Leica Q500MC. As medidas foram feitas a partir de um ponto próximo da superfície em direção ao substrato, na região de maior profundidade da trilha conforme mostra o esquema apresentado na Figura 3.13.

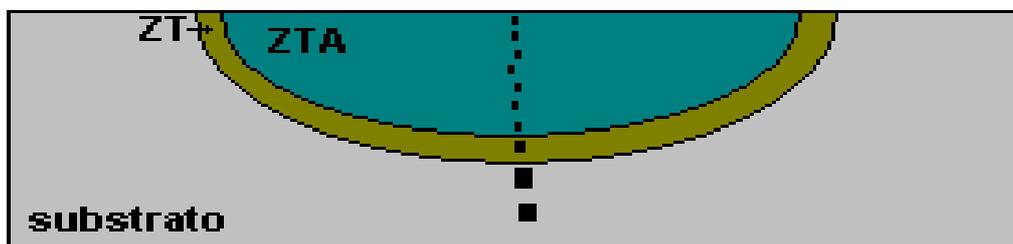


Figura 3.13 – Esquema da localização das medidas de microdureza.

3.2.3 Desenvolvimento do sistema de injeção de gás para proteção da superfície

Para a utilização do laser do LNLS nos experimentos de trilha sobreposta tornou-se necessário projetar e criar um sistema de injeção de gás sobre o feixe de laser que se adaptasse às características do equipamento, pois a proteção da zona submetida ao feixe de laser é essencial para que não ocorra contaminação sobre a superfície reaquecida, problema que não ocorre no passe simples, pois não há reaquecimento por não haver sobreposição, mas apenas uma trilha contínua. Um esquema do dispositivo é mostrado na Figura 3.14 e uma imagem é apresentada na Figura 3.15.

Compatibilizou-se o movimento do dispositivo com o movimento do equipamento onde não ocorre somente o movimento da coluna do feixe no sentido dos eixos ZX como também a mesa onde fica depositada a amostra no sentido do eixo Y. Com a sobreposição, ambos os movimentos são obrigatórios. O sistema, apresentado esquematicamente na Figura 3.12, mostrou-se eficiente e de acordo com os objetivos a serem alcançados pelo trabalho. O gás utilizado foi o Argônio, e a vazão conforme literatura a respeito de ensaios de vazão e efeito foi de 25 m³/min (Kim e Peng, 2000).

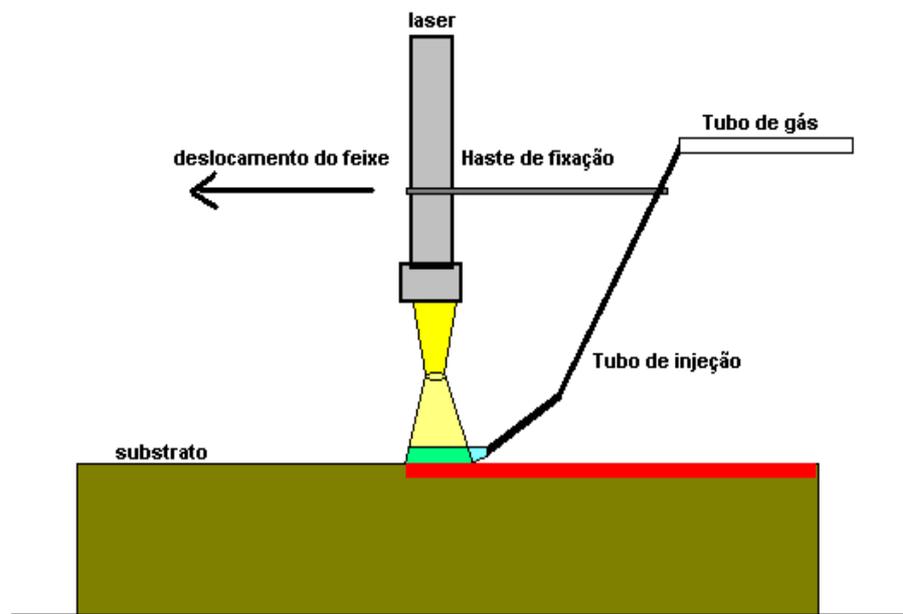


Figura 3.14 – Esquema de dispositivo de injeção de gás desenvolvido.



Figura 3.15 – Sistema de injeção de gás fixado junto ao cabeçote.

3.2.4 Sobreposição de trilhas

A partir dos parâmetros observados na primeira fase do trabalho e modificados pelos cálculos anteriormente descritos e das dimensões alcançadas pelas trilhas foi proposta para esta etapa do trabalho, uma sobreposição de 50%, com o feixe do laser programado para deslocar a largura da trilha em cada passe, conforme mostra esquema da Figura 3.16, até o recobrimento total da superfície da amostra.

Os parâmetros para esta etapa foram definidos a partir dos ensaios com trilhas simples e comentados no Capítulo 4 e que são os seguintes : potência fixa de 500 W e a velocidade variando de $8 \cdot 10^3$ a 10^4 mm/min. A situações avaliadas são resumidas na Tabela 3.5.

Tabela 3.5– Ensaio de sobreposição

Material	Recebido	Recozido	Temperado	Nitretado
AISI 1045	X		X	X
AISI 4340	X	X		X

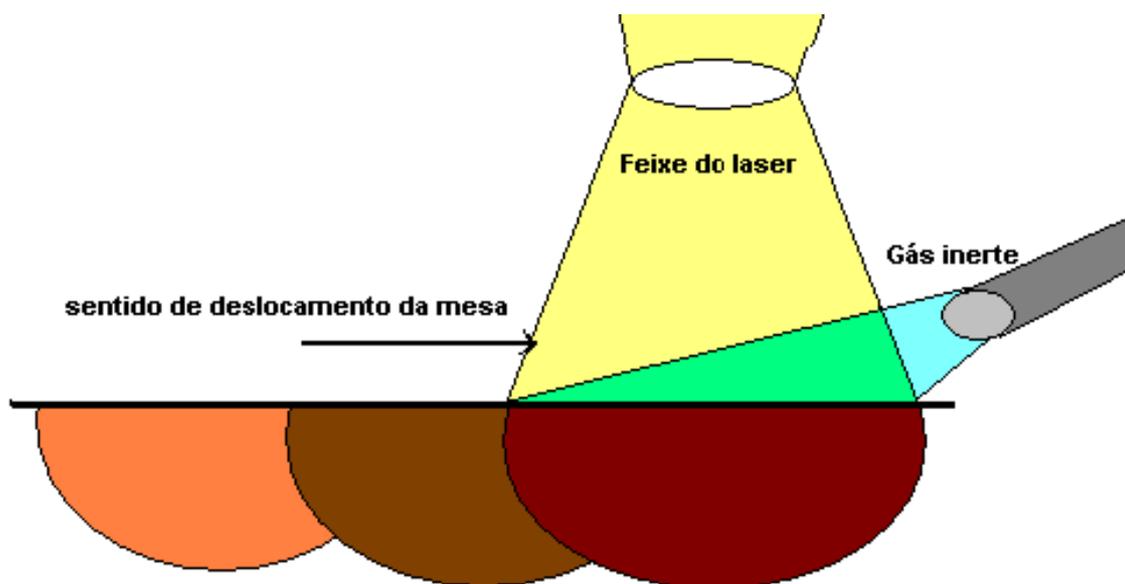


Figura 3.16 – Esquema de sobreposição das trilhas.

3.3 Ensaio de difração de raios X

O ensaio de difração de raios X é de grande importância na análise microestrutural, pois fornece informações sobre a natureza e os parâmetros do reticulado. Sua radiação com comprimento de onda da ordem do tamanho do espaçamento entre átomos numa estrutura cristalina possibilita esta aplicação. A técnica de difração tem uma grande vantagem sobre outros métodos por ser não destrutiva. A baixa penetração do feixe de raios X no substrato é uma outra vantagem quando aplicada a tratamentos superficiais em metais permitindo, por conseguinte uma análise focalizada nas fases presentes apenas na superfície.

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Tecnologia de Quartzos do Departamento de Engenharia de Materiais da Universidade de Engenharia Mecânica da Universidade de Campinas com o equipamento Difratorômetro de Raios X-2200 fabricado pela Rigaku e os parâmetros utilizados na avaliação estão apresentados na Tabela 3.6.

Na Figura 3.17 pode-se observar o equipamento utilizado no ensaio com um corpo de prova colocado no porta-amostra ao centro da foto onde incide o feixe de raios, estando à esquerda a fonte de raios-X e à direita o goniômetro receptor. Os picos que aparecem no difratograma são

analisados através de um software, denominado Match.

Tabela 3.6– Parâmetros usados no ensaio de difração de Raios X

Tipo de radiação	Tensão-Corrente	Ângulo	Passo (2θ)	Tempo por passo
Mo $K\alpha_1$	40 V – 20mA	10°-60°	0,02°	3 s



Figura 3.17 – Difratorômetro de Raios X.

3.4 Ensaio de Corrosão

Os ensaios eletroquímicos de determinação da impedância, polarização e potencial do eletrodo foram realizados no Laboratório de Degradação de Materiais e Desenvolvimento de Revestimentos do Departamento de Engenharia de Materiais da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas.

Para a realização destes ensaios utilizou-se o eletrodo de calomelano saturado (ECS-Hg/Hg₂Cl₂) como eletrodo de referência, empregando-se um capilar de Luggin contendo solução saturada de KCl como ponte salina. Foi utilizada platina como contra-eletrodo. O eletrodo de trabalho consiste no corpo de prova, onde apenas 1 cm² é exposto à solução, já que tratou-se de isolar todas as demais áreas com esmalte. Foi empregada a solução de 3,0% de NaCl (água salina), na temperatura de 25 °C.

O conjunto contendo eletrodo de trabalho, contra-eletrodo, eletrodo de referência, capilar de Luggin, Becker, constitui a célula eletroquímica usada neste trabalho, mostrada na Figura 3.18.

Os ensaios, no que diz respeito às amostras, foram realizados de forma não seqüencial e seguindo a ordem de impedância, potencial de corrosão e polarização além da impedância após polarização, neste último caso apenas para as amostras tratadas a laser, realizando três ensaios em cada amostra incluindo as réplicas. Os resultados foram comparados e analisados.

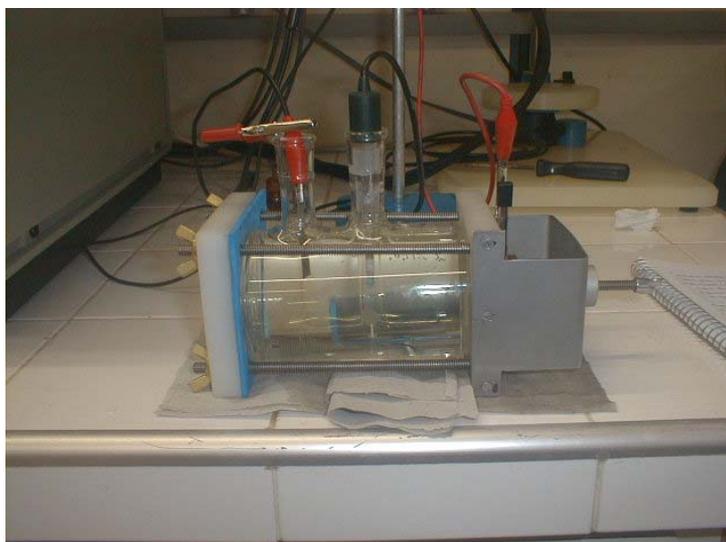


Figura 3.18 – Conjunto experimental utilizado nos ensaios de corrosão.

3.5 Ensaio de impedância eletroquímica

Tanto para o ensaio de impedância quanto para o ensaio de polarização e potencial do

eletrodo foi utilizado o equipamento Potenciostato tipo Potentiostat/Galvanoplast Modelo 273A da EG&G.

No caso do ensaio de impedância, o equipamento foi acoplado ao analisador de resposta de frequência Sorlartron 1250, fazendo-se uso do software de corrosão EIS-M398 da EG&G. Os parâmetros usados no processo deste ensaio foram: área do eletrodo de 1cm^2 ; frequência inicial de 10^4 Hz; frequência final de 10^{-2} Hz; amplitude 5. mv RMS e considerando um tempo de descanso da célula antes do ensaio de 12 minutos.

Para o ensaio de polarização e determinação do potencial do eletrodo foi utilizado o software M352 da EG&G e os parâmetros de entrada foram: velocidade de varredura de 0,2 mV/s; potencial variando de -200 mV/SCE até $+200$ mV/SCE; área do eletrodo de 1cm^2 . Procede-se ainda a tomada do potencial com circuito aberto.

3.6 Ensaio de Desgaste

Os ensaios de desgaste foram realizados no Laboratório de Desgaste do Departamento de Materiais da Universidade de São Paulo na cidade de São Carlos em uma máquina de desgaste microabrasivo mostrada na Figura 3.19.



Figura 3.19 – Máquina de desgaste microabrasivo.

Neste ensaio, uma esfera de aço ligado de diâmetro de uma polegada ($R=12,7$ cm) gira contra uma superfície da amostra formando uma calota de desgaste em sua superfície conforme mostrado na Figura 3.20.



Figura 3.20 – Corpo de prova sendo pressionado contra a esfera em rotação formando a calota de desgaste.

O diâmetro (b) formado na calota é medido em um microscópio ótico e o volume da calota calculado segundo a equação 2.10.

Os testes foram realizados a seco, a uma velocidade constante de deslizamento de esfera de $19,7 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ e uma força de contato de $18,7 \text{ N}$. Foram obtidas quatro calotas para cada amostra em um tempo fixo de cinco minutos o que corresponde à distância percorrida de 59 metros. Após a realização do ensaio, com uso de um microscópio ótico acoplado a um computador com analisador de imagem procedeu-se às medidas do diâmetro das calotas em um total de quatro para cada amostra. Calculou-se a média aritmética das mesmas e, posteriormente o volume que representa o desgaste. Os resultados foram colocados em um gráfico de barra para melhor visualização comparativa dos resultados.

Capítulo 4

Resultados e Discussão

4.1 Considerações Iniciais

Inicialmente são abordados os resultados referentes aos ensaios preliminares para definição dos parâmetros de processamento baseados em trilha simples, em seqüência são avaliados os resultados obtidos com sobreposição de trilhas. Os resultados obtidos no processo de tratamento superficial a laser através de Tabelas, Gráficos e Figuras, são analisados segundo a seqüência do procedimento experimental. São avaliadas as microestruturas, dimensões das poças fundidas, microdureza, resistência à corrosão e ao desgaste.

4.2 Resultados e discussão do ensaio de Trilha Simples

4.2.1 Dimensões das trilhas a laser

A primeira seqüência experimental realizada foi a produção de trilhas simples considerando a variação de potência e velocidade de varredura do feixe do laser, com o feixe do laser desfocado em 2 mm. Isto para um mesmo tipo de substrato, no caso o aço AISI 1045 jateado em Al_2O_3 . A Tabela 4.1 apresenta os resultados médios das medidas de largura **L** e profundidade **p** das trilhas, relativos aos ensaios desta primeira etapa.

Observa-se que as dimensões da trilha, tanto na largura **L** quanto na profundidade **p**, aumentam com a elevação da potência e diminuem com o aumento da velocidade para todas as faixas de potência. É um resultado já esperado, e percebe-se que menores velocidades, independente da potência, provocam evaporação e perda de material.

Tabela 4.1 – Dimensões das trilhas do aço AISI 1045 recozido e jateado em Al₂O₃

Potência (W)	1000		900		500	
Velocidade (mm/min)	L (μm)	p(μm)	L (μm)	p (μm)	L (μm)	p (μm)
3000	1477	354	1379	287	1190	227
4000	1408	272	1332	215	1056	151
5000	1370	218	1264	186	1025	139
6000	1367	221	1250	193	1018	132
8000	1323	218	1183	180	1009	133
10000	1326	177	1155	167	987	129

. Este efeito pode ser melhor observado na Figura 4.1, plotada a partir da Tabela 4.1 onde observa-se a variação da profundidade em função da velocidade de deslocamento do feixe do laser. Nela, constatamos um decaimento conforme uma função exponencial obtida a partir dos dados experimentais, através do método dos mínimos quadrados com a equação na forma $f(X) = Y_0 + A_1 \cdot e^{(-X/T1)}$.

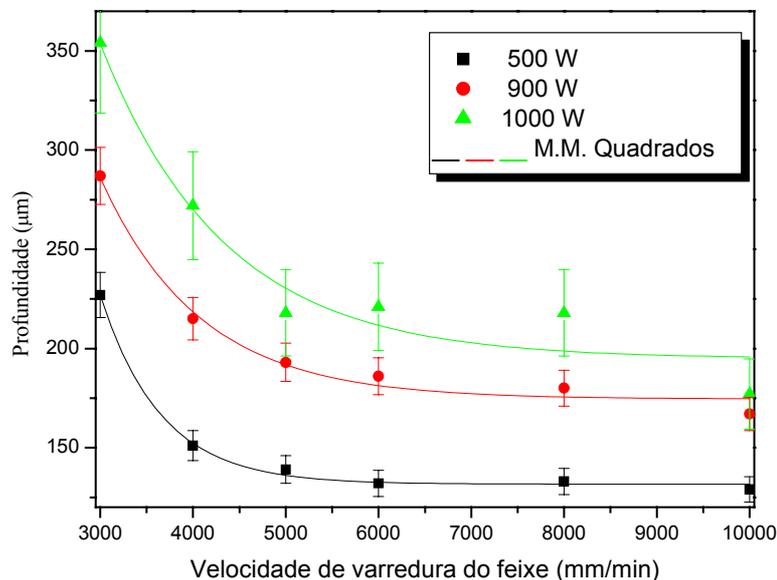


Figura 4.1 – Profundidade X velocidade de varredura para trilha simples, aço AISI 1045 recozido jateado com Al₂O₃ e diferentes potências.

Observa-se na Figura 4.1 que, com o aumento da velocidade do feixe do laser, a profundidade apresenta inicialmente uma queda brusca ficando essencialmente constante para $v > 6000$ mm/min. Pode-se observar ainda que na curva de potência mais elevada, ocorre uma maior discrepância da curva em relação aos pontos enquanto que na de menor potência a curva apresenta-se mais coerente em relação aos pontos tomados. Isto se deve ao menor controle operacional conseguido nas potências mais elevadas. Na Figura 4.2 e que relaciona largura X velocidade de varredura do feixe observa-se os mesmos efeitos verificados em relação ao gráfico anterior, porém a declividade da curva se dá de maneira menos brusca o que mostra ser o efeito da velocidade de varredura maior na profundidade que na largura produzida.

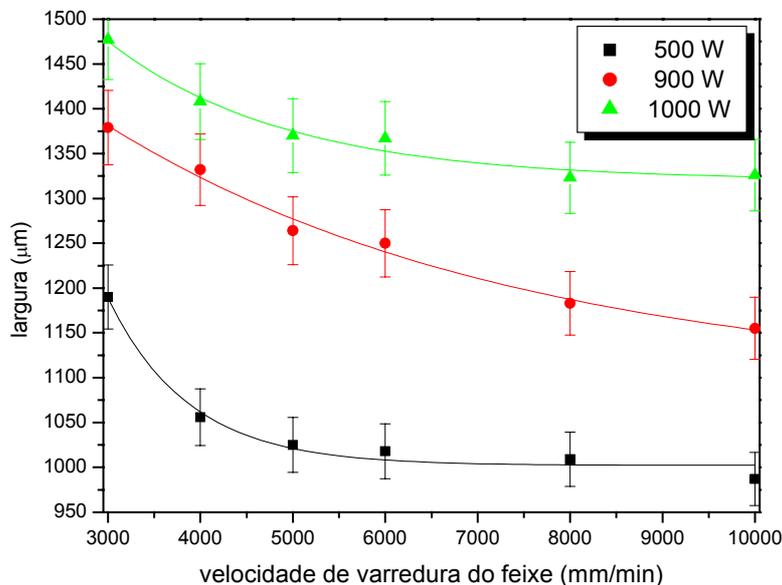


Figura 4.2 - – Largura X velocidade de varredura para trilha simples, aço AISI 1045 recozido jateado com Al_2O_3 e diferentes potências.

O aumento da potência implica em valores mais elevados nas dimensões das trilhas a laser tanto na largura como na profundidade. Na imagem micrográfica da secção transversal das trilhas, mostrada na Figura 4.3, observa-se que nos casos de potência mais elevada e de velocidade mais baixa ocorre a refusão do material e em alguns casos, acompanhados de significativa perda de material na região central da trilha por evaporação devido ao calor

alcançado, além de uma maior transformação microestrutural na zona termicamente afetada. Estes parâmetros, onde ocorreu refusão com ou sem perda de material, foram descartados nas etapas seguintes do trabalho. Já nos casos em que se dá a uma potência de 500 W e nas velocidades superiores a 6000 mm/min, pode-se observar que a microestrutura evolui para uma microestrutura martensítica sem apresentar perdas de material. A diferença entre as trilhas com e sem perda de material pode ser vista e constatada nas Figuras 4.3 e 4.4.

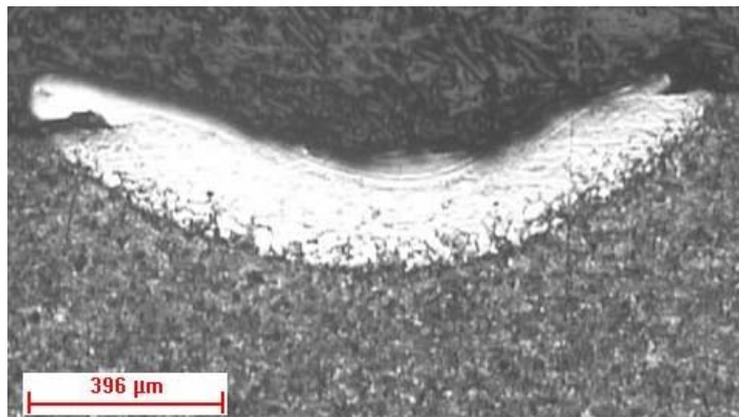


Figura 4.3 – (Nital 3%) Trilha simples com potência de 1000W e velocidade de 3000 mm/min.

Na Figura 4.4, observa-se a zona formada pela trilha do laser sem que o substrato tenha apresentado perda de material por evaporação. Isto se dá para trilhas com potência mais baixa e velocidades maiores.

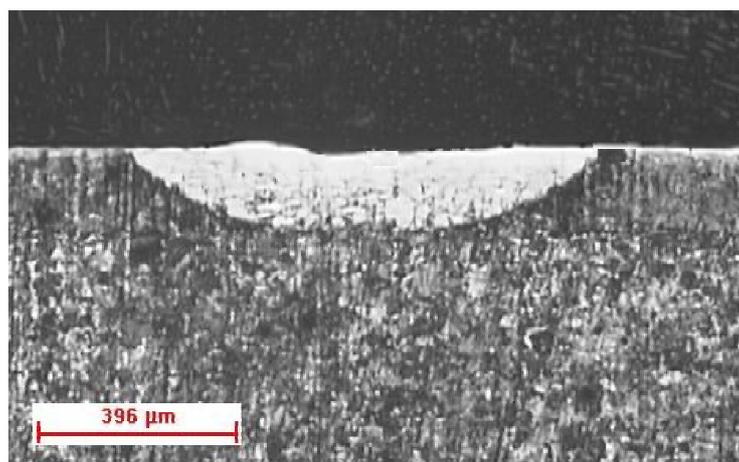


Figura 4.4 – (Nital 3%) – Trilha simples com potência de 500 W e velocidade de 8000 mm/min.

Na seqüência experimental foi estudado o efeito do acabamento superficial por jateamento sobre a formação da trilha do laser. Para isso, foram produzidos dois tipos de acabamento superficial: com pó de óxido de alumínio (Al_2O_3) e com microesfera de vidro. Manteve-se a potência constante e variou-se a velocidade. Os resultados geraram a Tabela 4.2 e a Figura 4.5:

Tabela 4.2 – Dimensões da região tratada do aço AISI 1045 com diferentes jateamento

Material	Al_2O_3		Microesfera de Vidro	
Velocidade (mm/min)	L (μm)	p (μm)	L (μm)	p (μm)
3000	1190	227	1287	237
4000	1056	151	1158	189
5000	1025	139	1145	148
6000	1018	132	892	136
8000	1009	133	759	117
10000	987	129	718	101

Para velocidades mais baixas, nas amostras previamente jateadas com areia produziram-se maiores profundidades de zona transformada.

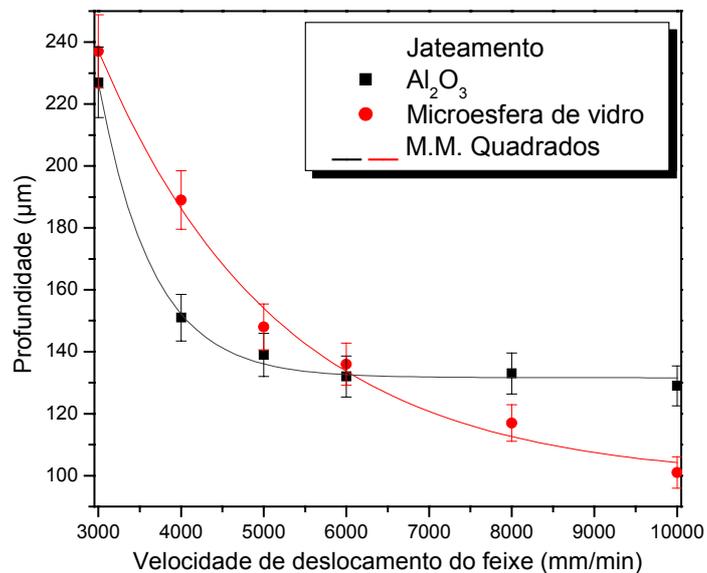


Figura 4.5 – Relação entre velocidade e profundidade a partir de diferentes tipos de jateamento.

Já para velocidades maiores ocorre uma inversão na profundidade da poça e as amostras previamente jateadas com Al_2O_3 alcançam valores maiores. Neste caso, uma maior profundidade da poça ocorrida em velocidades mais elevadas indica uma melhor absorção de energia, o que norteou a escolha do jateamento com Al_2O_3 para a etapa seguinte.

A próxima etapa foi o estudo a partir de uma potência fixa de 500 W e jateamento com Al_2O_3 e velocidade variando entre 3000 mm/min a 10000 mm/min para o substrato do aço AISI 1045 na forma de recebidos ou recozidos, tratados termicamente por têmpera e termoquimicamente por nitretação. A Tabela 4.3 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 4.3 – Dimensões da região tratada do aço AISI 1045, diferentes substratos e P=500W.

Material	Nitretado		Temperado		Recozido	
	L (μm)	p (μm)	L (μm)	p (μm)	L (μm)	p (μm)
3000	1310	294	1123	212	1190	227
4000	1205	234	1094	193	1056	151
5000	1145	199	946	167	1025	139
6000	1139	189	933	155	1018	132
8000	1101	179	879	155	1009	133
10000	1098	168	807	140	987	129

A Figura 4.6 mostra a variação ocorrida no aço nitretado, que apresentaram em todas as velocidades, maiores valores de profundidade. Percebe-se que o processo de nitretação alterou significativamente a absorção do laser, possivelmente devido aos carbonetos e aos nitretos formados na etapa anterior. Pode-se observar ainda que as amostras temperadas apresentaram em seu conjunto, maiores valores de penetração de camada em relação ao das peças recozidas, que após queda considerável a partir da segunda maior velocidade, encontra um equilíbrio da curva logo nas próximas velocidades de varredura do feixe, enquanto que as outras amostras começam a encontrar maior uniformidade de suas dimensões apenas a partir de velocidades intermediárias.

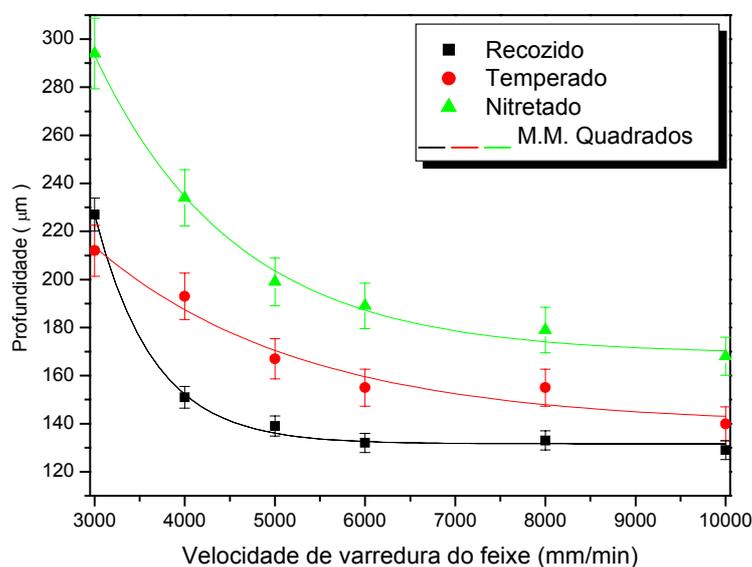


Figura 4.6 – Profundidade da poça para diferentes velocidades e substratos do aço AISI 1045.

A próxima etapa do trabalho estuda os efeitos do laser sobre o aço AISI 4340 a partir dos seguintes parâmetros: a potência do laser fixa em 500 W, velocidade de varredura do feixe de 3000 mm/min a 10000 mm/min, jateamento das peças com Al_2O_3 e as peças nos estados como recebido com uma estrutura bainítica com endurecimento médio, reozido e nitretado. Os resultados estão na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Dimensões da região tratada do aço AISI 4340, diferentes substratos e $P = 500$ W.

Material	Nitretado		Recebido		Reozido	
	L (µm)	p (µm)	L (µm)	p (µm)	L (µm)	p (µm)
3000	1295	244	1320	254	1250	212
4000	1224	196	1253	215	1246	180
5000	1221	180	1237	190	1174	155
6000	1207	179	1224	183	1161	151
8000	1041	170	1223	180	1060	142
10000	996	168	1209	174	1022	125

No gráfico feito a partir dos dados da Tabela 4.4, mostrado na Figura 4.7, observa-se diferenças em relação ao aço AISI 1045 estudado. Verifica-se que as amostras como recebidas são aquelas que apresentaram maiores valores da camada transformada, para todas as faixas de velocidades. Nesse caso as amostras nitretadas apresentaram uma profundidade de penetração menor que das amostras sem tratamento. As amostras recozidas apresentaram os menores valores nas dimensões das trilhas, bem abaixo das outras condições de substrato.

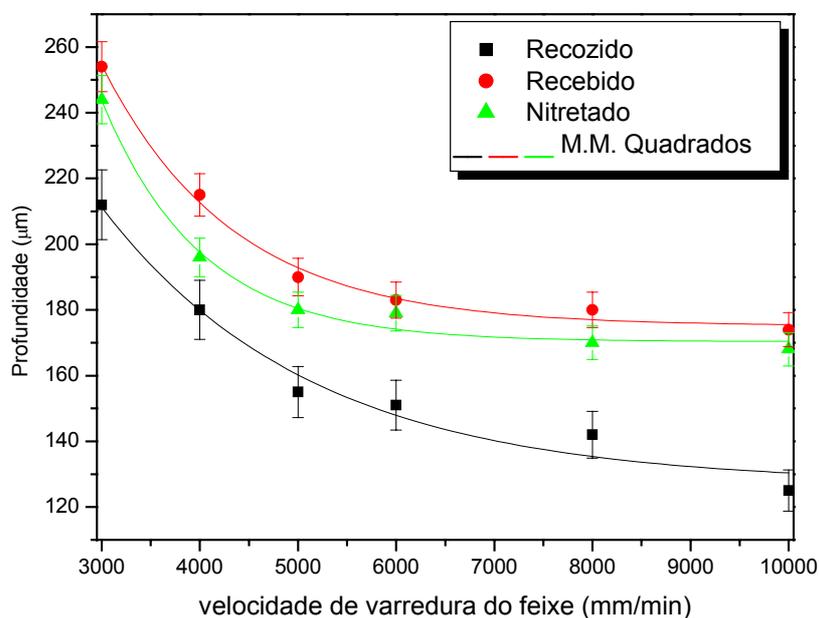


Figura 4. 7 – Profundidade de trilha para diferentes substratos do aço AISI 4340.

A partir dos resultados citados, pode-se fazer uma comparação entre os mesmos processos de tratamento para os diferentes tipos de aço. Na Figura 4.8 a seguir fazemos uma comparação entre os aços AISI 1045 e AISI 4340 que se encontram no estado recozido e em condições experimentais de mesma potência (500 W), jateados com Al_2O_3 e velocidade variando de 3000 mm/min a 10000 mm/min. Com exceção da velocidade mais baixa em que ocorre evaporação superficial, o que dificulta uma medida mais precisa da superfície observa-se que no conjunto, o aço AISI 4340 apresenta maiores valores de profundidade que o aço AISI 1045, porém verifica-se que para maiores valores da velocidade de varredura há uma convergência nos valores da

profundidade. Esta diferença na profundidade se dá em virtude dos elementos de liga que compõem o aço AISI 4340 que facilitam a transformação estrutural do material. A convergência que ocorre em velocidades mais elevadas pode significar que para tratamentos térmicos mais brandos, maiores velocidades de varredura sejam uma solução independente da composição do material.

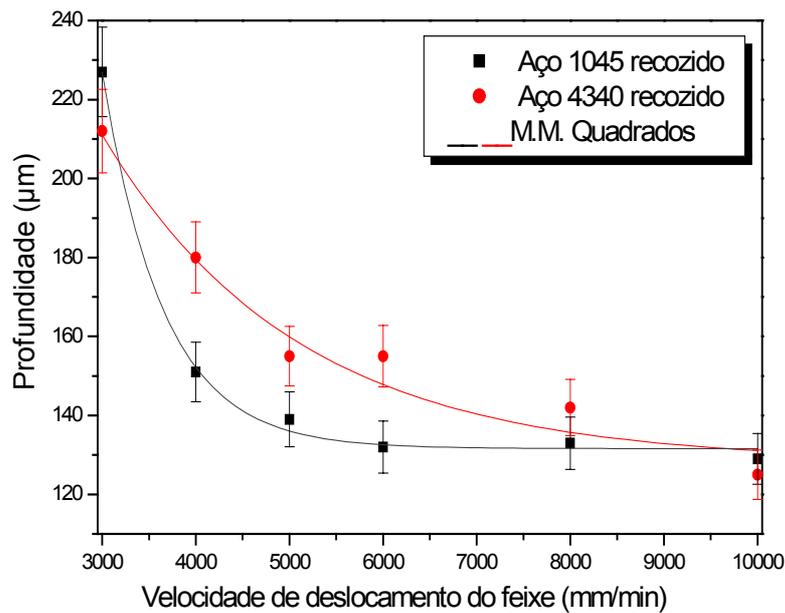


Figura 4.8 - Profundidade da camada tratada para os diferentes aços recozidos.

Uma situação semelhante ocorre em relação a Figura 4.9 que mostramos a seguir. Nela verificamos a profundidade da camada tratada para os aços nitretados. Neste gráfico, nas menores velocidades de varredura do feixe, para o aço AISI 4340 nitretado, os valores da profundidade de camada nitretada são maiores que do aço AISI 1045, porém também verificamos uma convergência para maiores velocidades. Este resultado volta a mostrar que os elementos de liga do aço AISI 4340 favorecem uma maior transformação microestrutural.

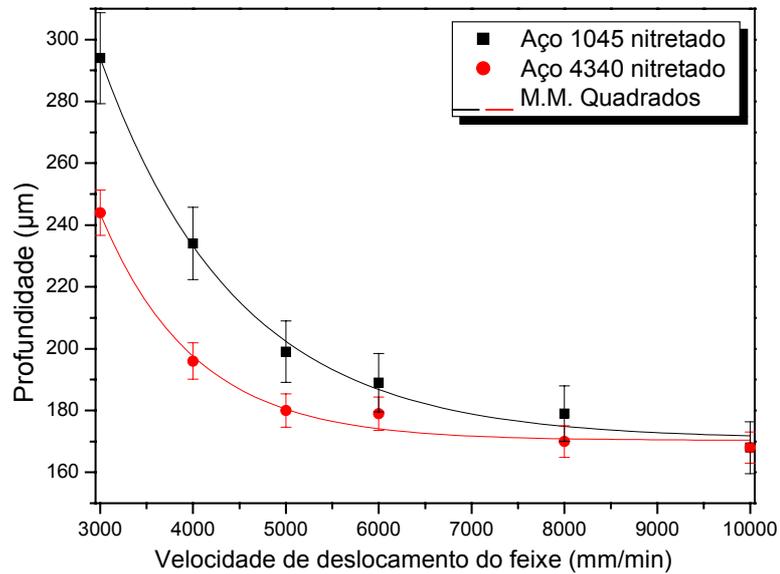


Figura 4.9 – Profundidade da camada tratada para os diferentes aços nitretados.

4.2.2 Microestrutura ótica e eletrônica

Utilizou-se no trabalho as imagens mais significativas para o entendimento da pesquisa realizada.

4.2.2.1 Aço AISI 1045

As imagens realizadas com microscópio ótico não permitiram definir a microestrutura da zona transformada, mas definiram perfeitamente as trilhas, a zona de transição e o substrato.

Na Figura 4.10 (a e b) são mostradas as trilhas de amostras realizadas com potência de

1000 W e 900 W, com velocidade de varredura do feixe de 4000 e 5000 mm/min respectivamente. A perda de material por evaporação é visível na superfície das trilhas e, devido a isto, estes parâmetros foram descartados para a etapa seguinte de nosso trabalho.

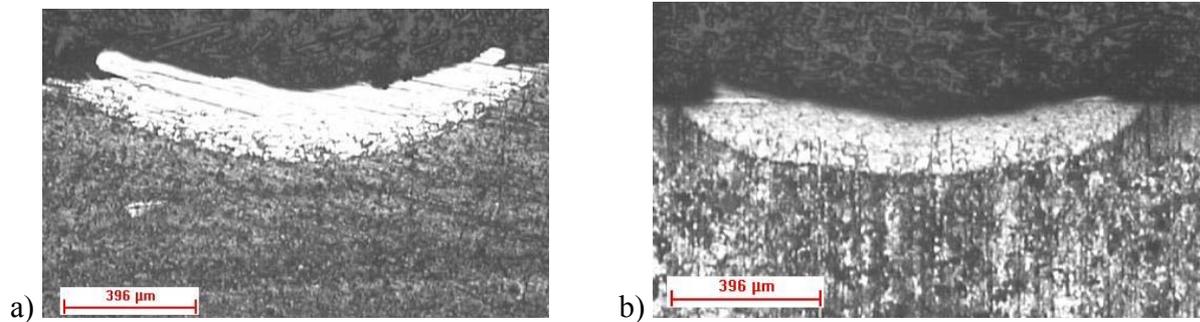


Figura 4.10 – Trilhas do aço AISI 1045 jateado com Al_2O_3 , e tratado com potências de: a) 1000 W e b) 900 W e velocidade de 4000 e 5000 mm/min respectivamente, e atacadas com nital 3%.

Diminuindo a potência e a partir de velocidades intermediárias verifica-se que a perda de material por evaporação deixou de ocorrer e a área termicamente afetada diminuiu sensivelmente. Porém não se conseguiu definir pelas imagens realizadas a presença de zona fundida e qual o percentual, mas como mostrado na Figura 4.11 (a e b) tornou-se possível definir os parâmetros que separam a zona fundida de uma zona tratada. As imagens mostram a menor profundidade alcançada pela amostra jateada com microesfera de vidro em velocidades elevadas e uma profundidade reduzida para amostra jateada com Al_2O_3 com velocidade mais elevada.

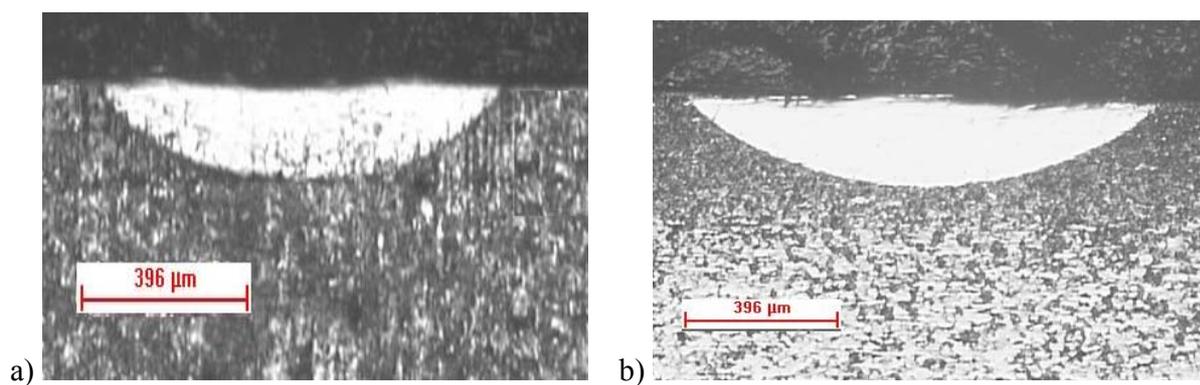


Figura 4.11 – Trilhas do aço AISI 1045 jateado previamente com Al_2O_3 e microesfera de vidro, e tratado a laser com potência de 500 W e: a) $v = 10 \cdot 10^3$ mm/min e b) $3 \cdot 10^3$ mm/min.

As Figuras 4.12 e 4.13 mostram respectivamente a microestrutura da trilha da amostra realizada com potência de 500 W, velocidade de $6 \cdot 10^3$ mm/min e jateado com Al_2O_3 , atacada com reativo de Vilela e observadas por meio do microscópio eletrônico de varredura (MEV). A microestrutura apresenta-se bastante refinada.

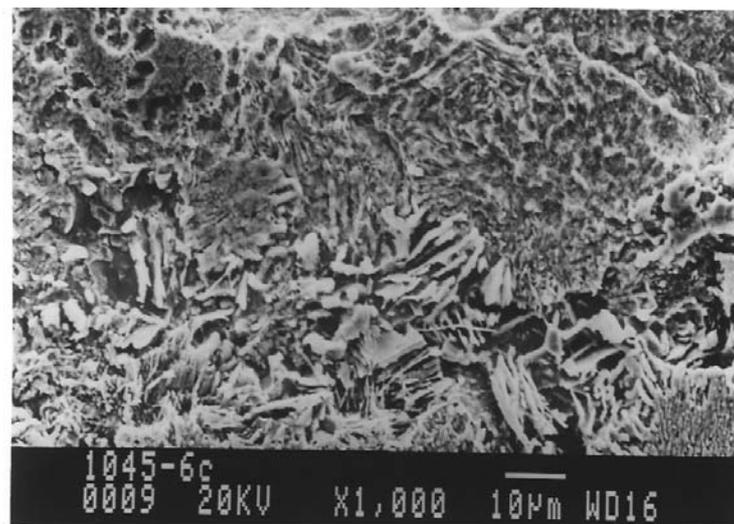


Figura 4.12 – Microestrutura da trilha do aço AISI 1045 jateado com Al_2O_3 , potência de 500 W e velocidade de $6 \cdot 10^3$ mm/min, atacada com reativo de Vilela.

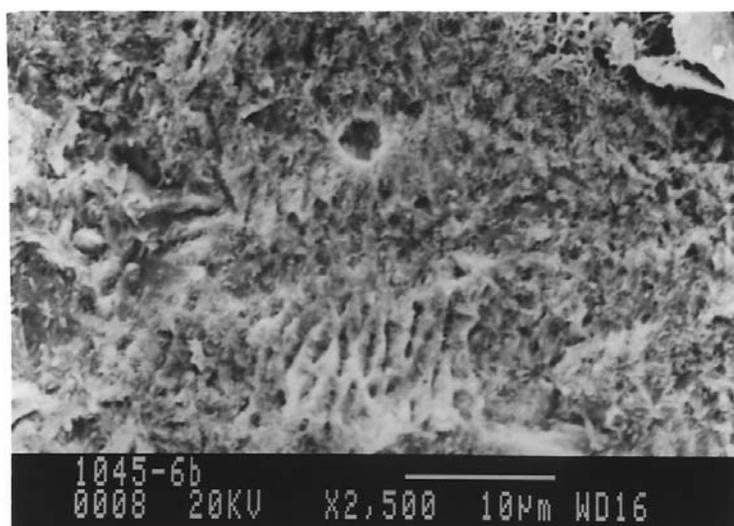


Figura 4.13 – Detalhe da Figura 4.12.

As Figuras 4.14 e 4.15, mostram respectivamente a microestrutura da trilha da amostra realizada com potência de 500 W, velocidade de $8 \cdot 10^3$ mm/min e jateado com Al_2O_3 , atacada com reativo de Vilela e observada por meio do Microscópio Eletrônico de Varredura. A microestrutura apresenta-se ainda mais refinada.

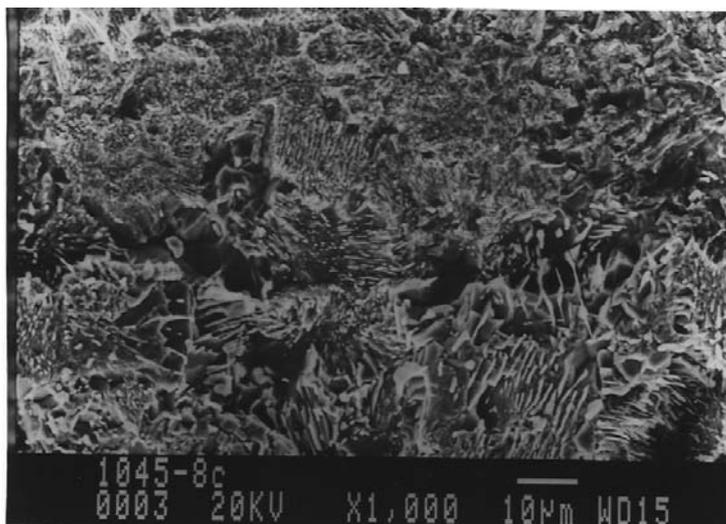


Figura 4.14 - Microestrutura da trilha do aço AISI 1045, jateado com Al_2O_3 , potência de 500 W e velocidade de $8 \cdot 10^3$ mm/min, atacada com reativo de Vilela.

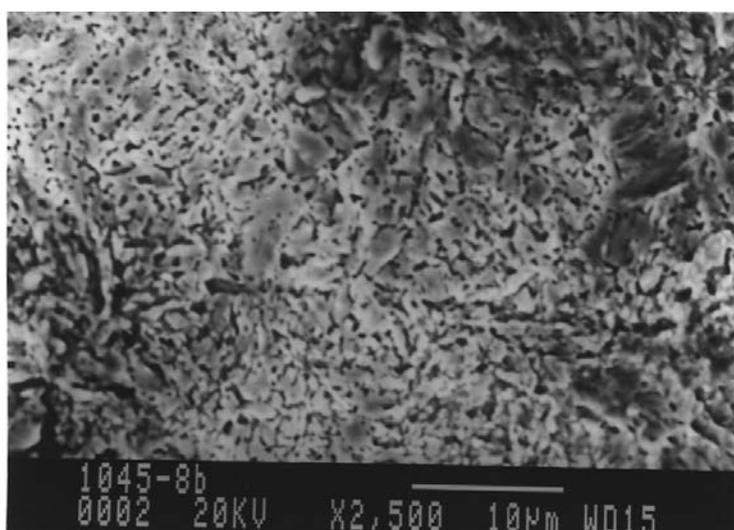


Figura 4.15 – Detalhe da Figura 4.14.

Na Figura 4.16, nas amostras pré-temperadas e tratadas a laser, observa-se que as dimensões da trilha apresentam diferenças em relação às amostras recozidas. Para velocidades mais baixas do feixe, verifica-se perda de material por evaporação, fato que desaparece a partir de velocidades intermediárias que também produziram uma menor zona termicamente afetada.

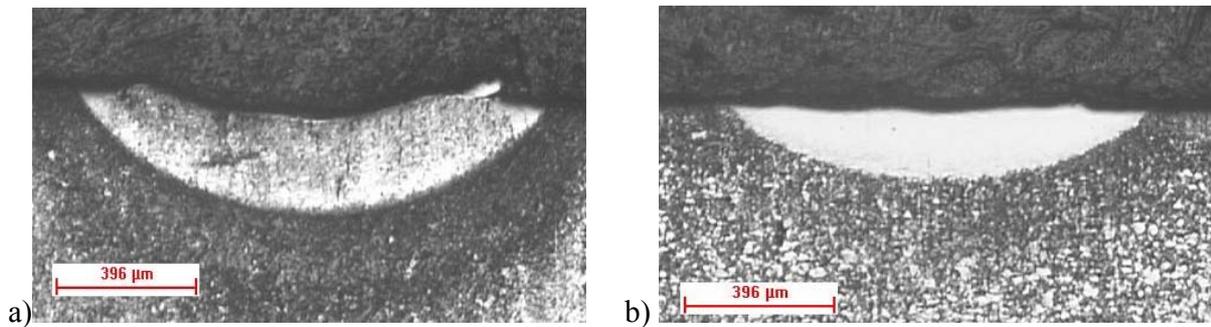


Figura 4 16 – Amostras pré-temperadas do aço AISI 1045, com potência de 500 W, jateadas com Al_2O_3 e velocidade de: a) $3 \cdot 10^3$ mm/min e b) $5 \cdot 10^3$ mm/min.

Nas amostras nitretadas, apresentadas na Figura 4.17, produzidas nas mesmas condições operacionais do laser, verifica-se um comportamento semelhante em relação às amostras temperadas, com perda de material para velocidades de varredura menores do feixe e, uma melhor condição, com pouco ou nenhuma perda de material, em velocidades maiores. Essas amostras foram as de maior profundidade de trilha após a varredura do feixe do laser para o aço AISI 1045 quando comparadas com outras amostras ensaiadas nas mesmas condições.

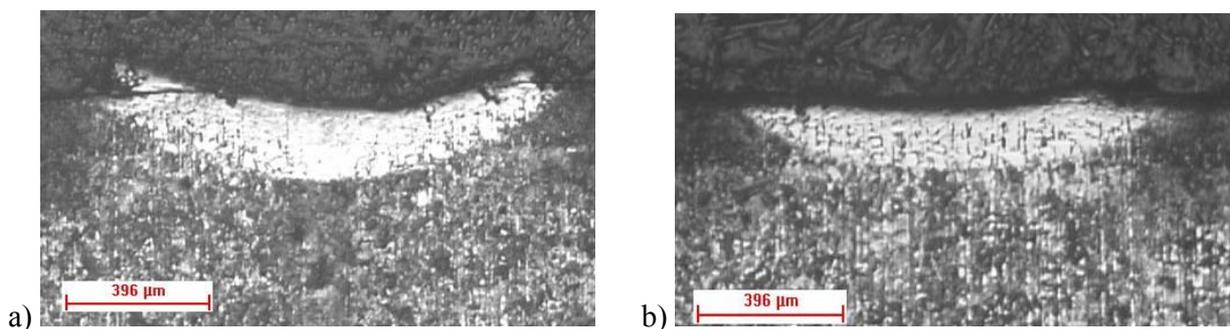


Figura 4 17 – Amostras pré-nitretadas do aço AISI 1045, com potência de 500 W, jateadas com Al_2O_3 e velocidade de a) $3 \cdot 10^3$ mm/min e b) $6 \cdot 10^3$ mm/min.

4.2.2.2 Aço AISI 4340

As micrografias das trilhas produzidas no aço AISI 4340 são apresentadas a seguir. Foram escolhidas aquelas mais significativas e que serviram para alicerçar este trabalho. Mostramos primeiramente os resultados do ensaio com as amostras como recebidas e tratadas a laser com potência de 500 W e jateadas com Al_2O_3 . Na Figura 4.18.a é mostrada a trilha da amostra produzida com velocidade do feixe de 3.10^3 mm/min a qual apresentou perda de material na região central e uma pequena região termicamente afetada na interface com o substrato. A Figura 4.18.b representa a amostra realizada com uma velocidade de 10^4 mm/min não se observa mais o fenômeno de evaporação, porém uma refusão superficial a direita da trilha pode ser vista. As dimensões das trilhas do aço AISI 4340 como recebido são as maiores em comparação com as trilhas produzidas nos outros substratos deste material o que mostra a elevada absorção do laser por este substrato, embora inferiores quando comparadas às dimensões das trilhas resultantes no aço AISI 1045 pré-nitretado e submetidas às mesmas velocidades de varredura do feixe de laser.

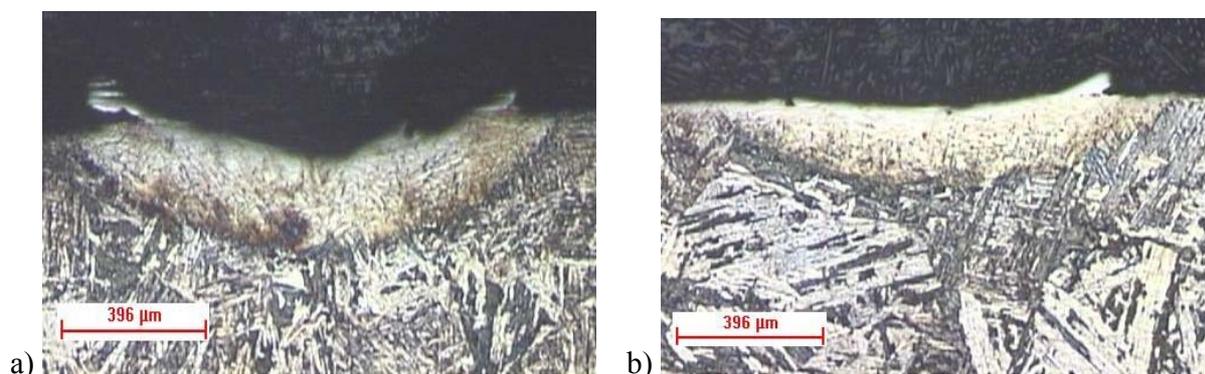


Figura 4.18 – Trilhas do aço AISI 4340 como recebido: a) $v = 3.10^3$ mm/min; b) $v = 10.10^3$ mm/min (Ataque com nital 3%).

Na imagem ampliada da interface trilha-substrato, que pode ser vista na Figura 4.19 pode-se verificar que a transformação da estrutura bainítica existente no substrato se mistura com a transformada pelo feixe de laser, caracterizando que a transformação microestrutural destas amostras foi muito menos eficiente que a das amostras do aço AISI 1045 e dos outros ensaios do próprio aço AISI 4340.

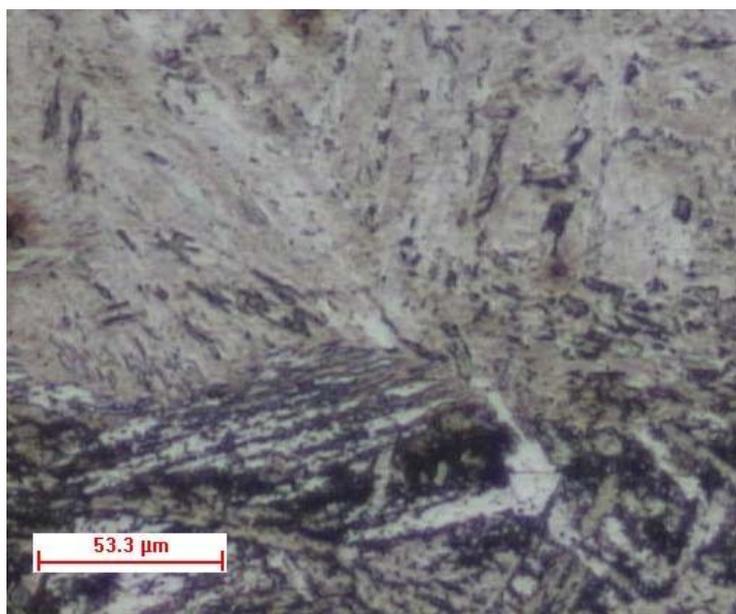


Figura 4.19– Região da interface trilha-substrato com a transformação da estrutura bainítica.

As amostras da Figura 4.20 representam as trilhas a laser dos ensaios realizados sobre os substratos recozidos. Vemos primeiramente a imagem “a” da amostra tratada com velocidade de $3 \cdot 10^3$ mm/min. Não se percebe neste caso, mesmo para uma baixa velocidade o fenômeno da evaporação superficial. As dimensões das poças dessas amostras, conforme mostra a imagem “b” foram as menores, para toda a faixa de velocidade, em comparação aos outros substratos deste material. O substrato recozido apresentou a menor absorção de energia, o que significa uma maior refletividade desta superfície.

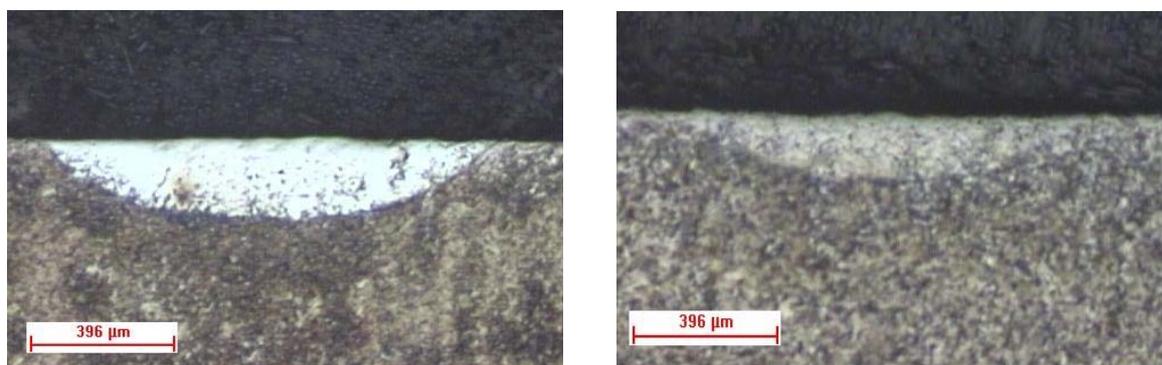


Figura 4.20 - Trilhas do aço AISI 4340 recozido apresentando : a) $v = 3 \cdot 10^3$ mm/min; b) $v = 8 \cdot 10^3$ mm/min (Ataque com nital 3%).

A imagem da interface trilha-substrato, Figura 4.21a, obtida em microscópio ótico, mostra a microestrutura granular do substrato e a microestrutura da poça com pouca definição. Porém a mesma amostra analisada por MEV, Figura 4.21b com 3000X mostra finas agulhas de martensita.

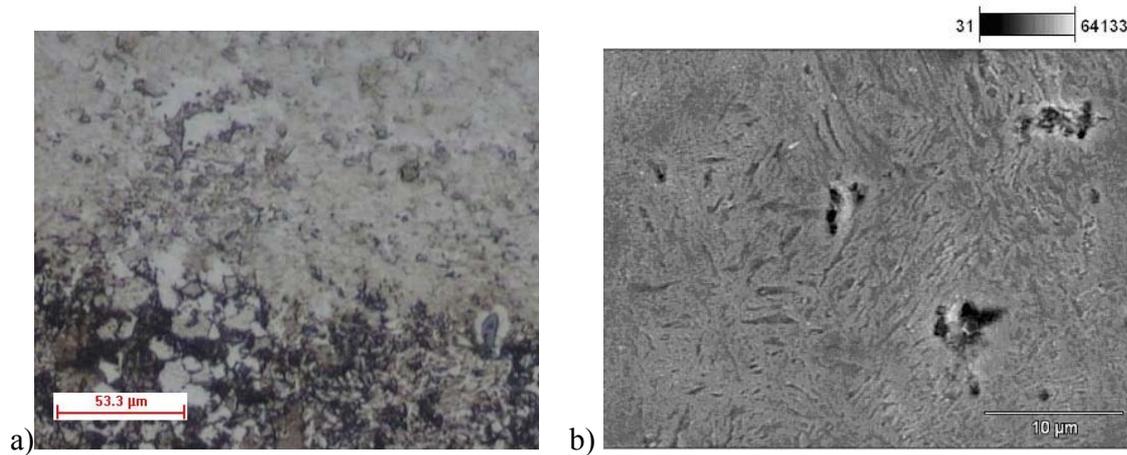


Figura 4.21 – Microestrutura da trilha do aço AISI 4340 recozido, $v = 10^4$ mm/min sendo a) Zona de transição obtida em MO e b) Zona da poça obtida pelo MEV.

Finalizando a análise dos ensaios de trilha simples, são apresentadas as micrografias referentes ao aço AISI 4340 nitretado. Na Figura 4.22.a observa-se a trilha produzida com velocidade de $3 \cdot 10^3$ mm/min a qual apresenta uma forte fusão de material removido do centro para as laterais. A trilha está bem definida, e o ataque com nital 3% apresenta a microestrutura do substrato misturada com a região refundida. No caso da Figura 4.22 b, resultante da velocidade de processamento de $8 \cdot 10^3$ mm/min, não ocorreu refusão superficial e pode-se observar uma microestrutura mais refinada em relação ao substrato.

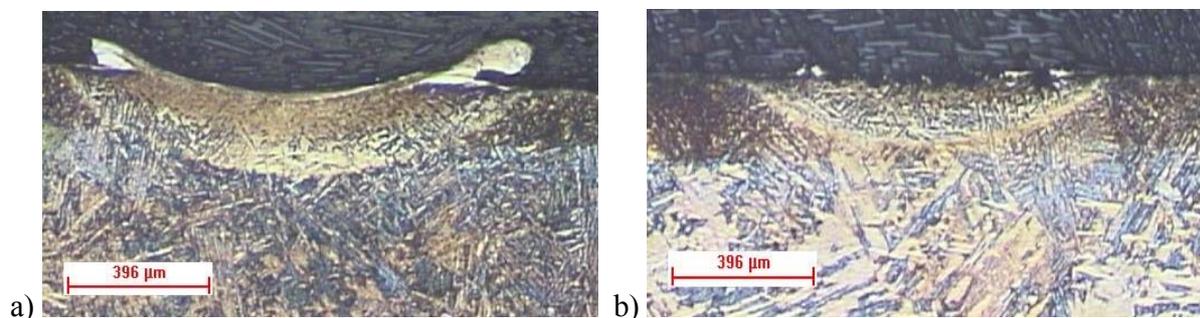


Figura 4.22 – Trilhas das amostras pré-nitretadas: a) $v = 3 \cdot 10^3$ mm/min e b) $v = 8 \cdot 10^3$ mm/min.

Nas imagens ampliadas da amostra pré-nitretada, na interface entre a zona transformada pelo laser e o substrato, obtidas por MO e MEV, vistas nas Figuras 4.23a) e b), nota-se, próximo à superfície, uma região de pouca definição, porém ao centro verifica-se uma matriz de microestrutura acicular caracterizada como martensita.

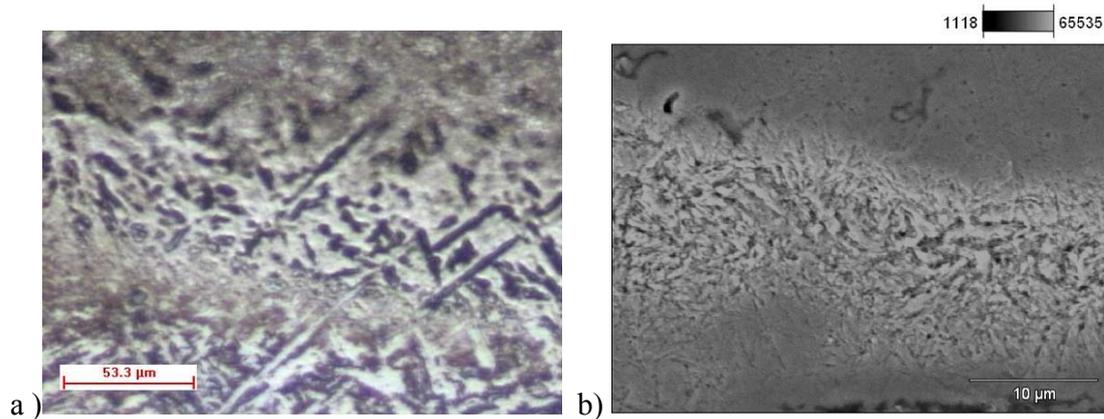


Figura 4.23 – Amostra pré-nitretada, interface substrato-zona tratada: a) MO; b) MEV.

4.2.3 Ensaio de microdureza

Os ensaios de microdurezas foram realizados somente para as trilhas definidas como as mais promissoras para a etapa seguinte do trabalho, isto é, trilhas que não apresentaram ebulição ou considerável refusão superficial, obtidas com potência de 500 W e velocidade de $8 \cdot 10^3$ mm/min e $10 \cdot 10^3$ mm/min e jateamento com Al_2O_3 para todas as situações de pré-tratamento. As medidas foram realizadas a partir da superfície, com uma distância de segurança entre as mesmas para que não fossem produzidos erros por interferências nas medidas. Os resultados dos perfis de microdurezas mais significativos estão nas Tabelas 4.5 e 4.6 para os aços AISI 1045 e AISI 4340.

Uma comparação interessante de resultados pode ser feita entre os perfis de dureza do aço AISI 1045 jateado com Al_2O_3 e com microesfera de vidro e tratado posteriormente a laser. Eles são apresentados nas Figuras 4.24 e 4.25. Na Figura 4.24 em que a velocidade de varredura é de $8 \cdot 10^3$ mm/min, os valores de dureza, dentro da poça da amostra jateada com microesfera de vidro, foram superiores aos valores apresentados pela amostra jateada com Al_2O_3 . As profundidades das poças nos dois casos são bastante próximas. O tipo de material usado no jateamento influenciou

na rugosidade superficial das amostras e conseqüentemente na absorção do feixe do laser.

Tabela 4.5 – Perfil de microdureza do aço AISI 1045

Material	Aço AISI 1045							
Jateamento	Al ₂ O ₃				Microesfera de Vidro			
Velocidade(mm/min)	8.10 ³		10 ⁴		8.10 ³		10 ⁴	
Unidades	μm	HV	μm	HV	μm	HV	μm	HV
Medidas	25,93	434,2	21,37	493,5	12,92	765,3	12,71	804,9
	51,25	478,2	45,44	503,3	34,93	782,7	53,96	831,5
	70,82	435,6	67,65	431,6	59,62	799,9	78,02	816,7
	93,85	418,4	91,72	400,4	82,43	849,4	95,73	832,4
	117,71	418,1	121,81	405,5	103,37	825,4	120,63	590,8
	144,72	318,3	160,21	245,4	125,6	724,3	143,4	334,3
	173,62	147,8	218,60	131,6	159,52	586,1	165,11	261,6
	221,82	138,1	299,78	123,5	199,63	323,6	186,82	270,3
	-	-	-	-	238,9	215,1	-	-

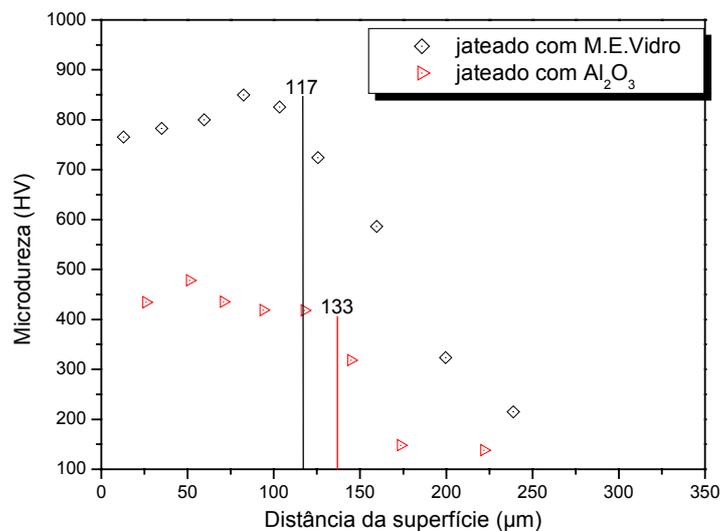


Figura 4.24 - Perfil de dureza do aço AISI 1045 para dois diferentes materiais de jateamento e $v = 8.10^3$ mm/min.

Um comportamento semelhante é visto na Figura 4.25 para amostras tratadas com velocidade de varredura do laser de 10.10^3 mm/min. Os perfis das amostras jateadas em microesfera de vidro alcançam valores mais elevados que os jateados com Al₂O₃, apesar das

primeiras possuírem uma profundidade de poça um pouco inferior, pelas mesmas razões já descritas. A rugosidade superficial, com valores citados no item 3.2.1, mostrando um valor mais elevado para microesfera de vidro, influenciou na absorção da energia do laser.

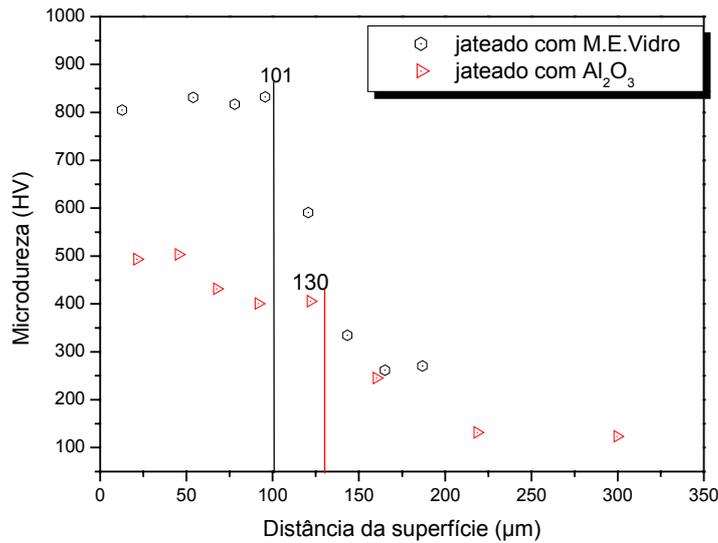


Figura 4.25 – Perfil de dureza do aço AISI 1045 para dois diferentes materiais de jateamento, $v = 10 \cdot 10^4$ mm/min.

Deste modo está comprovada, como era um dos objetivos deste trabalho, a influência dos materiais de jateamento sobre os resultados finais da profundidade das poças, por terem uma influência direta sobre a refletividade e absorção do feixe do laser. As microesferas de vidro deixam a superfície mais rugosa, favorecendo a absorção de energia.

Na Figura 4.26 compara-se o perfil de microdureza das trilhas feitas no aço AISI 4340 sem pré-tratamento e no mesmo aço, porém pré-recozido, para velocidade de varredura do laser de $8 \cdot 10^3$ mm/min, conforme Tabela 4.6. Observa-se que na amostra como recebida, a região da poça apresenta valores de dureza mais elevados que da amostra recozida. A amostra que sofreu recozimento apresentou valores bem inferiores de dureza em uma profundidade de poça menor. As medidas de durezas tiradas na região do substrato apresentam convergência para valores de dureza desses substratos, conforme valores apresentados na Tabela 3.2. O objetivo desta

comparação é mais uma vez estudar a importância do pré-tratamento sobre a absorção da energia do laser em aços com mesma composição química, mas com diferentes propriedades superficiais, neste caso a dureza e a microestrutura. Os resultados mostram a importância do pré-tratamento no resultado final dos materiais tratados posteriormente a laser.

Tabela 4.6 – Perfil de microdureza de aços AISI 4340

Material	Aço AISI 4340							
Substrato	Recozido				Recebido			
Velocidade(mm/min)	$8 \cdot 10^3$		10^4		$8 \cdot 10^3$		10^4	
Unidades	μm	HV	μm	HV	μm	HV	μm	HV
Medidas	39,66	358,5	34,66	540,0	13,47	928,1	33,00	943,9
	72,46	351,1	66,23	649,1	23,47	922,9	64,60	909,7
	106,08	345,4	91,14	469,5	60,18	944,9	99,49	896,7
	149,66	396,1	125,51	699,9	88,94	969,9	137,73	862,3
	188,05	177,6	158,58	701,9	115,80	793,3	172,72	747,0
	235,77	127,4	190,56	447,8	146,83	727,9	199,54	419,0
	285,4	122,4	228,18	335,5	182,48	441,3	243,10	372,3
	339,15	130,1	264,19	340,2	217,03	361,0	292,61	366,6
	-	-	-	-	245,79	372,0	-	-

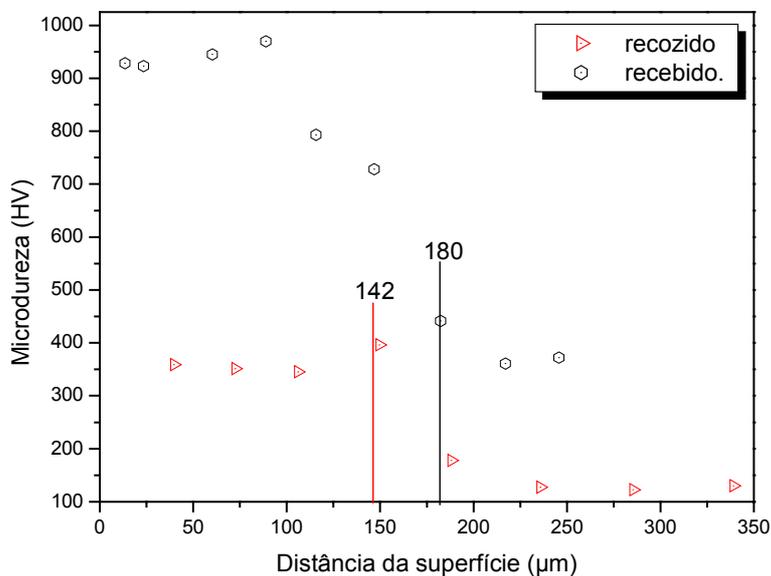


Figura 4.26 – Perfil de microdureza do aço AISI 4340 com substratos diferentes, $v = 8 \cdot 10^3$ mm/min.

O procedimento experimental foi repetido para as mesmas amostras, porém para a velocidade de varredura de $10 \cdot 10^3$ mm/min e os perfis encontrados foram plotados no Gráfico apresentado na Figura 4.27. Os resultados encontrados foram semelhantes ao do gráfico anterior o que tende a confirmar as observações descritas anteriormente.

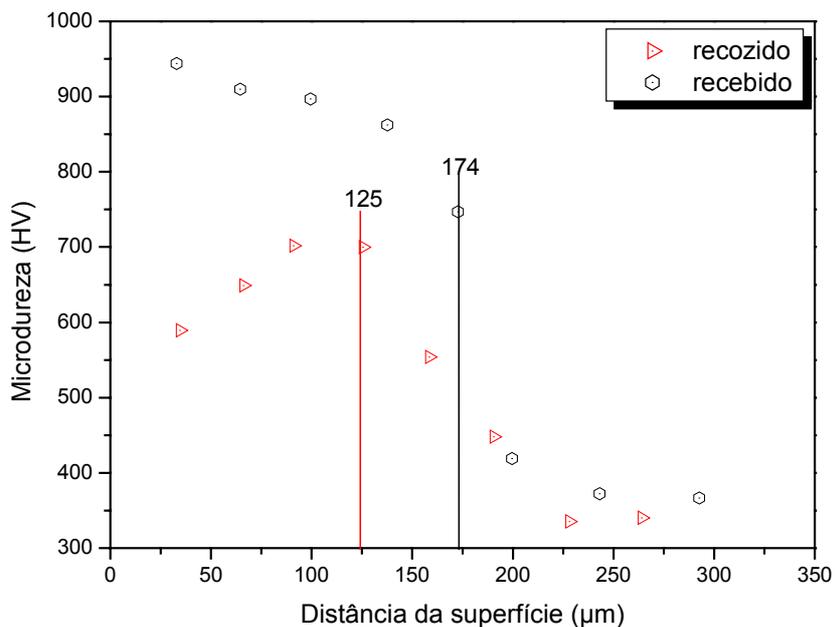


Figura 4.27 - Perfil de microdureza do aço AISI 4340 com substratos diferentes, $v = 10^4$ mm/min.

Na Figura 4.28 são analisados os perfis de microdurezas de dois aços diferentes que se encontram no estado recozido e jateados com o mesmo material, no caso Al_2O_3 , submetidos a velocidade de varredura de $8 \cdot 10^3$ mm/min e com potência de feixe de 500 W. Verificou-se que o aço AISI 1045 apresenta uma profundidade de camada transformada pouco inferior, alcançando valores superiores de dureza em relação ao aço AISI 4340 que atinge uma média de HV 370 enquanto que o primeiro ficou em torno de HV 450.

Através desta comparação procura-se verificar a influência dos elementos de liga sobre a absorção do feixe de laser, pois apesar das amostras possuírem uma estrutura recozida de baixa dureza, a grande quantidade de elementos presentes no aço ligado AISI 4340 pode influenciar no resultado do tratamento a laser.

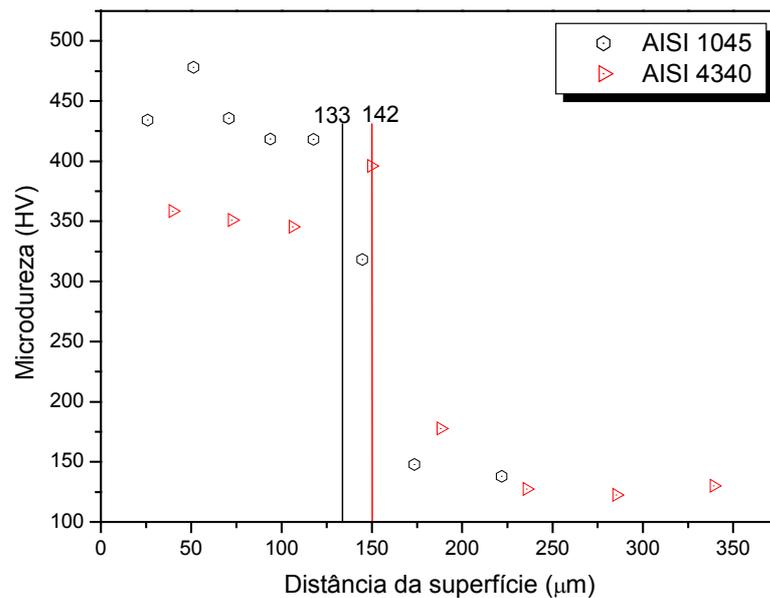


Figura 4.28 – Perfil de dureza dos aços AISI 1045 e AISI 4340 recozidos e jateados com Al_2O_3 e com $v = 8.10^3$ mm/min.

A Figura 4.29 apresenta o perfil de microdureza dos aços AISI 1045 e AISI 4340 para velocidade de 10.10^3 mm/min. O perfil do aço AISI 1045 apresenta valores semelhantes ao do perfil do mesmo material que foi tratado a laser com menor velocidade de varredura e apresentado na Figura 4.28. O aço AISI 4340 mostra uma elevação considerável nos valores de dureza dentro da poça, apresentando uma média aproximada de HV 650. Tendo em vista as profundidades das poças das amostras para ambos os aços apresentam-se com idênticas dimensões, os resultados apresentados mostram que esta diferença de valores de dureza na região da poça só pode ser resultado das diferentes composições químicas dos materiais.

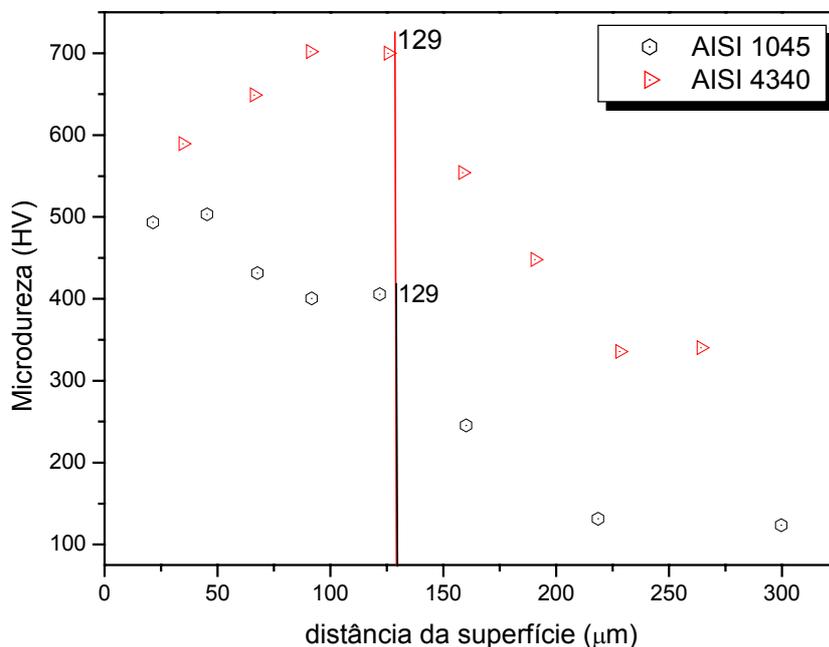


Figura 4.29 – Perfil de dureza para os aços AISI 1045 e AISI 4340 recozidos e jateados com Al_2O_3 e com $v = 10^4$ mm/min.

Considerando os gráficos apresentados que mostram os perfis de dureza obtidos em diversas condições experimentais, constata-se que o resultado final do tratamento a laser é influenciado não só pelos parâmetros operacionais do laser como também e de maneira significativa pelas características químicas pela preparação a que estes materiais são submetidos antes do tratamento propriamente dito.

4.2.4 Análises da primeira etapa

Com base nos resultados obtidos na primeira etapa podemos concluir que situações de alta potência e baixas velocidades de deslocamento do feixe produziram pistas com evaporação e deslocamento do material da parte central, sendo que as situações escolhidas para a etapa seguinte do trabalho foram as seguintes: potência de 500 W, velocidade de varredura do feixe do laser de $8 \cdot 10^3$ mm/min e $10 \cdot 10^3$ mm/min e jateamento com Al_2O_3 .

4.3 Resultados e discussão dos ensaios de trilhas sobrepostas

A segunda fase dos experimentos consistiu no tratamento de amostras com sobreposição de trilhas de 50%, escolhida por garantir uma boa área transformada. A vazão de gás nessas condições foi de 25 m³/min. Os ensaios realizados para aferição dos resultados, foram aqueles atualmente mais usados quando se trata de engenharia de superfície. Procedeu-se à caracterização microestrutural das amostras complementada pelo ensaio de difração de raios X, com o objetivo da identificação das fases presentes. Realizaram-se os ensaios de corrosão tanto pela técnica de extrapolação de Tafel como pela espectroscopia de impedância eletroquímica, finalizando com os ensaios de desgaste pelo ensaio de microabrasão.

4.3.1 Microestruturas Óticas e Eletrônicas

Neste tópico as análises das microestruturas foram realizadas por meio dos microscópios ótico e eletrônico conjunta e complementarmente, obedecendo a uma seqüência de apresentação para fins de caracterização das imagens.

4.3.1.1 Aço AISI 1045

A Figura 4.30.a mostra a sobreposição de trilhas do laser para o aço AISI 1045 recozido e velocidade de 8.10³ mm/min onde pode ser vista a regularidade da sobreposição, porém o ataque pelo nital 3% não revelou adequadamente a estrutura resultante. Uma imagem da Figura 4.30.a ampliada pode ser vista na Figura 4.30.b. A mesma situação de regularidade de sobreposição e observação microestrutural ocorreu para a amostra similar tratada com velocidade do feixe de 10.10³ mm/min conforme Figura 4.31

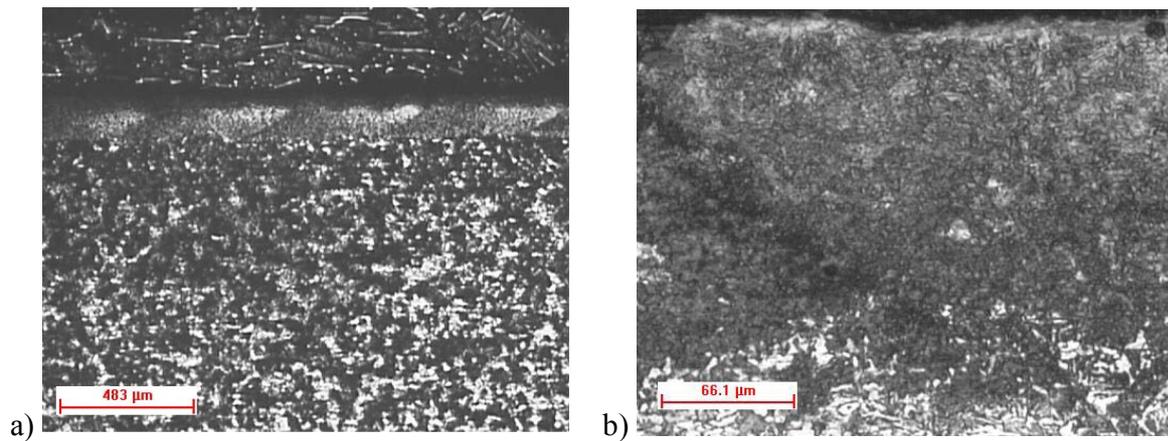


Figura 4.30 – Sobreposição de trilha do aço AISI 1045 recozido para $v = 8 \cdot 10^3$ mm/min e Nital 3% sendo: a) vista geral e b) uma imagem ampliada da poça na sobreposição.

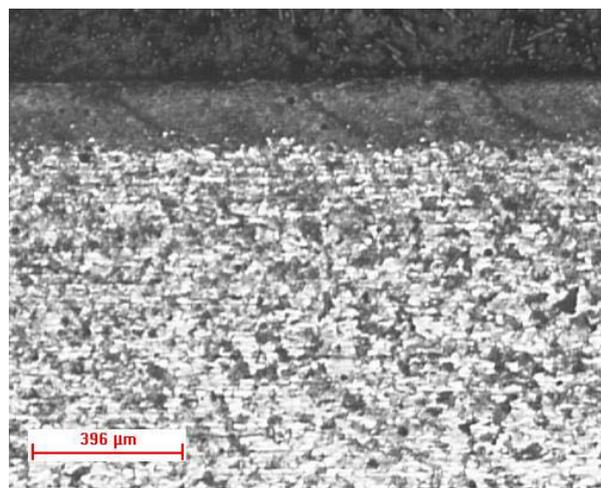


Figura 4.31 – Imagem da trilha sobreposta feita sobre o aço AISI 1045 como recebido e para $v = 10 \cdot 10^3$ mm/min..

Uma melhor definição da microestrutura resultante foi conseguida pelo MEV sobre o corte transversal da amostra é apresentada na Figura 4.32. Em meio a um fundo de estrutura bastante refinada que se contrapõe com a do substrato pode-se observar finos carbonetos e uma propagação de trinca sem definição de sua origem e se resultante ou não do tratamento realizado.

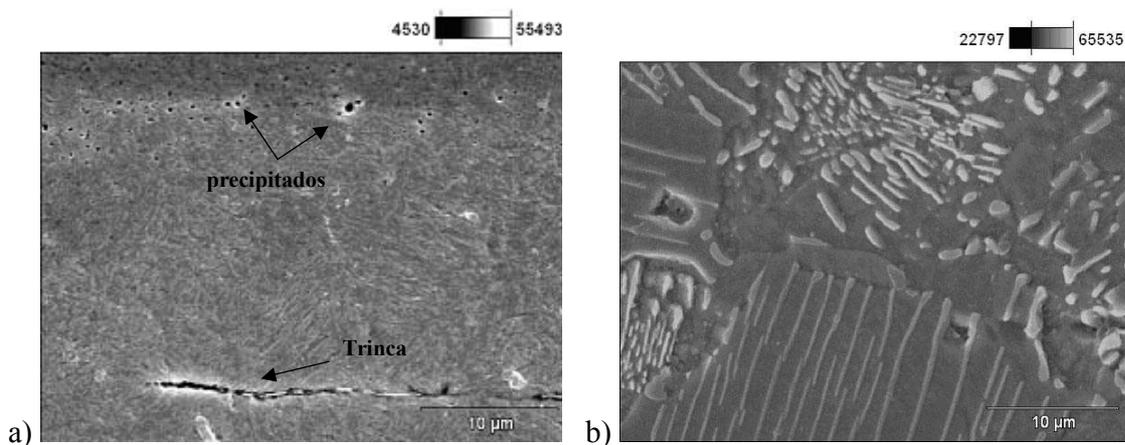


Figura 4.32 – Imagens feitas pelo MEV: a) na trinca e b) no substrato do aço AISI 1045 recozido

Uma Imagem mostrando o corte transversal da sobreposição das trilhas da amostra temperada e tratada a laser do aço AISI 1045 pode ser vista na Figura 4.33. Observa-se que as sobreposições não mantiveram um deslocamento constante, ocorrendo uma variação nas dimensões das larguras das trilhas com efeitos menores sobre a profundidade. Neste caso também houve dificuldade em estabelecer uma definição microestrutural por meio da microscopia ótica

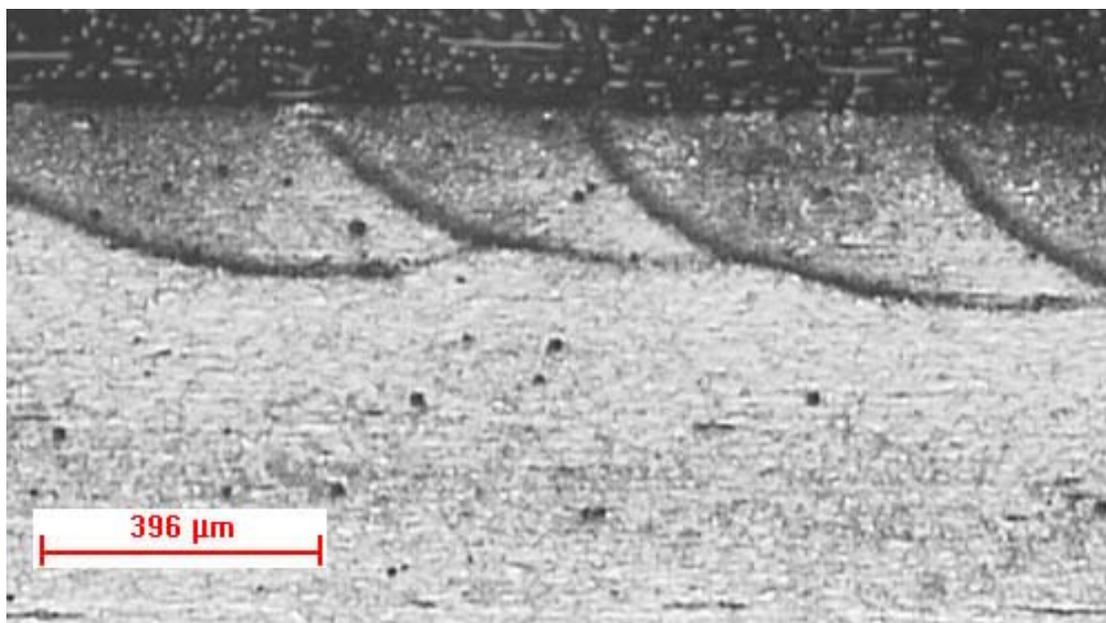


Figura 4.33 – Sobreposição de trinca do aço AISI 1045 modificado a laser após temperado.

A imagem ampliada da zona de transição da trilha do aço AISI 1045 temperado também não foi suficiente para se caracterizar a microestrutura resultante, porém ao revelar a superfície da amostra, na Figura 4.34, conseguimos constatar perfeitamente os passos realizados pela sobreposição.

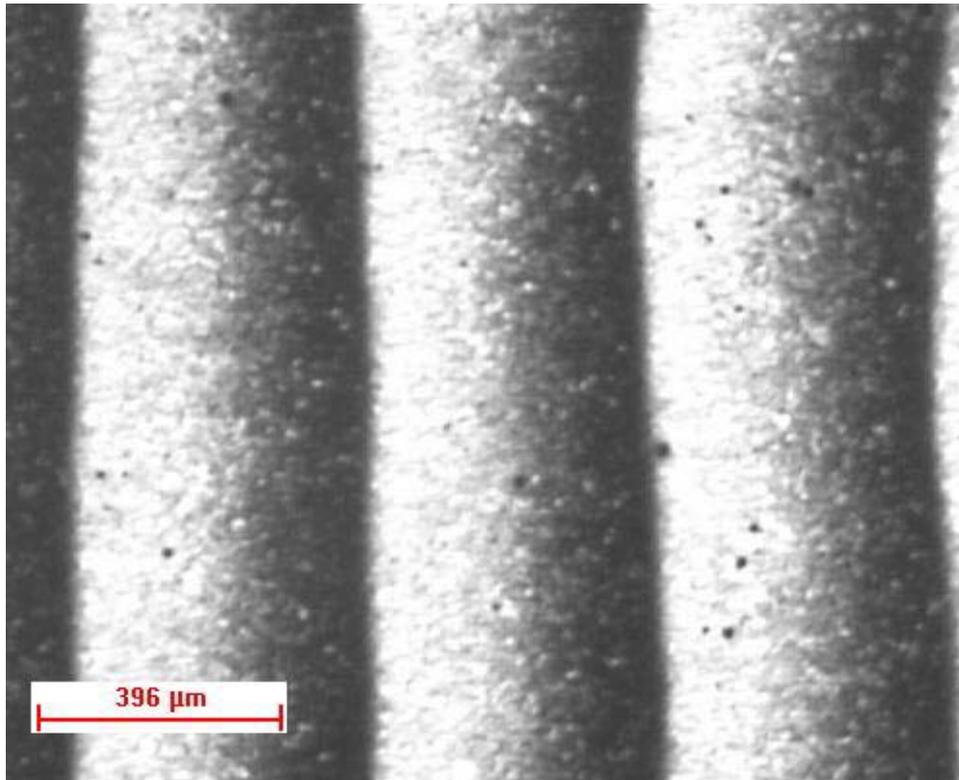
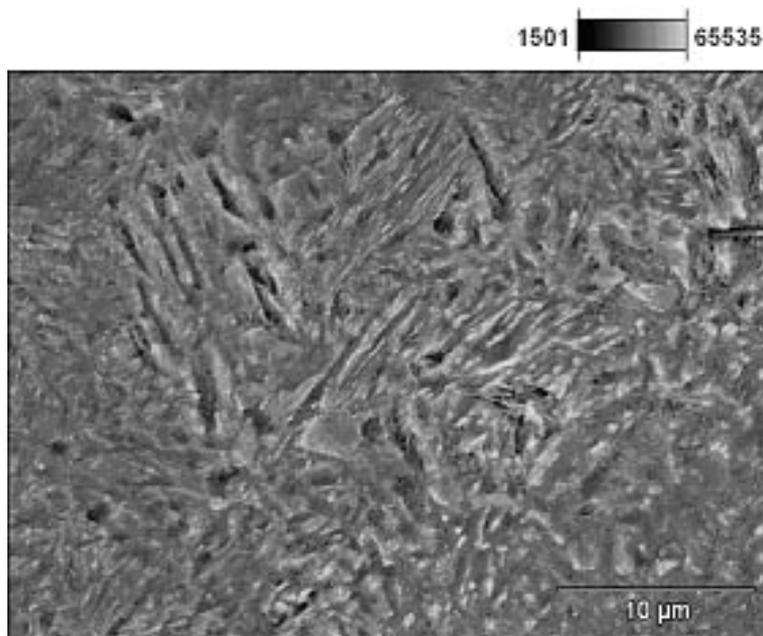
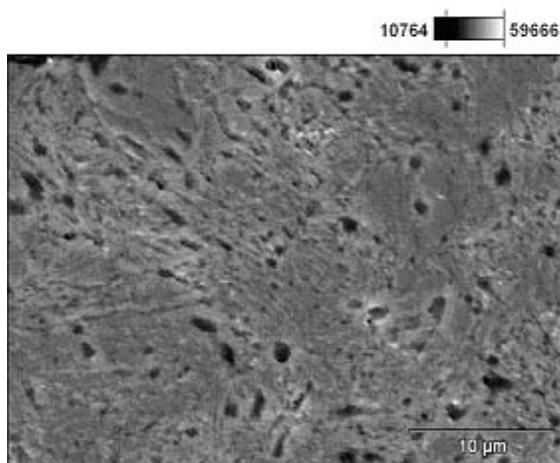


Figura 4.34 – Sobreposição de trilha do aço AISI 1045 pré-tratado por têmpera.

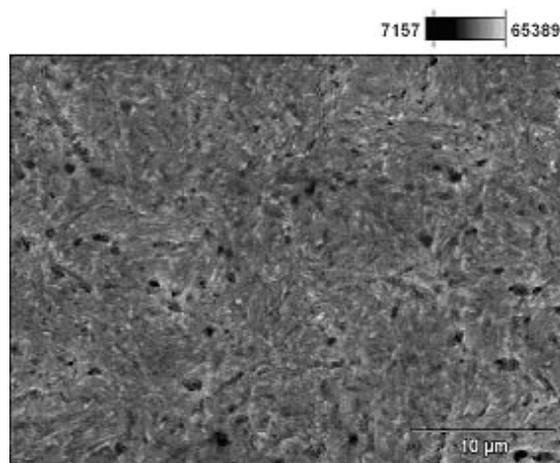
Ao analisarmos as imagens feitas através do MEV da região de sobreposição entre trilha da amostra do aço AISI 1045 temperada e tratada a laser, vistas na Figura 4.35, podemos constatar que a estrutura a estrutura martensítica é mais grosseira que no caso da amostra previamente recozida e tratada a laser. Isto mostra que os efeitos do laser sobre um mesmo material, com mesma composição química, mas com diferentes estruturas de substratos, resultantes dos tratamentos prévios, alteram a interação do feixe incidente do laser com o material, gerando microestruturas distintas.



a) Poça



b)Substrato



c)Transição Poça/Substrato

Figura 4.35 – Imagens de diferentes regiões do aço AISI 1045 pré-temperado e tratado a laser com $v = 8 \cdot 10^3$ mm/min feita pelo MEV sendo: a) poça; b) substrato e c) transição Poça/Substrato.

Uma comparação das imagens feitas pelo MEV, vista na Figura 4.35 “b” e “c”, entre as diferentes regiões do substrato e da trilha, em uma região próxima a zona de transição, permite

diferenciar o refino ocasionado pelo laser sobre a camada transformada a qual alcançou, conforme visto na fase primeira deste trabalho, valores de dureza bastante elevados em relação ao substrato original .

As imagens de microscopia ótica obtidas pelo Neophot da sobreposição das trilhas da amostra do aço AISI 1045 nitretada e tratada a laser, Figura 4.36, não permitiram uma boa definição das sobreposições realizadas, porém pode-se confirmar a regularidade da profundidade pela ação do laser e a dissolução da camada nitretada. Uma melhor resolução foi conseguida através da imagem da superfície.



Figura 4.36 – Sobreposição de trilha do aço AISI 1045 pré-nitretado e tratado a laser com $v = 8.10^3$ mm/min. Ataque com nital 3%.

Na Figura 4.37 apresenta-se a mesma amostra vista da superfície, na qual constata-se: a) a regularidade de deslocamento de varredura do feixe e, b) o refino microestrutural e a homogeneização ocorrida na zona nitretada feita pelo tratamento a laser. Não foram constatadas trincas e sim muitas precipitações de nitretos e carbonetos, confirmadas através dos difratogramas.

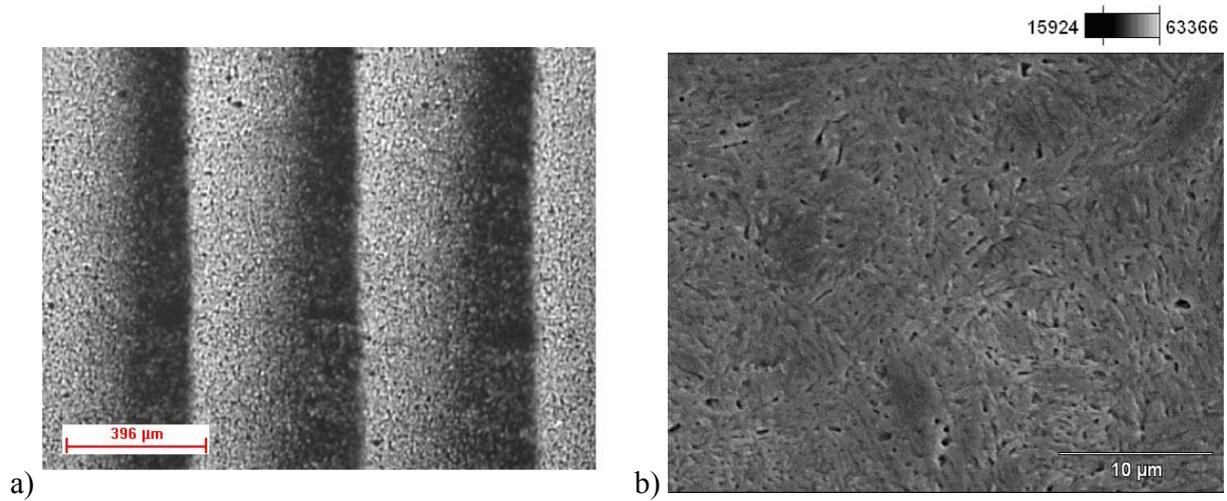


Figura 4.37 – Imagens feitas pelo MEV do aço AISI 1045 nitretado e tratado com $v = 10 \cdot 10^3$ mm/min sendo: a) superfície da amostra e b) região da poça. Ataque com Vilela.

Uma imagem ampliada da Figura 4.37b pode ser melhor visualizada na Figura 4.38 onde observa-se com mais evidência as precipitações ocorridas após o tratamento por laser.

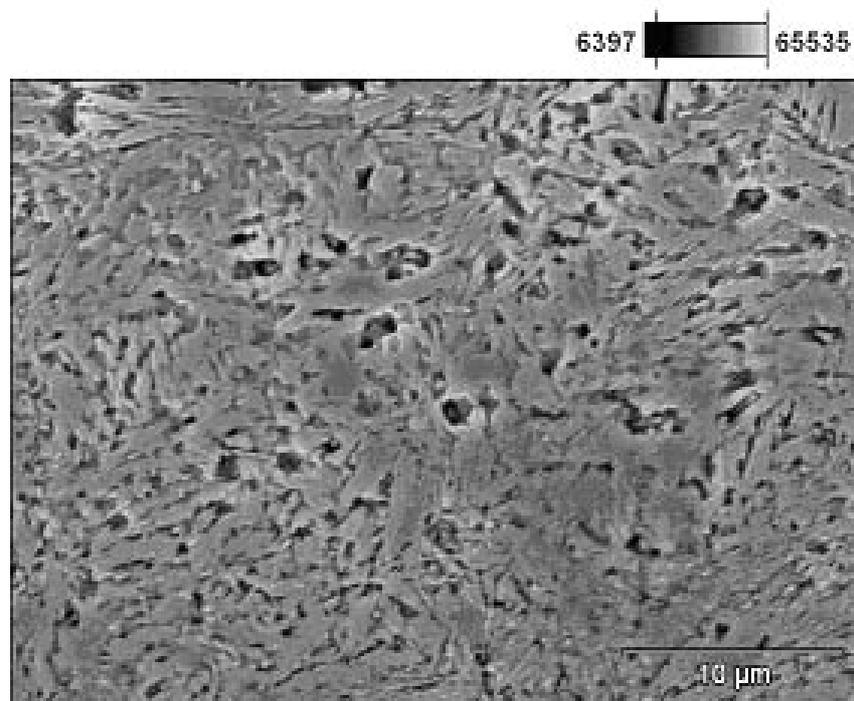


Figura 4.38 – Imagem ampliada da trilha do aço AISI 1045 nitretado e tratado a laser.

4.3.1.2 Aço AISI 4340

A Figura 4.39 mostra a sobreposição de trilhas do laser para o aço AISI 4340 recozido e tratado a laser, onde pode ser vista com boa definição a regularidade do processo de sobreposição e a profundidade da camada tratada. Uma pequena zona de transição se formou entre a poça e o substrato da peça. Esta característica da regularidade da zona tratada é uma das qualidades operacionais do laser nos tratamentos superficiais.

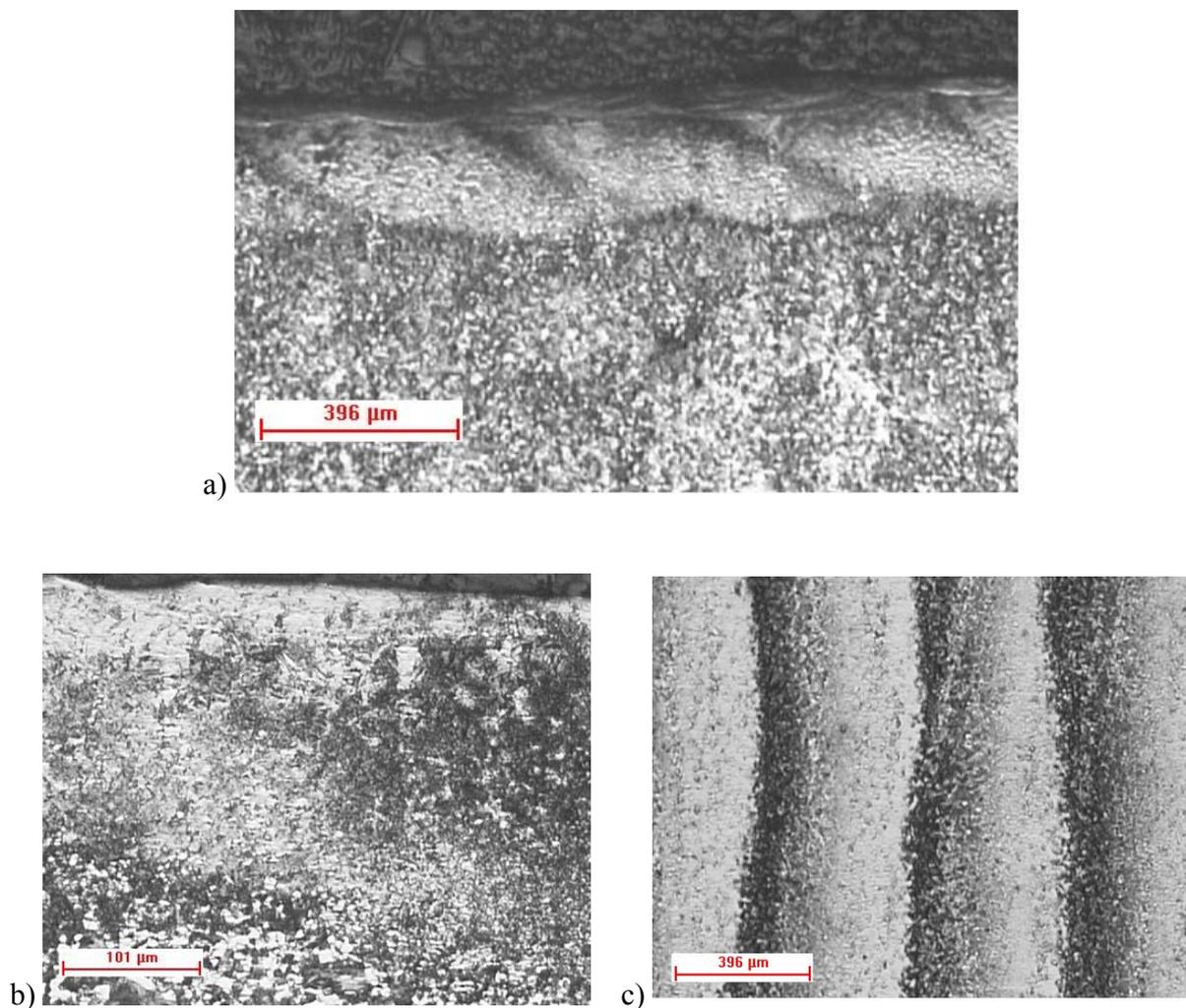


Figura 4.39 – Sobreposição de trilha do aço AISI 4340 pré-recozido e tratado a laser com $v = 8 \cdot 10^3$ mm/min sendo: a) Trilhas sobrepostas; b) Imagem ampliada da zona de transição; c) Superfície da amostra tratada, vista na Figura 4.39.a. Ataque com nital 3%.

Uma imagem obtida por MEV da mesma zona de transição, porém no interior da poça, mostrada na Figura 4.40a, permite visualizar uma estrutura acicular. Esta estrutura não ficou homogênea microestruturalmente. As imagens apresentadas nas Figura 4.40 b e c mostram uma comparação a partir de imagens feitas pelo MEV das regiões: b) do substrato e c) da superfície da mesma amostra onde o refino microestrutural pode ser melhor avaliado.

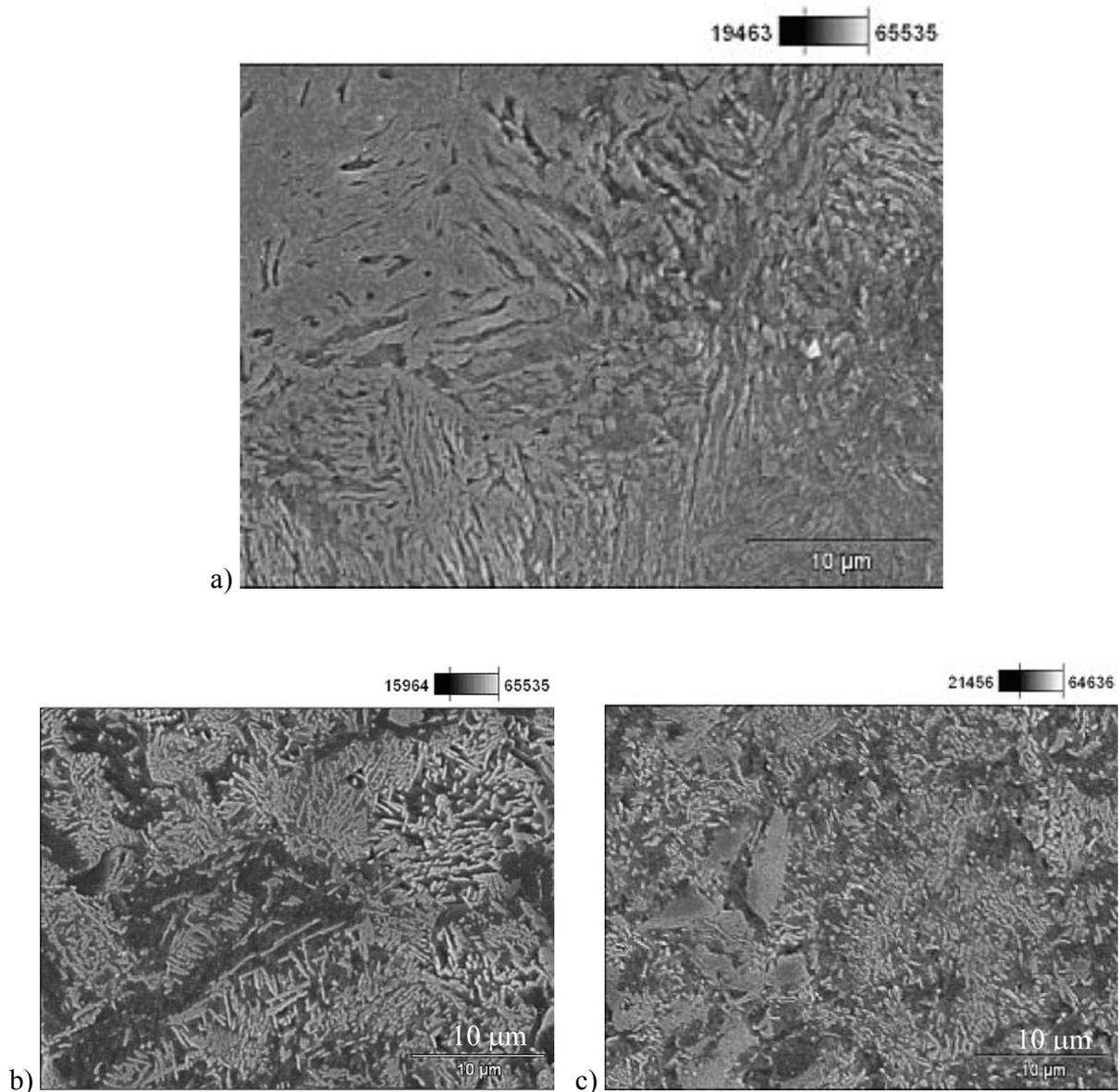


Figura 4.40 – Imagem feita pelo MEV da trilha do aço AISI 4340 pré-recozido e tratado a laser sendo a) região da poça; b) substrato ; c) superfície

Para o aço AISI 4340 como recebido e tratado a laser, a camada tratada é apresentada na Figura 4.41, sendo que na Figura 4.41.a observa-se a sobreposição de trilhas e regularidade na profundidade e cobertura de trilhas. Verifica-se também a transformação ocorrida na microestrutura do substrato após a passagem do laser com o refino da microestrutura acicular e a pequena zona de transição formada. Pode-se observar nas Figuras 4.41 b e c, a zona de transição entre a poça e o substrato e a microestrutura da superfície.

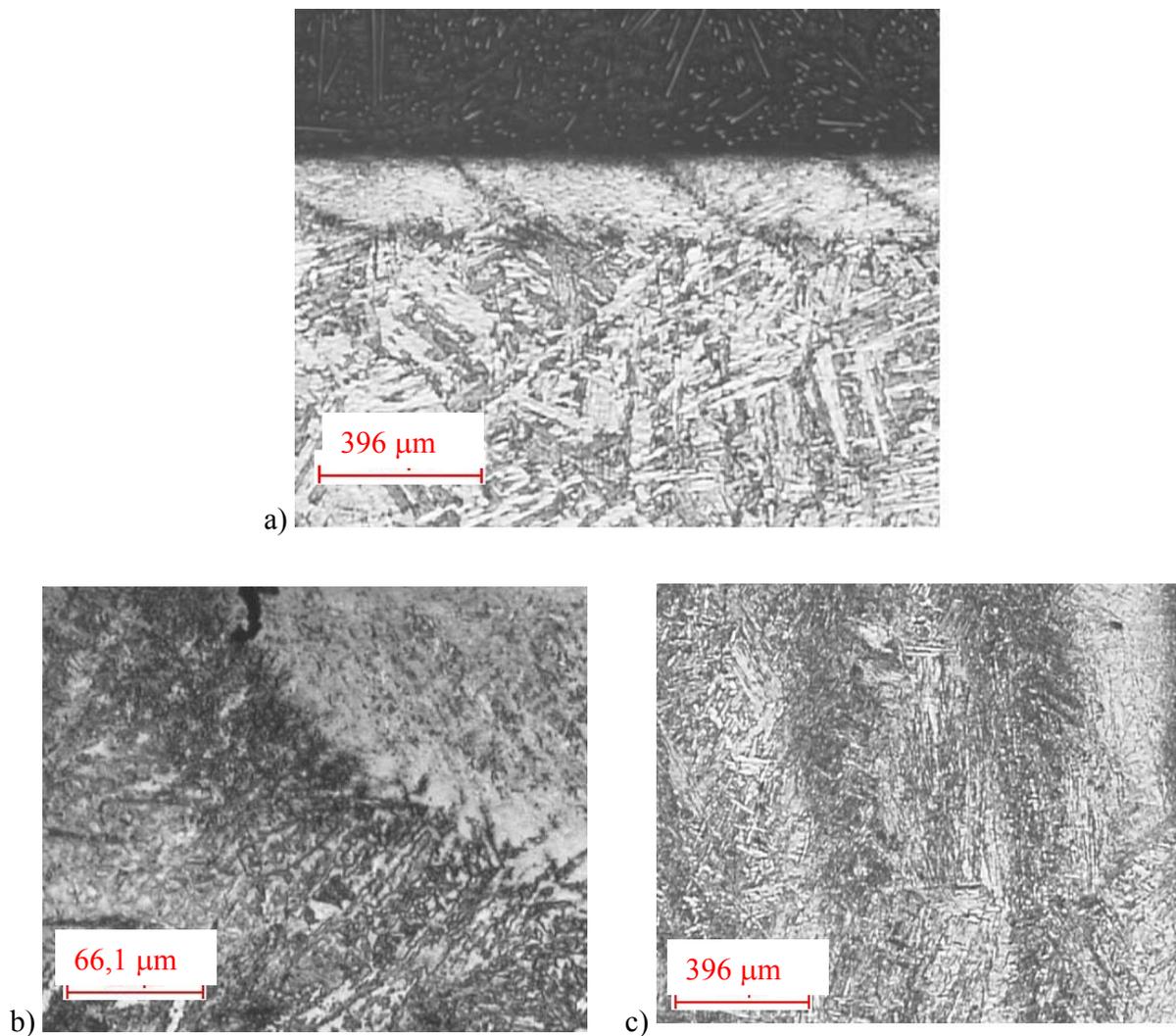


Figura 4.41 – Sobreposição de trilha do aço AISI 4340 como recebido e tratado a laser com $v = 8 \cdot 10^3$ mm/min: a) Sobreposição das trilhas; b) transição; c) superfície. Ataque com nital 3%.

Na imagem, mostrada na Figura 4.42.a, pode-se observar a estrutura martensítica bastante refinada do material sendo visualizada na imagem feita através de microscopia eletrônica que identifica a região da poça formando estrutura acicular o que resultou em uma alta dureza. As imagens feitas por MEV da superfície da amostra e mostradas nas Figuras 4.42.b e c, são caracterizadas como uma estrutura dendrítica e indica que a camada mais superficial sofreu uma refusão.

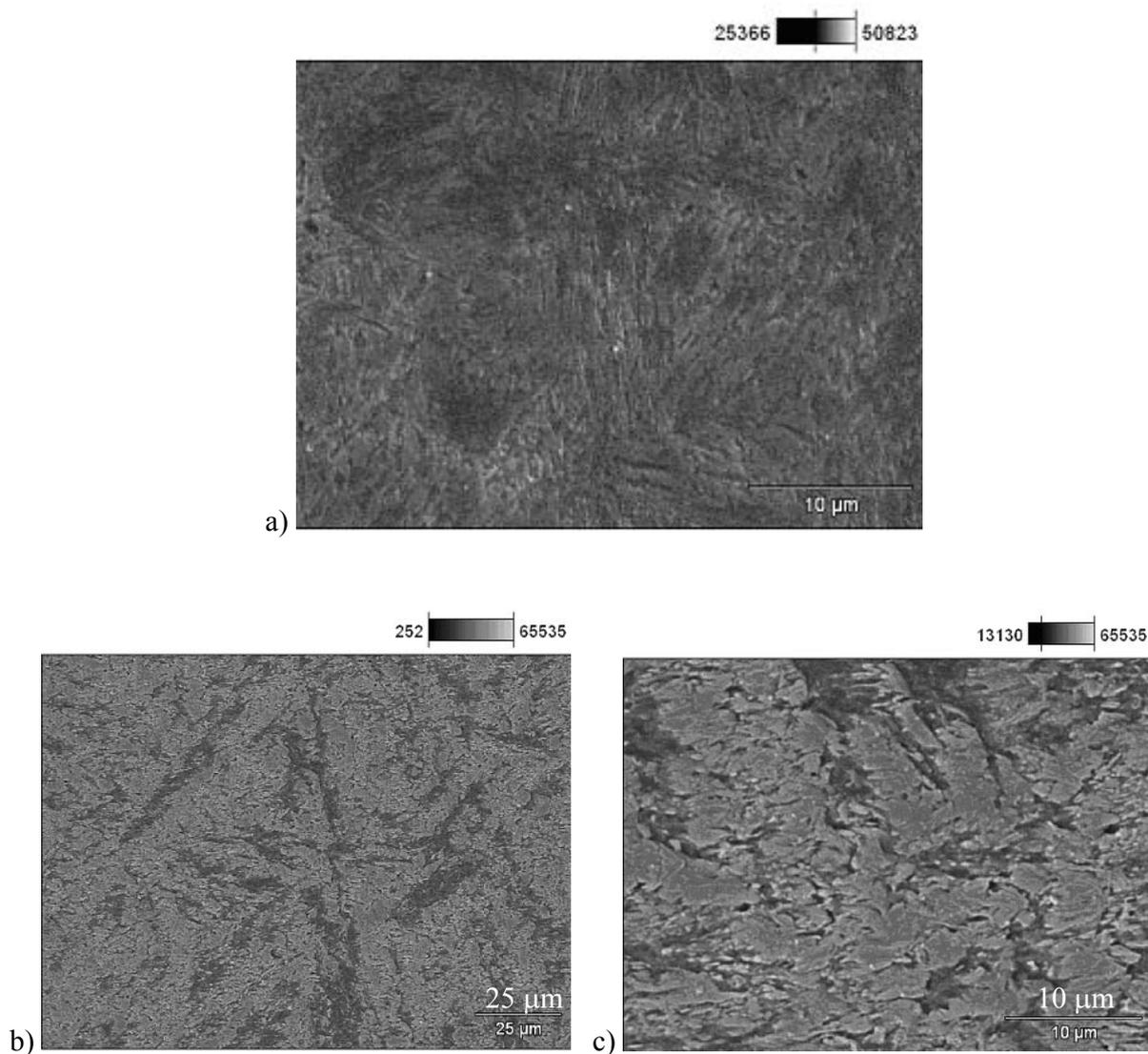


Figura 4.42 Imagem da trilha do aço AISI 4340 como recebida feita pelo MEV sendo: a) região da poça do laser; b) superfície do aço AISI 4340 como recebido com c) uma ampliação de “a”.

A amostra do aço AISI 4340 nitretado e tratado a laser para uma velocidade do feixe de $8 \cdot 10^3$ mm/min é vista na Figura 4.43, realizada por microscopia ótica após um breve ataque com reativo de nital 3%. Nela pode-se observar que a camada transformada apresenta-se com uma profundidade constante, porém não foi possível observar a sobreposição de trilhas com esta magnitude. A transformação da microestrutura ocorreu em toda a camada nitretada o que a diferenciou significativamente daquela vista no substrato, porém apresentando-se bem mais grosseira que as outras amostras do mesmo material e que já foram apresentadas.

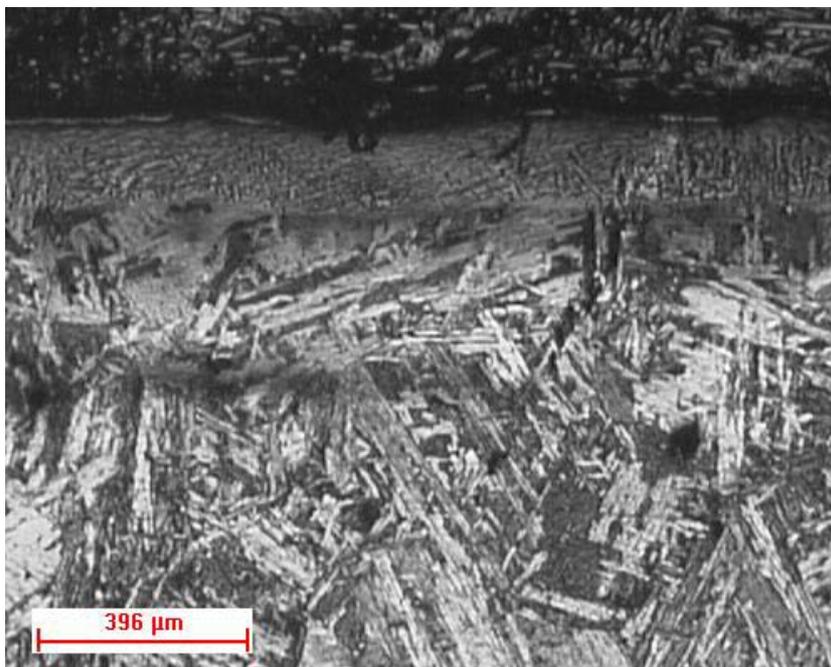


Figura 4.43 - Sobreposição de trilha do aço AISI 4340 nitretado e tratado a laser com $v = 8 \cdot 10^3$ mm/min. Ataque com nital 3%.

A Figura 4.44.a, ampliada a partir da Figura 4.43, mostra a trilha e a diferença de microestrutura entre a zona transformada e o substrato. Pode-se ver que praticamente não existiu uma zona de transição no material. Na mesma Figura, porém na imagem b pode ser vista a microestrutura da superfície da amostra tratada com velocidade do feixe de $10 \cdot 10^3$ mm/min em que se constata uma estrutura martensítica mais refinada que a estrutura bainítica presente no substrato, conferindo à amostra uma dureza elevada.

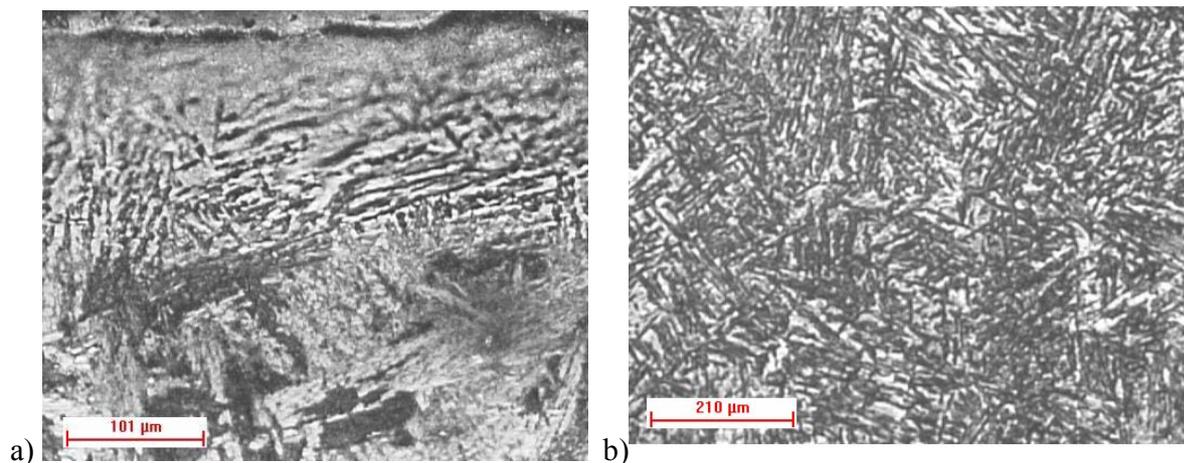


Figura 4.44 – Detalhes da Figura 4.43 sendo: a) região da trilha do aço AISI 4340 e b) superfície da mesma amostra.

Concluindo esta etapa da pesquisa, na Figura 4.45 pode-se ver a imagem obtida por MEV da amostra do aço AISI 4340 nitretado e tratado com velocidade do feixe do laser de $8 \cdot 10^3$ mm/min na qual a microestrutura martensítica da trilha pode ser melhor observada. Algumas regiões da amostra nitretada e tratada a laser também são vistas no material na região inferior da imagem.

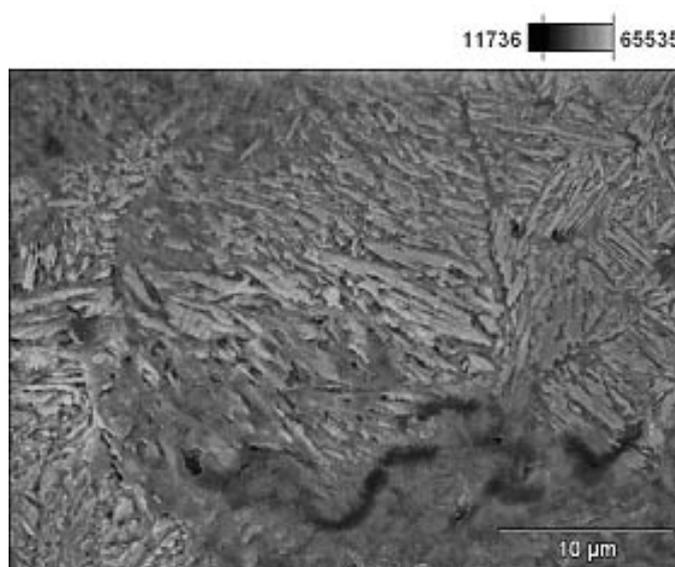


Figura 4.45 – Imagem feita pelo MEV da região da trilha do aço AISI 4340 nitretado e tratado a laser com $v = 8 \cdot 10^3$ mm/min.

4.3.2 Difração de Raios X

Os ensaios de Difração do Raio X revelaram-se importantes para explicar a formação das camadas superficiais. O alcance da penetração dos raios X sendo de apenas poucos microns não diz muito sobre a região da camada transformada acima de 50 μm , mas ao determinar o tipo de estrutura formada na região mais superficial, ela permite estudar os efeitos e resultados oriundos da absorção do laser.

A análise realizada com ajuda do software Match em conjunto com a análise química que precedeu aos ensaios com laser permitiu a identificação das fases presentes. O auxílio deste programa é fundamental, principalmente quando o resultado dos ensaios indica mais de uma fase presente na camada transformada.

4.3.2.1 Aço AISI 1045

Tendo em vista a análise comparativa entre amostras, todas através da intensidade relativa, iniciou-se o estudo do difratograma pela amostra como recebida do aço AISI 1045 cuja micrografia, vista no Capítulo 3, mostrou encontrar-se recozida. Após comparação pelo software, o perfil foi compatível com o do ferro α . O diagrama foi plotado na Figura 4.46 com os planos de difração identificados no mesmo.

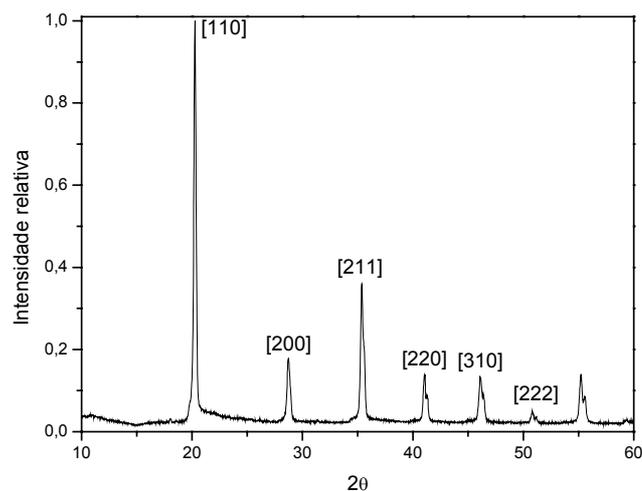


Figura 4.46 – Difratograma do aço AISI 1045 como recebido e não tratado a laser.

Para o aço AISI 1045 somente pré-temperado, o difratograma está apresentado na Figura 4.47 e o perfil resultante é compatível com martensita.

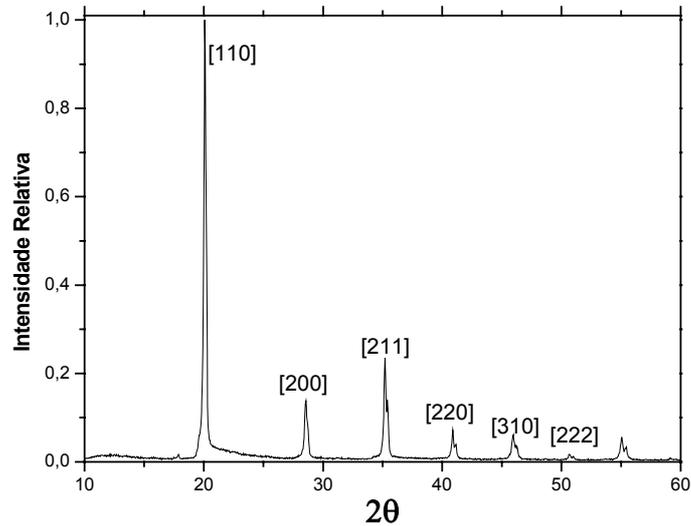


Figura 4.47 – Difratograma do aço AISI 1045 pré-temperado e não tratado a laser.

Na Figura 4.48 colocamos lado a lado os mesmos difratogramas vistos nas Figuras 4.46 e 4.47 gerados pelo Match, tendo em vista demonstrar a análise através do programa.

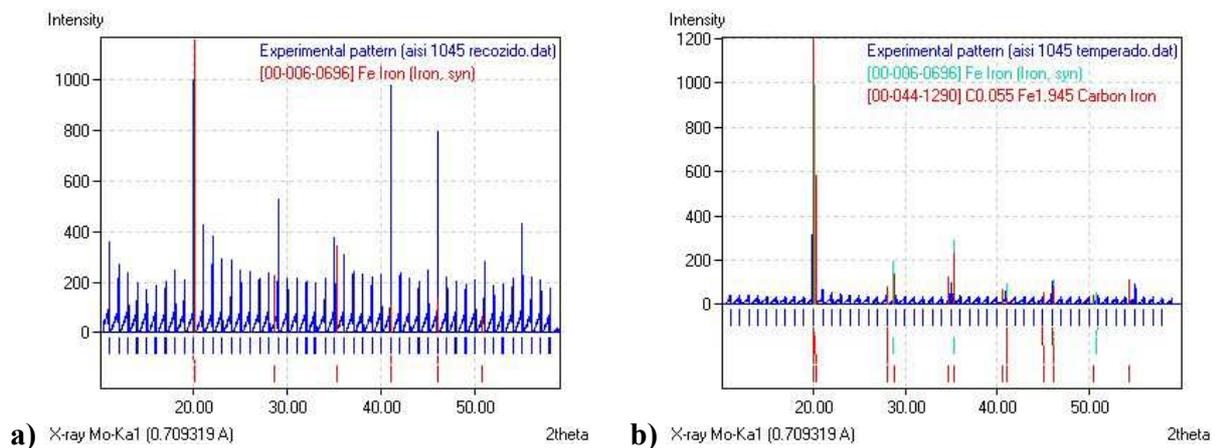


Figura 4.48 – Difratogramas gerados pelo programa Match para o aço AISI 1045: a) pré-recozido; b) pré-temperado.

Na Figura 4.49 está plotado o perfil do difratograma da amostra pré-nitretada sem uso de laser. Pode-se observar uma diferença significativa em relação à situação mostrada na Figura 4.46. Além dos picos principais, os outros picos presentes estão identificados no difratograma.

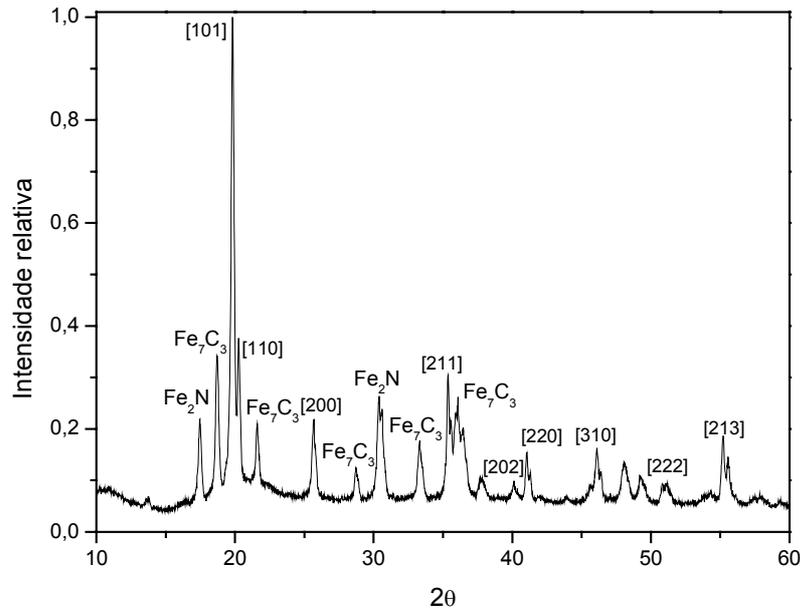


Figura 4.49 - Difratograma do aço AISI 1045 pré-nitretado e não tratado a laser.

As entradas que mostraram mais afinidade com o perfil do aço AISI 1045 pré-nitretado foram: a correspondente a martensita, a do carbeto de ferro Fe_7C_3 e a correspondente ao nitreto de ferro Fe_2N .

A Figura 4.50 apresenta o difratograma do aço AISI 1045 como recebido, isto é, recozido e tratado a laser com potência de 500 W, velocidade de varredura do feixe de $8 \cdot 10^3$ mm/min e jateado com Al_2O_3 . Comparando com os resultados da Figura 4.46 do mesmo material, porém antes do tratamento a laser, pode-se observar como principais diferenças o deslocamento do pico principal para um menor valor do ângulo de difração e o aparecimento de picos menores que antecedem o pico principal.

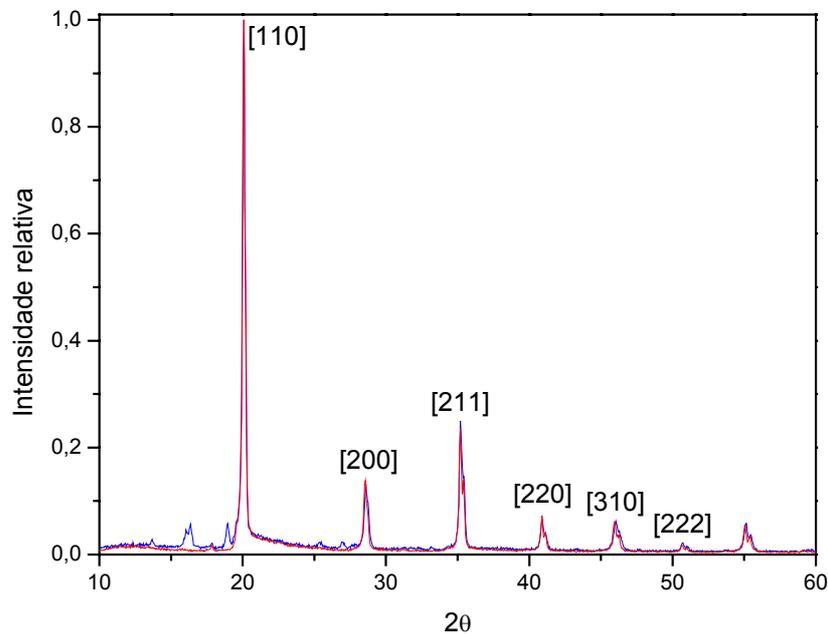


Figura 4.50 – Difratoograma do aço AISI 1045 recozido, sem e com tratamento superficial a laser com velocidade do feixe de $8 \cdot 10^3$ mm/min.

A análise pelo programa permitiu as seguintes conclusões sobre estas modificações: uma forte presença de ferrita na matriz com uma baixa transformação martensítica, pois o perfil encontrado para a ferrita apresentou-se como tendo mais afinidade que o perfil da martensita, o que já se esperava pela baixa dureza alcançada pela trilha. Os picos adicionais mostram a formação de carbonatos sendo que a análise pelo software revela a presença de FeCO_3 .

O difratograma oriundo do ensaio do aço AISI 1045, temperado e tratado a laser, está plotado na Figura 4.51. Comparando este com o difratograma visto na Figura 4.47 observa-se o surgimento de alguns picos com 2θ entre 15° a 20° . A análise pelo Match mostrou a martensita como a que melhor representa os picos principais. Já no caso dos picos adicionais, estes são mais compatíveis com FeCO_3 .

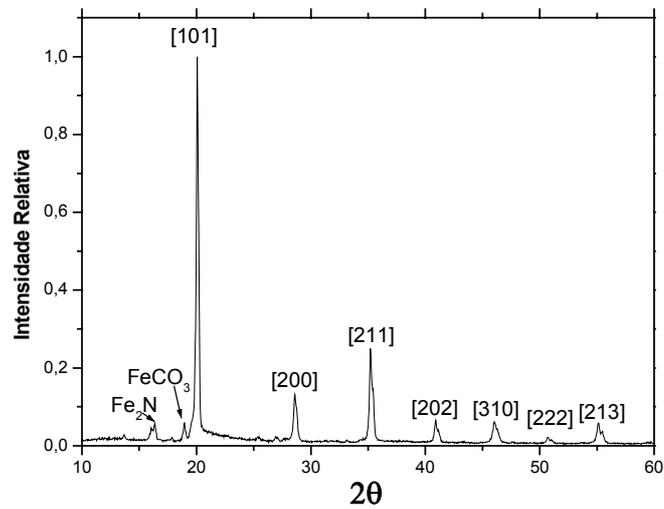


Figura 4.51 - Difratoograma do aço AISI 1045 temperado e tratado superficialmente a laser com velocidade do feixe de $8 \cdot 10^3$ mm/min.

O difratograma referente à amostra aço AISI 1045 nitretada e tratada a laser esta plotado no diagrama Figura 4.52.

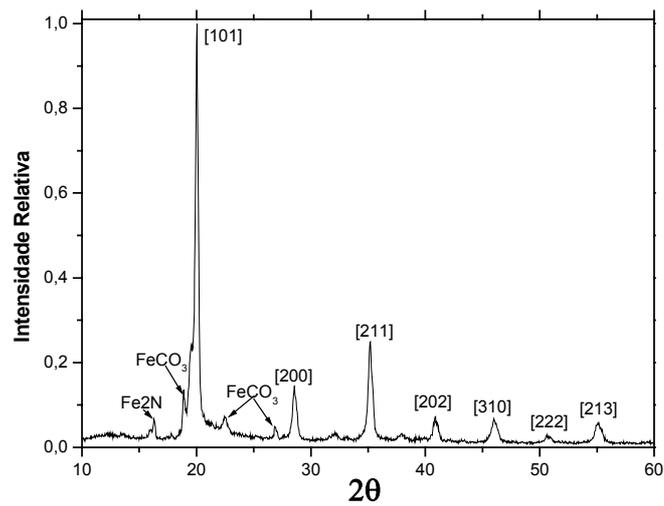


Figura 4.52 - Difratoograma do aço AISI 1045 nitretado e tratado a laser com $v = 8 \cdot 10^3$ mm/min.

A partir do difratograma plotado pode ser feita a seguinte observação: As entradas que melhor se adequaram ao perfil acima foram aquelas significando a presença dos picos de martensita e do FeNO que se sobrepõe a alguns picos já definidos.

4.3.2.2 Aço AISI 4340

O estudo do difratograma do aço AISI 4340 com a amostra do material como recebido é visto na Figura 4.53. A análise pelo software mostrou uma estrutura martensítica e a presença pouco acentuada de carbonetos diversos. As entradas que melhor se adequaram a esta análise foram as da martensita, porém não totalmente coincidente no pico máximo, do FeCO_3 , do Fe_3C e do FeN.

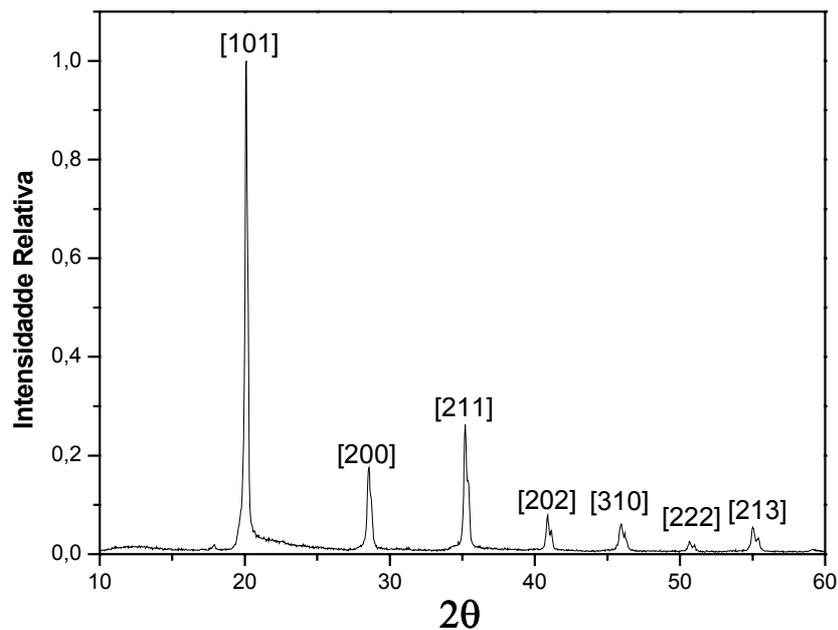


Figura 4.53 - Difratograma do aço AISI 4340 como recebido.

O difratograma do aço AISI 4340 pré-recozido apresentado na Figura 4.54, mostrou um excelente ajuste para a ferrita e para o Fe_3C . Este resultado tem correspondência com a microestrutura revelada e mostrada no Capítulo 3 para este material.

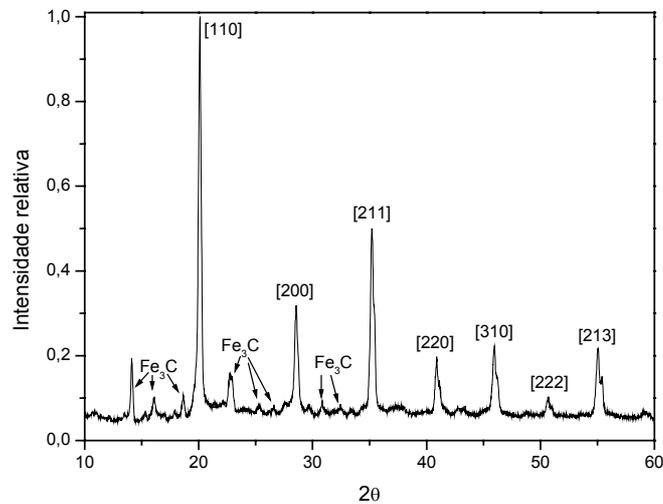


Figura 4.54 – Difratoograma do aço AISI 4340 recozido.

O último difratograma da fase de pré-tratamento do aço AISI 4340 corresponde à amostra apenas nitretada e é visto na Figura 4.55. A análise pelo programa acusou como melhores entradas para o perfil apresentado aquelas correspondentes ao nitreto Fe₂N e ao carboneto Fe₃C. O deslocamento do pico principal para a esquerda evidencia uma estrutura martensítica, porém o programa não encontrou uma melhor comparação dentro dos dados disponíveis.

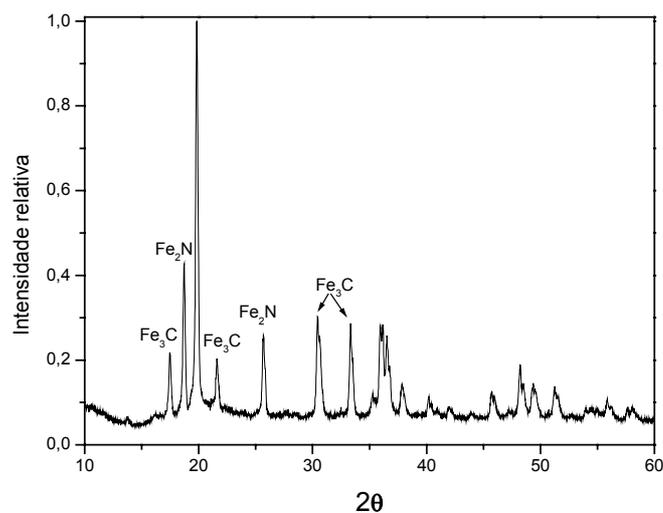


Figura 4.55 – Difratoograma do aço AISI 4340 nitretado.

.Na Figura 4.56 pode-se fazer uma comparação entre: a) as amostras como recebida e nitretada e b) as amostras como recebida e recozida vendo-se o deslocamento dos picos principais para a esquerda e o aparecimento de novos picos.

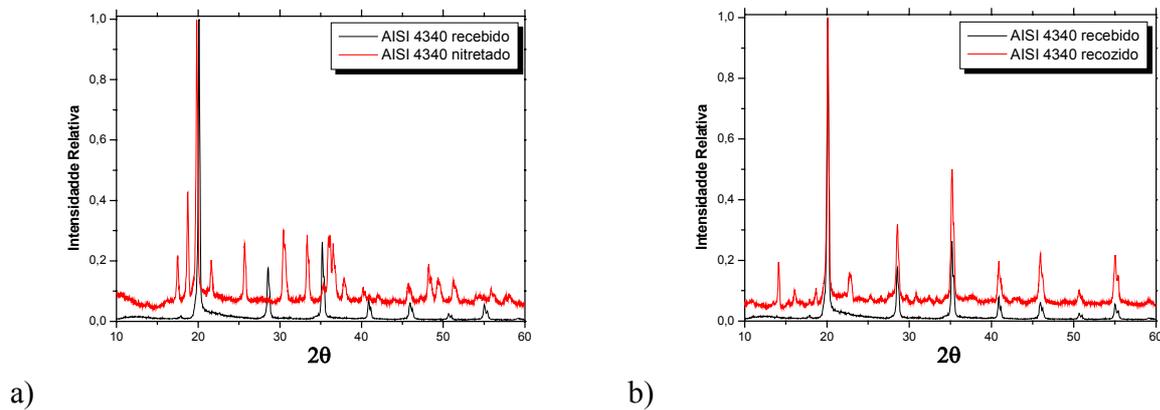


Figura 4.56 – Comparação dos difratogramas do aço AISI 4340 não tratados a laser sendo: a) recebido e nitretado; b) recebido e recozido.

A principal diferença entre o difratograma da amostra do aço AISI 4340 apenas como recebida daquela que foi tratada a laser são os picos de carbonetos que aparecem antes e depois do pico principal, na Figura 4.57.

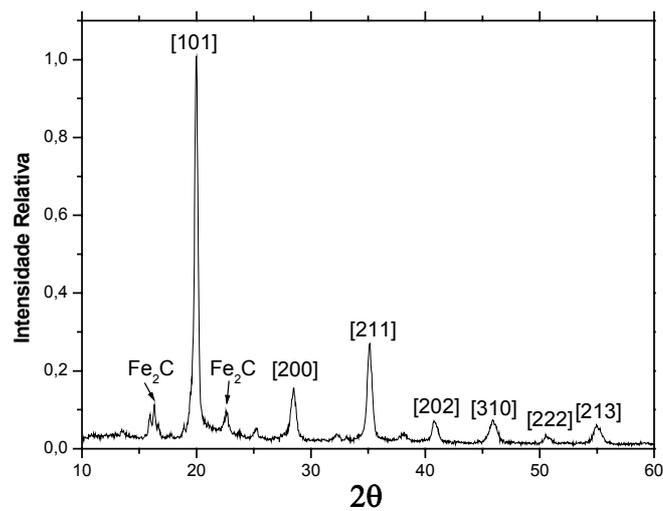


Figura 4.57 – Difratograma do aço AISI 4340 como recebida e tratado a laser, $v = 8 \cdot 10^3$ mm/min.

Eles evidenciam que o laser produz efeitos sobre a superfície homogênea da amostra não tratada, com o aparecimento de carbonetos no material. O pico principal apresenta um leve deslocamento para a esquerda evidenciando seu caráter martensítico.

O difratograma do aço AISI 4340 pré-recozido e tratado a laser, apresentado na Figura 4.58, mostra que a superfície já modificada pelo tratamento térmico anterior e que já havia sofrido alterações com o aparecimento de carbonetos, novamente sofreu modificações, porém apenas no reposicionamento e principalmente na intensidade dos picos destes carbonetos já que os picos principais mantiveram-se aproximadamente com mesmo ângulo de fase e variação apenas nas intensidades. Esta baixa modificação na amostra tratada foi mostrada antecipadamente no ensaio do perfil de dureza que apresentou pouca alteração em relação a amostra só recozida indicando que o tratamento a laser não produziu alterações significativas para a situação em questão.

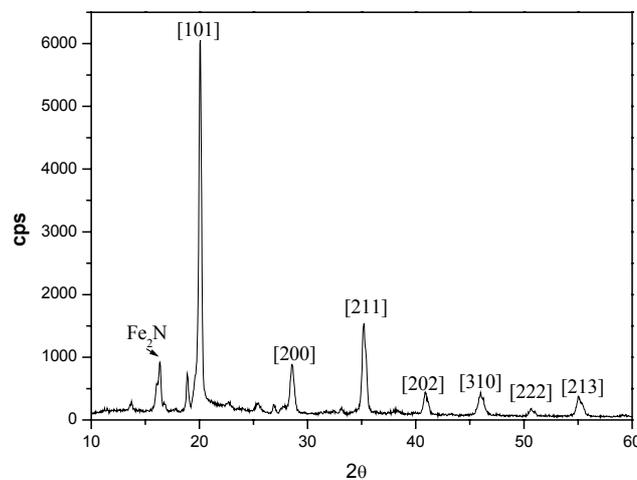


Figura 4.58 - Difratograma do aço AISI 4340 pré-recozido e tratado a laser, $v = 8.10^3$ mm/min.

Isto mostra que o substrato com mesma composição química, mas com diferentes microestruturas tem uma grande influência nos resultados finais do tratamento a laser, pois diferentes microestruturas apresentam diferentes características de absorção de energia depositada durante o tratamento a laser.

Na Figura 4.59 faz-se uma comparação entre os difratogramas do aço AISI 4340 sendo a) recozido antes e depois do tratamento a laser e b) recebido antes e depois do tratamento a laser, No caso “a”, a intensidade da difração sofreu alterações porém os picos permaneceram em igual ângulo de difração. A análise pelo Match também evidencia a presença de FeNi na superfície do material pois é o que mais se aproxima do pico principal do difratograma. O Fe₃C é o que melhor se adequou aos picos secundários do material, principalmente aqueles próximos ao pico principal.

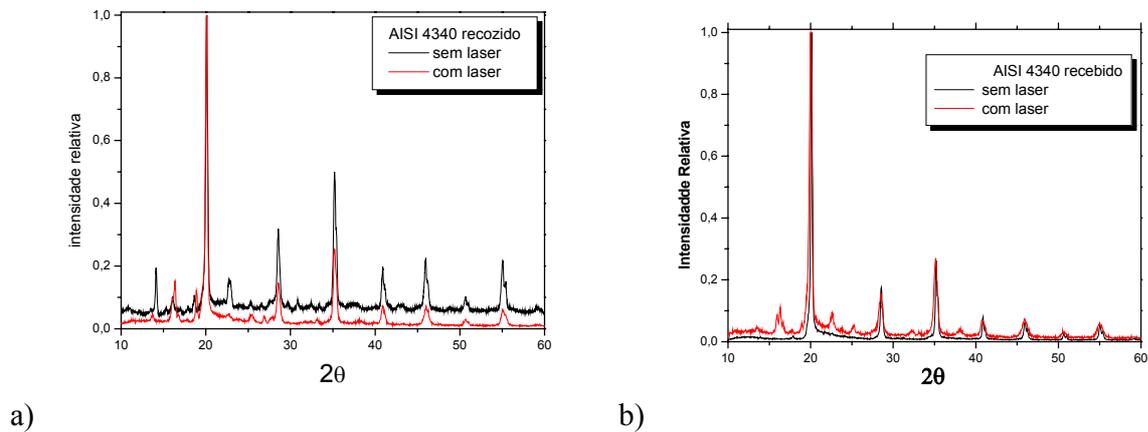


Figura 4.59 – Difratogramas comparativos do aço AISI 4340 com a) pré-recozido antes e depois de tratado a laser e b) recebido antes e depois de tratado a laser.

O difratograma mostrado na Figura 4.60 foi obtido da amostra do aço AISI 4340 nitretada e tratada a laser com velocidade de varredura do feixe $8 \cdot 10^3$ mm/min, potência de 500 W e jateada com Al₂O₃. Ele apresenta-se modificado quando comparado com o do aço AISI 4340 apenas nitretado, pois aqueles picos que aparecem após o processo de nitretação feito na preparação das amostras, desaparecem quase todos após o tratamento a laser o que evidencia que este tratamento teve um efeito homogeneizador sobre a superfície, promovendo a dissolução parcial dos carbonetos. Apenas os nitretos ainda continuam mostrando uma maior presença. Os picos apresentados são compatíveis com Fe₂N, a Fe e do FeC.

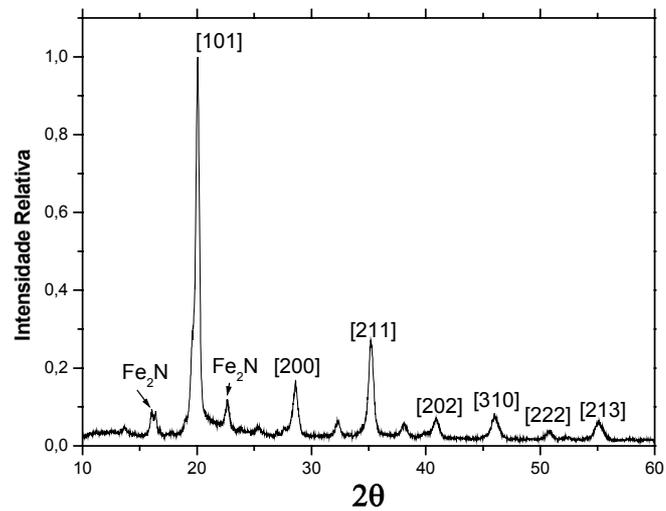


Figura 4.60 - Difratoograma do aço AISI 4340 nitretado e tratado a laser com velocidade de varredura do laser de $8 \cdot 10^3$ mm/min.

Para observar-se com maiores detalhes as diferenças entre os difratogramas antes e depois do tratamento a laser do aço AISI 4340 os mesmos são apresentados sobrepostos na Figura 4.61. Os picos do tratamento anterior, identificados como carbonetos de ferro desaparecem e os de nitretos mostrados na Figura 4.61. se evidenciam.

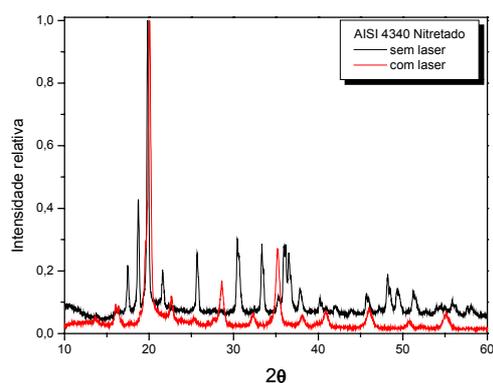


Figura 4.61 – Comparação entre os difratogramas do aço AISI 4340 apenas nitretado com o posteriormente tratado a laser e velocidade de varredura do feixe de $8 \cdot 10^3$ mm/min.

4.3.3 Resultado dos ensaios de corrosão

Realizou-se por meio dos ensaios de corrosão uma análise qualitativa dos resultados apresentados tanto pelo ensaio da extrapolação de Tafel como pelo ensaio de espectroscopia de impedância eletroquímica pelos gráficos de Bode, buscando, correlacioná-los e demonstrar a evolução ocorrida nos materiais. Procedeu-se, antes da realização dos ensaios, às medidas dos potenciais de circuito aberto para todas as amostras, e os resultados estão apresentados nas Tabelas 4.7 e 4.8. A medição do potencial de circuito aberto foi tomada após a estabilização do circuito montado, com um tempo nunca inferior a 12 minutos de descanso.

Tabela 4.7 – Potencial de circuito aberto das amostras do aço AISI 1045.

Tratamento	Pré-tratamento		
	Recozido	Temperado	Nitretado
Sem laser	-0,650 V	-0,650 V	-0,573 V
8.10 ³ mm/min	-0,580 V	-0,574 V	-0,630 V
10.10 ³ mm/min	-0,570 V	-0,598 V	-0,635 V

Tabela 4.8 – Potencial de circuito aberto das amostras do aço AISI 4340

Tratamento	Pré-tratamento		
	Recozido	Recebido	Nitretado
Sem laser	-0,625 V	-0,620 V	-0,250 V
8.10 ³ mm/min	-0,525 V	-0,541 V	-0,510 V
10.10 ³ mm/min	-0,554 V	-0,560 V	-0,490 V

Nas amostras tratadas a laser e não nitretadas ocorreu uma tendência de elevação dos valores de potencial de circuito aberto, tanto para o aço AISI 1045 quanto para o aço AISI 4340 em relação às amostras não tratadas. Já as amostras, que sofreram previamente nitretação e tratadas posteriormente a laser, apresentaram uma diminuição de potencial para ambos os aços sendo que no caso do aço AISI 4340 esta diferença se deu de maneira mais acentuada.

4.3.3.1 Aço AISI 1045

Na Figura 4.62 tem-se o Gráfico da variação da densidade de corrente e do potencial pela técnica de extrapolação de Tafel, para as diferentes amostras do aço AISI 1045, antes do tratamento a laser, pois há a necessidade de uma base comparativa para as amostras tratadas posteriormente a laser. Pode-se verificar que as amostras que sofreram tratamento tanto térmico quanto termoquímico apresentaram deslocamento positivo nas curvas de potencial, tornando-se mais nobres, porém quanto à densidade de corrente houve um deslocamento das curvas para direita apresentando elevação de valores, mostrando uma tendência para diminuição na resistência à corrosão do material. A amostra nitretada ficou com uma condição de ensaio melhor que a temperada, pois alcançou valores mais nobres de potencial para uma menor densidade de corrente. Esta melhor resistência à corrosão da amostra recozida a qual contém grandes áreas de ferro α é atribuída a tendência da mesma formar uma forte camada de óxido durante o processo corrosivo.

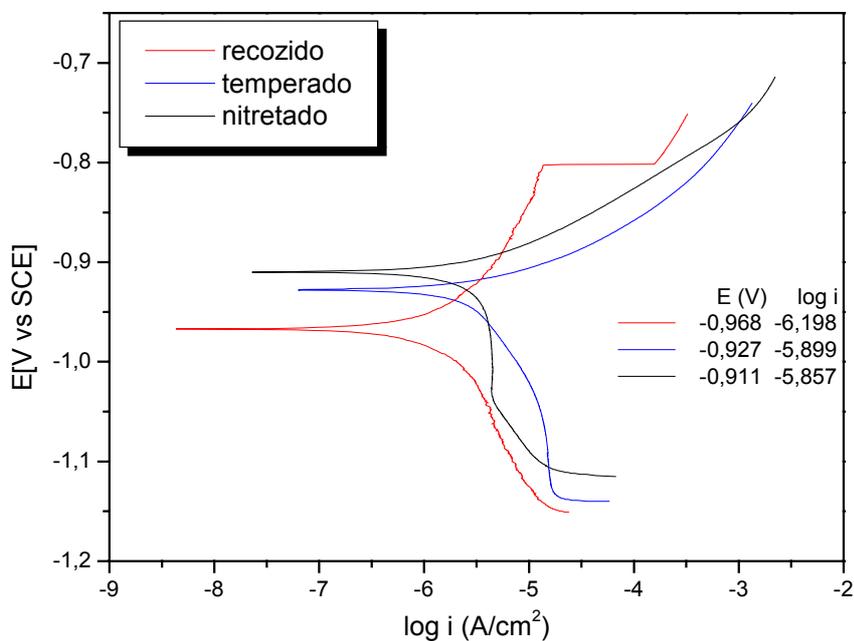


Figura 4.62 – Curvas de polarização das amostras do aço AISI 1045 não tratadas a laser. Resultados obtidos pela técnica de extrapolação de Tafel.

Na Figura 4.63 são apresentados os resultados obtidos pela técnica de extrapolação de Tafel para as amostras aço AISI 1045 recozidas, sem tratamento e tratadas a laser com velocidades de varredura do feixe de $8 \cdot 10^3$ mm/min e $10 \cdot 10^3$ mm/min sendo que os outros parâmetros operacionais são equivalentes. Pode-se ver que, para ambas as velocidades, ocorreu uma elevação no potencial de corrosão e na nobreza do material, porém com um aumento nos valores da densidade de corrente, indicando que houve tendência de diminuição na resistência a corrosão. A homogeneização ocorrida na superfície das amostras após o tratamento a laser, que passou de uma superfície de microestrutura rica em ferrita para uma com martensita refinada, provocou esta elevação de nobreza, porém diminuiu a capacidade de formar uma camada protetora de óxido sobre a superfície. Ao se comparar o resultado entre as superfícies modificadas verifica-se que a amostra que sofreu a menor velocidade de varredura, alcançou um melhor resultado de ensaio pois teve, no final do ensaio, seu potencial elevado a uma situação de maior nobreza e uma densidade de corrente apesar de próxima, um pouco menor portanto, com a superfície do material apresentando uma tendência de maior resistência à corrosão. A maior homogeneização alcançada após o tratamento a laser pode explicar esta situação.

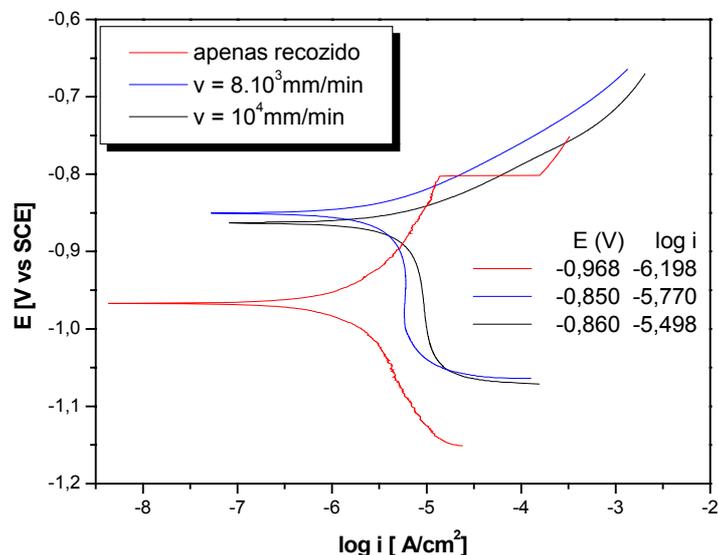


Figura 4.63 – Curvas de polarização das amostras do aço AISI 1045 recozido sem e com tratamento a laser. Resultados obtidos pela técnica de extrapolação de Tafel.

Pode-se também avaliar a influência do tratamento superficial a laser na resistência à corrosão do material através da técnica de espectroscopia de impedância eletroquímica, cujos dados foram plotados conforme Bode nos gráficos módulo de impedância X frequência e ângulo de fase X frequência. Nas Figuras 4.64 e 4.65 são vistos os gráficos para o aço AISI 1045 como recebido, isto é, recozido sem laser e para as respectivas velocidades de tratamento de $8 \cdot 10^3$ mm/min e 10^4 mm/min.

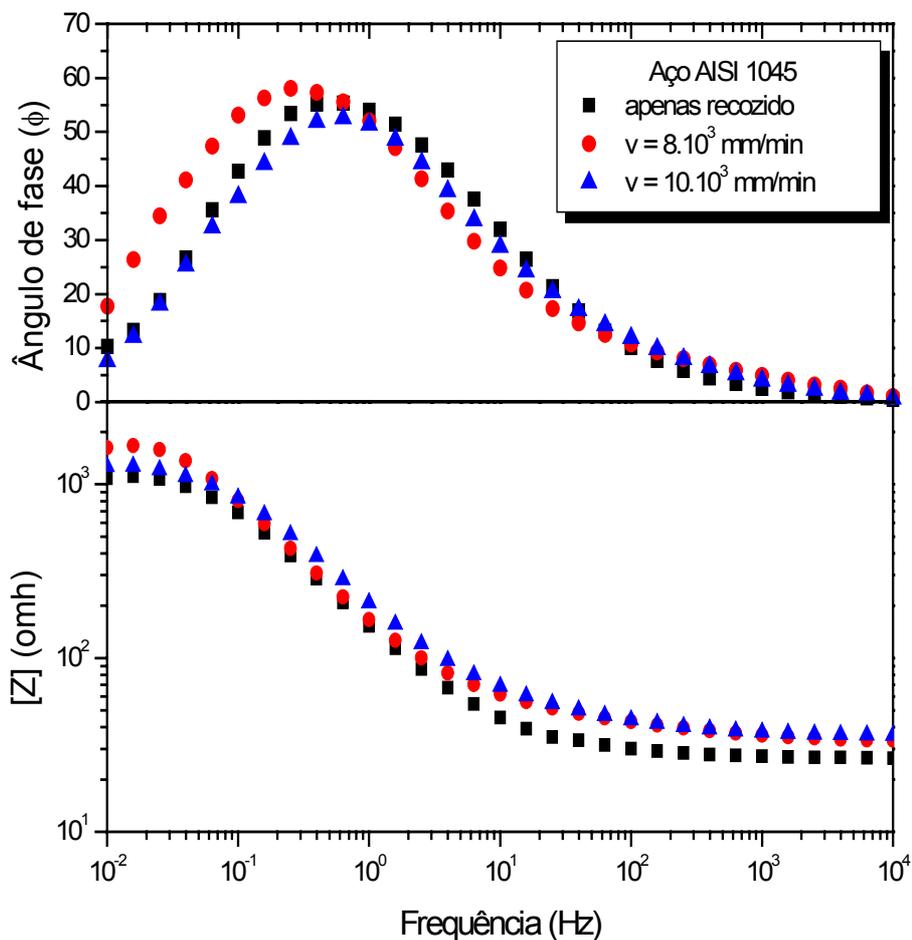


Figura 4.64 – Gráficos de Bode para o aço AISI 1045 recozido sem e com tratamento a laser para $v = 8 \cdot 10^3$ mm/min e $10 \cdot 10^3$ mm/min.

Na Figura 4.64 observou-se a ocorrência de um deslocamento positivo para cima do módulo de impedância e também do ângulo de fase das amostras tratadas em relação à amostra não tratada a laser o que qualitativamente indica uma melhora da resistência à corrosão com os tratamentos a laser. O módulo de impedância pós-polarização visto na Figura 4.65 também apresentou deslocamento positivo o que significa uma melhor resistência à corrosão do aço AISI 1045 e deslocou ainda mais o ângulo de fase para a esquerda.

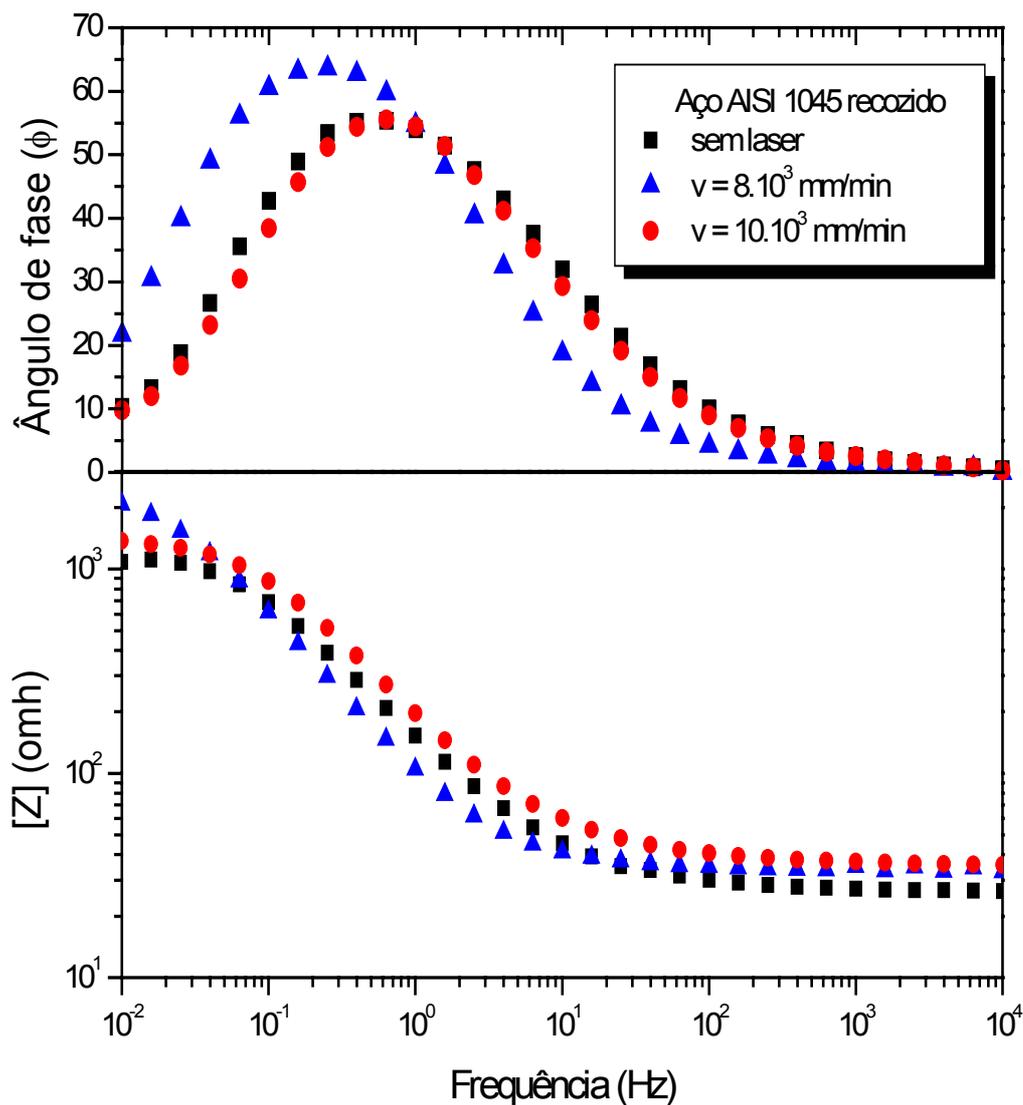


Figura 4.65 – Gráficos de Bode para o aço AISI 1045 recozido para ensaios pós-polarização.

A Figura 4.66 a seguir apresenta os resultados obtidos pela técnica de extrapolação de Tafel para as amostras do aço AISI 1045 temperadas, sem tratamento e tratadas a laser em duas diferentes velocidades de varredura do feixe de $8 \cdot 10^3$ mm/min e 10^4 mm/min sendo que os outros parâmetros operacionais também são equivalentes. Verificamos que estes tratamentos apresentaram tendência de elevação na nobreza dos materiais tratados a laser em comparação a amostra não tratada, porém as densidades de corrente mantiveram-se bastante próximas o que representa que a resistência à corrosão não mostrou alteração significativa. A amostra não tratada a laser e previamente temperada, já apresentando uma superfície homogeneizada, não contribuiu desta vez para a formação de uma camada de filme protetora contra a corrosão que possa diferenciá-la no tratamento a laser, portanto neste caso houve uma melhora nas condições gerais da amostra após o tratamento a laser. Comparando as amostras tratadas a laser entre si, ocorreu uma equivalência tanto dos potenciais de corrosão que mantiveram uma mesma tendência de elevação de nobreza com valores de potencial próximos. Já no que se refere à densidade de corrente, a amostra submetida a maior velocidade de varredura apresentou um valor um pouco menor. Com isto ficou caracterizado uma condição eletroquímica muito próxima entre ambas as amostras tratadas a laser.

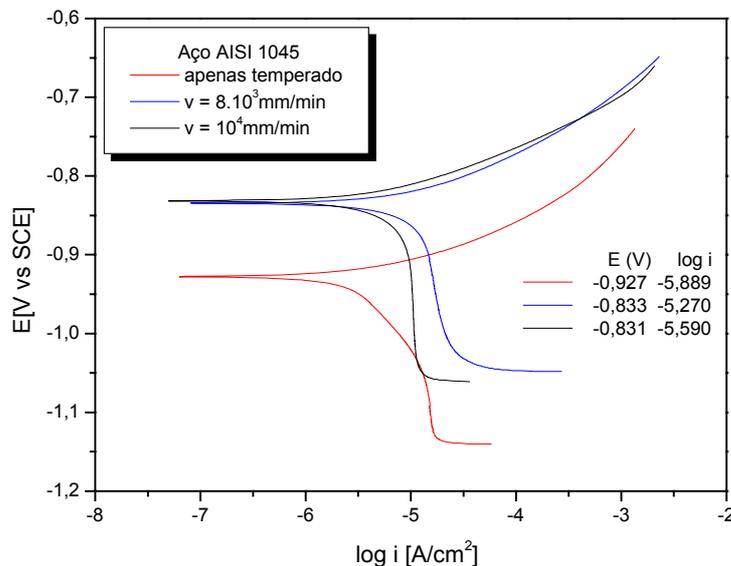


Figura 4.66 – Curvas de polarização das amostras temperadas do aço AISI 1045 sem e com tratamento a laser. Resultados obtidos pela técnica de extrapolação de Tafel.

Na Figura 4.67 é apresentado o gráfico de impedância eletroquímica para o aço AISI 1045 previamente temperado e tratado a laser para as velocidades de $8 \cdot 10^3$ mm/min e $10 \cdot 10^3$ mm/min. O módulo de impedância das amostras tratadas apresentou deslocamento positivo em comparação à amostra não tratada. Já o ângulo de fase apresentou um deslocamento para a esquerda do θ_{MAX} alcançando menores valores de frequência. Apesar deste valor máximo do ângulo de fase ter apresentado valores menores de impedância, o deslocamento para a esquerda representa qualitativamente uma tendência de melhoria na resistência à corrosão.

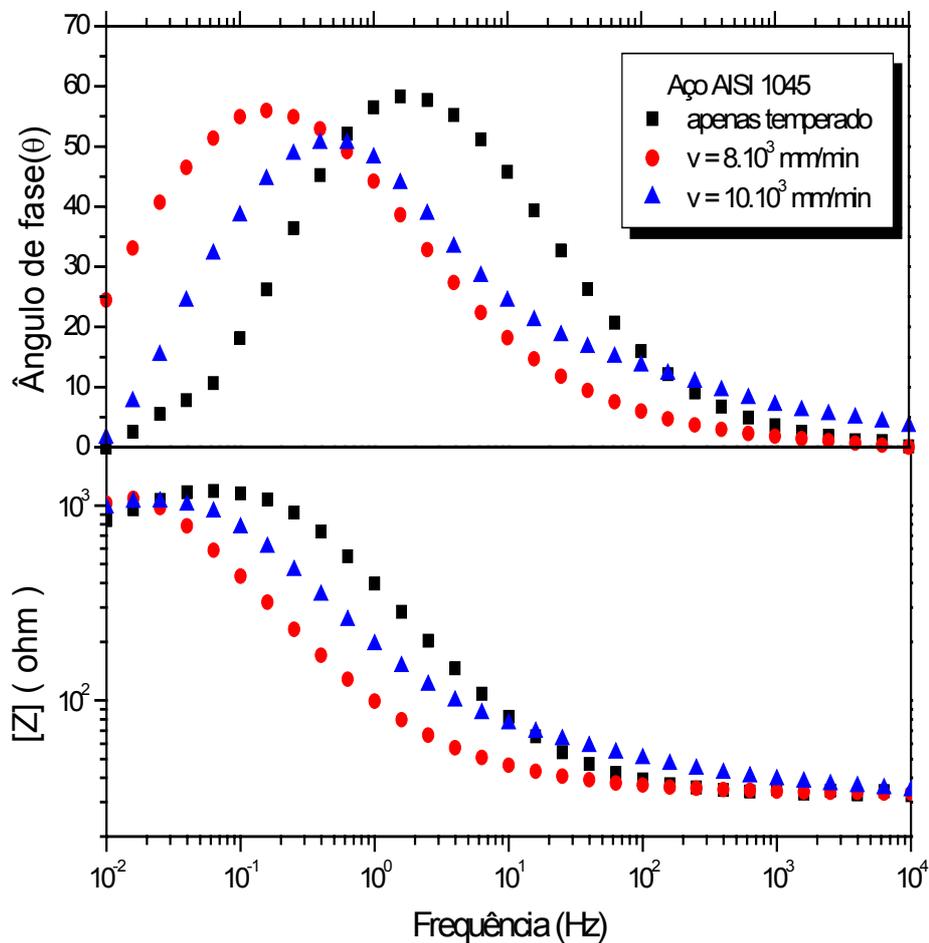


Figura 4.67 – Gráficos de Bode para o aço AISI 1045 temperado sem e com aplicação do feixe para $v = 8 \cdot 10^3$ mm/min e $10 \cdot 10^3$ mm/min.

A Figura 4.68 mostra os resultados obtidos pela técnica de extrapolação de Tafel para as amostras nitretadas, sem tratamento e tratadas a laser do aço AISI 1045 em duas diferentes velocidades de varredura do feixe de 8.10^3 mm/min e 10^4 mm/min sendo que os outros parâmetros operacionais também são equivalentes. Mais uma vez, pode-se observar que o tratamento a laser elevou o potencial de nobreza do material em que as amostras tratadas apresentaram uma condição, após tratamento, melhor que o material apenas nitretado. A densidade de corrente mostrou condições distintas entre as amostras tratadas a laser. Para a velocidade de 8.10^3 mm/min ocorreu um deslocamento negativo para a esquerda na densidade de corrente o que significa uma tendência de diminuição da resistência à corrosão. Para a velocidade de 10^4 mm/min tem-se o inverso e um deslocamento positivo para a direita da densidade de corrente é observado representando uma melhor resistência à corrosão do material. A formação de carbonetos e nitretos na superfície, após a passagem do laser sobre a amostra tratada com menor velocidade de varredura, pode explicar este melhor desempenho da amostra. Entre os materiais tratados, apesar daquele com menor velocidade de varredura ter ficado ligeiramente mais nobre, o de maior velocidade alcançou uma significativa diminuição da densidade de corrente, alcançando então, este último, uma melhor resistência contra a corrosão.

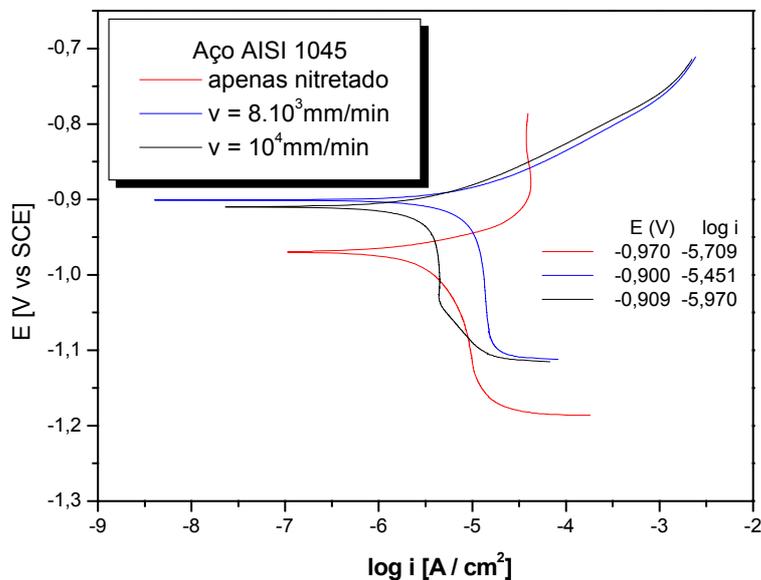


Figura 4.68 – Curvas de polarização das amostras nitretadas do aço AISI 1045 sem e com tratamento a laser. Resultados obtidos pela técnica de extrapolação de Tafel.

No ensaio de impedância eletroquímica para o aço AISI 1045 nitretado e tratado com velocidade de varredura do feixe de 8.10^3 mm/min e 10.10^3 mm/min, Figura 4.69 pode-se verificar que ocorreu o deslocamento negativo do módulo de impedância entre a amostra não tratada e as tratadas a laser, indicando qualitativamente, que ocorreu a diminuição da resistência a corrosão após tratamento a laser. A mesma situação pode ser verificada em relação ao ângulo de fase que também apresentou um deslocamento negativo para a direita das curvas das amostras tratada em relação à não tratada, confirmando uma tendência de uma menor resistência contra a corrosão.

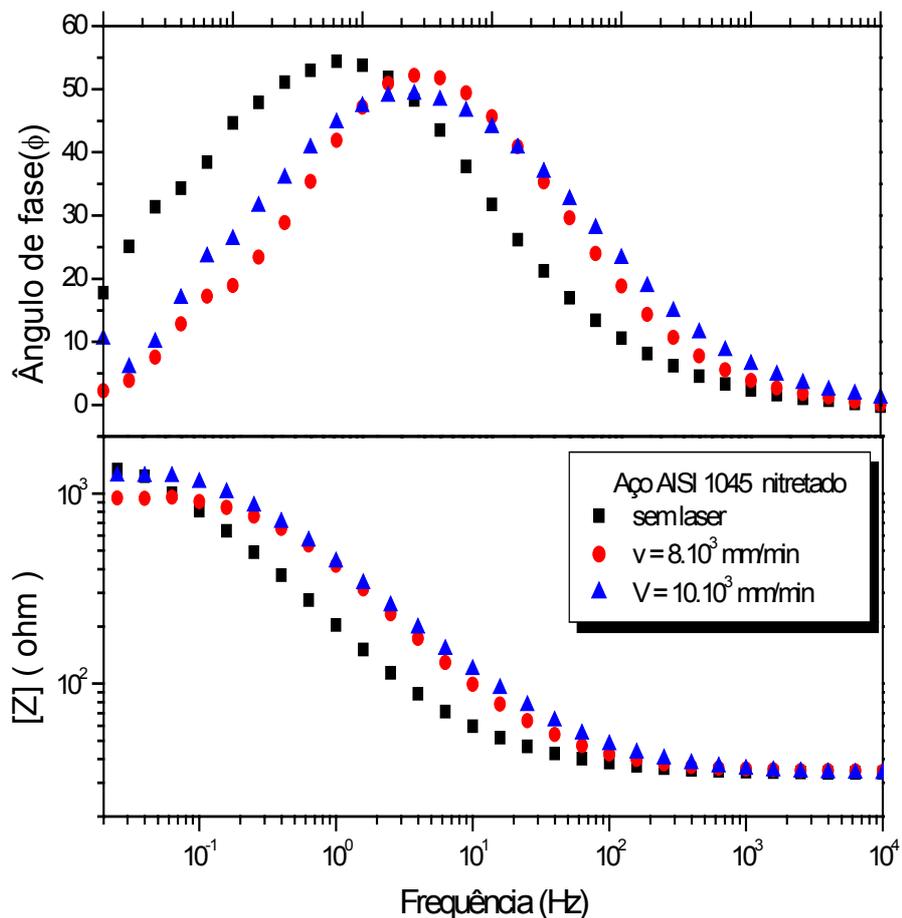


Figura 4.69 – Gráficos de Bode para o aço AISI 1045 nitretado sem e com aplicação do laser para $v = 8.10^3$ mm/min e 10.10^3 mm/min..

4.3.3.2 Aço AISI 4340

Na Figura 4.70, tem-se a variação da densidade de corrente e do potencial de corrosão pela técnica de extrapolação de Tafel para amostras do aço AISI 4340 como recebidas, recozidas e nitretadas antes do tratamento a laser. Pode-se verificar que as amostras que sofreram tratamento térmico de recozimento apresentaram um deslocamento negativo do potencial para baixo e com isto a diminuição em sua nobreza eletroquímica e um valor próximo na densidade de corrente comparadas com as amostras como recebidas o que, segundo esta ultima condição, apresenta uma tendência de resistência à corrosão muito semelhante. Já nas amostras nitretadas quando comparadas com as amostras como recebidas, ocorreu um deslocamento positivo considerável para cima nos valores do potencial, tornando os aços previamente nitretados mais nobres. A densidade de corrente também apresenta um deslocamento positivo para a esquerda, alcançando uma melhoria na resistência à corrosão. A partir destes resultados pode-se considerar que após as fases de pré-tratamentos, as amostras que sofreram nitretação possuem a melhor condição superficial contra a corrosão, enquanto que as amostras recozidas apresentaram as condições mais desfavoráveis.

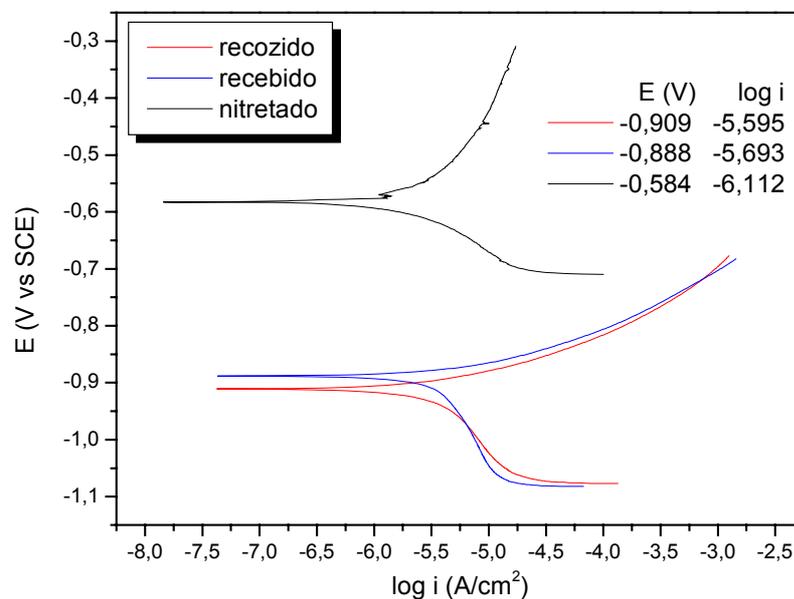


Figura 4.70 – Curvas de polarização das amostras do aço AISI 4340 sem tratamento a laser. Resultados obtidos pela técnica de extrapolação de Tafel.

Quando comparadas as curvas de polarização das amostras apenas recozidas com aquelas recozidas e tratadas a laser, com as curvas de polarização apresentadas na Figura 4.71 a seguir, pode-se observar que as amostras tratadas a laser tanto para velocidade de $8 \cdot 10^3$ mm/min quanto à de $10 \cdot 10^3$ mm/min, apresentaram um deslocamento positivo em seu potencial, tornando-as mais nobres. Quando comparados entre si, os valores de potencial são muito semelhantes com um diferencial positivo de valor para a amostra realizada com menor velocidade de deslocamento do feixe. O mesmo pode ser dito quanto à densidade de corrente em que os valores apresentam um ligeiro deslocamento negativo para a direita, porém mantendo uma tendência de resistência à corrosão muito próxima entre si. Quando se comparam as amostras tratadas a laser com a amostra sem tratamento, a densidade de corrente apresenta um pequeno deslocamento negativo para a direita. Pode-se dizer que a modificação superficial a laser do aço AISI 4340 apenas recozido apresenta uma melhoria nas propriedades de corrosão do material pois o ganho com um potencial mais nobre foi mais significativo que o pequeno deslocamento negativo na densidade de corrente.

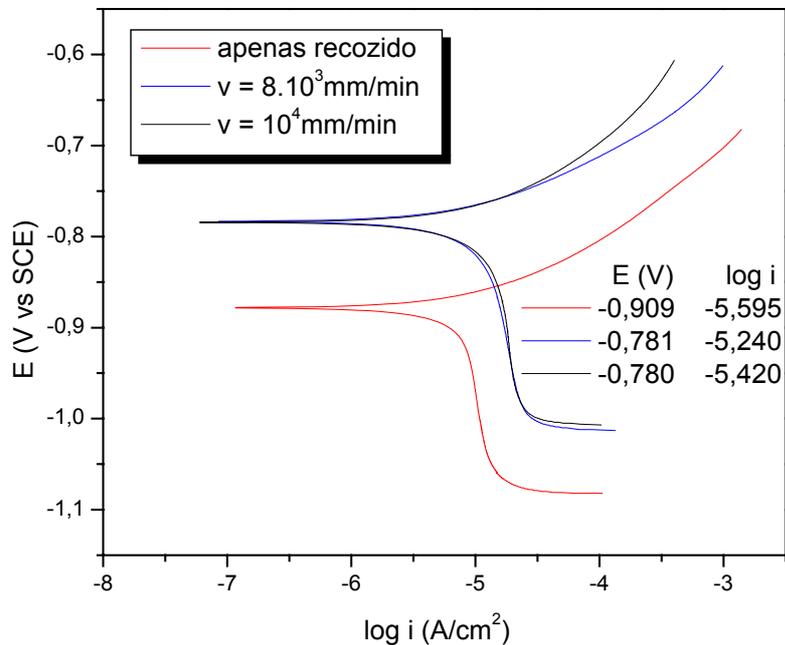


Figura 4.71 – Curvas de polarização das amostras do aço AISI 4340 recozidas sem e com tratamento a laser. Resultados obtidos pela técnica de extrapolação de Tafel.

A avaliação da influência do tratamento superficial a laser das amostras do aço AISI 4340 recozidas com e sem tratamento a laser na resistência a corrosão através da técnica de espectroscopia de impedância eletroquímica é apresentada na Figura 4.72. Comparando a amostra previamente recozida com as amostras tratadas a laser para velocidades de $8 \cdot 10^3$ mm/min e $10 \cdot 10^3$ mm/min, verifica-se que nas amostras tratadas a laser, ocorre um deslocamento positivo para cima do módulo de impedância. Com isto tem-se uma tendência de melhoria na resistência a corrosão do material. Já o ângulo máximo de fase apresenta uma diminuição na amplitude máxima apesar do deslocamento para valores de menor frequência.

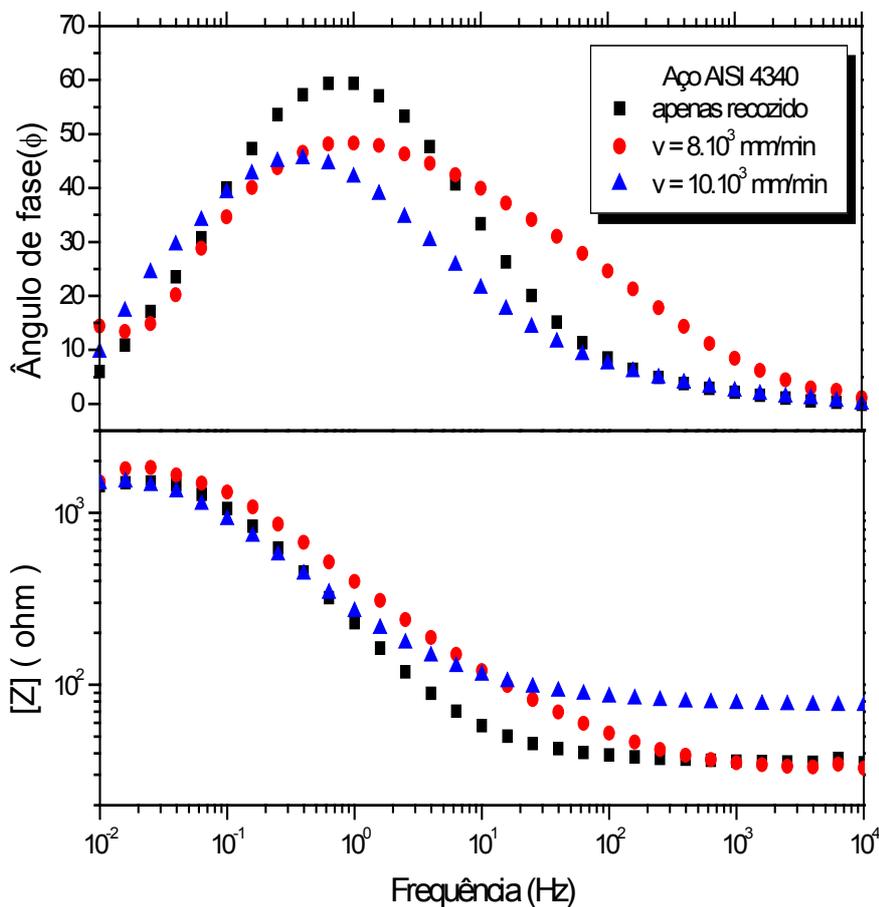


Figura 4.72 – Gráficos de Bode para o aço AISI 4340 recozido sem e com aplicação do feixe para $v = 8 \cdot 10^3$ mm/min e $10 \cdot 10^3$ mm/min.

No ensaio de extrapolação de Tafel mostrado na Figura 4.73, para amostras do aço AISI 4340 como recebidas sem tratamento e tratadas com duas velocidades distintas de varredura do feixe do laser, verifica-se que as amostras com tratamento superficial a laser apresentaram uma melhor condição em seu potencial eletroquímico tornando-se, em ambos os casos, mais nobres em comparação com a amostra sem tratamento a laser. As amostras tratadas com velocidade de varredura de feixe de $8 \cdot 10^3$ mm/min são as que alcançaram a melhor condição de nobreza após o tratamento a laser se comparadas com as tratadas com velocidade de 10^4 mm/min. Os valores de densidades de corrente das amostras tratadas apresentaram um acréscimo em comparação aos das amostras não tratadas. A amostra tratada com $8 \cdot 10^3$ mm/min teve um valor de densidade de corrente menor que a amostra tratada com maior velocidade. Isto significa uma maior resistência à corrosão alcançada pela amostra tratada com menor velocidade de varredura do laser. Pode-se dizer que no geral, para o aço AISI 4340 como recebido, o tratamento superficial a laser é benéfico ao material, pois a elevação de nobreza nos materiais tratados é muito mais significativa que o crescimento na densidade de corrente.

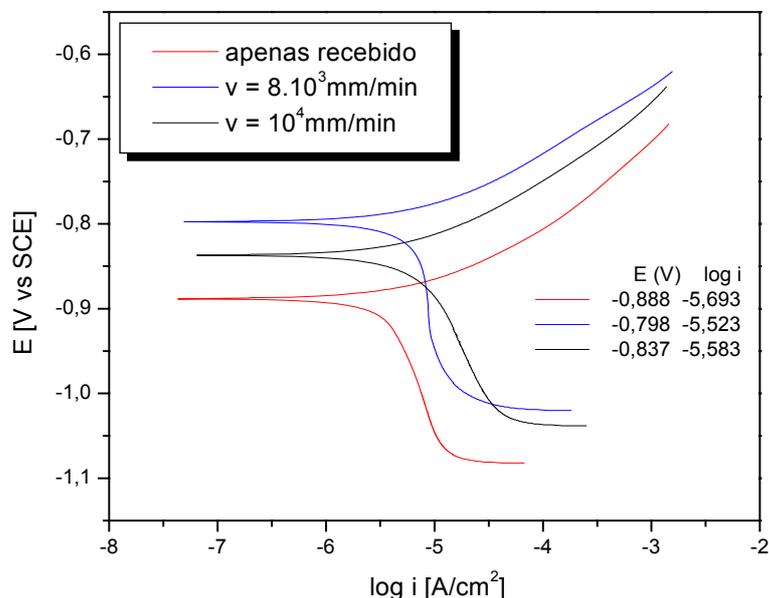


Figura 4.73 – Curvas de polarização das amostras do aço AISI 4340 nitretadas sem e com tratamento a laser. Resultados obtidos pela técnica de extrapolação de Tafel.

A avaliação do tratamento superficial a laser das amostras do aço AISI 4340 como recebidas, com e sem tratamento a laser, para a resistência a corrosão através da técnica de espectroscopia de impedância eletroquímica é apresentada na Figura 4.74. Comparando a amostra sem tratamento com as amostras tratadas com velocidade de varredura do laser de $8 \cdot 10^3$ mm/min e $10 \cdot 10^3$ mm/min verifica-se que a amostra tratada a laser com menor velocidade de varredura apresenta deslocamento positivo para cima do módulo de impedância em relação a amostra sem tratamento. Com isto tem-se uma tendência de melhoria na resistência a corrosão. Já o ângulo de fase máximo mostra um deslocamento negativo para baixo da amplitude máxima para ambas as amostras tratadas a laser.

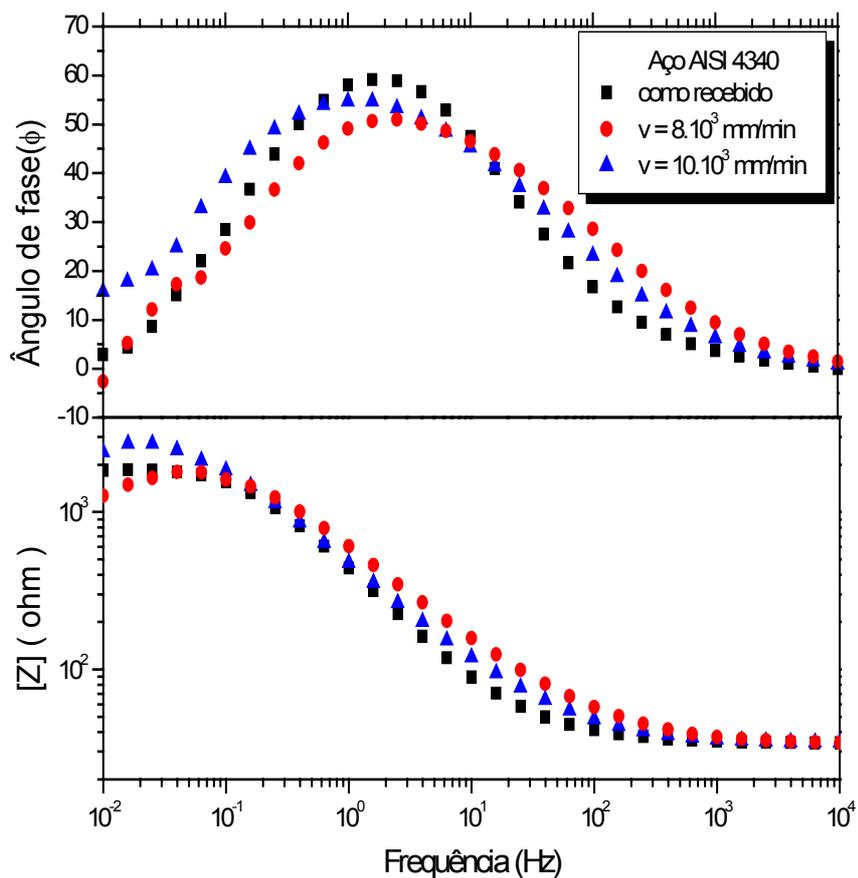


Figura 4.74 – Gráficos de Bode para o aço AISI 4340 como recebido sem e com aplicação do feixe para $v = 8 \cdot 10^3$ mm/min e $10 \cdot 10^3$ mm/min.

No ensaio de extrapolação de Tafel mostrado na Figura 4.75, as amostras pré-nitretadas do aço AISI 4340 submetidas a tratamento a laser com duas velocidades distintas de varredura, apresentaram um deslocamento negativo, para baixo, significativo no potencial eletroquímico tornando-se, em ambos os casos, menos nobres quando comparadas com a amostra sem tratamento a laser. A densidade de corrente também sofre deslocamento negativo para a direita, significando que ambas as amostras apresentam uma tendência de diminuição na resistência a corrosão. Isto mostra que o tratamento a laser para o AISI 4340 pré-nitretado não trouxe melhoria na resistência à corrosão do material, muito pelo contrario, diminui sua condição de resistência contra corrosão. A amostra tratada com menor velocidade do feixe é aquela que apresenta o maior deslocamento negativo, com maior perda de nobreza e maior valor de densidade de corrente e portanto decrescendo a resistência à corrosão. Constata-se por estes resultados que o tratamento superficial a laser não é uma solução para todas as situações de tratamento superficial.

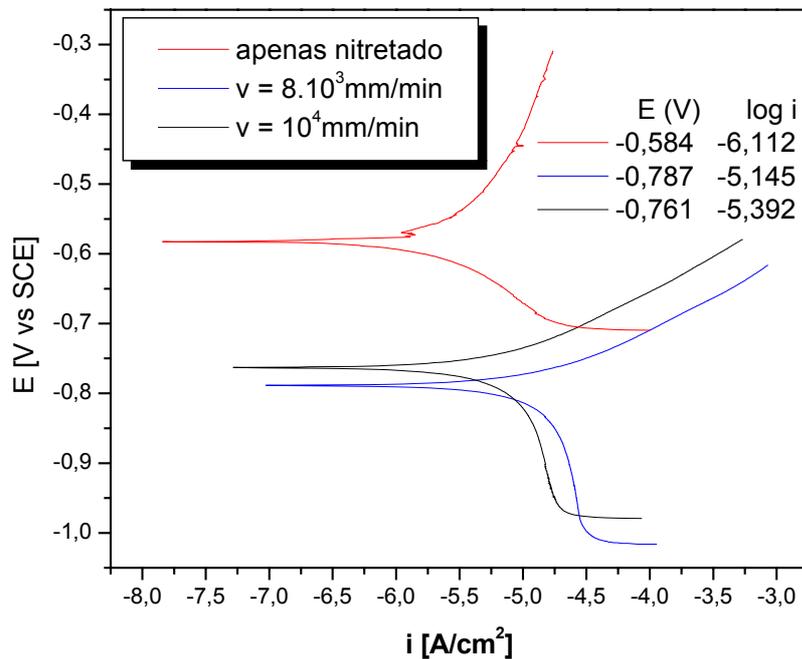


Figura 4.75 – Curvas de polarização das amostras do aço AISI 4340 nitretadas sem e com tratamento a laser. Resultados obtidos pela técnica de extrapolação de Tafel.

A avaliação do tratamento superficial a laser das amostras aço AISI 4340 nitretadas com e sem tratamento a laser para a resistência a corrosão através da técnica de espectroscopia de impedância eletroquímica é vista nas Figuras 4.76 e 4.77. Comparando a amostra apenas pré-tratada por nitretação com as amostras submetidas a tratamento a laser com velocidades de varredura do laser de 8.10^3 mm/min e 10.10^3 mm/min verifica-se que as amostras tratadas a laser apresentam um deslocamento negativo do módulo de impedância, com o valor do módulo de Z ficando muito inferior ao da amostra somente pré-tratada. Com isto temos uma tendência de redução bastante significativa na resistência a corrosão. O mesmo ocorreu com o ângulo de fase que também apresentou deslocamento negativo significativo na amplitude de θ_{MAX} para valores de maior frequência.

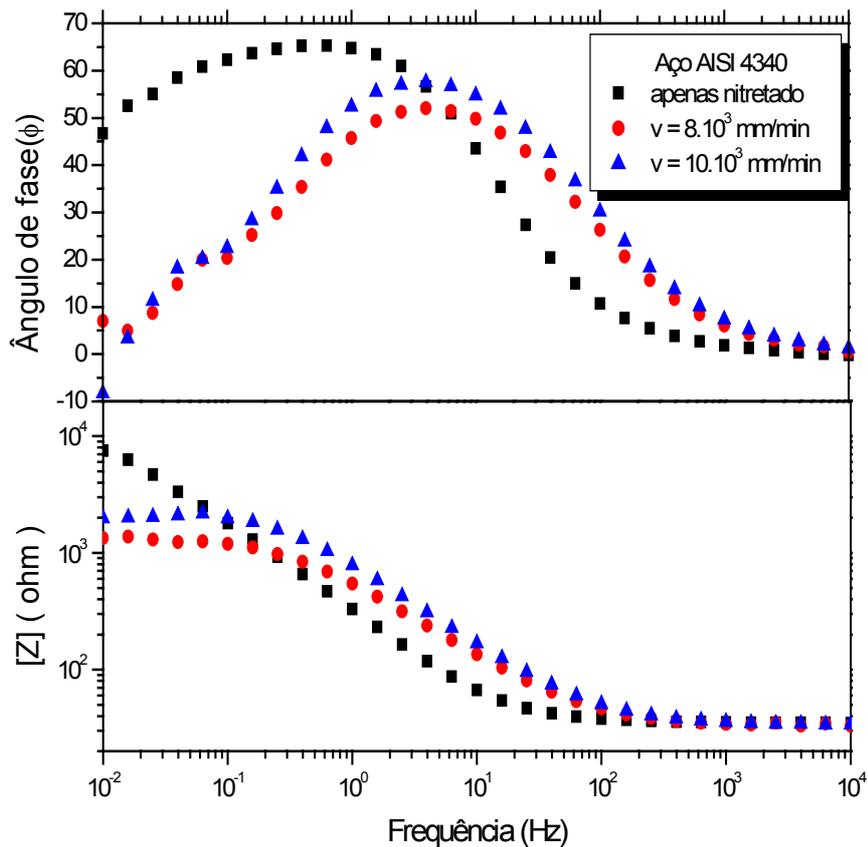


Figura 4.76 – Gráficos de Bode para o aço AISI 4340 apenas nitretado sem e com aplicação do feixe para $v = 8.10^3$ mm/min e 10.10^3 mm/min.

No caso dos ensaios de impedância eletroquímica pós-polarização para este material submetido a velocidades de varredura de $8 \cdot 10^3$ mm/min e $10 \cdot 10^3$ mm/min, o módulo de Z apresentou também um deslocamento negativo para baixo. O ângulo de fase máximo também sofreu um deslocamento para a direita alcançando valores de maior frequência quando comparado com a amostra sem tratamento a qual possui um maior valor de θ_{MAX} . Este deslocamento significa uma tendência de diminuição da resistência à corrosão para ambas as amostras tratadas a laser.

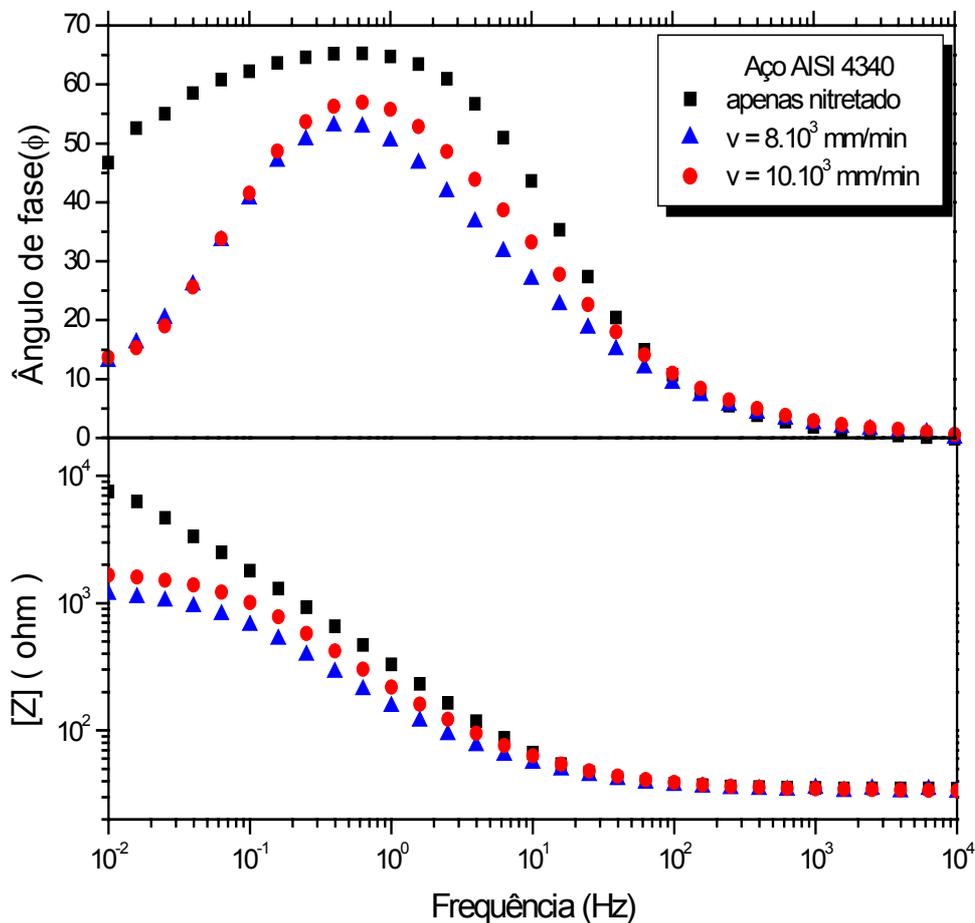


Figura 4.77 – Gráficos de Bode para o aço AISI 4340 apenas nitretado para ensaios pós-polarização .

4.3.4 Resultado dos ensaios de desgaste

Os ensaios de desgaste por micro-abrasão foram realizados a seco com os mesmos parâmetros operacionais de força igual a 18,7 N, distância percorrida de 59 metros para um tempo de cinco minutos e velocidade de deslizamento de $19,7 \text{ cm.s}^{-1}$ a fim de permitir apenas um estudo comparativo entre as amostras. Foi utilizada uma esfera de aço AISI 52100 com 25,4 mm de diâmetro. Foram realizados três ensaios por amostra, sendo duas réplicas de cada. Os diâmetros da calota formada foram medidos, conforme visto na Figura 4.86, em duas direções e calculado um valor aritmético médio.

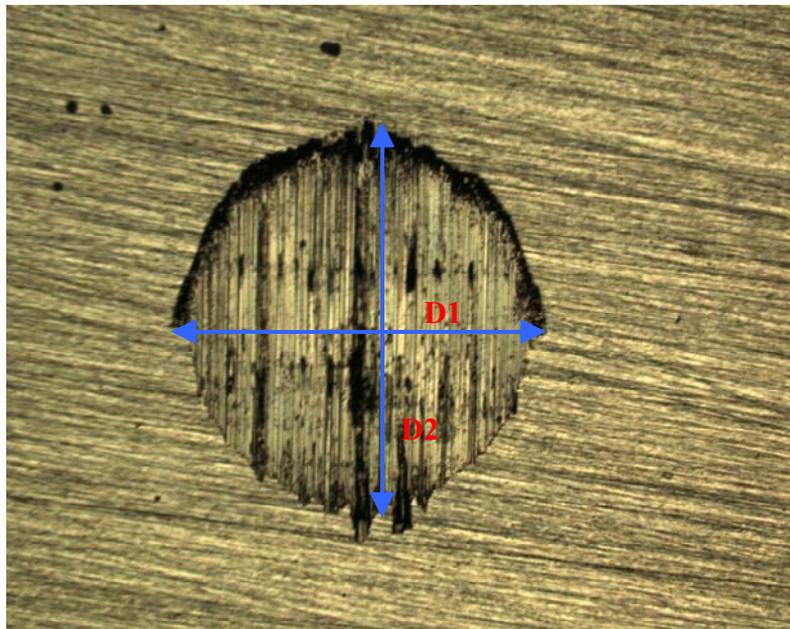


Figura 4.78 – Calota formada pelo ensaio de desgaste de microabrasão.

Os resultados e análises estão colocados a seguir em tabelas e plotados em gráficos de barra, segundo a ordem de apresentação seguida neste trabalho.

4.3.2.1 Aço AISI 1045

A Tabela 4.9 contém o valor médio aritmético “b” dos diâmetros das calotas em mm e os respectivos volume V dados pela Equação 3.3, em mm^3 para os ensaios das peças do aço AISI

1045 sem e com tratamento a laser, para as duas velocidades realizadas de $8 \cdot 10^3$ mm/min e 10^4 mm/min e potência de 500 W do laser, sendo os resultados plotados na Figura 4.87 em um gráfico de barra.

Tabela 4.9– Resultados do ensaio de micro-abrasão do aço AISI 1045

Ensaio de Micro-abrasão do aço AISI 1045						
Pré-tratamento	Recozido		Temperado		Nitretado	
Tratamento	b (mm)	V (mm ³)	b (mm)	V (mm ³)	b (mm)	V (mm ³)
Sem laser	0,952	3,174	1,406	15,104	1,838	44,109
$8 \cdot 10^3$ mm/min	0,850	2,017	1,142	6,574	1,220	8,562
10^4 mm/min	0,780	1,431	1,036	4,452	1,012	4,054

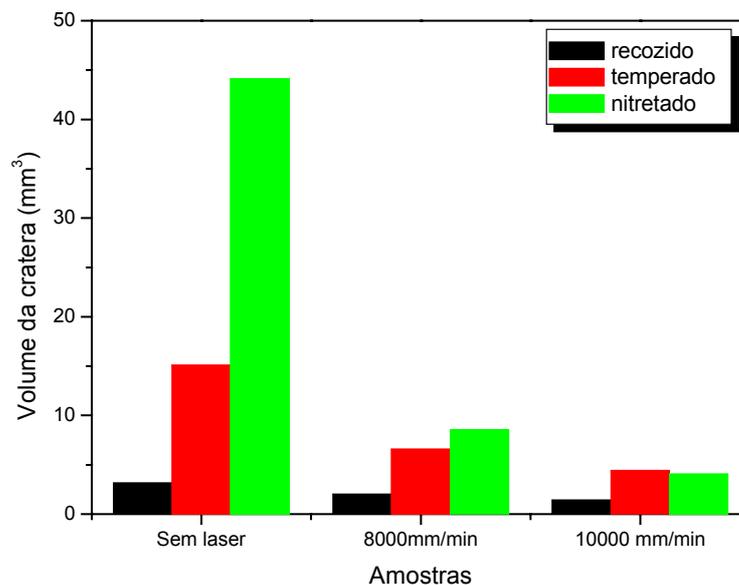


Figura 4.79 – Ensaio de micro-abrasão do aço AISI 1045 sem e com tratamento a laser.

Pode-se observar que nos resultados dos ensaios de desgaste do aço AISI 1045, as amostras submetidas à velocidade de varredura do feixe do laser de $10 \cdot 10^3$ mm/min apresentaram os

melhores resultados. Também se verifica que as amostras com tratamento a laser em todos os ensaios apresentaram ganho na resistência ao desgaste em relação às amostras não tratadas. Os aspectos abrasivos da amostra com maior profundidade de poça podem ter influenciado no coeficiente de desgaste apresentado pela amostra.

Quando se analisa pela microestrutura do substrato, verifica-se que as amostras recozidas e tratadas a laser apresentam melhor resistência ao desgaste que as tratadas depois de temperadas e nitretadas. Estas duas últimas, apesar de mostrarem um resultado bem distinto nas amostras não tratadas com a nitretada apresentando um nível de desgaste bem mais elevado, após o tratamento apresentam um comportamento mais próximo. O baixo nível de desgaste apresentado pela amostra recozida sem e com tratamento a laser pode indicar que a superfície mais macia e menos rugosa do aço AISI 1045 tenha melhores propriedades antidesgaste, mas também pode indicar que o ensaio de desgaste microabrasivo sem gotejamento de lubrificante aplicado não seja mais indicado para estudar este tipo de material que possui superfície macia.

4.3.2.2 Aço AISI 4340

A Tabela 4.10 a seguir contem os valores do volume da calota e do coeficiente de desgaste calculado para os ensaios das peças do aço AISI 4340 sem e com tratamento a laser para as velocidades de varredura de $8 \cdot 10^3$ mm/min e 10^4 mm/min e potência de 500 W do laser com os resultados plotados na Figura 4.88 em um gráfico de barra.

Tabela 4.10 – Resultados do ensaio de micro-abrasão do aço AISI 4340

Ensaio de micro-abrasão do aço AISI 4340						
Pré-tratamento	Recozido		Recebido		Nitretado	
Tratamento	b (mm)	V (mm ³)	b (mm)	V (mm ³)	B (mm)	V (mm ³)
Sem laser	2,382	124,43	2,280	104,44	0,866	2,174
$8 \cdot 10^3$ mm/min	1,620	26,62	1,496	19,36	0,974	3,478
10^4 mm/min	1,644	28,23	1,648	28,51	0,912	2,674

Os resultados dos ensaios de desgaste do aço AISI 4340 diferem significativamente daqueles do aço AISI 1045. Porém verifica-se que, com exceção das amostras nitretadas e tratadas a laser, houve uma melhora significativa entre as amostras tratadas e as não tratadas para

aquelas recozidas e como recebidas. Entre estas, as com velocidade de varredura de $8 \cdot 10^3$ mm/min apresentaram-se mais resistentes ao desgaste que as tratadas com velocidade de varredura de $10 \cdot 10^3$ mm/min. As amostras nitretadas divergiram quanto a estes resultados, pois as amostras submetidas à menor velocidade de varredura apresentam um desgaste mais elevado.

Quando as amostras são analisadas pelo tipo de pré-tratamento realizado, verifica-se que as pré-nitretadas, tratadas ou não a laser, são as que melhor se apresentam quanto à resistência ao desgaste. Porém neste caso verifica-se que o tratamento a laser não melhorou esta propriedade, ao contrário, ocorreu uma diminuição da resistência ao desgaste. Neste caso, com a resistência ao desgaste já bastante elevada, o tratamento a laser não se mostrou adequado.

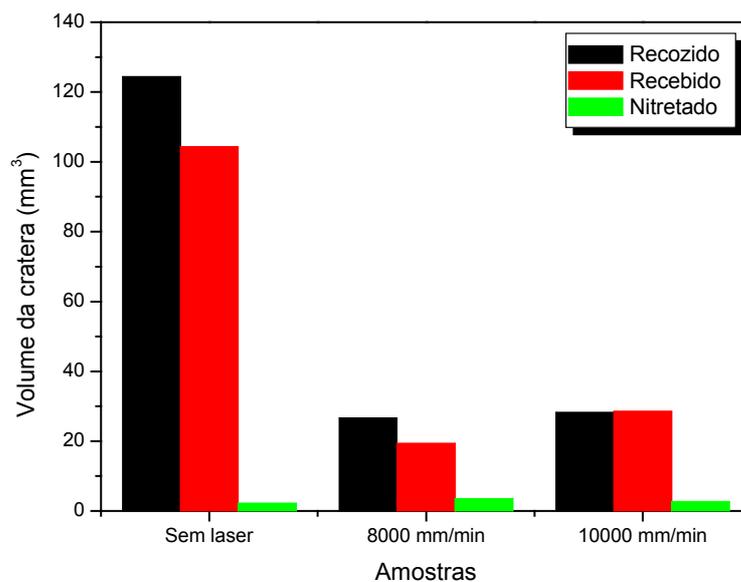


Figura 4.80 – Ensaio de microabrasão do aço AISI 4340 sem e com tratamento a laser.

Capítulo 5

Conclusões

5.1 Conclusões deste trabalho

Os resultados deste trabalho podem ser divididos em duas etapas distintas: aqueles obtidos a partir dos ensaios com trilha simples, correlacionados aos parâmetros operacionais do laser, e aqueles obtidos a partir dos ensaios com trilhas sobrepostas, com estes resultados correlacionados aos ensaios das propriedades mecânicas e químicas dos materiais, resultantes do tratamento a laser. Os mesmos são colocados a seguir:

Para o aço AISI 1045

Os efeitos dos parâmetros operacionais do tratamento superficial a partir de um laser de CO₂ de potência contínua sobre o aço AISI 1045 são estudados e os resultados comprovam a influência da interação entre a potência e velocidade de varredura do feixe do laser sobre a profundidade da camada tratada, a microestrutura e o perfil de dureza superficial e as propriedades dos materiais.

Potências em torno valor nominal do equipamento, de 1000 W, provocam evaporação superficial do material independente da velocidade do feixe do laser. Já potências intermediárias em torno de 500 W se mostraram mais propícias ao tratamento superficial.

Velocidades abaixo de $4 \cdot 10^3$ mm/min para as faixas de potência estudadas também

provocaram evaporação superficial no material não sendo portanto indicadas ao tratamento a laser do aço AISI 1045. Velocidades intermediárias de 5.10^3 mm/min e 6.10^3 mm/min provocam refusão superficial considerável sendo indicadas portanto a este tipo de tratamento. Já velocidades acima de 8.10^3 mm/min provocam apenas transformação térmica ou refusão superficial reduzida sendo portanto propícias ao tratamento térmico de têmpera.

Os pré-tratamentos térmicos de têmpera e nitretação mostram ter influência nos resultados da profundidade da poça formada pelo feixe do laser em relação à microestrutura da amostra como recebida. As amostras nitretadas apresentam maiores valores de profundidade da poça após o tratamento. As amostras temperadas apresentam valores intermediários das dimensões da poça enquanto que as amostras como recebidas com microestrutura recozida apresentam os menores valores de profundidade da camada tratada.

O jateamento superficial, etapa final da preparação das amostras com objetivo de melhorar a absorção da energia incidente e realizada com diferentes materiais, sendo microesfera de vidro e óxido de alumínio (Al_2O_3), exercem importante influência na absorção da energia aportada pelo feixe incidente do laser, influenciando nas dimensões e propriedades finais do material. As amostras jateadas com Al_2O_3 apresentam maiores valores nas dimensões da poça para velocidades do feixe do laser acima de 8.10^3 mm/min, sendo equivalentes para velocidades intermediárias.

O perfil de microdureza das amostras jateadas com microesfera de vidro apresenta valores de dureza Vickers bem superior aos das amostras jateadas com Al_2O_3 nas velocidades acima de 8.10^3 mm/min.

O tratamento superficial a laser provou ter significativa importância sobre a melhoria da resistência a corrosão do AISI 1045 em todas as situações estudadas. Foi constatado em todos os ensaios que após o tratamento superficial o potencial eletroquímico torna-se mais nobre porém nos casos das amostras como recebidas apresentam uma tendência de elevação da velocidade de corrosão

O mesmo resultado é visto sobre a resistência ao desgaste que melhora significativamente após a sobreposição sobre as amostras pré-tratadas com uma diminuição da cratera provocada pelo ensaio de microabrasão superior a 50% sobre as amostras não tratadas a laser.

Para o aço AISI 4340

Os efeitos dos parâmetros operacionais do tratamento superficial a partir do laser de CO₂ de potência contínua sobre o aço AISI 4340 são estudados e os resultados também comprovam a influência da interação entre a potência e velocidade de varredura do feixe do laser sobre a profundidade da camada tratada, a microestrutura o perfil de dureza superficial e as propriedades mecânicas e químicas.

A potência do feixe do laser e a velocidade de varredura exercem influência na camada tratada a laser do AISI 4340 semelhante ao do AISI 1045 sendo que para menores velocidades verifica-se a evaporação do material e para velocidades acima de 6.10^3 mm/min um tratamento térmico com refino da microestrutura acicular pode ser verificado

Os pré-tratamentos, térmico ou termoquímico, mostram ter influência sobre as dimensões das trilhas e também sobre as propriedades superficiais do AISI 4340. As amostras que apresentam maiores valores de profundidade de camada tratada são as amostras sem pré-tratamento. As amostras nitretadas ficaram com valores de profundidade da poça formada após tratamento a laser, pouco inferior às amostras como recebidas. Quando comparadas com as amostras do AISI 1045 com substrato similar, a profundidade da poça tende a ser aproximado tanto para mostras recozidas como para amostras nitretadas.

O perfil de microdureza das amostras como recebidas e tratadas a laser são bastante superiores àquelas tratadas após pré-tratadas com recozimento com pelo menos duas vezes o valor medido.

No caso do AISI 4340, o tratamento superficial a laser mostrou ter importância sobre a resistência à corrosão de amostras recozidas e endurecidas que apresentam elevação na nobreza

do potencial eletroquímico com valores da velocidade de corrosão se mantendo aproximados, porém não teve o mesmo resultado quanto às amostras nitretadas que apresentam perda de nobreza e tendência de elevação da velocidade de corrosão.

Resultados semelhantes são obtidos para a resistência ao desgaste em que verificamos uma melhoria das propriedades após tratamento a laser, porém quanto às amostras nitretadas que já apresentam elevada resistência ao desgaste, ocorre um decréscimo nestes valores.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Pode-se apontar as seguintes linhas de pesquisa objetivando trabalhos futuros:

Estudar as propriedades resultantes do tratamento superficial a laser para outros materiais e/ou ligas de interesse científico.

Tendo em vista a influência dos parâmetros operacionais, estudar as modificações nas propriedades dos materiais considerando outros percentuais de sobreposição de trilha e da modificação da vazão de gás de proteção.

Realizar o ensaio de corrosão considerando a influência do tempo de exposição ao meio sobre camada formada pelo laser sobre a superfície.

Estudar as propriedades de resistência ao desgaste com outras velocidades e cargas para os materiais estudados a fim de determinar com precisão o coeficiente de desgaste

Referências Bibliográficas

Artigos

Acker, K. V.; Vanhoyweghen, D.; Persoons, R.; Vangrunderbeek, J. **Influence of tungsten carbide particle size and distribution on the wear resistance of laser clad WC/Ni coatings.** Wear 258, pp 194-202, 2005.

Acselrad, O.; Souza, A. R.; Kalashnikov, I. S.; Camargo Jr., S. S. **A first evaluation of the abrasive wear of an austenitic FeMnAlC steel.** Wear 257, pp 999-1005, 2004.

Adachi, K.; Hutchings, I. M. **Sensitive of wear rates in the micro-scale abrasion test to test conditions and material hardness.** Wear 258, pp 318-321, 2005.

Anjos, M. A.; Vilar, R.; Qiu, Y. Y. **Laser cladding of ASTM S31254 stainless steel on plain carbon steel substrate.** Surface and Coatings Technology 92, pp142-149, 1997.

Blawert, C.; Mordike, B. L.; Collins, G. A.; Short, K. T.; Tendys, J. **Influence of process parameters on the nitriding of steel by plasma immersion ion implantation.** Surface and Coating Technology 103-104, pp 240-247, 1998.

Carmignani, C.; Mares, R.; Toselli, G. **Transient finite element analysis of deep penetration laser welding process in a singlepass butt-welded thick steel plate.** Computer methods in applied mechanics and engineering 179, pp 197-214, 1999.

- Caudron, E.; Buscail, H. **In-situ high temperature X-ray diffraction characterization of yttrium implanted extra low carbon steel and pure iron.** Materials Chemistry and physics 64, pp 29-36, 2000.
- Chan, S. M.; Chan, L. C.; Lee, T. C. **Tailor-welded blanks of different thickness ratios effects on forming limit diagrams.** Journal of Materials Processing Technology 132, pp 95-101, 2003.
- Chang, W. S.; Na, S. J. **A study on the prediction of the laser weld shape with varying heat source equation and the thermal distortion of a small structure in micro-joining.** Journal of Materials Technology 120, pp 208-214, 2003.
- Chen, B.; Penwell, D.; Nguyen, J. H.; Kruger, M. B. **High pressure X-ray diffraction study of Fe₂B.** Solid State Communications 129, pp 573-575, 2004.
- Cheung, N.; Pinto, M. A.; Ierardi, M. C. F. **Steel Surface Treatment Using Laser Remelting: Mathematical Modeling and Experimental Analysis,** Lasers in Engineering. v. 15, pp.41-53, 2005.
- Colaço, R.; Vilar, R. **Stabilization of retained austenite in laser surface melted tool steels.** Materials Science and Engineering A 385, pp 123-127, 2004.
- Cui, Z. D.; Man, H. C.; Cheng, f. T.; Yue, T. M. **Cavitation erosion-corrosion characteristics of laser surface modified NiTi sharp memory alloy.** Surface and Coating Technology 162, pp 147-153, 2003.
- Euh, K.; Kim, Y. C.; Shin K.; Lee S.; Nark, J. K. **Effect of tempering on hardness improvement in a VC/steel surface-alloyed material fabricated by high-energy electron-beam irradiation.** Materials Science and Engineering A346, pp 228-326, 2003.
- Fastow, M.; Bamberger, M.; Nir, N.; Landkof, M. **Laser surface melting of AISI 4340 steel.** Materials Science and Technology 6, pp 900-904, set 1990.
- Fedrizzi, L.; Rossi, S.; Bellei, F.; Defrorian, F. **Wear-corrosion mechanism of hard chromium coatings.** Wear 253, pp 1173-1181, 2002.

- Fu, Y.; Wei, J.; Batchelor, W. **Some considerations the mitigation of fretting damage br the application of surface-modification technologies.** Journal of Materials Processing Technology 99, 231-245, 2000.
- Gant, A. J.; Gee M. G.; May A. T. **Microabrasion of WC-Co hardmetals in corrosive media.** Wear 256, pp 954-962, 2004.
- Gee, M. G.; Gant, A.; Hutchings, I.; Bethke, R.; Schiffman, K.; Acker, K.M.; Poulat, S.; Gachon, Y.; von Sebut, J. **Progress towards standardization of ball cratering.** Wear 255, pp 1-13, 2003.
- Gee, M. G.; Wicks, M. J. **Ball crater testing for the measurement of the unlubricated sliding wear of wear-resistant coatings.** Surface and Coatings Technology 133-134, pp 376-382, 2000.
- Grum, J.; Sturm, R. **Comparison of measuring and calculated thickness of martensite and ledeburite shells around graphite nodules in hardened layer of nodular iron after laser surface remelting.** Applied Surface Science 187, pp 116-123, 2002.
- Ierardi, M. C. F.; Azolini, W.; Garcia, A.; Vilar, R. **Laser Cladding Of A Martensitic Stainless Stell On A Tool Steel Substrate.** In: 9th International Metallurgy and Materials Congress, Istambul, Turquia, 1997, v. 1. p. 327-331.
- Imafuku, M.; Suzuki, H.; Akita, K.; Iwata, K.; Fujikura, M. **Effects of laser irradiation on iron loss reduction for Fe-3% grain-oriented silicon steel.** Acta Materialia 53, pp 939-945, 2005.
- Kampus, Z.; Balic, J. **Deep drawing of tailored blanks without a blankholder.** Journal of Materials Processing Technology, 133, pp 128-133, 2003.
- Kim J. D., Peng, Y. **Plunging method for Nd:YAG laser cladding with wire feeding.** Optics and Laser in Engineering 33, pp 299-309, 2000.
- Kim, J. D.; Peng, Y. **Melt pool shape and dilution of laser cladding with wire feeding.** Journal of Materials Processing Technology 104, pp 284-293, 2000.

- Kinsey, B. Viswanathan, V.; Cao, J. **Forming of Aluminium Tailor welded Blanks**. Society of Automotive Engineers 0882, pp 1-7, jan 2001.
- Lee, W. S.; Su, T. T. **Mechanical properties and microstructural features of AISI 4340 high-strength alloy steel under quenched and tempered conditions**. Journal of Materials Processing Technology 87, pp 198-206, 1999.
- Liliental W. K.; Tymowski, G. J.; Tarfa, N. **Melhorando Propriedades Mecânicas Superficiais de Ligas Ferrosas através da Nitretação a Gás Controlada e Automática**. Nitrex Metal Inc. s/n., tradução Vendramin, J. C. Combustol. São Paulo, 12p, 2002
- Lima, M. S. F.; Vieira, N. D.; Morato, S. P.; Vencovsky P. **Microstructural changes due to laser ablation of oxidized surfaces on an AISI M2 tool steel**. Materials Science and Engineering A 344, pp 1-9, 2003.
- Lin, J.; Hwang, B. C. **Coaxial laser cladding on an inclined substrate**. Optics & Laser Technology 31, pp 571-578, 1999.
- Lo, K. K.; Cheng, F. T.; Kwok, C. T.; Man, H. C. **Improvement of cavitation resistance of AISI 316 stainless steel by laser surface alloying using fine WC powder**. Surface and Coating Technology 165, pp 258-267, fev 2003.
- Marques, M. J.; Pina, J.; Dias, ^a M.; Lebrun, J. L.; Feugeas, J. **X-ray diffraction characterization of ion-implanted austenitic stainless steel**. Surface & Coating Technology 195, pp 8-16, 2005.
- Nascimento, C. K.; Casteletti, L. C.; Piteli Filho, L. E. **Boretação do aço AISI D2 em meio líquido**. 3º Congresso Brasileiro de Fabricação – Joinville, 6p, 2004.
- Pinto, M. A.; Cheung, N.; Ierardi, M. C. F.; Garcia, A. **Modelagem matemática e análise experimental da transformação martensítica através do tratamento superficial a laser em aço AISI 1045**. In: XV Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 2002.

- Rocha, A. da S.; Hisch, T. **Fast in situ X-ray diffraction phase and stress analysis during complete heat treatment cycles of steel.** Materials Science and Engineering A 395, pp 195-207, 2005.
- Rossi, S.; Massiani, Y.; Bertassi, E.; Torregossa, F.; Fedrizzi, L. **Low temperature plasma immersion ion implantation of nitrogen on a mould steel.** Thin solid films 416, pp 160-168, 2002.
- Rutherford, K. L.; Hutchings, I. M. **A micro-abrasive test, with particular application to coated systems.** Surface and Coatings Technology 79, pp 231-239, 1996.
- Stachowiak, G. B.; Stachowiak, G. W. **Wear mechanisms in ball-cratering test with large abrasive particles.** Wear 256, pp 600-607, 2004.
- Sun, Z.; Annergren, I.; Pan, D.; Mai, T. A. **Effect of laser surface remelting on the corrosion behavior of commercially pure titanium sheet.** Materials Science and Engineering A 345, pp 293-300, 2003.
- Sun, Z.; Kuo, M. **Bridging the joint gap with wire feed laser welding.** Journal of Materials Processing Technology 87, pp 213-222, 1999.
- Thawari, G.; Sundararajan, G.; Joshi, S. V. **Laser surface alloying of medium carbon steel with SiP_(p).** Thin Solid Films 423, pp 41-53, jan 2003.
- Tomida, S.; Nakata, K.; Shibata, S.; Zenkouji, I.; Saji S. **Improvement in wear resistance of hypereutectic Al-Si cast alloy by laser surface remelting.** Surface and Coating Technology 169-170, pp 468-471, 2003.
- Toth, H. J.; Leal Neto, R. M.; Vatauvuk, J. **Caracterização Metalográfica da Camada Branca de Aços Nitretados,** Instituto de Pesquisa Energéticas e Nucleares – São Paulo, 8p 2000.
- Trezona, R. I.; Allsopp, D. N.; Hutchings I. M. **Transitions between two-body and three-body abrasive wear: influence of test conditions in microscale abrasive wear test.** Wear 225, pp 205-214, 1999.

- Tusek, J.; Kampus, Z.; Suban, M. **Welding of tailored blanks of different materials**. Journal of Materials Processing Technology 119, pp 180-184, 2001.
- Tzeng, Y. F. **Effects of operating parameters on surface quality for the pulsed laser welding of zinc-coated steel**. Journal of Materials Processing Technology 100, pp 163-170, 2000.
- Uenishi, K.; Kobaiashi, F. **Formation of surface layer based on Al₃Ti on aluminium by laser cladding and compatibility with ceramics**. Intermetallics 7, pp 553-559, 1999.
- Yang, S.; Su, Y.; Huang, W.; Zhou, Y. **Microstructure characteristics of Cu-Mn alloys during laser surface remelting**. Materials Science and Engineering A 386, pp 367-374, 2004.
- Yoo, J.H.; Ahn S. H.; Kim, J. G.; Lee, S. Y. **Influence of target power density and substrate bias voltage on the electrochemical properties of type 304 SS films prepared by unbalanced magnetron sputtering**. Surface and Coating Technology 157, pp 47-54, 2002.
- Yue, T. M.; Hu, Q. W.; Mei, Z. Man, H. C. **Laser cladding of stainless on magnesium ZK60/SiC composite**. Materials Letters 47, pp 165-170, 2001.
- Zeng, D. W.; Xie, C. S.; Yung, K. C. **Mesostructured composite coating on SAE1045 carbon steel synthesized in situ by laser surface alloying**. Materials Letters 56, pp 680-684, nov 2002.
- Zhang, W.; Lei, T. C.; Li, J. **Laser Cladding of stainless steel with Ni-Cr₃C₂ for improved wear performance**. Wear 251, pp 1372-1376, 2001.

Teses

Bezerra, A. A. F. **Análise da Resistência à Corrosão do Aço Carbono Revestido com Al55-Zn após Deformação Mecânica e Tratamento Térmico**, Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade de Campinas, 200X, XXp Dissertação (Mestrado).

Cheung, N. **Simulação Numérica de Tratamento Superficial por Refusão com Laser: Interação Radiação Laser-Matéria e Solidificação**. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade de Campinas, 2003, 206 p Tese (Doutorado).

Pinto, M. A. **Deposição de revestimentos Compósitos Metal-Cerâmico Wc-Co por Fusão a Laser**, Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade de Campinas, 2004, 102 p Tese (Doutorado).

Vicentin L.C. **Solda a laser em chapas finas de aço baixo carbono**. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade de Campinas, 1999, 67 p Dissertação (Mestrado)

Livros

Burakowski, T., Wierzchon, T. **Surface Engineering of Metals: Principles, Equipment, Technology**; Ed. CRC Press, New York, 1999, 591p.

Garcia, A. **Solidificação: Fundamentos e Aplicações**. Ed. da Unicamp, São Paulo, Brasil, 2001, 391p.

Gemelli, E. **Corrosão de Materiais Metálicos e sua Caracterização**, Ed. Livros Técnicos Científicos, 2001, 183p.

Marlet, H. **O Laser**. Editora Mnole, São Paulo, 1987, 205p

Padilha, A. F., Ambrósio Filho, F. **Técnicas de Análise Microestrutural**, Ed. Hemus pp 45-75, 1996.

Prokhorov, A. M.; Konov V. I. **Laser Heating of Metals**. Ed. Adam Hilger, New York, 1990, 233 p.

Rubahn, H. G. **Laser Applications in Surface Science and Technology**, Ed John Wiley & Sons, 1996, 336p.

Steen, W. M. **Laser Material Processing**, Ed. Springer-Verlag, 3^a Ed., 1996, 266p.

Wolyneç, S. **Técnicas Eletroquímicas de Corrosão**. Ed. da Universidade de São Paulo, 1^a edição, 2003, 166p.

Normas

American Society for Testing and Materials, Philadelphia ASTM A 29/A 29M; **Standard Specification for Steel Bars Carbon and Alloy, Hot-Wrought and Cold-Finished General Requirements for**¹, v. 01.05, Annual Book of ASTM Standards, 2000.

American Society for Testing and Materials, Philadelphia. ASTM G 31-72; **Standard Practice for Laboratory Immersion Corrosion Testing of Metals**¹, v. 03.02, Annual Book of ASTM Standards, 1999.

American Society for Testing and Materials, Philadelphia. ASTM A 321-90; **Standard Specification for Steel Bars, Carbon, Quenched and Tempered**¹, v. 03.02, Annual Book of ASTM Standards, 2001.

Sites - Internet

Stoeterau, R. L. **Tribologia**, apostila 172p, Departamento de Engenharia Mecânica – UFSC, 2004 <www.lmp.ufsc.br/guigo/EMC5315/EMC-5315-tribologia.pdf>, acesso 03/outubro/2004.

Putz, H. **Match – Phase Identification from Powder Diffraction**. Version 1.0A Crystal Impact, 2003, Bonn Germany <www.crystalimpact.com>, acesso 05/dezembro/2004.

Abrasion and Wear Testing of Coatings by Ball Cratering: Crater
www.npl.co.uk/materials/projects/crater, acesso 12/dezembro/2004.