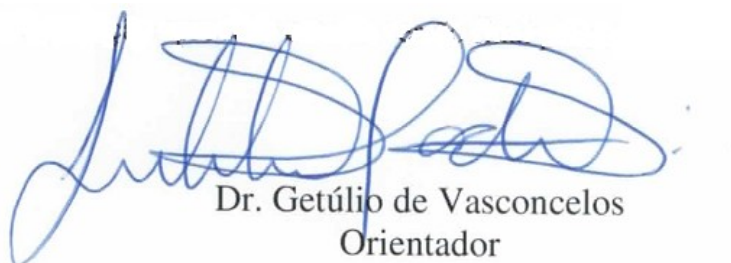


Tese apresentada à Pró-Reitoria de Pós-Graduação e Pesquisa do Instituto Tecnológico de Aeronáutica, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências no Programa de Pós-Graduação Engenharia Aeronáutica e Mecânica, Física e Química dos Materiais Aeroespaciais.

Anderson Ferreira da Silva

**AVALIAÇÃO TRIBOLÓGICA DA APLICAÇÃO DE LUBRIFICANTES
SÓLIDOS COM LASER DE CO₂ EM ATMOSFERA AMBIENTE EM AÇO
AISI 52100**

Tese aprovada em sua versão final pelos abaixo assinados:



Dr. Getúlio de Vasconcelos
Orientador

Prof. Dr. Celso Massaki Hirata
Pró-Reitor de Pós-Graduação e Pesquisa

Campo Montenegro
São José dos Campos, SP – Brasil
2010

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)**Divisão de Informação e Documentação**

Ferreira, Anderson Silva

AVALIAÇÃO TRIBOLÓGICA DA APLICAÇÃO DE LUBRIFICANTES SÓLIDOS COM LASER DE CO₂ EM ATMOSFERA AMBIENTE EM AÇO AISI 52100 / Anderson Ferreira da Silva **São José dos Campos, 2010.**

Número de folhas no formato 109f.

Tese de mestrado – Curso de Engenharia Aeronáutica e Mecânica e área de Física e Química dos Materiais Aeroespaciais – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2010. Orientador: Prof. Dr. Getúlio de Vasconcelos.

1. Laser. 2. Tratamento térmico. 3. Tribologia. 4. Lubrificante sólido

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

FERREIRA, Anderson Silva **AVALIAÇÃO TRIBOLÓGICA DA APLICAÇÃO DE LUBRIFICANTES SÓLIDOS COM LASER DE CO₂ EM ATMOSFERA AMBIENTE EM AÇO AISI 52100.** 2010. 109f. Dissertação de mestrado em Física / Química dos materiais Aeroespaciais – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: ANDERSON FERREIRA DA SILVA

AVALIAÇÃO TRIBOLÓGICA DA APLICAÇÃO DE LUBRIFICANTES SÓLIDOS COM LASER DE CO₂ EM ATMOSFERA AMBIENTE EM AÇO AISI 52100.

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO/2010

É concedida ao Instituto Tecnológico de Aeronáutica permissão para reproduzir cópias desta Dissertação e para emprestar ou vender cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta Dissertação pode ser reproduzida sem a sua autorização (do autor).

Anderson Ferreira da Silva

Rua dos Diamantes, 397 A – Jardim Monte Cristo

08670 110 – Suzano – SP – Brasil

**AVALIAÇÃO TRIBOLÓGICA DA APLICAÇÃO DE
LUBRIFICANTES SÓLIDOS COM LASER DE CO₂ EM
ATMOSFERA AMBIENTE EM AÇO AISI 52100.**

Anderson Ferreira da Silva

Composição da Banca Examinadora:

Prof.	Koshun Iha	- Presidente - ITA
Prof.	Getúlio de Vasconcelos	- Orientador - IEAv
Prof.	Nicolau A.S.Rodrigues	- Membro Interno -IEAv
Prof.	Dr. Antônio Jorge Abdalla i	- Membro Externo - IEAv

ITA

Agradecimentos

A Deus em primeiro lugar por me proporcionar viver e mudar minha realidade.

À minha amiga, namorada, noiva e esposa Joseana por sempre acreditar em mim.

A Dona Lourdes pela compreensão.

Aos meus pais.

Ao meu orientador Dr. Getúlio.

Ao grande professor, amigo e sempre orientador Dr. Nicolau por acreditar no meu potencial.

Aos amigos Gilson, Antônio e Carioca.

Aos professores, Milton, Riva, Abdala pela ajuda nas dúvidas.

Ao amigo Marcos Campanha por acreditar e auxiliar no meu projeto.

Ao amigo Luiz Granjo por acreditar e auxiliar no meu projeto.

Aos amigos do BTC pelos momentos de descontração e pelo auxílio no projeto.

Ao IEAv e ao grupo DEDALO.

A todos que auxiliaram direta ou indiretamente neste trabalho.

“Bom mesmo é ir a luta com determinação, abraçar a vida com paixão, perder com classe e vencer com ousadia. Pois, o triunfo pertence a quem se atreve.”

Charles Chaplin

Resumo

Neste trabalho, são apresentados os resultados da avaliação tribológica da aplicação de lubrificantes sólidos, no caso grafita, sobre a superfície do aço AISI 52100 via laser de CO₂. O trabalho surgiu da busca pela melhoria das propriedades superficiais dos materiais que têm solicitações diferenciadas na superfície. A utilização do laser para tratamentos de superfícies, por exemplo, aplicação de lubrificantes sólidos em atmosfera ambiente, tem possibilitado grandes avanços nesta área. No entanto, determinar quais parâmetros operacionais do laser e a resultante destas influências sobre as propriedades tribológicas dos materiais tem sido uma busca incessante.

Os resultados deste trabalho confirmam que existe uma faixa de processamento laser eficaz na redução do atrito e do desgaste. Sendo que as energias necessárias variam de 3 a 11 J/m². Ainda, verifica-se que as amostras tratadas com laser, apresentam um coeficiente de atrito da ordem de 0,3 enquanto, amostras sem tratamento laser o atrito é da ordem de 0,7.

As análises químicas por EDX e EDS demonstram uma difusão atômica de curto alcance nas zonas tratadas com o laser.

Palavras chaves: 1. Laser. 2. Tratamento térmico. 3. Tribologia. 4. Lubrificante sólido.

Abstract

In this paper, we present the results of the tribological application of solid lubricants, for graphite, on the surface of AISI 52100 steel via CO₂ laser. The work arose from the attempt to improve the surface properties of materials that have different demands on the surface. The use of lasers for surface treatments, for example, application of solid lubricants in air, has allowed great advances in this area. However, to determine which operating parameters of the laser and the resultant of these influences on the tribological properties of materials has been a constant search.

These results confirm that there is a range of laser processing effective in reducing friction and wear. Since the energies needed range 3 - 11 J/m². Still, it appears that the samples treated with laser, have a coefficient of friction of about 0.3 while samples without laser treatment attrition is of the order and 0.7. The chemical analysis by EDX and EDS demonstrate a short-range atomic diffusion in areas treated with laser.

Key words: 1. Laser. 2. Heat treatment. 3. Tribology. 4. Solid lubricant.

Lista de Figuras

Figura 1 - Esquema básico de funcionamento de laser.	5
Figura 2 - Modos de operação do feixe de laser.....	7
Figura 3 – Distribuição do campo elétrico na secção transversal do feixe laser.....	11
Figura 4 - Desenho esquemático de um feixe de laser guiado por um espelho plano, incidindo sobre uma amostra num ponto P1	12
Figura 5 - Desenho esquemático de um feixe de laser guiado por um espelho plano, incidindo sobre uma amostra num ponto P2	13
Figura 6 - Ilustração de 50PPP. Observa-se que quando $R = 50$ a distância de pulso a pulso é de 0,508 mm (25,4 mm / 50 pulsos).....	14
Figura 7 - Variação da densidade de potência em função do tempo de interação.	15
Figura 8 - Perfil de dureza de um aço tratado por laser.....	17
Figura 9 - Profundidade de penetração em função da densidade de energia	18
Figura 10 - Modelo de interação da radiação com a matéria.	20
Figura 11 - Refletividade de alguns materiais.....	21
Figura 12 - Representação esquemática dos planos estruturais da grafita.....	25
Figura 13 - a) contatos conformes; b) contatos não-conformes.....	26
Figura 14 - Modos de desgaste, mais representativos.	28
Figura 15 - Representação esquemática do contato da esfera contra disco.	31
Figura 16 - Modelo de perda de volume.	32
Figura 17 - Geração dos cavacos de grafita.	37

Figura 18 - Moinho de bolas utilizado para moagem.....	37
Figura 19 - Desagregação do material após secagem.	38
Figura 20 - Arranjo de peneiras.....	38
Figura 21 - Recobrimento da superfície do substrato de AISI 52100	40
Figura 22 - Laser de CO₂ utilizado para tratar as amostras de AISI 52100.	41
Figura 23 - Esquema simplificado de propagação do feixe de laser.	42
Figura 24 - Ilustração detalhada da movimentação do feixe	42
Figura 25 - Trilhas formadas na superfície da amostra que foi irradiada com laser.	44
Figura 26 - Equipamento de EDX.....	46
Figura 27 – Esquema básico do ensaio de EDX.....	46
Figura 28 - Tribômetro utilizado no ensaio de atrito e desgaste.....	49
Figura 29 - Esquema do teste de esfera contra disco.....	49
Figura 30 - Esquema ilustrativo da força normal e das velocidades angular (ω) e linear (v) e a força de atrito (μ).....	50
Figura 31 - Representação esquemática dos sulcos (ranhuras).....	51
Figura 32 - Distribuição percentual da grafita em função da abertura das malhas nas peneiras.....	53
Figura 33 - Micrografia do pó de grafita obtida por (MEV).	54
Figura 34 - Micrografia da superfície da amostra de AISI 52100.	57
Figura 35 - O MEV da secção transversal do aço AISI 52100.	58
Figura 36 - Sentido de corte da secção transversal.	67
Figura 37 - Ilustração da medida de dureza.	67

Figura 38 - Perfil de dureza Vickers da secção transversal, com velocidade de 10 mm/s e 1 ciclo de aquecimento (Condição 1).	69
Figura 39 - Perfil de dureza Vickers da secção transversal, com velocidade de 30 mm/s e 5 ciclos de aquecimento (Condição 2).	70
Figura 40 - Perfil de dureza Vickers da secção transversal, do aço AISI 52100 tratado com velocidade de 100 mm/s e 5 ciclos de aquecimento (Condição 3).	71
Figura 41 - Perfis de dureza Vickers (HV) das regiões irradiadas com laser.	72
Figura 42 - Superfície com o revestimento de grafita fixado com a Condição 1.	74
Figura 43 - Morfologia do revestimento de grafita fixado na superfície do aço AISI 52100 com laser na Condição 1.	75
Figura 44 - Apresenta o MEV do revestimento de grafita fixados pela ação do laser no substrato do aço AISI 52100.	76
Figura 45 - O MEV do revestimento de grafita fixados pela ação do laser no substrato do aço AISI 52100, com a Condição 3.	77
Figura 46 (a), (b), (c) e (d) - Representação das fases do processo, de fixação de grafita por laser.	78
Figura 47 - Difratoograma de raios-X das fases presentes no aço AISI 52100.	80
Figura 48 - Modelo esquemático da análise química por EDS.	82
Figura 49 - Espectro da análise por EDS realizado na superfície do revestimento de grafita fixado sobre o substrato de AISI5210.	83
Figura 50 - EDS da ZTT nota-se, um aumento do teor de carbono.	84
Figura 51 - EDS do substrato do aço AIS 52110, sem alterações na concentração de carbono.	84

Figura 52 - Comportamento da perda de massa (desgaste) em função da dureza Vickers..	89
Figura 53 - Resultado dos coeficientes de atrito das amostras tratadas com tratamento laser e sem tratamento laser	90
Figura 54 - Resultados tribológicos do coeficiente de atrito da Condição 4, em comparação com as Condições 1, 2, 3 e sem tratamento laser.	92
Figura 55 - Correlação dos valores de largura do risco em relação às condições de processamento laser aplicadas.....	93
Figura 56 - Coeficiente de atrito do para tratado com laser na Condição 5.	94
Figura 57 - Esquema simplificado da formação do terceiro corpo.....	95
Figura 58 - Coeficiente de atrito dos pares com e sem tratamento laser, sob ensaio tribológico mais severo.....	96
Figura 59 - Perfil bruto da superfície do aço AISI 52110 sem tratamento laser.	97
Figura 60 - Perfil bruto da superfície do aço AISI 52100 com tratamento laser	98

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Fatores que influenciam o atrito	23
Tabela 2 - Variação do coeficiente de atrito deslizante em diferentes materiais	24
Tabela 3 - Percentual da composição química do aço AISI 52100.....	36
Tabela 4 - Parâmetros dos ensaios tribológicos	48
Tabela 5 - Massa de grafita retida em cada uma das peneiras.	52
Tabela 6 - Solventes utilizados.....	55
Tabela 7 - Seleção do ligante e do solvente.....	56
Tabela 8 - Concentração dos componentes utilizados na preparação da solução	57
Tabela 9 - Dureza obtidas no aço AISI 52100 sem tratamento laser	59
Tabela 10 - Parâmetros de processamento laser (Resolução)	61
Tabela 11- Parâmetros de processamento laser para 1,5, 10 e 20 ciclos de aquecimento.....	63
Tabela 12 - Seleção dos parâmetros de processamento laser	66
Tabela 13 - Nomenclatura utilizada no ensaio de dureza	68
Tabela 14 - Análise química da camada de revestimento	85
Tabela 15 - Ensaios tribológicos, parâmetros do ensaio pino-contra- disco.	87
Tabela 16 - Resultados dos ensaios tribológicos	88

Lista de Símbolos e Siglas

I_0 -	Intensidade (W/ cm^2)
Flu -	Fluência (J/ m^2)
PPP -	Pontos por polegada quadrada
DPI -	Dots per inch
μ -	Coefficiente de atrito
Vp -	Volume perdido
Q -	Taxa de desgaste (mm^3/m)
K -	Coefficiente de desgaste ($\text{mm}^3/\text{N.m.}$)
CMC -	Carbox Metil Celulose
HV -	Hardness Vickers
MEV -	Microscopia eletrônica de varredura
MO -	Microscopia óptica
EDX -	Energy Dispersive X-ray Fluorescence Spectrometer
EDS -	Energy-Dispersive X-ray

Sumário

1.0	Introdução.....	1
2.0	Revisão da literatura.....	2
2.1	- Estado da arte em tratamentos de superfície por laser em aços	2
2.2	- Laser.....	5
2.2.1	- Principais parâmetros do laser	7
2.2.2	- Dependência dos parâmetros nos processos desejados.....	14
2.2.3	- Processos de tratamento superficial por laser	16
2.3	Equações de Aquecimento.	19
2.4	- Interação da radiação eletromagnética com a matéria	19
2.5	- Tipos de Atrito e Desgaste.....	22
2.5.1	- Atrito deslizante	22
2.6	- Contatos mecânicos entre superfícies	26
2.6.1	- Desgaste	28
2.6.2	- Teste de desgaste.....	30
2.6.3	- Taxa de desgaste (Q).....	33
2.6.4	- Coeficiente de desgaste (K)	34
3.0	Materiais e Métodos.....	35
	Metodologia experimental e técnicas de caracterização utilizadas.....	35
3.1	- Preparação dos corpos-de-prova (cp) de aço AISI 52100.....	36

3.2 - Preparação da solução a base de grafita.....	36
3.3 - Recobrimento por meio de pulverização das amostras de aço AISI 52100	39
3.4 - Laser de CO ₂ de 50W	40
3.4.1 - Parâmetros de processamento laser.....	43
3.5 - Técnicas de caracterização utilizadas	44
3.5.1 - Ensaio de dureza Vickers	45
3.5.2 - Análise química por Espectroscopia Dispersiva de raios - X (EDS)	45
3.5.3 - Técnica complementar de análise química por espectroscopia de fluorescência de raios X. ...	45
3.5.4 - Microscopia eletrônica de varredura (MEV)	47
3.5.5 - Difractometria de raios - X	47
3.5.6 - Ensaio tribológicos	48
4.0 - Resultados e Discussões	52
4.1 - Morfologia do material particulado de grafita	52
4.2 - Preparação da solução de grafita.....	54
4.3 - Análise microestrutural do aço AISI 52100 sem tratamento laser.....	57
4.3.1 - Microscopia óptica e eletrônica de varredura (MEV) do aço AISI 52100.....	57
4.3.2 - Dureza do substrato de aço AISI 52100.....	59
4.4 - Resultados referentes às amostras tratadas com laser de CO ₂ (pré-seleção dos parâmetros).....	60
4.5 - Caracterização das amostras tratadas por laser	66
4.5.1- Perfil de dureza Vickers.....	66
4.5.2 – O MEV do revestimento	73

4.5.3 - Difractometria raios-X (DRX).....	79
4.5.4 - Análise dos constituintes da camada tratada por EDS	82
4.5.5 - Análise química por Fluorescência de raios - X	85
4.5.6 - Ensaio de desgaste.....	86
4.5.7 - Coeficiente de atrito	90
5.0 - Conclusões	99
6.0 - Sugestões para Trabalhos Futuros	101
7.0 - Referências	102
Anexo 1A - Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....	107
Anexo 1B - Perfis de Dureza Vickers	108

1.0 Introdução

Na indústria de construção de máquinas ou de componentes mecânicos, um importante fenômeno a ser analisado é o atrito entre as partes que mantêm contato mútuo. Sabe-se que em muitos casos o atrito e o desgaste, em geral, limitam a vida útil das máquinas provocando desde geração de calor a folgas excessivas entre os componentes.

Desta maneira, busca-se a eliminação ou redução destes fenômenos para elevar ao máximo a vida útil dos componentes. Utiliza-se para isto, por exemplo, filmes fluidos, tratamentos térmicos, pinturas, etc. [1, 2].

Na maioria dos casos, os componentes mecânicos, como: engrenagens, fusos, guias lineares, etc, são confeccionados com aços tratados termicamente, cuja resistência ao desgaste, corrosão e a fadiga na superfície de contato são pré-requisitos. Dentre os principais aços aplicados que se enquadram neste pré-requisito destacam-se os aços AISI 52100, 4320, M50 dentre outros [1].

O fato da superfície ter exigências estruturais específicas e distintas do restante do material tem levado ao desenvolvimento da Engenharia de superfície, especificamente, os tratamentos superficiais [2,3].

Dentre as técnicas de tratamento de superfície, as que utilizam laser para promover alterações nas propriedades mecânicas de dureza e resistência ao desgaste, vêm sendo cada vez mais aplicadas, pois em um mesmo processo é possível promover um tratamento de têmpera e fixação de um revestimento para atuar como lubrificante sólido [5].

Neste contexto, este trabalho propõe-se irradiar com um feixe de laser de CO₂ com intensidade de 70 kW /cm² a superfície de amostras do aço de alta resistência ao desgaste, o AISI 52100, previamente revestidas com uma solução de material particulado de grafita, produzindo dessa forma uma superfície além de recoberta com lubrificante sólido, tratada termicamente (têmpera).

2.0 Revisão da literatura

2.1 - Estado da arte em tratamentos de superfície por laser em aços

Os lasers, na atualidade, são amplamente utilizados em vários processos na cadeia de manufatura industrial, destacando-se a furação, a solda, a têmpera superficial e principalmente, o corte de metais.

Este aumento na utilização do laser foi sem dúvida motivada pela redução no custo do equipamento, pela oferta de lasers com diferentes comprimentos de onda e elevadas densidades de energia ou intensidades.

No passado devido alto custo do equipamento, era comum a utilização de lasers de baixa intensidade no processamento de materiais. Para suprir esta desvantagem, ou seja, processar materiais com lasers de baixa intensidade de energia, toda a energia fornecida pelo laser deveria ser entregue ao processo. Isto se dava mediante a utilização de materiais fotoabsorvedores da radiação incidente, como: grafita e disulfeto de molibdênio, aplicado na forma de pintura sobre a superfície a ser processada. Esta camada de pintura, por ser melhor absorvedor da radiação incidente do feixe de laser de CO₂ que o metal, favorece a absorção acoplamento da radiação, reduzindo drasticamente as perdas por reflexão.

Para se ter uma idéia deste fator de acoplamento, o aço reflete cerca de 90% da radiação proveniente de um laser de CO₂, por outro lado, esta camada de pintura superficial absorverá acima de 90% desta radiação, tornando-se aquecida e por fim, transferindo parte do calor absorvido para promover as transformações de interesse na superfície do metal [5].

Embora este processo de pintura para favorecimento do acoplamento seja um processo comum, não foi encontrado na literatura estudos sobre a possível fixação destes revestimentos de grafita ou de MoS₂ sobre o aço ou ainda suas propriedades tribológicas.

Mediante a utilização de um laser de CO₂, com potência de 50W e diâmetro de feixe de 300 μm (70 kW/cm²), Vasconcelos irradiou amostras de aço AISI M2 e verificou que além desta camada de revestimento de grafita permanecer sobre a superfície do metal e reduzir o coeficiente de atrito em cerca de 3 vezes, havia ainda a difusão de carbonetos para o interior da amostra metálica, aumentando a dureza superficial na ordem de 30% em uma extensão de 70 μm [5].

Basu utilizou um laser de CO₂ com potências de 2,5 kW e diâmetro de feixe de 17 mm. Com esses parâmetros de processamento obtiveram têmpera superficial da ordem de 300 μm de profundidade e dureza superficial de 1050 HV no aço AISI 52100. Ensaio tribológicos realizados neste material indicaram uma redução de 50% na taxa de desgaste. Nas regiões tratadas com laser, às análises realizadas por difratometria de raios-X (DRX) indicaram a predominância da fase martensítica [6].

Jendrzejewski avaliou o comportamento das tensões superficiais durante o processo de tratamento laser por refusão em uma liga de cobalto e níquel depositada na superfície do aço X₁₀Cr₁₃. Utilizou no experimento um laser de CO₂ de 1,2 kW, com diâmetro de feixe de 10 mm. As tensões oriundas do processo foram minimizadas com a redução da intensidade aplicada [7].

Yao utilizou-se um laser de CO₂ (potência de 7 kW) e diâmetro de feixe de 15 mm para promover a refusão da superfície, em um aço de médio carbono, usando para aumentar a

absorção da radiação laser um recobrimento de grafita. A extensão da zona tratada foi da ordem de 600 μm e apresentou dureza superficial de 900 HV contra 400 HV do substrato. As análises por DRX nas regiões tratadas indicam a predominância da fase martensítica [8].

Ganeev utilizou-se um laser de CO_2 (potência de 100 W e diâmetro de feixe de 0,1mm para produzir padrões de têmpera superficial em um aço carbono, previamente recoberto com grafita. A dureza resultante do tratamento por laser foi de 950 HV, com profundidade de 170 μm . O autor não cita a realização de ensaios tribológicos neste trabalho [9].

Outro trabalho que utilizou grafita como recobrimento foi realizado por Visscher, onde um laser de CO_2 (1,8 kW) promoveu padrões de dureza de 800 HV na superfície de um aço AISI 1045. Ensaos tribológicos indicam a redução do coeficiente de atrito. No entanto, durante o teste tribológico utilizou-se parafina como lubrificante [10].

Frente a estes resultados, neste trabalho será estudada a aplicação da grafita sobre a superfície do aço AISI 52100 por laser de CO_2 , com potência de 50 W e diâmetro de feixe de 300 μm (Intensidade de 70 kW/cm^2) objetivando identificar os parâmetros do laser como: velocidade de varredura, número de ciclos de aquecimento e resolução necessários para promover na superfície da amostra resistência ao desgaste e redução do coeficiente de atrito.

2.2 - Laser

A palavra Laser é o acrônimo do inglês de *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, ou seja, amplificação da luz por emissão estimulada de radiação [11].

O laser tornou-se uma ferramenta amplamente utilizada nas diversas áreas desde a biomedicina até a de processamento de materiais (corte, solda, etc.), graças as suas propriedades de baixa divergência de emissão (colimação) em um único comprimento de onda (monocromaticidade) e a capacidade de operação em elevadas densidades de energia. A Figura 1 apresenta o esquema básico de funcionamento de um sistema laser [12].

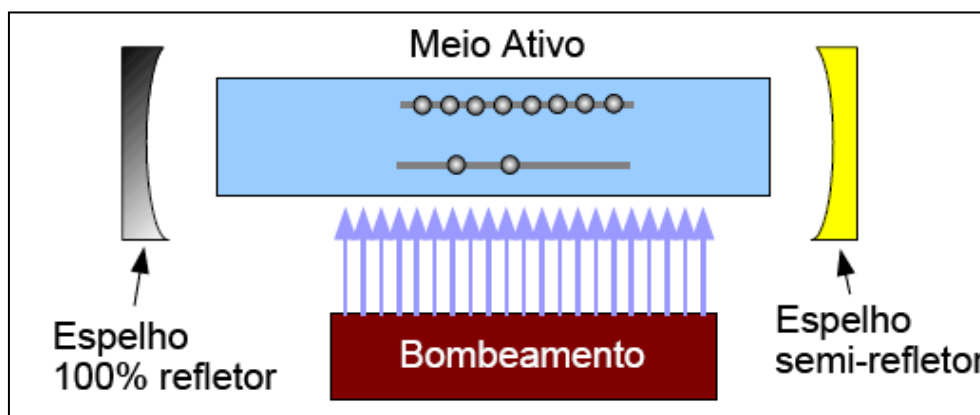


Figura 1 - Esquema básico de funcionamento de laser, adaptado de [10, 11].

Um laser é composto de forma simplificada por: meio ativo, uma cavidade ressonante e uma fonte de excitação. O meio ativo é o responsável pela geração de fótons. Os fótons gerados no meio ativo refletem-se totalmente no espelho da esquerda, Figura 1, contudo, parte destes fótons é extraído do sistema através do espelho da direita (semi refletor).

De acordo com o meio ativo, os tipos de lasers podem ser agrupados como se segue:

Laser de estado sólido

Consiste em um laser cujo meio ativo é um sólido, normalmente um cristal ou vidro, sua excitação é proveniente de uma lâmpada ou de outro laser, um exemplo deste tipo de laser é o Nd: YAG cujo comprimento de onda é $1,06 \mu\text{m}$.

Laser de corante

Os lasers de corante operam com um meio ativo contendo um corante orgânico diluído em um solvente líquido, sua fonte de excitação pode ser feita por lâmpadas de flash ou outros lasers. Corantes orgânicos complexos como a rodamina e a fluoresceína dissódica dissolvidas em solução de álcool são alguns exemplos de corantes utilizados.

Laser de estado gasoso

O laser de CO_2 é o exemplo mais conhecido de laser de estado gasoso normalmente formado pela mistura de gases N_2 , He e CO_2 e sua fonte de excitação mais comum pode ser feita por descarga elétrica DC ou por rádio frequência. O comprimento de onda típico deste laser é de $10,6 \mu\text{m}$.

2.2.1 - Principais parâmetros do laser

Os principais parâmetros de um feixe de laser são:

Comprimento de onda (λ)

Os comprimentos de onda dos lasers compreendem intervalos dentro do espectro eletromagnético, variando desde o ultravioleta até o infravermelho [11].

Em processamento de materiais a seleção adequada do melhor comprimento onda é de fundamental importância, pois cada material interage de maneira diferente com a radiação incidente, podendo refleti-la, absorvê-la ou transmiti-la.

Modo de operação

O modo de operação de um feixe de laser pode ser (a) contínuo (CW – do inglês Continuous Wave) (b) modulado e (c) pulsado. A Figura 2 apresenta estes modos de operação.

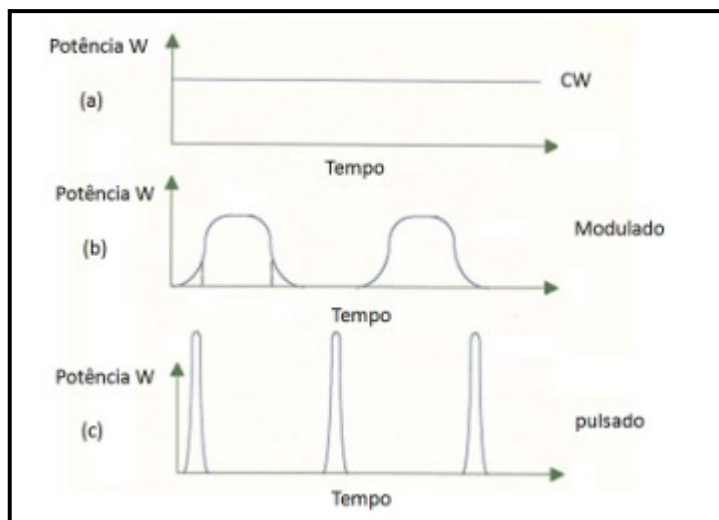


Figura 2 - Modos de operação do feixe de laser, adaptado de [11].

O modo de laser de onda continua é aquele que a potência não varia ou varia pouco em função do tempo. O modo pulsado é aquele na qual a variação da potência com o tempo é determinada por processos internos do meio ativo. O modo modulado é aquele na qual a variação da potência altera-se com o tempo.

Diâmetro do feixe

O diâmetro do feixe é o diâmetro de um “spot” que o feixe produz num alvo colocado num plano transversal a direção de propagação. A área limitada por uma circunferência com este diâmetro contém 86,5 % da energia ou potencia do feixe [11,12].

Cintura do feixe

A cintura do feixe é definida como o ponto de máxima concentração de energia do feixe, ou seja, o ponto onde o diâmetro do feixe é mínimo.

Ponto focal

O ponto focal é definido como o ponto onde se formaria a cintura de um feixe quando um feixe idealmente paralelo é focalizado por uma lente convergente. É importante observar que o ponto focal e a cintura do feixe não são necessariamente coincidentes, embora frequentemente essa diferença seja tão pequena que os dois conceitos sejam utilizados com o mesmo significado.

No caso de processos de tratamento de superfície, a localização e a forma do ponto focal em relação à superfície irão influenciar na densidade de potência. O foco do feixe pode ser focalizado abaixo, sobre ou acima da superfície da peça.

Distância focal

É a distância entre o plano principal de uma lente e o ponto focal. Quando o ponto focal encontra-se exatamente sobre a superfície do material dizemos que o feixe está focado no material.

Velocidade de varredura

A velocidade de varredura é definida como a velocidade relativa de deslocamento do feixe laser ao movimentar-se sobre uma superfície [11,12].

Intensidade

A intensidade (I_0) do feixe laser é o quociente da potência do feixe pela sua área, a Equação 1 apresenta esta relação [10,11].

$$I_0 = \frac{2P}{(\pi r^2)} \quad (1)$$

onde P é a potência (W), r é a metade do diâmetro do feixe (m).

Tempo equivalente de pulso

O tempo de pulso (t_p) corresponde a duração do pulso do laser, a Equação 2 apresenta esta relação.

$$t_p = \frac{d}{v} \quad (2)$$

onde, d é o diâmetro do feixe (m) e v é a velocidade de varredura (m/s). É equivalente à duração de um pulso com duração t_p .

Fluência

A Fluência (Flu) é a razão entre a energia (produto da potência do feixe pelo tempo de pulso) do pulso de laser (em *Joules*) pela área da região iluminada (m^2). A Equação 3 apresenta esta relação.

$$Flu = \frac{P \times t_p}{\left(\pi \times \left(\frac{d^2}{4}\right)\right)} \quad (3)$$

onde P é a potência (W), t_p é o tempo de pulso (s) e d é o diâmetro do feixe (m).

Modo espacial

Normalmente, um sistema gera ondas eletromagnéticas com vários modos longitudinais e transversais.

Ao realizar-se um corte transversal (plano perpendicular) a distribuição da intensidade em relação ao eixo de propagação obtém-se um padrão espacial da radiação eletromagnética para se caracterizar o feixe, conhecido como TEM (Transversal Elétrico e Magnético). Geralmente, o feixe é composto pela superposição de diversos modos transversais e suas representações são feitas por índices que indicam a ordem do modo. Estes descrevem a variação da intensidade em um plano perpendicular a direção de propagação do feixe. O modo TEM_{00} é o que se denomina modo fundamental (Figura 3) [11].

O modo TEM_{00} é o de mais baixa ordem e apresenta uma distribuição gaussiana de intensidade. Este modo possui a menor divergência o que torna o mesmo eficiente para o processo de tratamento de superfície. Para quantificar a qualidade do feixe de laser compara-se o produto do ângulo de divergência e o diâmetro no ponto focal entre um feixe real e o feixe gaussiano ideal. A razão entre estes dois produtos é o fator conhecido como M^2 .

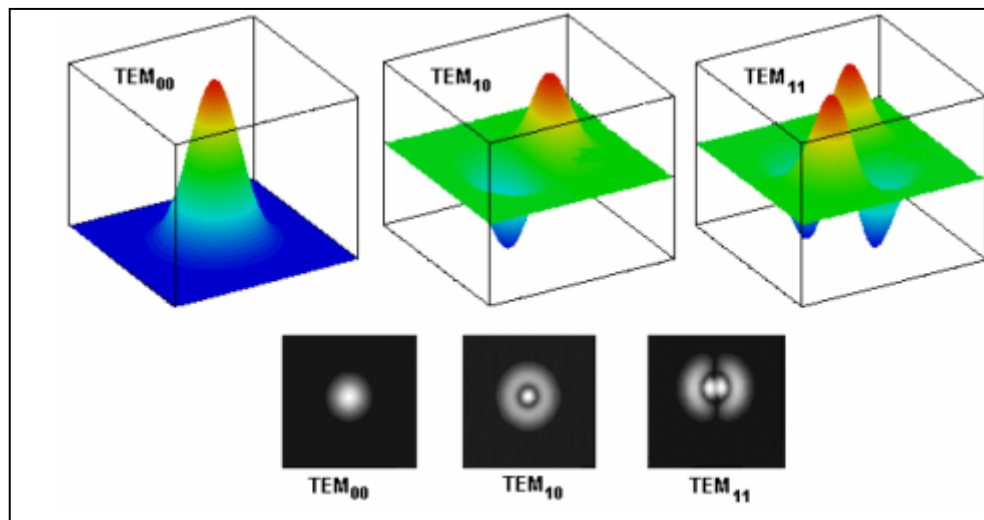


Figura 3 – Distribuição do campo elétrico na secção transversal do feixe laser, adaptado de [11, 12].

Resolução (PPP)

A resolução é um parâmetro que pode ser indicado como o número de pontos por polegada quadrada. Este parâmetro surge do fato do laser, no caso o equipamento da marca *Synrand* utilizado ter feixe de laser guiado sobre a superfície do metal a ser processada por um conjunto de espelhos. Para melhor entender este parâmetro, observe o esquema apresentado na Figura 4.

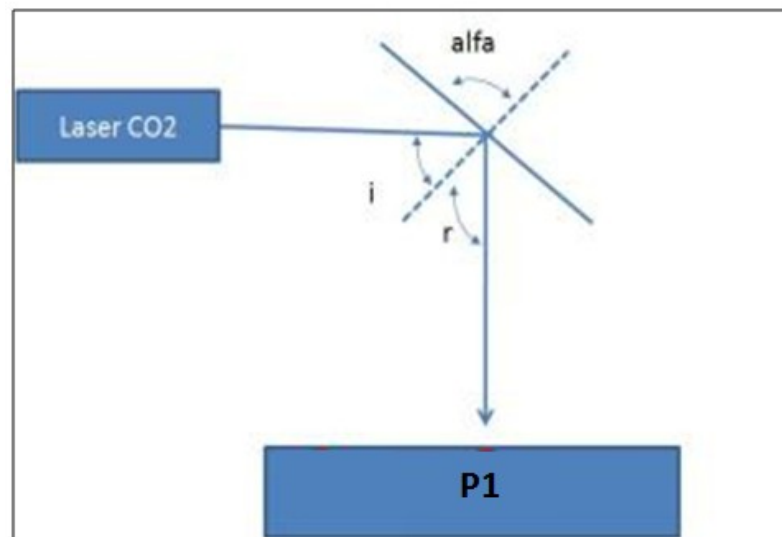


Figura 4 - Desenho esquemático de um feixe de laser guiado por um espelho plano, incidindo sobre uma amostra num ponto P1, adaptado de [13]

O feixe de laser atinge a amostra exatamente no ponto P1, conforme Figura 4. Para que o feixe se desloque para um novo ponto P2, o espelho plano terá que se deslocar um determinado ângulo, saindo de α para α' , conforme apresentado na Figura 5.

A razão entre a menor distância, entre P1 e P2 que este conjunto de espelhos pode disparar os pulsos de laser, guiado pelo espelho determina a resolução.

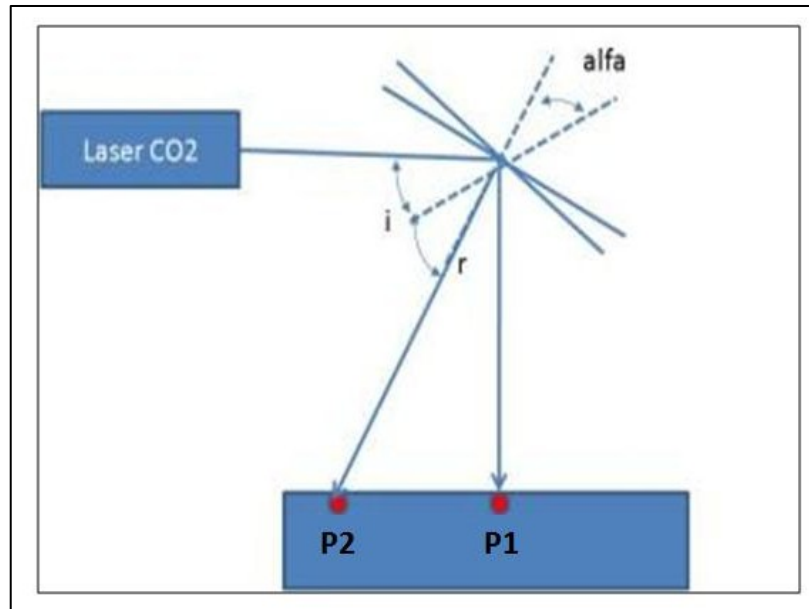


Figura 5 - Desenho esquemático de um feixe de laser guiado por um espelho plano, incidindo sobre uma amostra num ponto P2, adaptado de [13]

Para o equipamento utilizado, a resolução máxima corresponde a 900 PPP, ou seja, ocorrerá a sobreposição de um ponto sobre o outro.

Quando o equipamento está selecionado para disparar 50 pontos por polegada quadrada (PPP) ocorre o que esta indicando na Figura 6. Como o diâmetro do feixe é de $300\ \mu\text{m}$, a distância entre cada pulso é da ordem de $0,508\ \text{mm}$. Contudo, aumentando-se a resolução para 85 PPP, por exemplo, os pulsos disparados sobre a superfície da amostra se tocam uns nos outros.

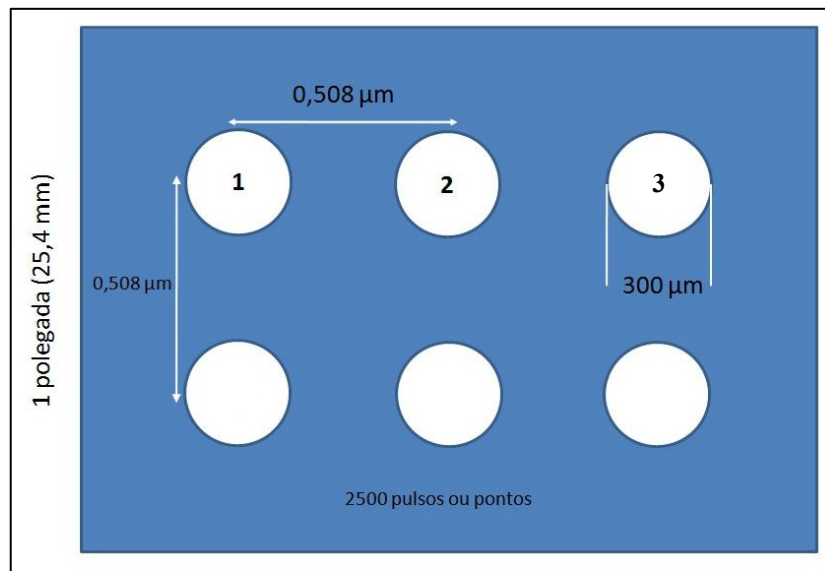


Figura 6 - Ilustração de 50PPP. Observa-se que quando $R = 50$ a distância de pulso a pulso é de 0,508 mm (25,4 mm / 50 pulsos).

Aumentando a resolução para 150 PPP ocorre a sobreposição de um pulso sobre o outro de 50%.

Aumentando para uma resolução de 300 PPP a distância entre os centros dos pontos será de 0,086 mm e para 600 PPP a distância será de 0,042.

O aumento da resolução faz com que cada pulso dê certa contribuição de calor ao ponto anterior. Este conceito foi amplamente discutido no trabalho de REIS J.L [13].

2.2.2 - Dependência dos parâmetros nos processos desejados

Conforme apresentado anteriormente, existem vários parâmetros a serem considerados no processamento de materiais por laser, dentre os quais podemos destacar a densidade de potência (ou intensidade) e o tempo de interação.

A Figura 7 apresenta alguns processos típicos em função da variação destes parâmetros [12].

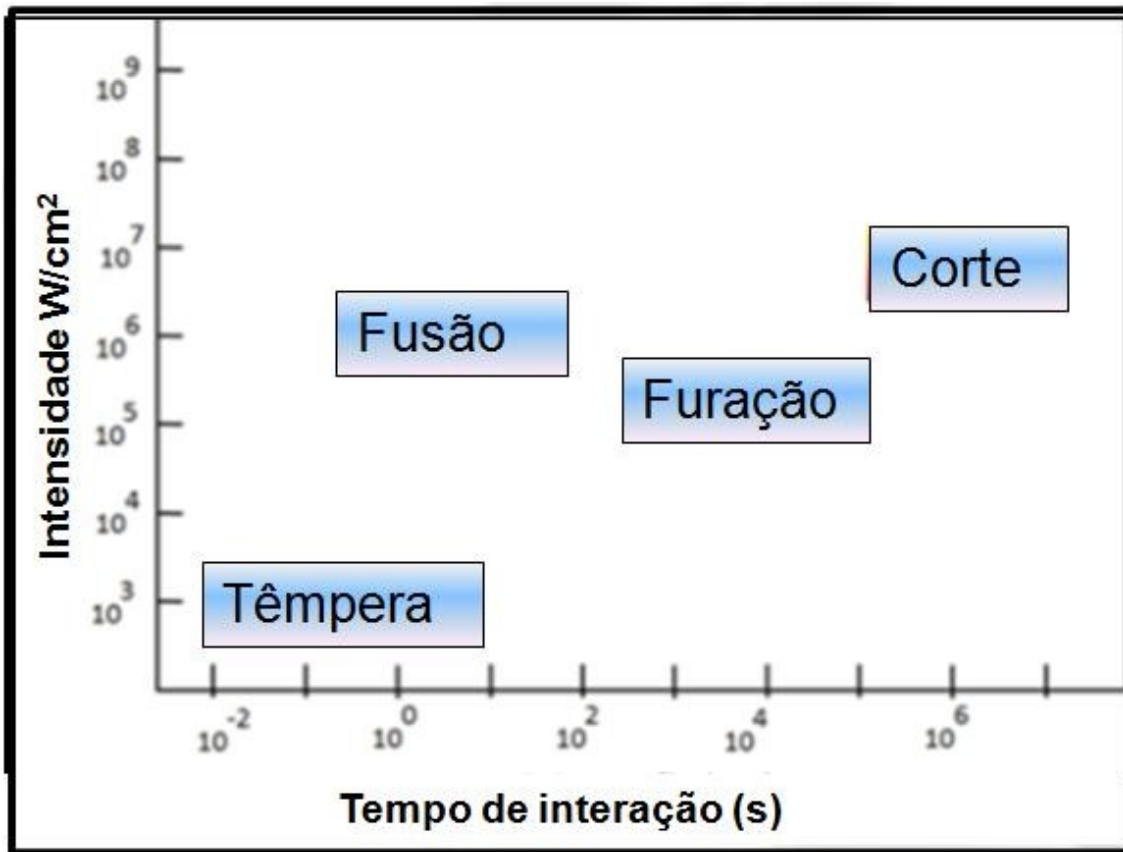


Figura 7 - Variação da densidade de potência em função do tempo de interação, adaptado de [12].

Observa-se que conforme o processo desejado altera-se o tempo ou a intensidade de energia. Por exemplo, utiliza-se a baixa intensidade de energia com curto tempo de interação da radiação com a matéria, para realizar o processo de têmpera superficial (sem fusão).

Se aumentarmos a densidade de potência e o tempo de interação ocorrerá fusão superficial, no entanto se mantivermos a mesma densidade de potência e aumentando somente o tempo de interação, ocorrerá o processo de furação e o corte.

2.2.3 - Processos de tratamento superficial por laser

Os processamentos de materiais por laser podem envolver fusão ou não [14]. Dessa maneira, os que envolvem fusão localizada podem ser divididos em três subcategorias, descritos a seguir.

Refusão a laser (Laser Remelting)

Neste processo a superfície do material é fundida e, devido à alta difusividade térmica do substrato, a mesma é solidificada rapidamente.

Formação de ligas na superfície (Laser Alloying)

Inicialmente, deposita-se por um processo conveniente uma camada de determinada composição química sobre o substrato. Esta camada é então solubilizada no substrato através da ação laser.

Deposição a laser (Laser Cladding)

Neste processo um pó com granulometria controlada é pulverizado sobre a superfície do metal. A incidência do feixe de laser no ponto de ação funde o pó na superfície do metal. O material depositado na superfície pode possuir composição e propriedades diferentes do substrato.

Têmpera por laser (laser hardening)

A têmpera por laser é um método autógeno de produzir padrões de resistência e durezas localizados. O feixe de laser irradia toda a superfície de forma a aquecê-la, porém sem causar fusão ou ablação. Ligas ferrosas são particularmente, mais suscetíveis a esse tratamento por laser devido ao processo de formação da estrutura martensítica [3,14].

O princípio da têmpera por laser é similar aos métodos convencionais (têmpera por chama, indução, etc.). No entanto, os tempos envolvidos no processo são extremamente curtos, de 0,1 a 3 segundos [15,16]. Um perfil de dureza característico de uma camada tratada por laser de fibra com potência de 2 kW (potência variável) e diâmetro de feixe de 1,9 mm é apresentado na Figura 8.

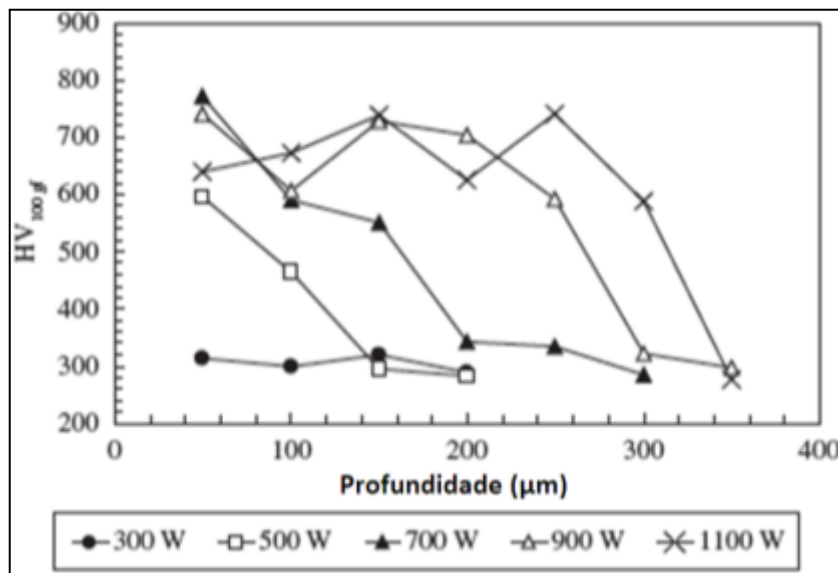


Figura 8 - Perfil de dureza de um aço tratado por laser, adaptado de [16].

A profundidade da região tratada depende principalmente, de parâmetros de processamento do laser como: velocidade, densidade de energia e intensidade. No caso, para uma potência de 300 W a dureza atingida para um aço 4340 é de 300HV.

No entanto, se aumentarmos a potência para 700 W ocorre um aumento na dureza atingindo um patamar de 800 HV. Entretanto, esse aumento é limitado pela fusão e/ ou ablação do material. Ao irradiar a superfície com 1100 a ocorre a redução da dureza ocasionada, possivelmente, pela fusão.

As profundidades das zonas tratadas termicamente, por laser são apresentadas na Figura 9.

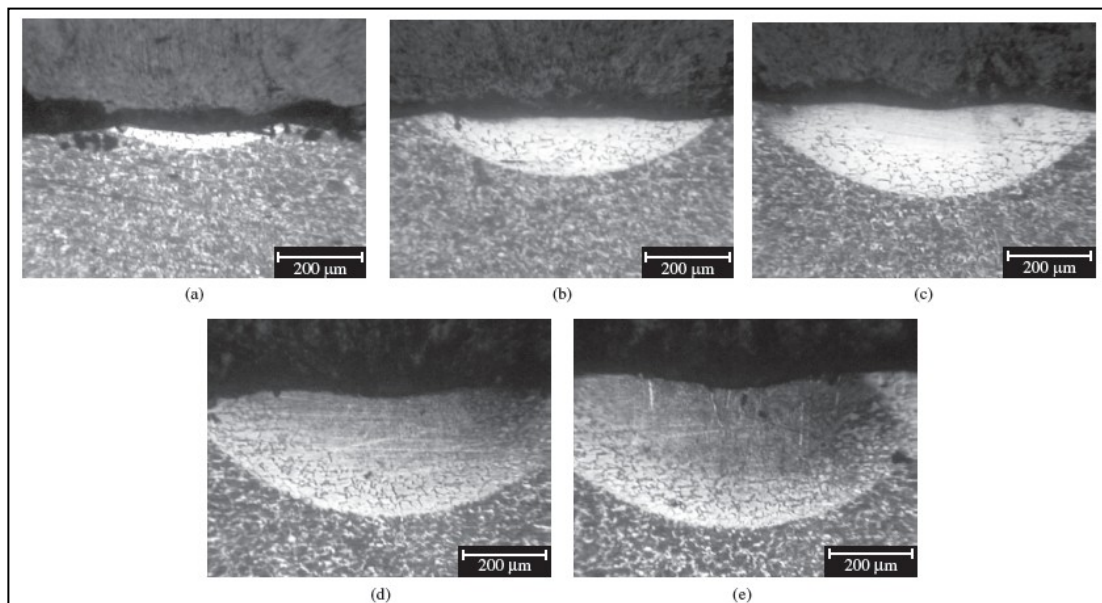


Figura 9 - Profundidade de penetração em função da densidade de energia adaptado de [16].

As micrografias apresentadas na Figura 9 são referentes à secção transversal, das amostras irradiadas com laser de: 2 kW de potência, diâmetro de feixe de 1,9 mm, velocidade de 120 rpm e com diferentes níveis de potência: (a) 300W, (b) 500W, (c) 700W e (d) 1100W. As profundidades das zonas tratadas variam conforme a densidade de energia entregue a superfície do material.

2.3 Equações de Aquecimento.

Os tempos envolvidos no processo de têmpera a laser são extremamente curtos (0,1 a 3 segundos), dessa maneira, a fonte de energia pode ser considerada instantânea.

Carlaw e Jaeger [17], apresentaram a solução matemática para descargas instantâneas de energia.

A partir da equação de Fourier tem-se:

$$\Delta T = \left(\frac{Q}{4 \cdot \rho \cdot c (\pi t \alpha)} \right) \exp \left[\frac{-R^2}{4 t \alpha} \right] \quad (7)$$

onde $\Delta T = T - T_0$; e T é a temperatura do ponto de interesse em determinado instante de tempo em K (Kelvin); T_0 é a temperatura ambiente; Q é a quantidade de calor em J; ρ   a massa específica do material em Kg/m^3 ; c o calor específico do material em J Kg^{-1} ; t o tempo em segundos; α a difusividade térmica em m^2/s e R , a posição no espaço do ponto de interesse em metros em relação à fonte de energia [17].

2.4 - Interação da radiação eletromagnética com a m teria

Quando o feixe de radiação eletromagnética incide sobre a superfície de uma amostra metálica, uma fração é refletida (I_R), parte é transmitida (I_T) e uma parte é absorvida (I_A) [15].

O coeficiente de absorção (β) depende dentre outros fatores: do meio, do comprimento de onda (λ) e da intensidade, sendo que somente a parte da radiação que é absorvida é de interesse para a área de processamento de materiais por laser, por esta causar as transformações de interesse ao material. A Figura 10 apresenta estas interações entre a radiação incidente e a matéria.

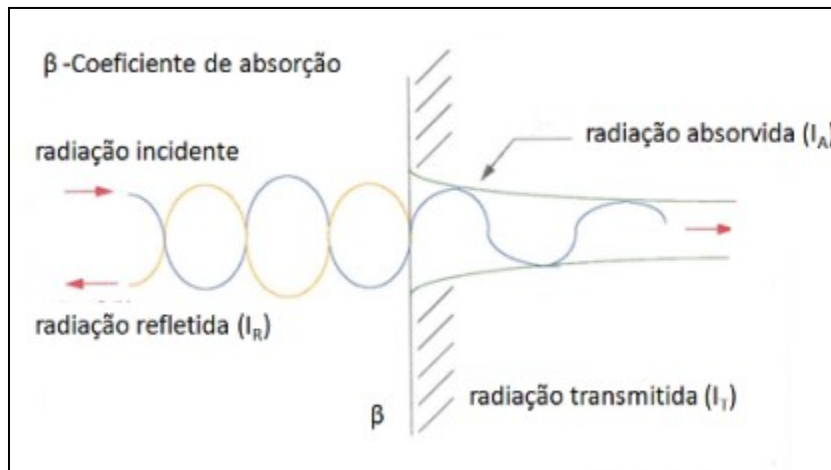


Figura 10 - Modelo de interação da radiação com a matéria, adaptado de [15].

No balanço energético da interação do feixe de laser com a matéria, além da energia absorvida, deve-se contabilizar a energia perdida pela refletividade [15].

A Figura 11 apresenta cinco curvas de refletividade de diferentes materiais em temperatura ambiente em função do comprimento de onda (λ) [14,15].

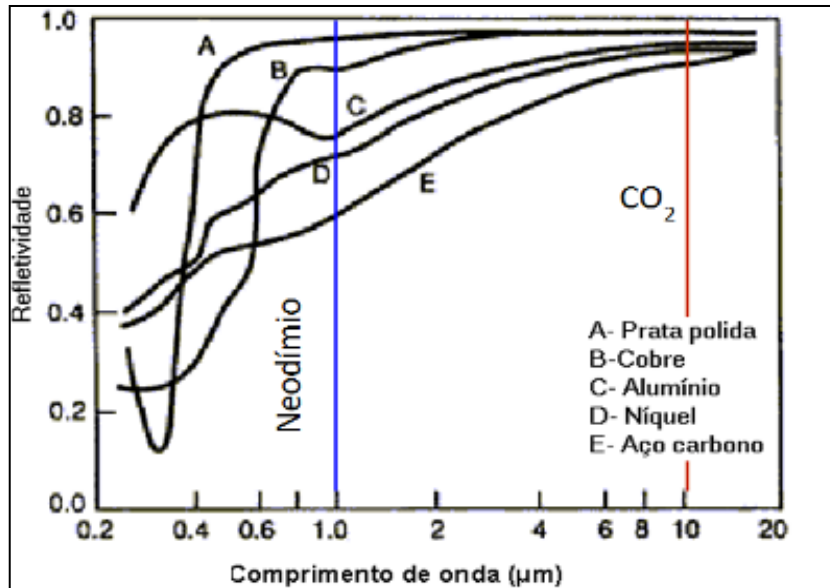


Figura 11 - Refletividade de alguns materiais, adaptado de [15].

Para $\lambda = 10,6\mu\text{m}$ (laser de CO_2) observa-se que a refletividade para o aço carbono (E) é da ordem de 85% enquanto para um $\lambda = 1,06\mu\text{m}$ (laser de neodímio) é superior a 50%.

Para reduzir a refletividade e consequentemente, aumentar a eficiência da absorção da energia pelo material. Existem inúmeros métodos que podem ser utilizados como: aumento da rugosidade, polarização da luz, mudança no ângulo de incidência do feixe, pré-aquecimento do substrato ou aplicação de recobrimentos. A aplicação da grafita é o recurso mais popular e atrativo para aumentar a absortividade da superfície normalmente aplicada na forma de pintura [4, 11, 12, 13, 14].

2.5 - Tipos de Atrito e Desgaste

2.5.1 - Atrito deslizante

Não há consenso no que se refere às verdadeiras causas do fenômeno de atrito sólido, sabe-se apenas que este se deve a inúmeros mecanismos que provavelmente agem de forma conjunta, porém aparecem em diferentes proporções e em diferentes circunstâncias. Pode-se definir, para uso neste trabalho que o fenômeno de atrito entre corpos sólidos seria aquele que causa “a resistência ao movimento de um corpo sólido sobre outro” [1].

Segundo a norma ASTM Standard G-40-93 [18] relativos à terminologia padrão para erosão e desgaste, a força de Atrito (F) é “A força tangencial resistente na interface entre dois corpos, quando sob a ação de uma força externa, um corpo move-se ou tende a mover-se em relação ao outro.”

O coeficiente de Atrito (μ): “É a razão adimensional da força resistente ao movimento tangencial entre dois corpos em relação à força normal (C) pressionando estes corpos um contra o outro” assim:

$$\mu = \frac{F}{C} \quad (4)$$

O atrito não é apenas uma propriedade do material, é a propriedade somada às condições existentes durante o movimento [19].

Contudo, um número incontável de modificações pode ocorrer durante o processo de contato entre os corpos (deslizamento). Alguns exemplos dessas variáveis são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Fatores que influenciam o atrito

Categoria	Fator
Geometria de contato	Os contatos podem ser conformes e não conformes
Propriedades lubrificantes	Regime de lubrificação, espessura do revestimento
Movimento relativo	Movimento linear ou recíproco
Força aplicada	Pressão de contato
Terceiros corpos (escombros)	Características das partículas imersas no lubrificante, interface entre superfícies de contato
Temperatura	Efeitos térmicos nas propriedades do material

Correlacionar quais os efeitos que tangem o contato entre duas superfícies e que contribuem diretamente para o atrito é ainda um dos maiores desafios para a tribologia. Para facilitar o entendimento do que é o atrito o mesmo foi dividido em:

Atrito em Metais

Quando superfícies metálicas livres de elementos graxos deslizam entre si, o tipo de atrito encontrado varia de acordo com a natureza dos materiais, cujos comportamentos mais comuns são os que seguem [19,20].

Atrito Severo

O coeficiente de atrito é elevado, normalmente compreendem-se no intervalo de 0,9 a 2,0. Uma inspeção da superfície após o escorregamento mostrará poucos sulcos (largos e irregulares) causados por pontos salientes de uma superfície em contato com a outra [19].

Atrito Moderado

O coeficiente de atrito é baixo, normalmente compreende-se no intervalo de 0,7 a 0,3. Uma inspeção da superfície revelará um grande número de linhas finas onde pequenas saliências formam os sulcos (bem definidos e regulares) [19,20].

Atrito em Não Metais

Apesar da grande variedade de substâncias não metálicas que estão em contato, por exemplo, sólidos carbonosos, pode-se verificar que as características de atrito são uniformes. A Tabela 2 apresenta alguns valores de coeficiente de atrito para diferentes materiais [21].

Tabela 2 - Variação do coeficiente de atrito deslizante em diferentes materiais

Classificação	Material	Variação do coeficiente de atrito
Sólidos lamelares	Grafita em aço	0,01 ~ 0,7
Sólidos Carbonosos	Diamante em Diamante	0,02 ~ 1,00
Metais	Alumínio em Aço doce	0,47 ~ 0,61
Materiais orgânicos e	Ceras em ferro fundido	0,20 ~ 0,40
Polímeros	Teflon em aço	0,04 ~ 0,15

Os sólidos lamelares possuem sistemas estruturais dispostos em camadas, no interior das quais os átomos estão fortemente ligados, mas que estão separadas por distâncias relativamente grandes, mantendo-se unidas por forças residuais fracas.

Na grafita, que é uma forma cristalina de carbono, a distância entre os átomos dentro da camada é $1,4 \cdot 10^{-8}$ cm, enquanto que entre camadas é de ordem de $3,4 \cdot 10^{-8}$ cm (Figura 12) [21,22].

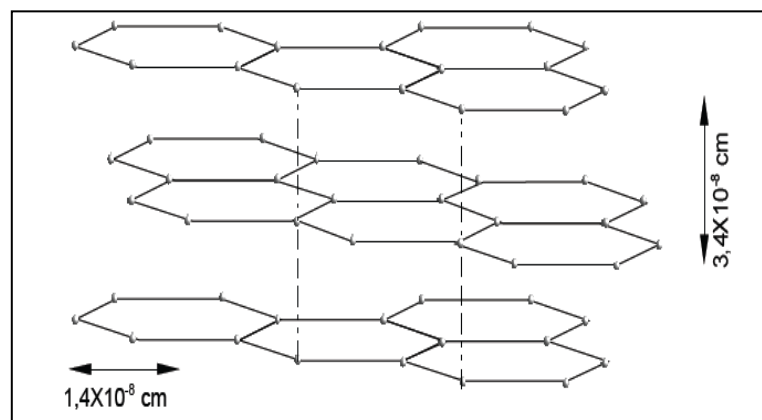


Figura 12 - Representação esquemática dos planos estruturais da grafita, adaptado de [21, 22].

A estrutura lamelar da grafita é indicada para aplicações em atmosfera ambiente, pois o vapor de água é um componente necessário para o efeito lubrificante do material. A absorção de água reduz a energia de ligação entre os planos hexagonais para um nível menor que a energia de adesão possibilitando o deslizamento [21,22]. O coeficiente de atrito da grafita varia de 0,1 a 0,7.

A classificação da grafita pode ser realizada quanto à forma, tamanho e tipo.

O tipo de grafita classifica-se conforme descrito a seguir:

Tipo A - Lamelas finas e uniformes distribuídas ao acaso;

Tipo B - O centro é formado por grafitas finas e as bordas por grafita grosseira, este tipo também é conhecido como tipo roseta;

Tipo C - Conhecida como grafita primária, com veios grandes;

Tipo D - Grafita fina com distribuição ao acaso;

Tipo E - Veios finos com orientação definida.

2.6 - Contatos mecânicos entre superfícies

Segundo Johnson [23], os contatos podem ser conformes ou não conformes. Um contato é conforme quando as superfícies dos dois corpos encaixam-se perfeitamente com pouca ou nenhuma deformação. Corpos que apresentam perfis de superfícies diferenciados são ditos como contatos não-conformes. Quando tais superfícies são colocadas em contato, num primeiro instante, não tendo deformação das superfícies, tem-se um contato pontual. A Figura 13 apresenta esses contatos.

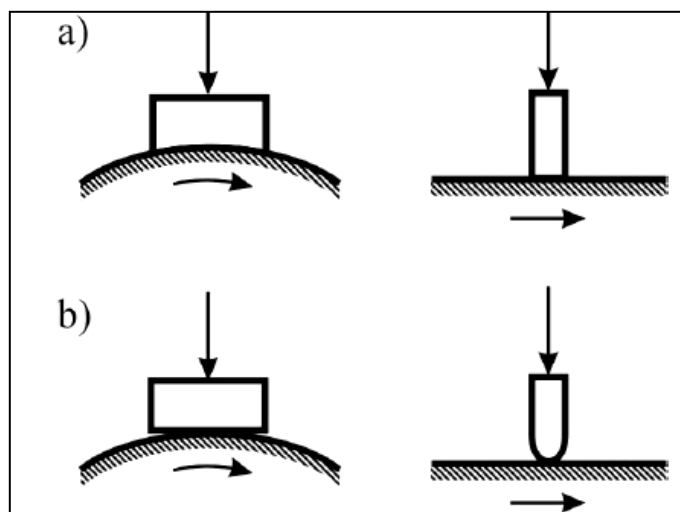


Figura 13 - a) contatos conformes; b) contatos não-conformes, adaptado de [1, 23].

No entanto, independente do tipo de contato, quando uma ou ambas as superfícies são recobertas por um revestimento, quatro parâmetros principais podem controlar o comportamento tribológico. Esses parâmetros estão relacionados à dureza do revestimento, do substrato, espessura do revestimento, rugosidade e o tamanho dos escombros (terceiro corpo) presentes no contato [22]. No contato entre superfícies recobertas com revestimentos ou filmes, os mecanismos tribológicos são influenciados pelas seguintes características de superfície:

Dureza do revestimento

Revestimentos macios em substratos duros reduzem o atrito, devido à tensão de cisalhamento ser menor que do substrato. Um revestimento duro sobre um substrato macio pode provocar aumento na resistência ou ainda, provocar a deformação do substrato [22, 23].

Espessura do revestimento

A espessura do revestimento pode influenciar no comportamento do atrito e no sistema tribológico devido: a formação de sulcos (ranhuras), o aumento da resistência ao deslizamento, a deformações plásticas ou a penetração do revestimento no substrato. [22, 23].

Rugosidade

De acordo com a rugosidade das superfícies em contato, pode haver formação de sulcos. Se a superfície possuir uma elevada rugosidade e receber um revestimento espesso, a área específica superficial será reduzida. No entanto, se o revestimento aplicado for fino, esta redução de área superficial não é observada [23].

Escombros (terceiro corpo)

O terceiro corpo são partículas formadas pela interação entre as asperezas existentes nas superfícies em contato. No entanto, podem vir de fontes externas ou formadas pelo desgaste. O encobrimento dos escombros, nas rugosidades entre as superfícies de contato podem gerar, desde o esmagamento dos escombros, embutimento ou a difusão dos mesmos nas superfícies [22, 23].

Outro fenômeno, que provém do contato entre superfícies é o desgaste que abordaremos a seguir.

2.6.1 - Desgaste

O desgaste pode ser definido com a remoção gradual de partículas discretas de superfícies em contato e com movimento relativo, devido, predominantemente, a ações mecânicas.

Os principais modos de desgaste são apresentados na Figura 14 [21,22].

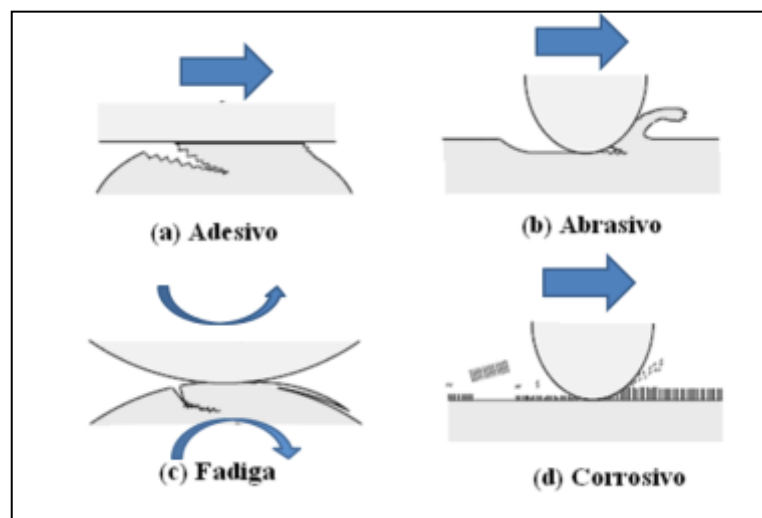


Figura 14 - Modos de desgaste, mais representativos, adaptados de [21,22].

(a) Desgaste por Adesão

O desgaste por adesão pode ser definido como o caldeamento (soldagem a frio) de pontos de contato entre superfícies. As junções das superfícies quando submetidas a um movimento relativo de escorregamento, podem ser rompidas. O local de rompimento dependerá das condições superficiais, distribuição de temperatura, características de encruamento, geometria local e distribuição de tensões. Entre os modos de desgaste o maior responsável por danos superficiais é o desgaste por adesão [1, 22].

(b) Desgaste por abrasão

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. Dessa interação entre as superfícies ocorreram ranhuras (sulcos) e o material removido das ranhuras é deslocado na forma de partículas de desgaste, geralmente soltas. Este tipo de fenômeno é facilmente observado nos processos de lixamento e polimento [21,22].

(c) Desgaste por fadiga superficial (rolamento)

Esta forma de desgaste decorre do carregamento dinâmico de superfícies conformes, esse carregamento resulta no acúmulo de tensão e deformações plásticas, que após um número finito de ciclos de carga podem conduzir ao nucleamento e crescimento de uma trinca [1, 23].

(d) Desgaste por corrosão

Esta forma de desgaste ocorre quando o ambiente que envolve a superfície de deslizamento interage quimicamente com ela. Se o produto da reação é raspado da superfície, desgaste corrosivo ocorre e as partículas podem interagir ou não com a superfície num processo abrasivo [21, 23].

Vale salientar, que dificilmente ocorre apenas um mecanismo de desgaste, geralmente há uma combinação entre eles. Além dos quatros desgastes básicos citados existem outros tipos como: erosão, cavitação, impacto, *fretting*, etc que não foram abordados neste trabalho.

2.6.2 - Teste de desgaste

De uma forma geral existem inúmeros mecanismos de desgaste, que podem ocorrer simultaneamente. Dessa maneira, existem diversos tipos de ensaios para quantificar e identificar o tipo de desgaste dos quais podemos citar: *Scratch tester*, *Drum wear test*, *Rolling wear test* e *Pin on disk test* entre outros.

Os principais parâmetros associados aos ensaios para a avaliação do desgaste são: par testado, tipo de material, tempo de ensaio, força aplicada, temperatura e regime de lubrificação.

Neste trabalho o ensaio de desgaste adotado foi o tipo pino contra disco, onde o pino adotado é em formato de esfera [2, 22, 23, 24]. A equação fenomenológica que geralmente é utilizada é a equação de Archard (8). Essa equação assume que o material a ser perdido está relacionado com a forma e tamanho da área de contato nas asperezas, o desgaste com o carregamento e a dureza a superfície do material.

Conforme a dureza das interfaces em contato pode ocorrer desgaste predominante da esfera, Figura 15 (a), predominante no disco, Figura 15 (b) ou em ambas as superfícies 15 (c).

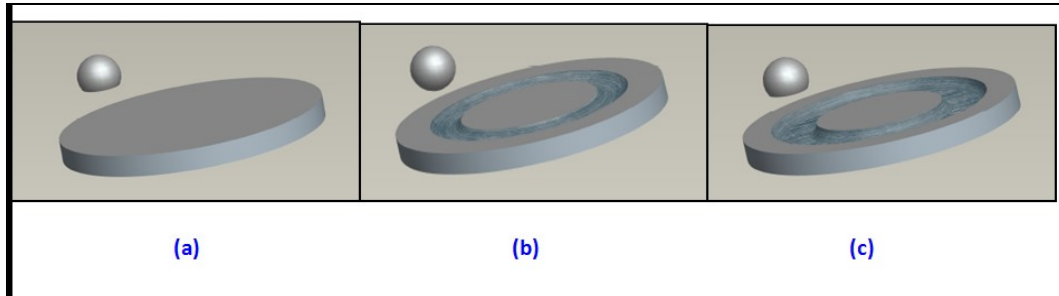


Figura 15 - Representação esquemática do contato da esfera contra disco. De acordo com a dureza do material o desgaste pode ser predominante na esfera (a), no disco (b) ou em ambos (c), adaptado de [22].

Se o desgaste na extremidade esférica apresenta forma elíptica significa que o desgaste está relacionado ao desgaste do outro material e quanto mais profundo esse desgaste, maior será a faixa de contato das laterais transversais do pino (esfera) [2, 21, 22].

Segundo a ASTM G99 [18] e o trabalho de Pinto [2] as medidas de desgaste devem ser representadas como o volume perdido em milímetros cúbicos para esfera e para disco (Figura 16).

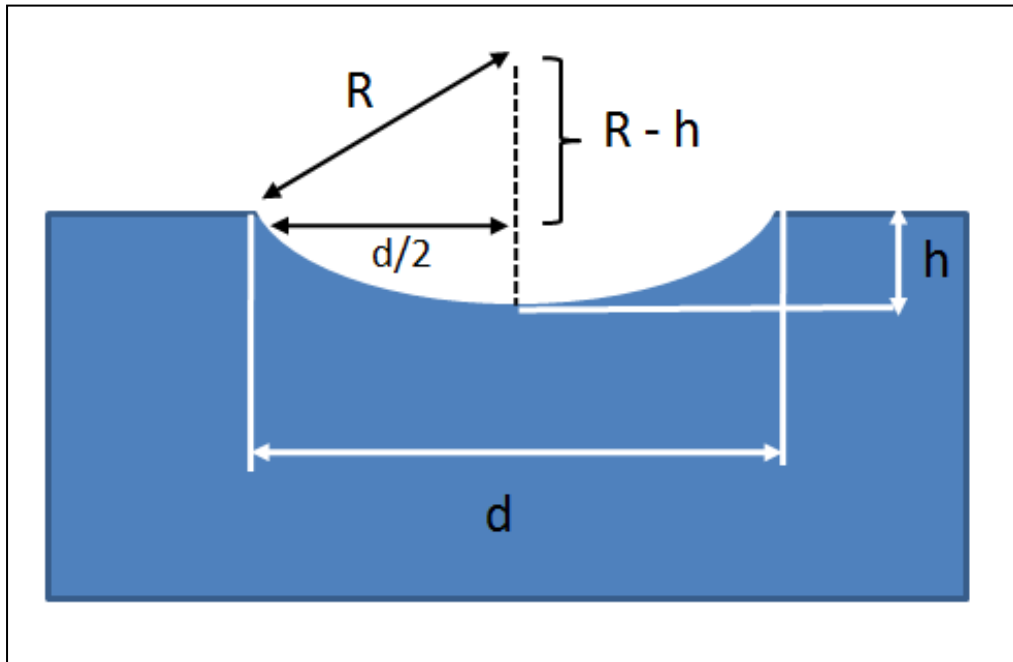


Figura 16 - Modelo de perda de volume, adaptado de [2].

O volume da calota esférica é dado por:

$$V_p = \frac{\pi}{3} h^2 (3R - h) \quad (5)$$

onde: R é o raio de curvatura (ou raio da esfera) e h é a altura

Mas,

$$\left(\frac{d}{2}\right)^2 + (R - h)^2 = R^2 \quad (6)$$

Ou seja,

$$\frac{d^2}{4R} - 2h + \frac{h^2}{R} = 0 \quad (7)$$

Se $R \gg h$

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

Dessa forma teremos:

$$V = \frac{\pi d^4}{64R} \quad (9)$$

A partir da Equação 9 as seguintes relações entre a taxa de desgaste e coeficiente de desgaste podem ser estabelecidas [2,24].

2.6.3 - Taxa de desgaste (Q)

A taxa de desgaste (Q) é dada pela Equação 10.

$$Q = \frac{V}{L} \quad (10)$$

Substituindo teremos:

$$Q = \frac{(\pi d)^4}{64(RL)} \quad (11)$$

onde: L – representa a distância (m) percorrida pelo raio da esfera R (mm) e a unidade da taxa de desgaste é dada em mm³/m.

2.6.4 - Coeficiente de desgaste (K)

O coeficiente de desgaste (K) é dado pela Equação 10, sendo F_N a força normal aplicada à superfície [23,24].

$$K = \frac{Q}{F_N} \quad (12)$$

A unidade do coeficiente de desgaste é dada em mm³/N.m.

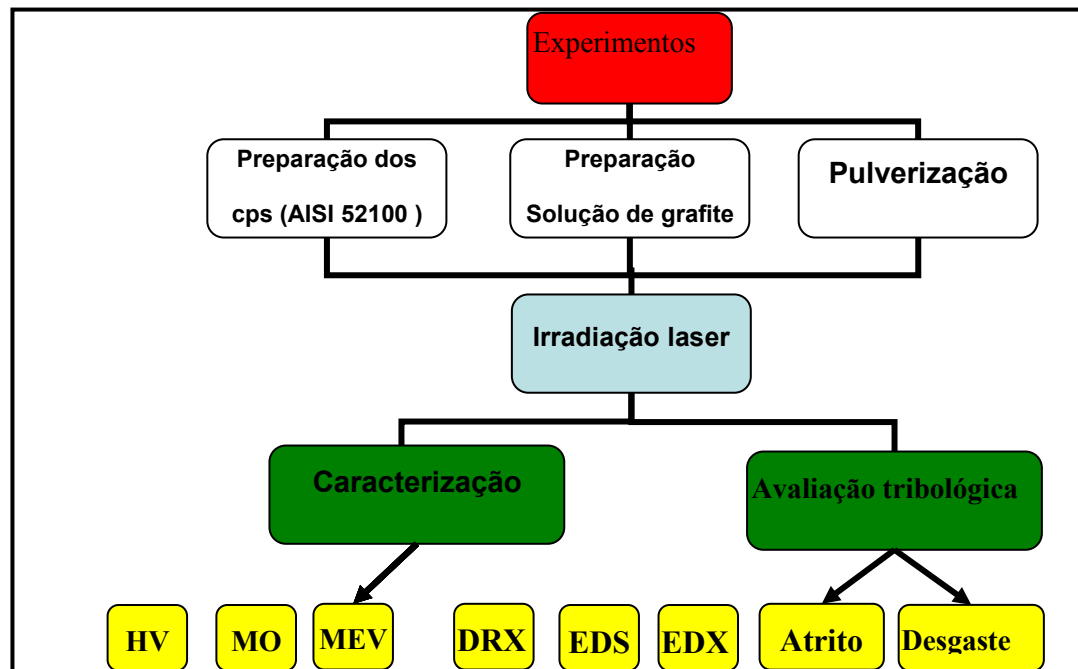
No ensaio de pino contra disco geralmente o material mais mole é o disco. No nosso caso, o material mais mole será o pino (esfera). Uma observação é que, embora o atrito e o desgaste provêm de interações entre superfícies, é errôneo interpretar que os dois devem estar relacionados, nem sempre um alto atrito significa um desgaste elevado [2, 18, 24].

3.0 - Materiais e Métodos

Metodologia experimental e técnicas de caracterização utilizadas.

A metodologia experimental utilizada neste trabalho foi dividida em três etapas distintas: a primeira refere-se à preparação dos corpos - de - prova (cp) de aço AISI 52100. A segunda etapa consiste na preparação de uma solução a base de grafita e do recobrimento da superfície por meio de pulverização da superfície dos cp's. A terceira etapa consiste em irradiar as amostras com um feixe de laser de CO₂. A quarta etapa é na caracterização dos cps por microscopia óptica, MEV, EDX, EDS e ensaios tribológicos de atrito e desgaste.

A seguir será realizado o detalhamento destas etapas.



3.1 - Preparação dos corpos-de-prova (cp) de aço AISI 52100.

As amostras de aço AISI 52100, em formato de cilindros (diâmetro de $15 \times 3 \pm 0,1$ mm) foram extraídas a partir de um tarugo de diâmetro 20×200 mm em um torno convencional. Em seguida estas amostras foram retificadas e lixadas com lixas de Carbetto de Silício com grana variando de 100 a 600 (mesh).

Após estes procedimentos foi efetuada a limpeza com água e sabão neutro seguido, por banho de ultra-som em acetona.

Através de tratamento térmico por têmpera total, em forno elétrico (aquecimento 860°C por 40 minutos e revenimento em óleo a 160°C), a dureza normalizada atingida é de 670 HV (*Hardness Vickers*). A Tabela 3 apresenta a composição química do aço AISI 52100 obtidos por análise química NSK do Brasil e pela V&M do Brasil (VALLOUREC & MANNESMANN Tubes).

Tabela 3 - Percentual da composição química do aço AISI 52100.

Material	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
AISI 52100	1,10	0,25	0,35	0,015	0,012	1,45	0,08

3.2 - Preparação da solução a base de grafita

Inicialmente foi feita a usinagem de um tarugo de grafita (diâmetro 50×100 mm) em um torno convencional. O torno foi previamente limpo e seco com álcool etílico, para que se removesse poeira e graxa, evitando-se assim, a contaminação dos cavacos gerados. Para se obter cavacos de tamanho de partículas de tamanho reduzido, utiliza-se um avanço de $0,1\text{ mm / rpm}$.

Para evitar a dispersão dos cavacos no ar, selecionou-se baixa rotação do torno (360 rpm). Os cavacos forma coletados em papel fotográfico, localizado abaixo do tarugo de grafita.

A Figura 17 apresenta o tarugo de grafita e no detalhe os cavacos obtidos, já recolhidos em um recipiente.



Figura 17 - Geração dos cavacos de grafita por meio de usinagem em torno convencional, no detalhe o pó obtido.

Em seguida estes cavacos foram inseridos no interior de um moinho de 900 ml seguindo a seguinte mistura: 70 gramas de cavaco, 400 ml de álcool etílico, 300 esferas de AISI 52100. A Figura 18 apresenta o arranjo experimental utilizado para a moagem dos cavacos.



Figura 18 - Moinho de bolas utilizado para moagem

O moinho permaneceu em movimento com uma rotação de 200 RPM durante 48 horas. Após o processo de moagem por via úmida, a “pasta” formada pelo processo foi seca em forno tipo mufla em uma temperatura de 60°C até a completa evaporação do álcool etílico. Logo após a secagem o material foi removido e desagregado em uma peneira com abertura de 0,2 mm (Figura 19).



Figura 19 - Desagregação do material após secagem, esta etapa é utilizada como uma primeira classificação.

Finalmente, fêz-se a classificação com o seguinte arranjo de peneiras: 0,177 mm; 0,149 mm; 0,105 mm; 0,074 mm; 0,062 mm; 0,044 mm e 0,037 mm , conforme apresentado na Figura 20.

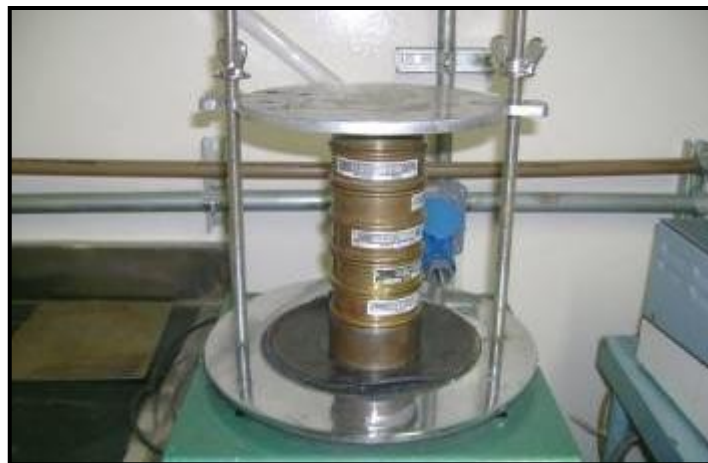


Figura 20 - Arranjo de peneiras.

As peneiras foram dispostas da maior abertura para a menor abertura, para se efetuar a classificação do pó de grafita. O tempo de peneiramento variou de 30 minutos.

3.3 - Recobrimento por meio de pulverização das amostras de aço AISI 52100

O material particulado utilizado para as próximas etapas deste trabalho, foi aquele retido na peneira de menor abertura (0,037 mm).

A composição da mistura para a preparação de uma solução para aplicação nos substratos foi à seguinte:

- 30 gramas de pó de grafita;
- 200 ml de álcool etílico;
- 0,525 gramas de CMC (Carbox Metil Celulose). A função deste composto orgânico é aumentar à resistência a verde do revestimento após a aplicação com pistola pneumática [5,13].

Em seguida, esta mistura acondicionada em um recipiente plástico foi misturada em um moinho com rotação de 200 rpm por um período de 2 horas.

Após esta etapa de mistura a solução foi vertida na câmara da pistola pneumática e aplicada sobre a superfície do aço AISI 52100, previamente aquecidos a 60 °C.

A quantidade de álcool etílico adicionado a mistura foi aquela que proporcionou uma melhor solubilidade.

A Figura 21 apresenta a pulverização por meio de pistola pneumática na superfície das amostras de aço AISI 52100, previamente preparadas (tratamento térmico, lixamento, limpeza e aquecimento).



Figura 21 - Recobrimento da superfície do substrato de AISI 52100 através de pulverização.

A espessura do revestimento é controlada visualmente, onde o processo é finalizado quando o brilho da superfície metálica deixa de ser observado.

3.4 - Laser de CO₂ de 50W

O equipamento de laser de CO₂ utilizado é da marca Synrad modelo SH e suas principais características são as seguintes: comprimento de onda (λ) 10,6 μm , modo de operação contínuo (CW) diâmetro de feixe no foco é de 300 μm , distância focal 190 mm, modo TEM₀₀, potência de 50W, excitação por meio de radio frequência e refrigeração a água.

Espelhos galvanométricos acoplados ao tubo de laser são responsáveis pelo movimento e direcionamento (x, y) do feixe de laser sobre a superfície a ser tratada. O movimento do feixe pelos espelhos possibilita a geração de “trilhas”, cuja largura e o comprimento podem ser controlados. O software de controle utilizado na movimentação dos espelhos permite alterar a resolução podendo ser variada de 50 a 900 PPP (pontos por polegada quadrada). A Figura 22 apresenta o equipamento de laser de CO₂.

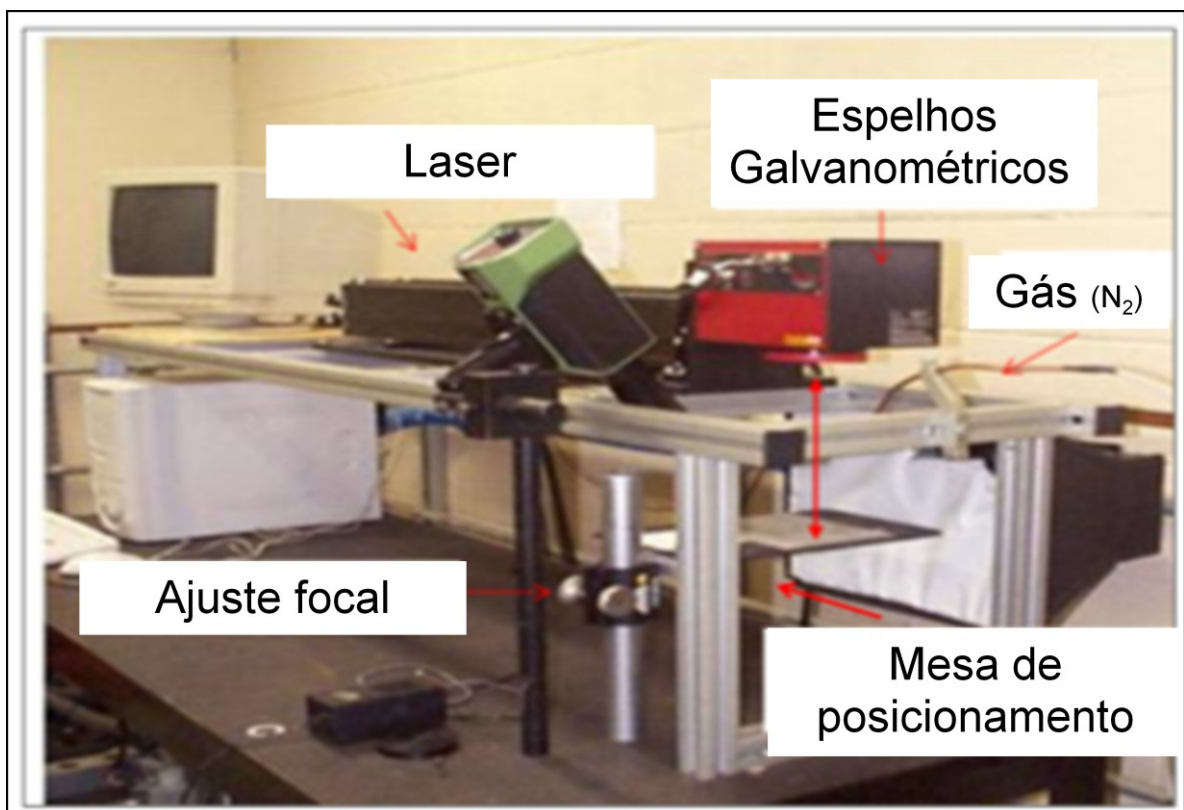


Figura 22 - Laser de CO₂ utilizado para tratar as amostras de AISI 52100. Em destaque o dispositivo de guiagem do feixe de laser.

O feixe laser movimenta-se em relação à superfície da amostra por meio da reflexão em espelhos galvanométricos formando “trilhas”.

O modelo de varredura do feixe de laser sobre a superfície é exemplificado na Figura 23.

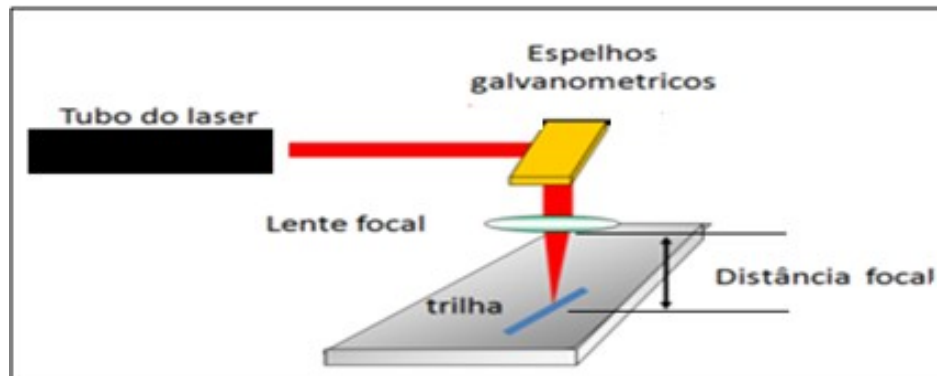


Figura 23 - Esquema simplificado de propagação do feixe de laser.

Os parâmetros como velocidade, distância entre pontos (resolução), ciclos de aquecimento (quantidade de vezes que o feixe de laser irradia a superfície para formar a respectiva “trilha”) podem ser variados para que uma determinada transformação superficial ocorra. A Figura 24 apresenta de forma detalhada o movimento do feixe de laser sobre a superfície para a formação da trilha.

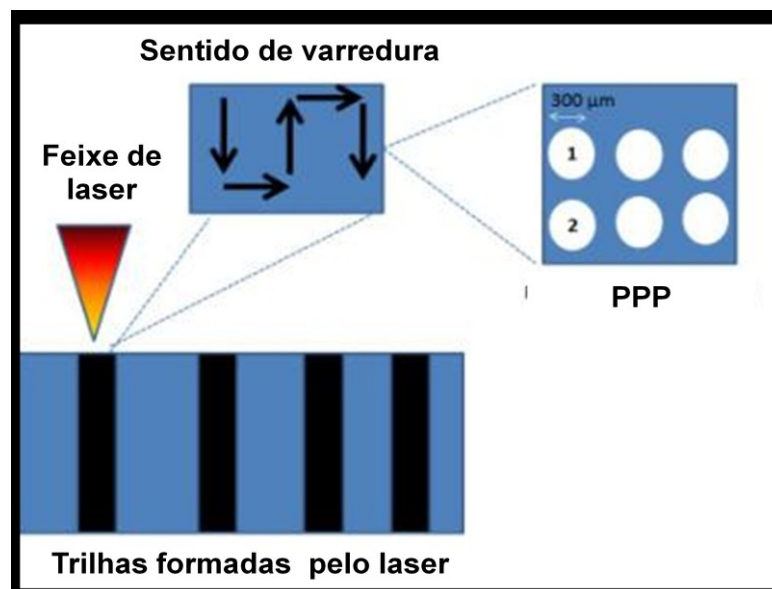


Figura 24 - Ilustração detalhada da movimentação do feixe sobre a amostra ou superfície a ser tratada.

Conforme ilustrado na Figura 24 cada trilha pode ser processada com um dado parâmetro (velocidade, ciclos de aquecimento e resolução). No detalhe o sentido de formação da trilha e a resolução. A seguir abordaremos outros fatores relacionados ao processamento laser.

3.4.1 - Parâmetros de processamento laser

Para se atingir os objetivos propostos neste trabalho de fixar um revestimento de grafita sobre a superfície metálica e promover a têmpera superficial, iremos variar os seguintes parâmetros de processamento laser: velocidade, número de ciclos de aquecimento e resolução. O diâmetro do feixe de 300 μ m, distância focal de 190 mm, potência de 50 W e fluxo de gás de proteção de N₂ de 98 *psi* e a área processada de cada trilha (12X8 mm) foram mantidos fixos em todos os experimentos.

A velocidade de varredura do feixe de laser foi variada de 10 a 150 mm/s, com incremento de 10 mm/s (10 mm/s corresponde ao limite inferior de velocidade de varredura do feixe de laser) sendo que o aumento de velocidade foi estabelecido a cada 10 mm/s (a velocidade mínima testada inicialmente foi de 1 mm/s onde verificou-se sua impossibilidade devido à limitação do equipamento).

Os ciclos de aquecimento (quantidade de vezes que o feixe de laser passa sobre a superfície) variaram de 1 a 20 vezes com incremento de 5 vezes.

A resolução utilizada foi de 50, 100, 300, 600, 900(PPP), que corresponde à sobreposição do feixe de 0, 28, 71, 87 e 99 % respectivamente.

Selecionados os parâmetros, irradiaram-se quatro trilhas na superfície da amostra de aço AISI 52100 (Figura 25). Para minimizar efeitos térmicos, manteve-se um intervalo de tempo de 5 minutos para cada nova irradiação, adotou-se para tal a sequência 1, 4, 2 e 3 mantendo-se o dobro da distância da trilha 2 para a trilha 1.



Figura 25 - Trilhas formadas na superfície da amostra que foi irradiada com laser.

3.5 - Técnicas de caracterização utilizadas

Após irradiar as amostras de aço AISI 52100 os revestimentos de grafita e a zona tratada termicamente (ZTT) foram caracterizados pelas seguintes técnicas: Ensaio de dureza Vickers, Análise química de Energia Dispersiva (EDS), Difratometria de raios – X, Espectroscopia de fluorescência de raios –X e Ensaaios de atrito e desgaste.

3.5.1 - Ensaio de dureza Vickers

Os ensaios de dureza por microindentação foram realizados em conformidade com a norma ASTM E92 – 92, utilizando um microdurômetro FM Type M na escala $HV_{0,05}$ (carga de 0,05Kg), do laboratório DEDALO do IEAV. Foram efetuadas 5 medições para cada ponto apresentado.

3.5.2 - Análise química por Espectroscopia Dispersiva de raios - X (EDS)

As análises químicas foram realizadas pelo equipamento Noram Voyer com detetor de Si (Li) de 10 mm², resolução de energia de 13,6 eV, do laboratório de análise do AMR - DCTA. Este equipamento realiza análises quantitativas, qualitativas e mapeamento químico.

3.5.3 - Técnica complementar de análise química por espectroscopia de fluorescência de raios X.

O ensaio de Espectroscopia de fluorescência de raios-X foi realizado no equipamento *Shimadzu EDX 800* (Figura 26) com detetor de Si com resolução de energia de 5 a 50 keV.

Este equipamento realiza análises químicas quantitativas e qualitativas de elementos químicos incluindo o Carbono [25]. E permite, além de quantificar os elementos constituintes da amostra, estimar a espessura, por exemplo, de um revestimento aplicado na superfície. É requisito para utilizar esta técnica, conhecer os elementos do substrato (base) e do revestimento (camada).



Figura 26 - Equipamento de EDX

Shimadzu 800

No ensaio, através de software dedicado do próprio equipamento são consideradas há existência de duas camadas (base e revestimento), motivo pelo qual deve-se conhecer os constituintes básicos de pelo menos uma das camadas a serem analisadas. A Figura 27 apresenta o esquema básico deste equipamento.

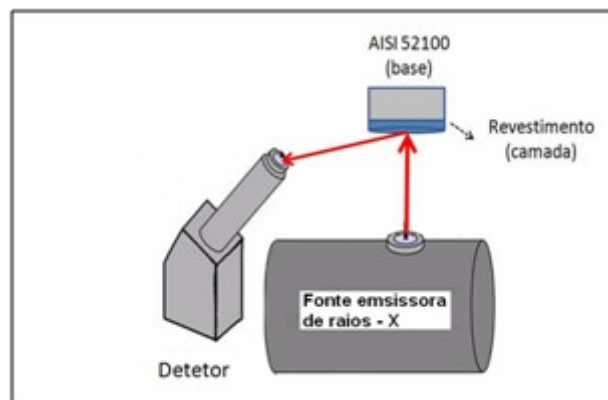


Figura 27 – Esquema básico do ensaio de EDX

Os raios - X emitidos pelo equipamento, ao colidirem com a camada de revestimento de grafita, excitam os seus elétrons, é aumentada a intensidade do feixe de raios - X até que se atinja o substrato composto por ferro (Fe), cromo (Cr), Manganês (Mn) e o Carbono (C). A espessura da camada é dada pela diferença de energias utilizadas durante a excitação dos elementos da camada até atingir o substrato [25].

3.5.4 - Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

O microscópio eletrônico utilizado foi um LEO 451, do laboratório do AMR / DCTA. Este microscópio faz a varredura da amostra por meio de um feixe de elétrons, parte da radiação refletida é coletada por detetores. As imagens são capturas por meio de softwares dedicados. Uma das condições para esta técnica é que a superfície a ser analisada deve ser condutora para que o feixe de elétrons possa ser acelerado até a mesma e é necessária a utilização de vácuo [15].

3.5.5 - Difratometria de raios - X

Realizou-se análise de varredura simples por meio de difratômetro de raios- X da marca LEICA, do laboratório do AMR / DCTA, as condições aplicadas foram: tensão de 40kV, corrente de 40 mA, faixa de observação $20^{\circ} < 2\theta < 120^{\circ}$ e alvo de Cu-K α que fornece raios-X com $\lambda = 1,5406 \text{ \AA}$.

3.5.6 - Ensaaios tribológicos

Os ensaios de atrito e desgaste foram realizados em um tribômetro da marca *Nanovea* (Figura 28) do laboratório de ensaios tribológicos da NSK – Brasil, seguindo a norma da ASTM GG99 [18]. A Tabela 4 apresenta os parâmetros do ensaio, sugeridos pela norma internacional para realização dos ensaios tribológicos nos pares com e sem tratamento laser.

Tabela 4 - Parâmetros dos ensaios tribológicos

Esfera			Movimento	Temperatura	Rotação	Umidade	Carga(s)
Aço AISI 52100	Diâmetro 6 mm	Dureza 750 HV	Rotacional	20° C	600 rpm	45%	10 e 60N

A cada ensaio utilizou-se uma área nova tanto na esfera quanto no corpo de prova. A centralização dos corpos de prova foi realizada por relógios comparadores. Todos os ensaios foram realizados, em ambiente com temperatura (20°C) e umidade controlada (45%) para garantir a reprodução dos ensaios e minimizar influências externas.

O equipamento utilizado no ensaio de atrito e desgaste é apresentado na Figura 28.



Figura 28 - Tribômetro utilizado no ensaio de atrito e desgaste.

O coeficiente de atrito e o desgaste foram medidos por meio do software dedicado do próprio equipamento. A Figura 29 apresenta o esquema do ensaio, onde um elemento (pino, bola, etc.) duro o suficiente provoca um sulco (ranhura) [21, 22, 23].

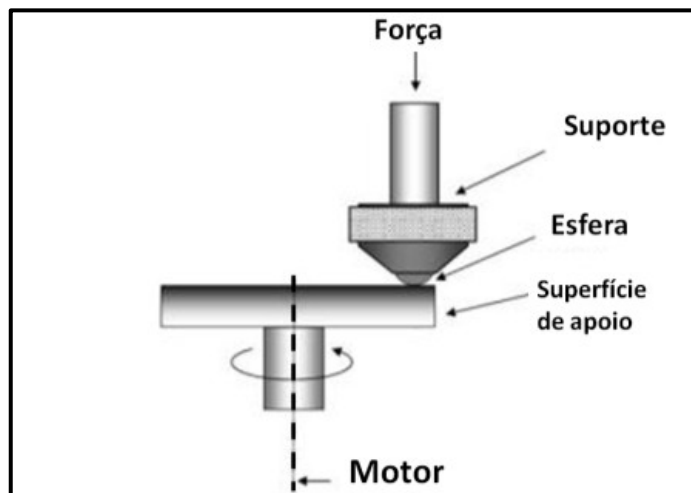


Figura 29 - Esquema do teste de esfera contra disco adaptado de [21].

A força de atrito é tangente ao movimento rotacional, assim o atrito possui a mesma direção da velocidade linear, porém, com sentido contrário, conforme ilustrado na Figura 30.

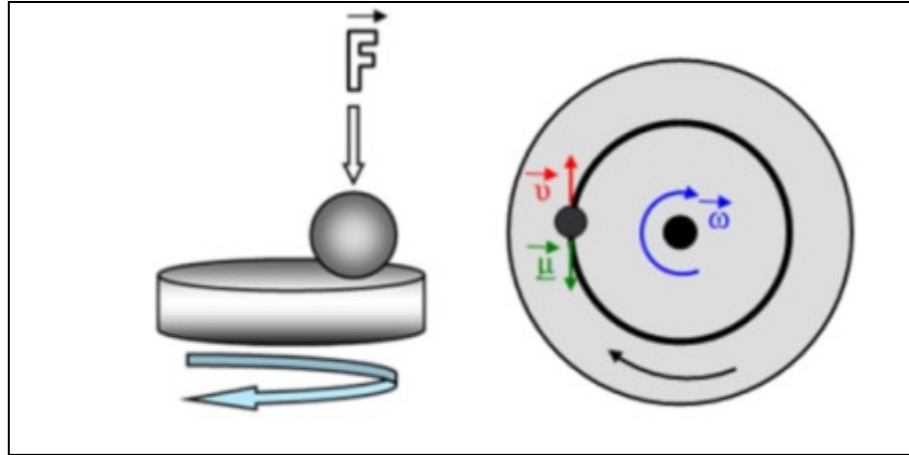


Figura 30 - Esquema ilustrativo da força normal e das velocidades angular (ω) e linear (v) e a força de atrito (μ) [19, 21]

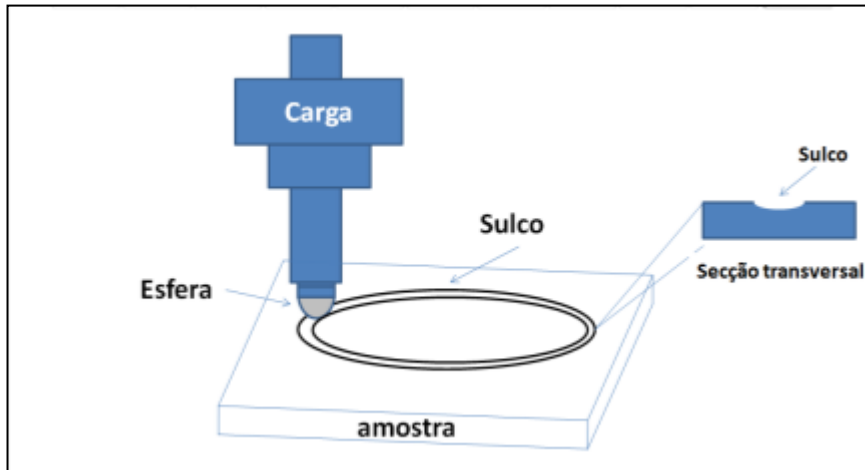
A relação entre a velocidade linear e a velocidade angular é descrita pela equação:

$$v = \omega 2\pi R \quad (13)$$

onde a velocidade linear (v) é dada em mm/s, o raio (R) em mm e a velocidade angular (ω) em s^{-1} .

O contato entre a ponteira (esfera) formará um sulco (ranhura), a largura desse sulco (Figura 31) está relacionado às propriedades mecânicas como, por exemplo, dureza.

Na literatura [21, 22, 23, 24, 25, 26] é descrito que superfícies com durezas elevadas apresentavam menores larguras nos sulcos e conseqüentemente menor desgaste, quando comparados a materiais com menor dureza.



**Figura 31 - Representação esquemática dos sulcos (ranhuras),
adaptado de [21].**

Através da largura da trilha, podemos relacionar o volume de material perdido e dessa maneira, construir um perfil de desgaste em função do tratamento aplicado na superfície avaliada [29,30]. As equações que correlacionam estes comportamentos foram apresentadas na Secção 2.6.2. - Quantificação do desgaste.

4.0 - Resultados e Discussões

Inicialmente são abordados os resultados referentes à preparação do material particulado e a sua formulação na solução, em seguida os resultados referentes às amostras tratadas via laser.

4.1 - Morfologia do material particulado de grafita

O pó de grafita utilizado para a produção dos revestimentos após processo de moagem, secagem e desagregação foram classificadas por peneiramento e os resultados estão apresentados na Tabela 5 e sua respectiva distribuição granulométrica é apresentada na Figura 32.

Tabela 5 - Massa de grafita retida em cada uma das peneiras.

Abertura da peneira (μm)	Massa (%)
177	4
149	6
105	7
74	9
62	18
44	25
37	30
Menor que 37	4

A Figura 32 apresenta a distribuição granulométrica da grafita após, a separação por peneiramento.

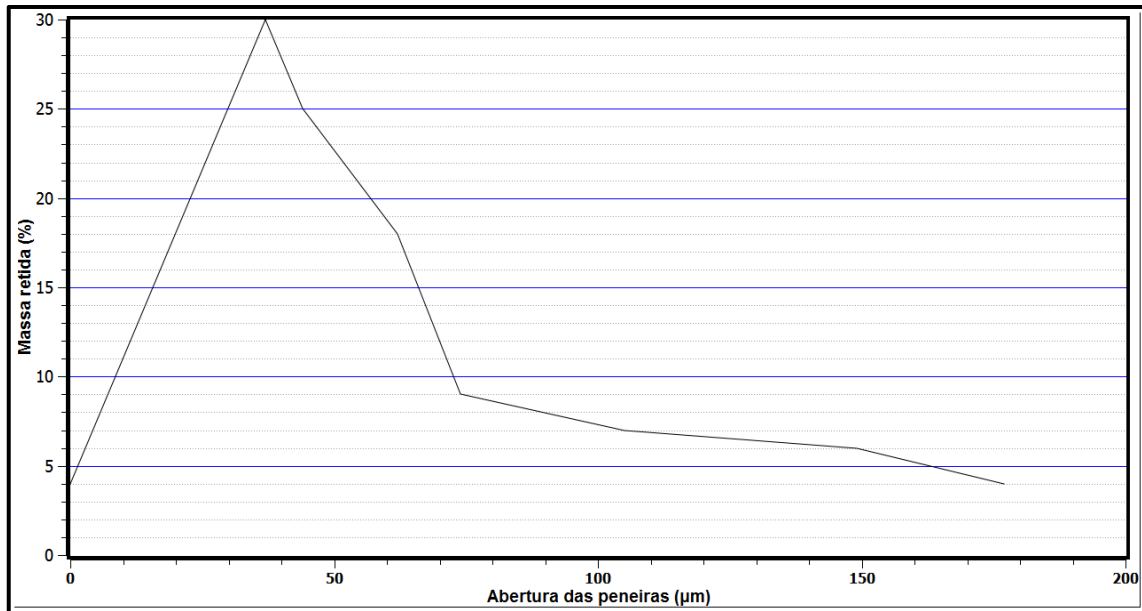


Figura 32 - Distribuição percentual da grafita em função da abertura das malhas nas peneiras.

A curva de distribuição percentual do tamanho de partícula retida em cada peneira, observa-se um maior número de partículas retidas na abertura de 0,044 mm

A análise por microscopia eletrônica de varredura (MEV) mostrou que o pó de grafita retido no último estágio de peneiramento é constituído por grãos com formatos de flocos e tamanhos variando de 1 a 10 μm .

A Figura 33 apresenta o aspecto geral do material particulado formado pelo processo de moagem.

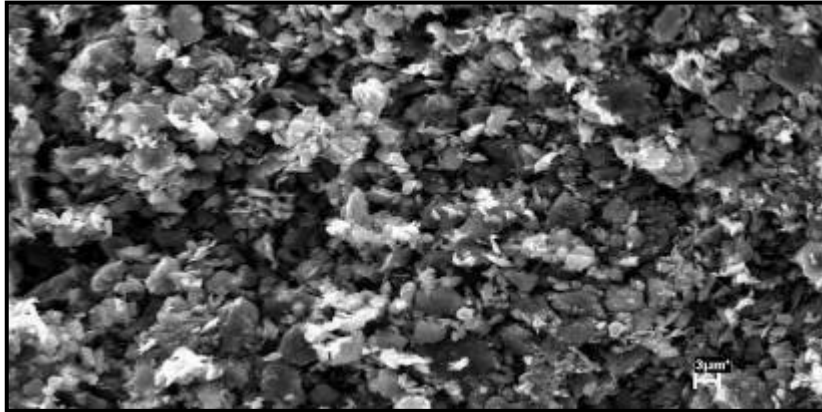


Figura 33 - Micrografia do pó de grafita obtida por microscopia eletrônica de varredura (MEV). Observam-se partículas no formato arredondado com diâmetro médio de 44 μm .

O material particulado que será utilizado para produzir a solução, foi somente o material que passou pela peneira com abertura de 0,037 mm.

4.2 - Preparação da solução de grafita

A formulação da solução de grafita, para recobrir na forma de pintura a superfície do aço AISI 52100 foi elaborada a partir de ensaios experimentais onde, variou-se primeiramente o solvente utilizado. A Tabela 6 apresenta os resultados obtidos:

Seleção dos solventes utilizados na formulação da solução de grafita utilizada para recobrir o substrato metálico por meio de pulverização.

Tabela 6 - Solventes utilizados

Grafita (gramas)	Solvente	Observação na solução
15	Água (volume não avaliado)	Ocorreu a precipitação do material particulado durante o preparo observou-se a formação de duas fases. A grafita não é solúvel em água.
15	Acetona (volume não avaliado)	Ocorreu a precipitação do material particulado durante o preparo observou-se a formação de duas fases. A grafita não é solúvel em acetona.
15	Álcool etílico (120 ml)	Não ocorreu precipitação observa-se a dissolução da grafita, porém, quando aplicado no substrato metálico não houve fixação do revestimento.

A quantidade de solvente selecionado foi aquela que permitiu que 0,15 gramas de grafita formassem uma solução que pudesse ser aplicada por meio de pulverização.

Uma vez que o solvente foi selecionado, os seguintes ligantes foram avaliados:

- Goma arábica;
- Carboxi Metil Celulose.

Repetiu-se os experimentos anteriores e os resultados são apresentados na Tabela 7 apresenta os resultados.

Tabela 7 - Seleção do ligante e do solvente.

Grafita (gramas)	Solvente	Observação no recobrimento
15	Álcool etílico + goma arábica (1%)	Ocorreu um entupimento da pistola e não houve uma distribuição homogênea.
15	Álcool etílico + CMC (1%)	A solução aderiu à superfície homogeneamente.
15	Álcool etílico + CMC (2%)	A solução aderiu à superfície homogeneamente.

Verificou-se experimentalmente que a utilização do álcool como solvente resultou, em uma melhor homogeneidade.

Variou-se os valores de CMC entre (0,5 a 3%) e manteve-se as quantidades de álcool e grafita, observou-se que com a nova formulação com 0,5% de CMC a camada de grafita, quando aplicada duas vezes sobre a superfície, não remove o material particulado depositado anteriormente. Ao se aumentar a quantidade de CMC para 3% iniciou-se a formação de aglomerados. Analisando os resultados percebeu-se que quanto maior a quantidade de grafita e de CMC, maior a ocorrência de recobrimentos não homogêneos e formação de aglomerados. A proporção utilizada está na faixa entre 12 e 15 gramas de grafita, quando obtêm-se a melhor cobertura.

A Tabela 8 apresenta a proporção de material utilizado na formulação da solução para a pintura dos substratos metálicos.

Tabela 8 - Concentração dos componentes utilizados na preparação da solução

CMC (%)	Grafita (gramas)	Álcool etílico (ml)
0,525	15	120

4.3 - Análise microestrutural do aço AISI 52100 sem tratamento laser

4.3.1 - Microscopia óptica e eletrônica de varredura (MEV) do aço AISI 52100

As secções transversais das amostras de AISI 52100 foram avaliadas e as Figuras 34 e 35 apresentam respectivamente a microscopia óptica e o MEV respectivamente. Nos ensaios as amostras foram tratadas com ácido Picral 3%, durante o tempo de 20 segundos para uma melhor visualização das estruturas.

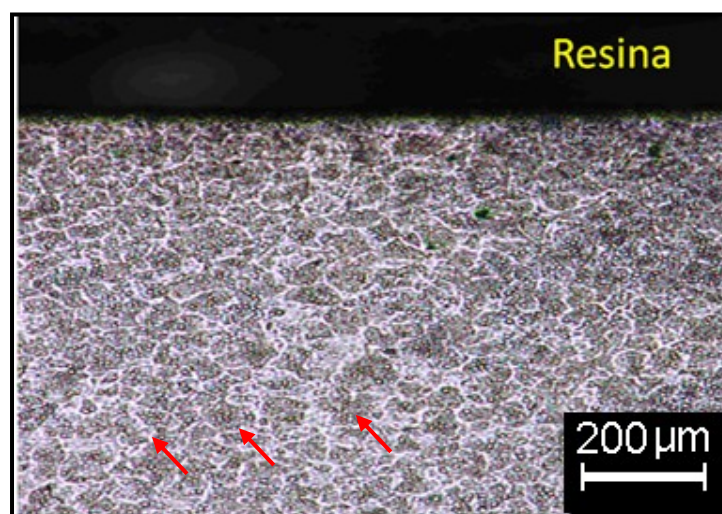


Figura 34 - Micrografia da superfície da amostra de AISI 52100, tratado com reagente Picral 3%.

A microestrutura apresenta duas fases distintas uma clara e uma escura e também a existência de carbonetos de cromo esferiorizados. A microestrutura do material esta de acordo com os trabalhos encontrados na literatura [33]. Ainda, analisando a interface (resina / material) não observa-se a presença de nenhuma região com tratamento diferenciado.

Após avaliar a microestrutura por microscopia óptica, foram então executadas as avaliações por MEV, conforme apresentado na Figura 35.

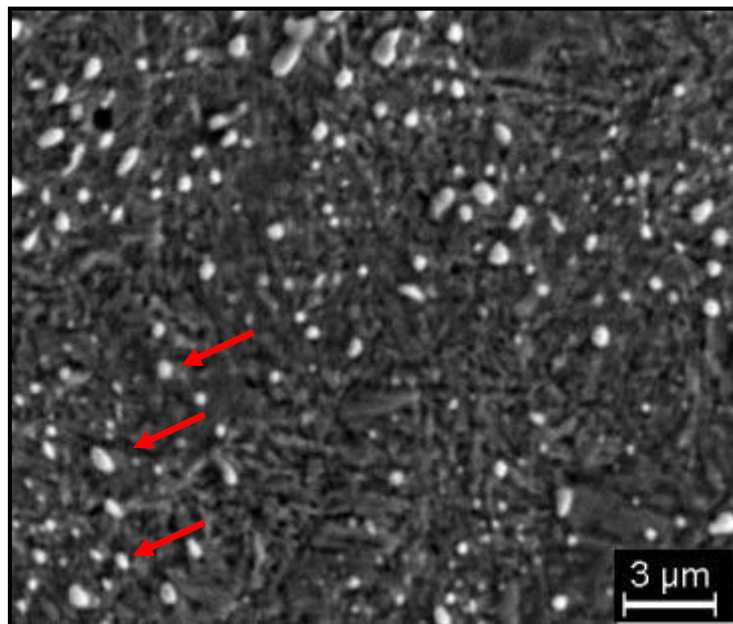


Figura 35 - O MEV da secção transversal do aço AISI 52100, tratado com reagente químico Picral 3%, apresenta uma matriz martensítica e carbonetos de cromo (x 3000).

O aço AISI 52100 apresenta uma estrutura refinada, consistindo de uma matriz martensítica e carbonetos de cromo esferiorizados, devido o processo de solidificação do material.

Os ensaios de microdureza Vickers (HV) foram realizados após o tratamento térmico dos corpos de prova, para complementar a caracterização do material os resultados, são apresentados a seguir.

4.3.2 - Dureza do substrato de aço AISI 52100

Os resultados de dureza por microindentação Vickers ($HV_{0,05}$), obtidos para confirmar os tratamentos térmicos de têmpera e revenimento, são apresentados na Tabela 9. A média e desvios padrões foram calculados a partir de 5 valores para cada cp.

Tabela 9 - Dureza obtidas no aço AISI 52100 sem tratamento laser

Corpo de prova	Pontos mensurados	Dureza (HV)
1	Superfície (interna e externa)	617±17
2	Superfície (interna e externa)	673±08
3	Superfície (interna e externa)	633±18
4	Superfície (interna e externa)	649±32
5	Superfície (interna e externa)	654±26
	Média	646±24

Pode-se observar, dos valores apresentados, que a dureza média atingida é da ordem de 646 HV e está de acordo com o tratamento térmico de têmpera e revenimento realizados.

4.4 - Resultados referentes às amostras tratadas com laser de CO₂ (pré-seleção dos parâmetros)

Parâmetro resolução (PPP)

Previamente à irradiação das superfícies as amostras do aço AISI 52100, fez-se a preparação da superfície com lixamento (granas de 100 a 600). Em seguida, fez-se a limpeza com detergente neutro e álcool etílico. Após etapa de lixamento e limpeza, todas as amostras foram aspergidas com a solução de grafite na proporção apresentada na Secção 4.2, Tabela 8.

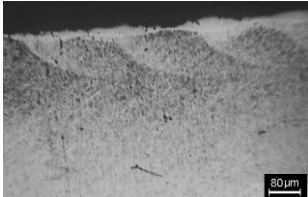
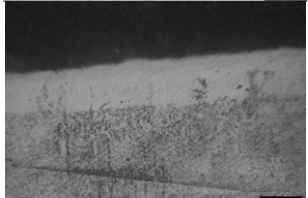
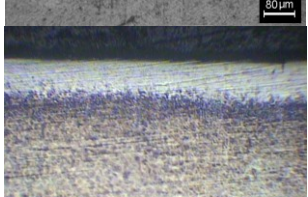
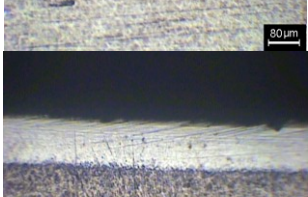
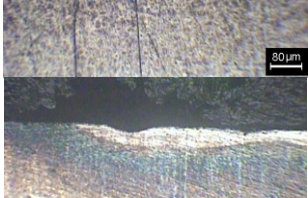
Para seleccionar os parâmetros, por exemplo: velocidade, número de ciclos de aquecimento e resolução mais adequados para realizar os objetivos deste trabalho, escolheu-se variar primeiramente a resolução, por se tratar de um parâmetro específico do equipamento laser utilizado. Os valores seleccionados de resolução variam de: 50, 100, 200, 300, 600 e 900 pontos por polegada (PPP).

Deve-se salientar que ao variarmos a resolução do laser, foram mantidos fixos: a potência do laser em 50 W (máxima potência do laser), o diâmetro do feixe em 0,03 mm (diâmetro mínimo do feixe) e a velocidade em 10 mm/s.

Após irradiarmos as amostras de aço AISI 52100 com os respectivos parâmetros podemos notar que, dependendo da resolução aplicada pode-se obter desde a não sobreposição de pontos (50 PPP) até a total sobreposição de pontos, levando à ablação do material (900 PPP).

O valor ótimo de resolução é aquele no qual, ocorre uma sobreposição de pontos sem, no entanto, causar danos na superfície do material. A Tabela 10 apresenta um resumo dos resultados obtidos.

Tabela 10 - Parâmetros de processamento laser (Resolução)

Resolução (PPP)	Tempo (s)	Sobreposição (%)	MO
50	0,0508	Sem sobreposição	 01
100	0,0254	30%	 02
300	0,00846	74%	 03
600	0,00423	87%	 04
900	0,00282	99%	 05

Pode-se observar (MO - 1) que com uma resolução de 50 PPP, utilizando a equação (2) o tempo para gerar um pulso, será de 0,0508 s. O revestimento fixado com esses parâmetros apresentou falhas, pois não ocorre a sobreposição de pontos.

No entanto, observando a secção transversal da amostra nota-se a formação de uma zona termicamente tratada (ZTT) e logo abaixo uma zona termicamente afetada pelo calor (ZTA).

Ao aumentarmos a resolução para 100 PPP, ocorre a redução da falhas e observando a secção transversal (MO -2) nota-se o aumento da ZTT. Quando a resolução é de 300 e 600 PPP o mesmo comportamento é observado. Entretanto, ao aplicarmos a resolução de 900 PPP ocorrem danos superficiais no material.

Dessa forma, mantendo a velocidade de processamento do feixe de laser com 10 mm/s, 50W de potência e 300 μ m de diâmetro de feixe, o valor ideal de resolução, onde ocorre uma zona tratada (ZTT), consequentemente, uma zona termicamente afetada (ZTA), mas, sem danos superficiais é a resolução de 600 PPP.

Nota: Na região de tratamento laser ocorrem uma Zona Tratada Termicamente (ZTT) e logo abaixo uma Zona Termicamente Afetada (ZTA), para efeitos de medição de extensão da profundidade de tratamento são considerados somente os valores de encontrados na ZTT.

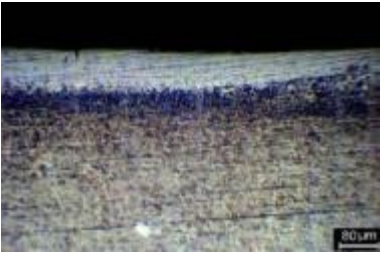
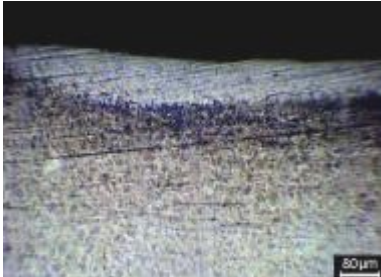
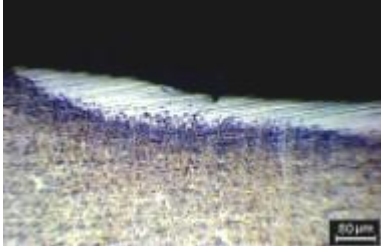

Parâmetro ciclo de aquecimento

Na seqüência de ensaios seguinte fixou-se os seguintes parâmetros: resolução em 600 PPP, potência 50 W, diâmetro de feixe 0,03 mm, distância focal 190 mm e velocidade em 10 mm/s. Variou-se o também número de ciclos de aquecimento de 1, 5, 10 e 20 ciclos.

Os ciclos de aquecimento influenciam diretamente, no tempo de interação do feixe de laser com a superfície da amostra a ser irradiada. Dessa maneira, o mesmo influencia na profundidade da zona termicamente tratada (ZTT).

De forma geral, é possível controlar esse processo de maneira que obtenha-se a máxima extensão tratada sem causar a fusão ou a ablação. A Tabela 11 apresenta os resultados das amostras irradiadas com estes parâmetros de processamento apresentados.

Tabela 11- Parâmetros de processamento laser para 1,5, 10 e 20 ciclos de aquecimento

Resolução (PPP)	Ciclo de aquecimento	Velocidade (mm/s)	Tempo de interação (s)	Espessura da ZTT (μm)	Microscopia óptica (MO)
600	1	10	0,00211	60	
600	5	10	0,02115	80	
600	10	10	0,2115	75	
600	20	10	2,115	50	

Pode-se observar que irradiando a superfície do material com um (01) ciclo de aquecimento ocorreu à fixação do revestimento e a formação de uma zona mais clara (ZTT), abaixo da resina de baquelite. A extensão desta zona tratada termicamente é da ordem de 60 μm .

Aumentando o número de ciclos de aquecimento para cinco (5) é possível notar o surgimento de uma leve depressão (avaria) na região central. Aumentando novamente o ciclo de aquecimento para 10 vezes, a avaria torna-se mais acentuada e a região tratada torna-se menor.

Na região tratada com 20 ciclos o revestimento de grafita é totalmente evaporado e a superfície é severamente danificada.

Quando a superfície é irradiada uma única vez, o calor é absorvido pela camada de grafita e é distribuído para o volume do material originando as transformações de interesse.

Seguindo os mesmos procedimentos de processamento laser para a velocidade de 10 mm/s, uma nova série de experimentos foram realizados, porém com velocidades variando de 20 a 150 mm/s.

Os revestimentos produzidos com velocidade de 20 e 30 mm/s, com 1 ciclo de aquecimento apresentaram uma superfície regular, sem falhas e a ZTT varia sua espessura (diminuindo em função do aumento da velocidade). Nas velocidades de 40 a 70 mm/s ocorreram falhas na fixação dos revestimentos e entre 80 e 150 mm/s não ocorrem fixação do revestimento e não há ZTT. Os melhores resultados foram os revestimentos obtidos com velocidades entre 10 e 30 mm/s.

No ensaio seguinte, trabalhou-se com um número de ciclos de aquecimento igual a 5 e mantendo a variação das velocidades de 20 a 150 mm/s. Os revestimentos com velocidade de 20 e 100 mm/s apresentaram regularidade na fixação e uma ZTT. Enquanto velocidades entre 120 e 150 mm/s não houve aderência do revestimento e não houve ZTT.

Na sequência de ensaios aumentaram-se os ciclos de aquecimento para 10 ciclos, mantendo a variação da velocidade de 20 mm/s a 150 mm/s. Os revestimentos de 20 mm/s a 60 mm/s apresentaram inícios de danos superficiais, enquanto as velocidades entre 70 mm/s a 150 mm/s apresentaram fixação do revestimento e uma ZTT.

Em seguida irradiou-se as amostras com 20 ciclos de aquecimento, mantendo a variação da velocidade entre 10 e 100 mm/s. Os revestimentos de 20 mm/s a 100 mm/s apresentaram erosão do revestimento, enquanto revestimentos de 150 mm/s obtiveram aderência e uma pequena ZTT. Estes resultados mostram que ao aplicarmos um número elevado de ciclos de aquecimentos (10, 20 ciclos) com uma baixa velocidade de processamento laser (entre 10 a 50 mm/s) ocorrem, maiores danos na superfície do material. Enquanto, com um menor número de ciclos (1 a 5 ciclos), com velocidades baixas ou médias (10 a 50 mm/s) obtêm-se zonas tratadas sem danos.

Assim podemos supor por similaridade que se ocorrer uma ZTT sem danos na superfície, ocorre à fixação do revestimento. Dessa maneira, foram selecionados parâmetros para os ensaios subsequentes apresentados na Tabela 12.

Os parâmetros selecionados foram baseados em comportamentos observados experimentalmente onde, como critério de seleção adotou-se ausência de danos superficiais, fixação do revestimento de grafita e a obtenção de uma zona termicamente tratada (ZTT). Além destes parâmetros são apresentados os valores da razão entre a energia do pulso de laser pela área da região iluminada, ou seja, a Fluência do laser (calculado a partir da Equação 3 - Secção 2.2.1).

A Tabela 12 apresenta os parâmetros de velocidade, número de ciclos de aquecimento e a energia utilizada no processo de interação do feixe de laser com a grafita.

Tabela 12 - Seleção dos parâmetros de processamento laser

Condição	Velocidade (mm/s)	Número de ciclos de aquecimento	Área (m)	Fluência do laser (Joules /m²)
1	10	1	0,00096	6,754x10 ⁶
2	30	5	0,00096	11,255 x10 ⁶
3	100	5	0,00096	3,377x10 ⁶

Por fim depois de selecionados os parâmetros de processamento laser de: velocidade, número de ciclos de aquecimento e resolução. Passaremos a caracterizar as superfícies tratadas via laser por meio de ensaio de dureza Vickers.

4.5 - Caracterização das amostras tratadas por laser

4.5.1- Perfil de dureza Vickers

Em cada corpo de prova, produzido com os parâmetros de processamento laser selecionados, as extensões das zonas tratadas termicamente foram avaliadas por meio de ensaio de microdureza Vickers.

A Figura 36 apresenta a etapa de preparação da amostra para efetuar a medição. Onde executou-se o seccionamento da amostra em sua secção transversal.

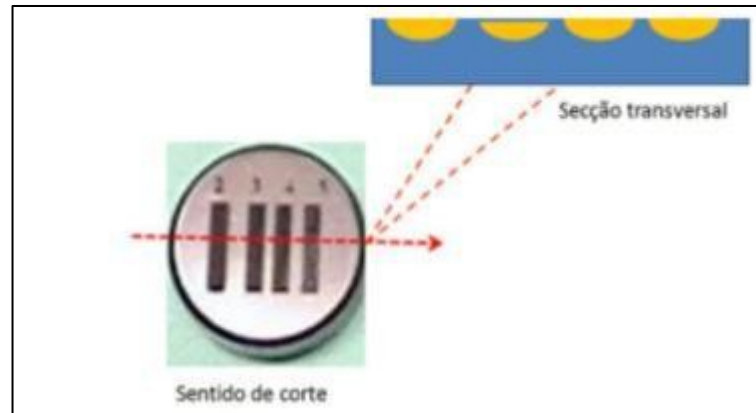


Figura 36 - Sentido de corte da secção transversal, para verificação das zonas tratadas por laser.

A fim de facilitar as análises das ZTT produzidas, foram adotadas nomenclaturas, suas representações e seus respectivos significados são apresentados na Figura 37 e na Tabela 13 respectivamente.

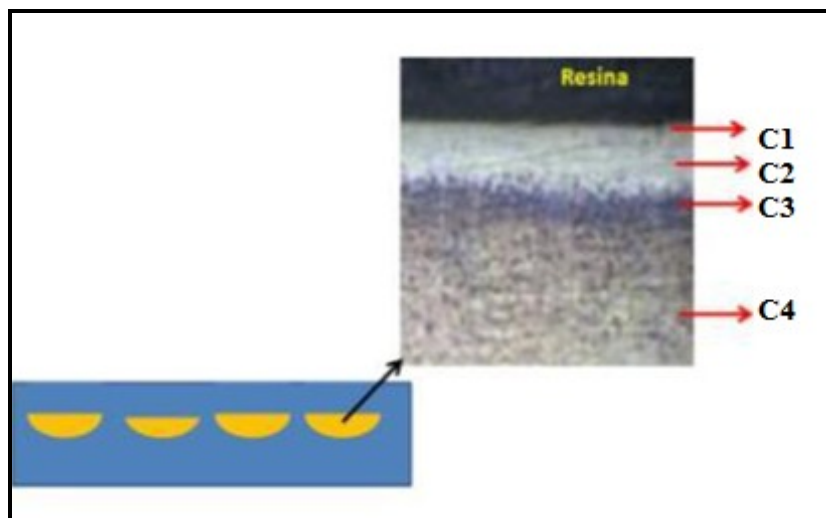


Figura 37 - Ilustração da medida de dureza, os significados das siglas são indicados na Tabela 14.

A extensão da ZTT (Zona Termicamente Tratada) obtida através do processamento laser foi realçada através da aplicação de um reagente químico, Picral 3%. Vale salientar, que a ZTA não foi levada em consideração para determinação da máxima extensão de tratamento laser.

A Tabela 13 apresenta as nomenclaturas adotadas na construção dos perfis de dureza Vickers (HV)

Tabela 13 - Nomenclatura utilizada no ensaio de dureza

Face analisada	Posição relativa na superfície	Nomenclatura
Transversal	Extremidade (borda próximo ao baquelite) região clara	C1
Transversal	Meio da zona clara para o substrato	C2
Transversal	Interface ZTT - ZTA e material de base	C3
Transversal	Somente material de base	C4

Os pontos de micro-indentação foram distribuídos de modo a abranger as heterogeneidades das amostras e assim propiciar comparações entre as diferentes regiões. As Figuras 38, 39, 40 e 41 apresentam os perfis de dureza Vickers das amostras tratadas por laser.

Na Condição 1 (velocidade de 10 mm/s, com 1 ciclo de aquecimento) verificou-se, que a profundidade da zona tratada é de 60 μm e a dureza atingida na superfície foi da ordem de 1020HV \pm 45 (Figura 38).

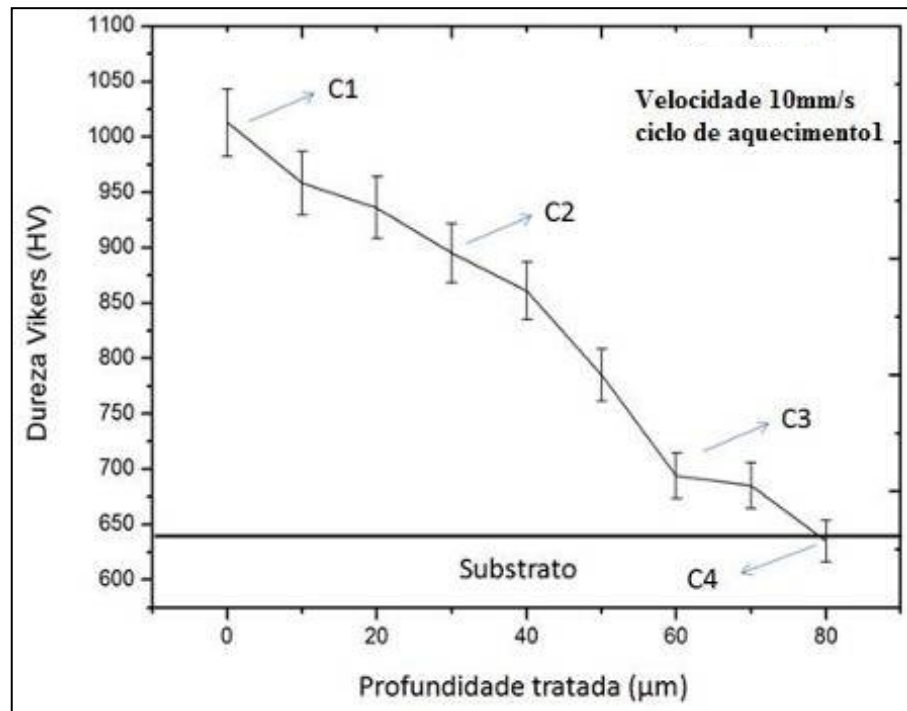


Figura 38 - Perfil de dureza Vickers da secção transversal, com velocidade de 10 mm/s e 1 ciclo de aquecimento (Condição 1).

O primeiro ponto, onde realizou-se a medida de perfil de dureza foi a partir de 10 μm da superfície, para minimizar possíveis erros. Existe uma grande diferença entre a dureza superficial e o substrato (inalterado). No entanto, a dureza não sofre uma transição drástica e sim suave.

A Figura 39 apresenta um perfil de dureza da secção transversal de uma amostra tratada sob a Condição 2 (velocidade de 30 mm/s, com 5 ciclos de aquecimento) verificou-se, que a profundidade da zona tratada é da ordem de 65 μm e a dureza atingida na superfície foi de $1040\text{HV}\pm 50$.

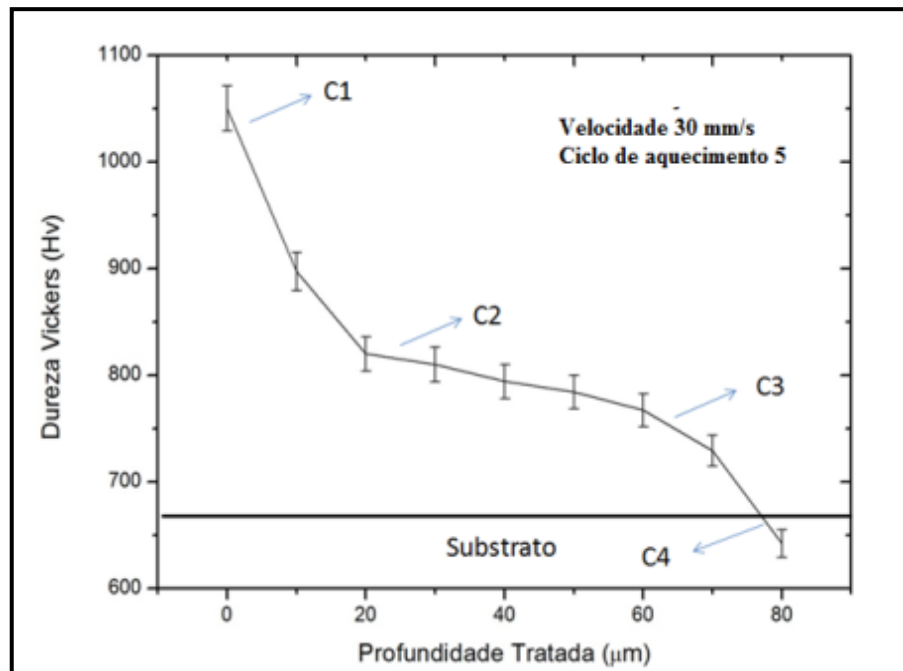


Figura 39 - Perfil de dureza Vickers da secção transversal, com velocidade de 30 mm/s e 5 ciclos de aquecimento (Condição 2).

Avaliando o a Figura 39, observa-se uma alteração no perfil de dureza se comparado com a Figura 38 (Condição 1) ocasionado, possivelmente, pelo aumento da velocidade de processamento e o número de ciclos de aquecimento. Contudo, a dureza atingida ($1040\text{HV}\pm 50$) é mais elevada que o substrato (650 HV).

À medida que a velocidade foi aumentada, Condição 3 (velocidade de 100 mm/s, com 5 ciclos de aquecimento) verificou-se, que a profundidade (ou extensão) da zona tratada é da ordem de 20 μm e a dureza atingida na superfície foi de $890 \text{ HV} \pm 45$. A Figura 40 apresenta o perfil de dureza.

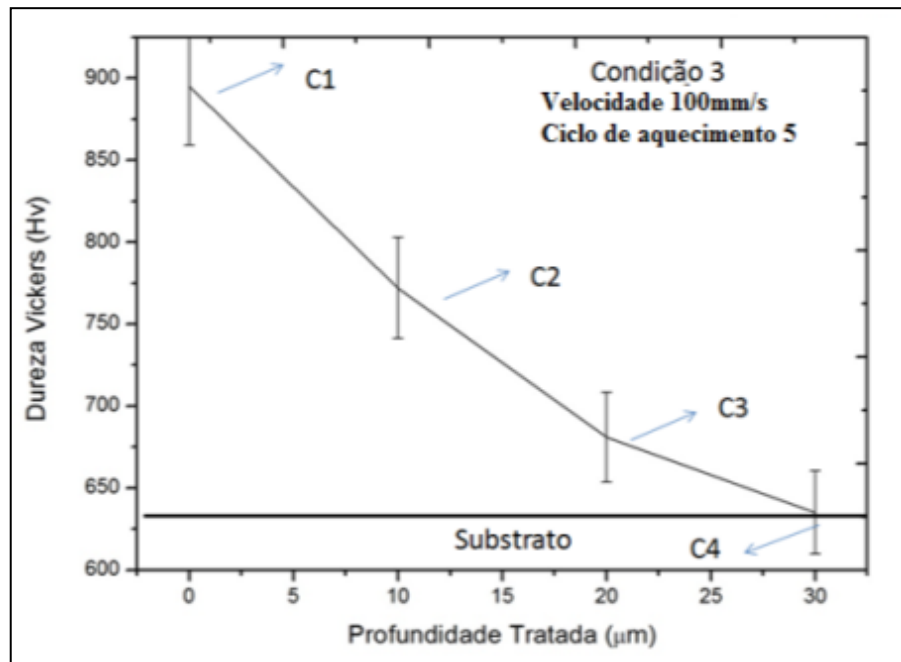


Figura 40 - Perfil de dureza Vickers da secção transversal, do aço AISI 52100 tratado com velocidade de 100 mm/s e 5 ciclos de aquecimento (Condição 3).

Nota-se que se compararmos o perfil da condição 3 aos das condições 1, 2 à medida que a velocidade de processamento laser aumenta, ocorre uma redução na dureza e na profundidade da zona tratada termicamente. Essa alteração está correlacionada à profundidade de penetração do feixe de laser a superfície e as características intrínsecas dos materiais.

Para facilitar a avaliação entre os comportamentos dos perfis de dureza Vickers (microindentação) obtidos após os tratamentos laser nas Condições 1, 2 e 3, os perfis são apresentados na Figura 41.

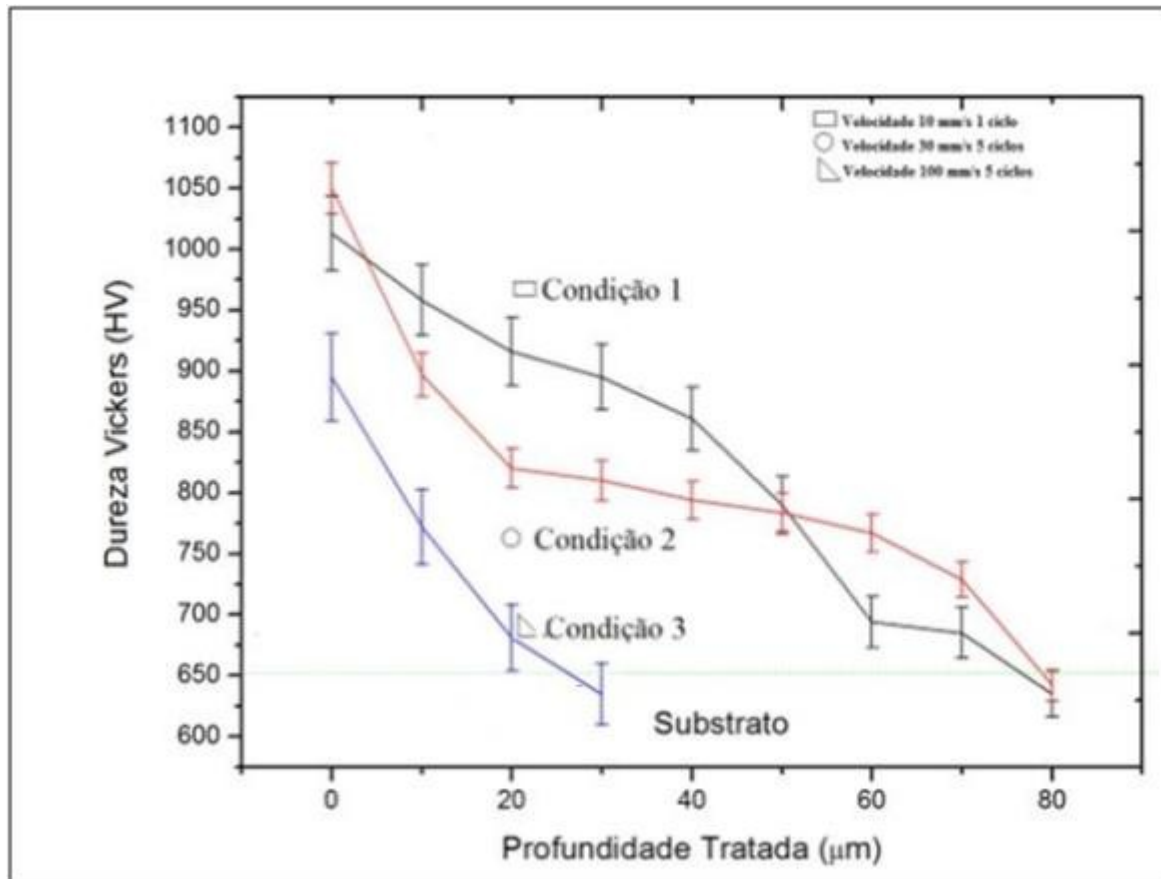


Figura 41 - Perfis de dureza Vickers (HV) das regiões irradiadas com laser. Observam-se diferentes comportamentos para cada parâmetro de processamento aplicado.

Nota-se que os perfis de durezas são diferentes em função das velocidades de processamento laser e dos ciclos de aquecimento aplicados, ou seja, para cada parâmetro existe uma dureza máxima distinta.

A máxima dureza atingida esta relacionada às transformações de interesse, que por sua vez estão relacionados ao aquecimento promovido pela interação da radiação laser incidente sobre a superfície do aço AISI 52100 recoberta pela grafita. Os ensaios de dureza para os outros parâmetros de processamento laser estão no Anexo 2B.

Os revestimentos de grafita depositados por laser foram caracterizados por meio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), como apresentados a seguir.

4.5.2 – O MEV do revestimento

Nesta secção serão apresentados os resultados referentes às superfícies dos substratos sem revestimento e com revestimento nas condições adotadas de processamento laser.

Para cada condição de processamento laser aplicada nas amostras são apresentados imagens obtida por MEV com ampliação da região desejada.

Conforme apresentado na Secção 4.1 os grãos de grafite após processo de moagem e separação apresentavam formato de flocos com tamanhos compreendidos entre 3 e 10 μm .

Após irradiar a superfície recoberta com grafita com a Condição 1 (velocidade 10 mm/s e 1 ciclo de aquecimento, obteve-se a seguinte imagem apresentada na Figura 42.

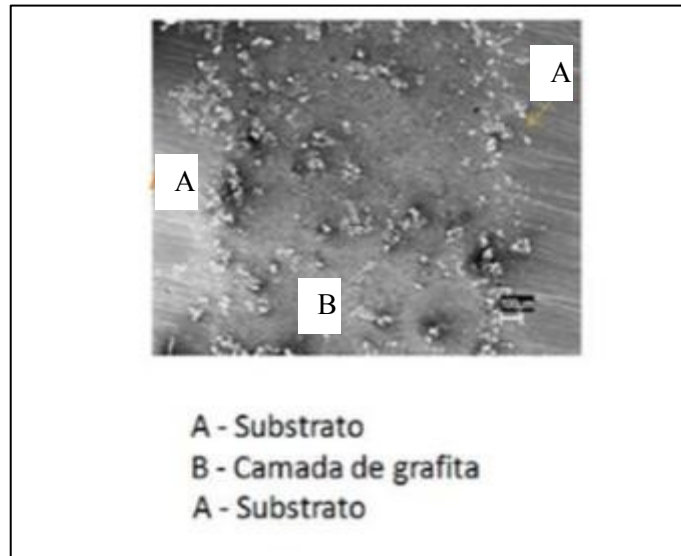


Figura 42 - Superfície com o revestimento de grafita fixado com a Condição 1.

Observando a Figura 42 nota-se que somente a região B (revestimento fixado) foi irradiada com laser. Nas extremidades observa-se as marcas das lixas (600) utilizadas no processo de preparação da amostra.

Analisando a região B, (Figura 42) observa-se a morfologia do revestimento de grafita, durante o processo de sinterização.

A Figura 43 apresenta a ampliação exatamente da região irradiada pelo laser e sua respectiva morfologia (Figura maior do quadro).

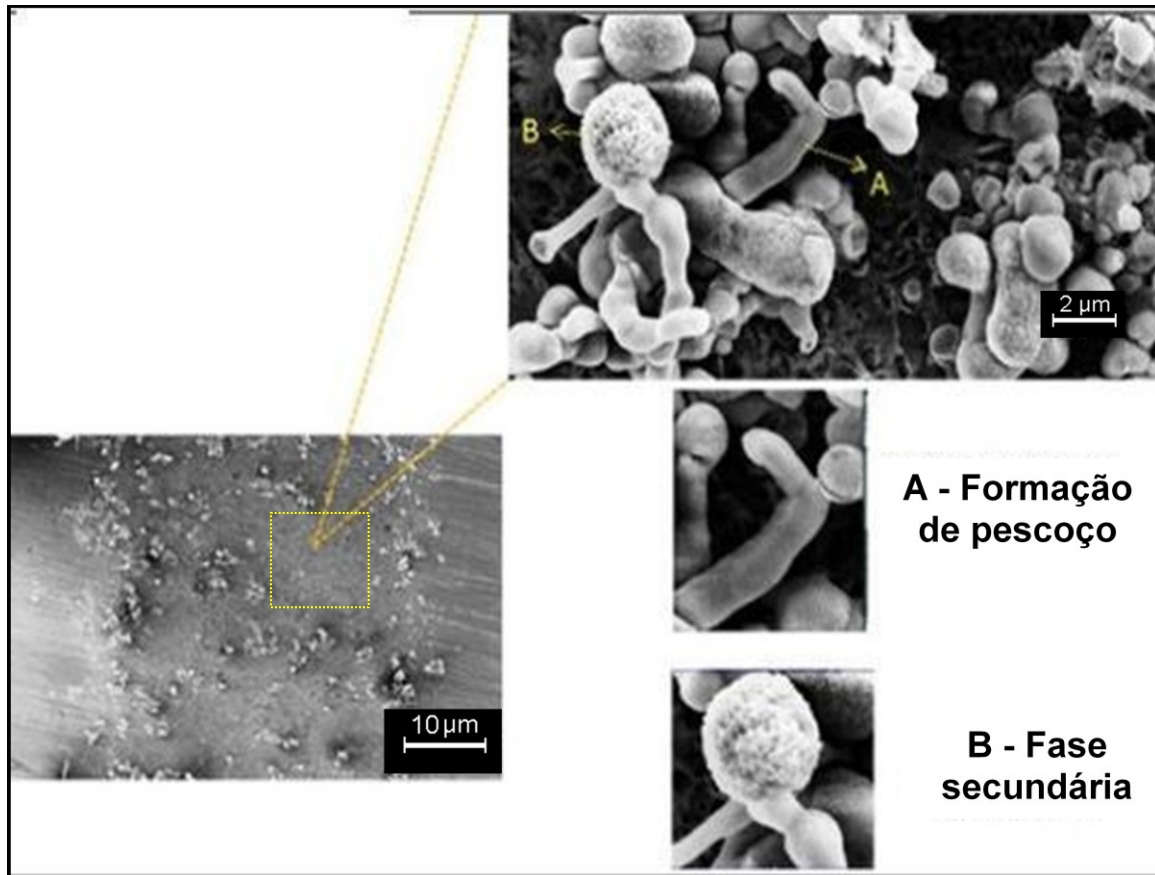


Figura 43 - Morfologia do revestimento de grafita fixado na superfície do aço AISI 52100 com laser na Condição 1.

No detalhe (A), na morfologia da camada de grafita, observa-se flocos presentes da morfologia original (Figura 28) e estes passam por um processo de sinterização do revestimento com a formação pescoços (detalhe B) e a ligação entre os grãos. Ainda, podemos notar a formação das fases intermediárias da formação dos pescoços.

Irradiando a superfície com a Condição 2 (velocidade de 30 mm/s e 5 ciclos de aquecimento) os resultados são apresentados na Figura 44.

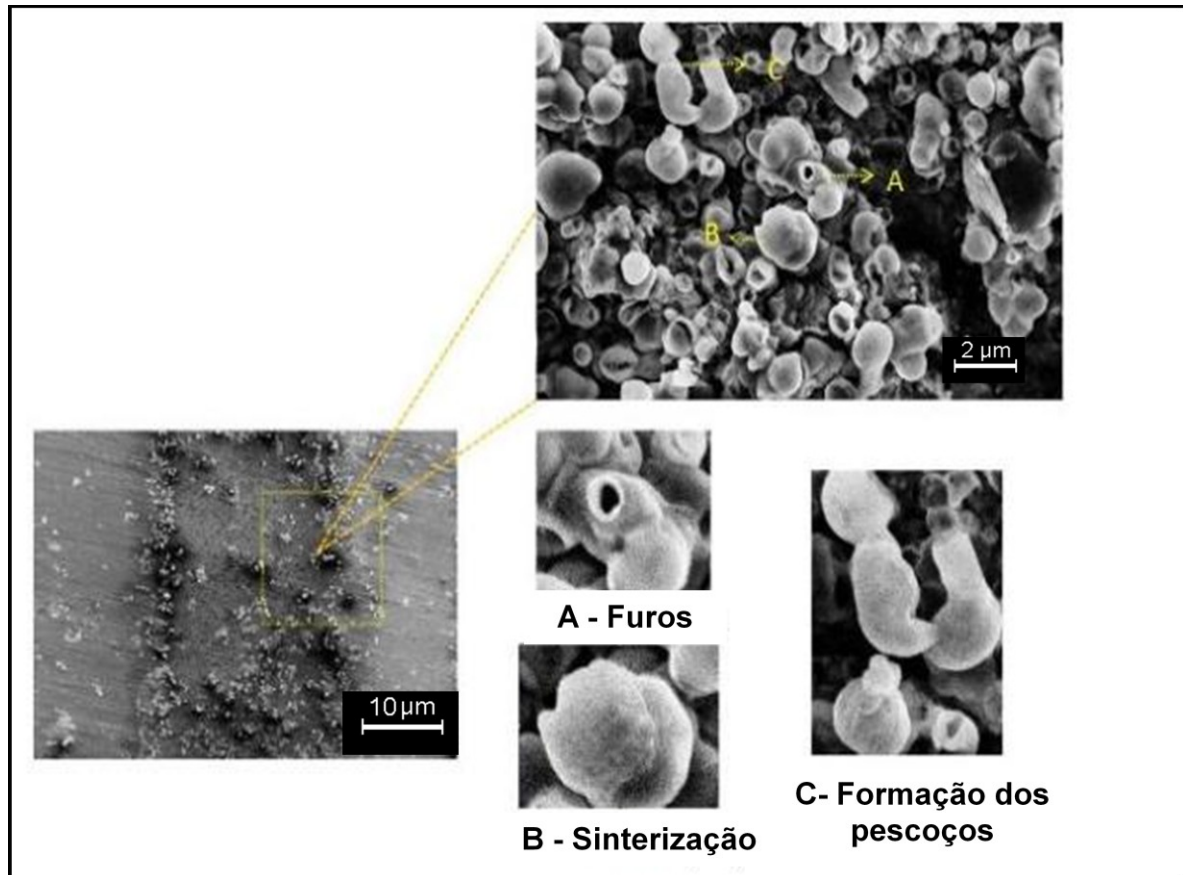


Figura 44 - Apresenta o MEV do revestimento de grafita fixados pela ação do laser no substrato do aço AISI 52100.

Nota-se um comportamento similar nas amostras tratadas com a Condição 1 (velocidade de 10 mm/s e 1 ciclo de aquecimento), com formação de grãos circulares, ligados uns com os outros através de pescoços. No entanto, podemos observar o surgimento de furos, possivelmente, oriundos do aprisionamento de gases aprisionados no interior dos poros.

A Condição 3 (Velocidade de processamento de 100 mm/s e 5 ciclos de aquecimento), o comportamento é similar os observados na Condição 1 e 2. No entanto, nota-se a redução dos furos encontrados no revestimento de grafita.

A Figura 45 apresenta os resultados do MEV sobre a camada de revestimento após a ação laser.

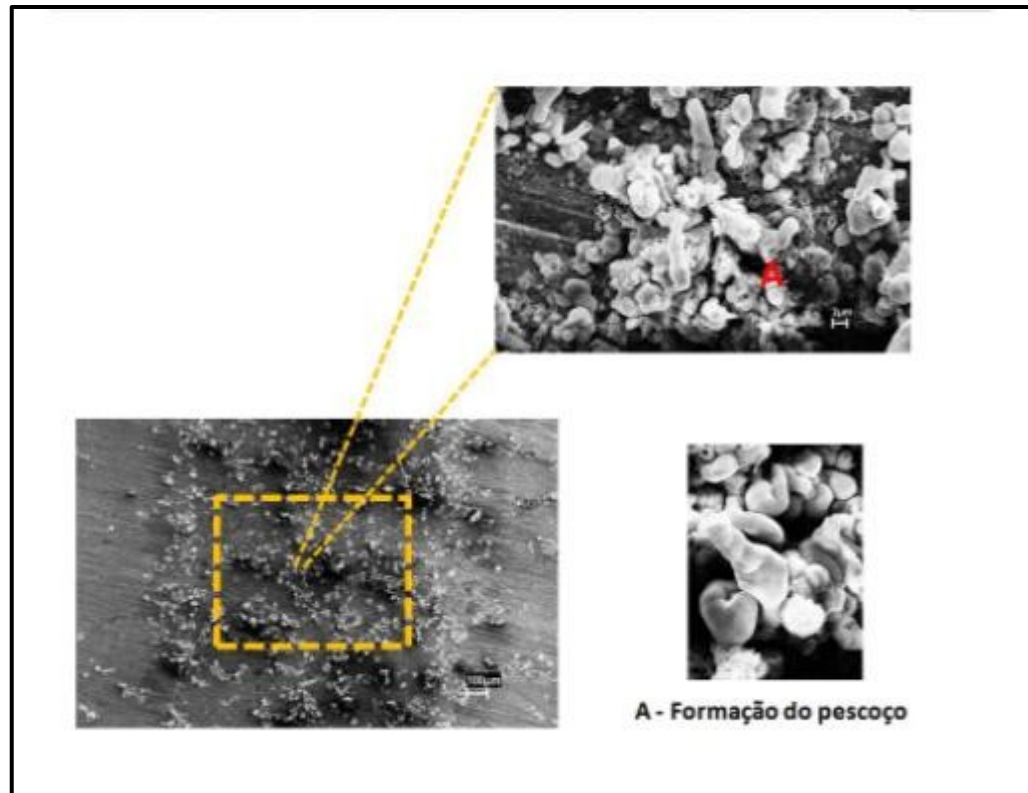


Figura 45 – O MEV do revestimento de grafita fixados pela ação do laser no substrato do aço AISI 52100, com a Condição 3.

A redução dos furos no revestimento deve-se, possivelmente, ao aumento da velocidade de processamento e conseqentemente ao menor tempo de interação do feixe de laser com a superfície do material.

Para exemplificar o processo de fixação do revestimento, a Figura 46 (a), (b), (c) e (d) apresenta um modelo simplificado.

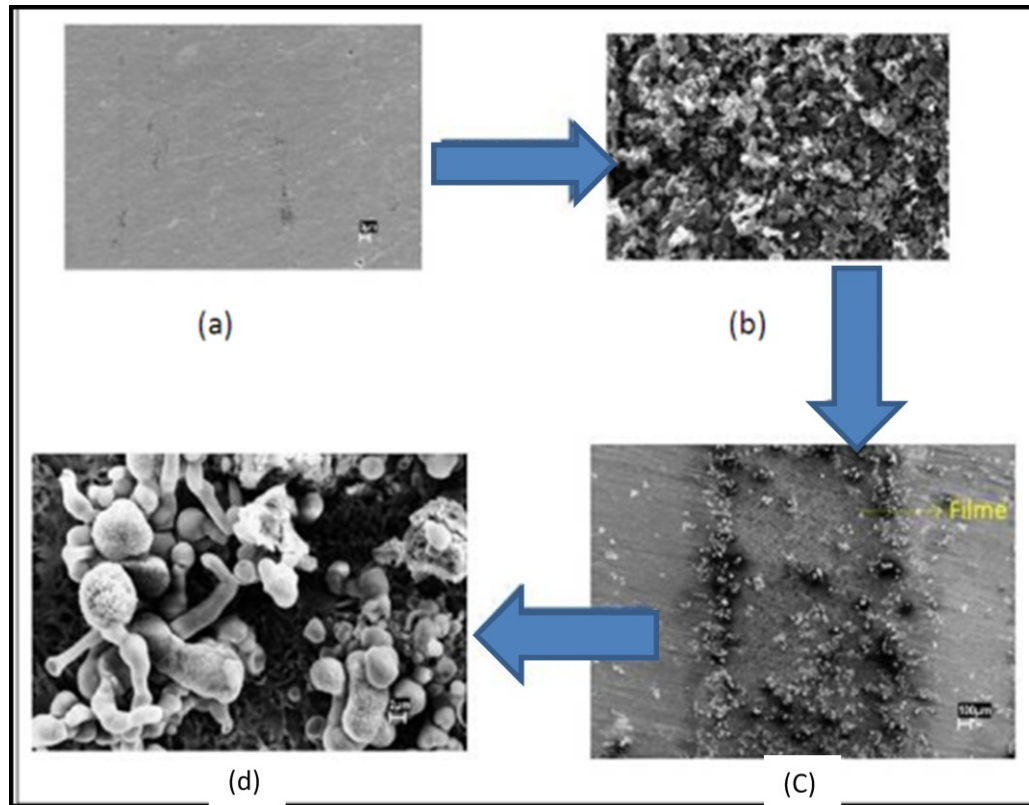


Figura 46 (a), (b), (c) e (d) - Representação das fases do processo, de fixação de grafita por laser. Na região (a) a superfície do substrato sem revestimento, (b) substrato com revestimento a “verde”, (c) revestimento ancorado na superfície e (d) formação dos pescoços e densificação da camada.

No detalhe (a) é apresentado à superfície do substrato metálico sem revestimento. No detalhe (b) o revestimento de grafita pulverizado sem irradiação laser. Na região (c) o revestimento após ser irradiado com laser. No detalhe (d) a morfologia do revestimento de grafita com a formação de pescoços ocasionados pelo processo de sinterização por laser.

Após os ensaios de dureza Vickers, MEV para caracterizar as zonas tratadas termicamente e a morfologia do revestimento de grafita respectivamente, passaremos a caracterizar o material tratado por meio de Difratoimetria de raios- X (DRX).

4.5.3 - Difratoimetria raios-X (DRX)

Neste tópico, a análise das regiões com e sem tratamento por laser foi realizada por difração de raios-X. Os resultados foram interpretados com o auxílio dos bancos de dados da JCPDS (Joint Committee on Powder Diffraction Standards, Swarthmore, USA). As fichas utilizadas na interpretação foram respectivamente: 39 - 1346 (Fe_2O_3), 03 - 1172 (Cr_{23}C_6), 05 - 0720 (Cr , Fe_{07}) C3 e 25 - 0284 (grafita C).

Realizou-se a análise de DRX nas seguintes condições:

Substrato: Superfície do aço AISI 52100 sem tratamento laser;

Condição 1: Superfície do aço AISI 52100 tratada com laser, com velocidade de 10 mm/s e 1 ciclo de aquecimento.

Condição 2: Superfície do aço AISI 52100 tratada com laser, com velocidade de 30 mm/s e 5 ciclos de aquecimento.

Condição 3: Superfície do aço AISI 52100 tratada com laser, com velocidade de 100 mm/s e 5 ciclos de aquecimento.

Os respectivos resultados são apresentados na Figura 47 onde é apresentado o material de base (substrato sem tratamento laser) em relação às Condições 1,2 e 3.

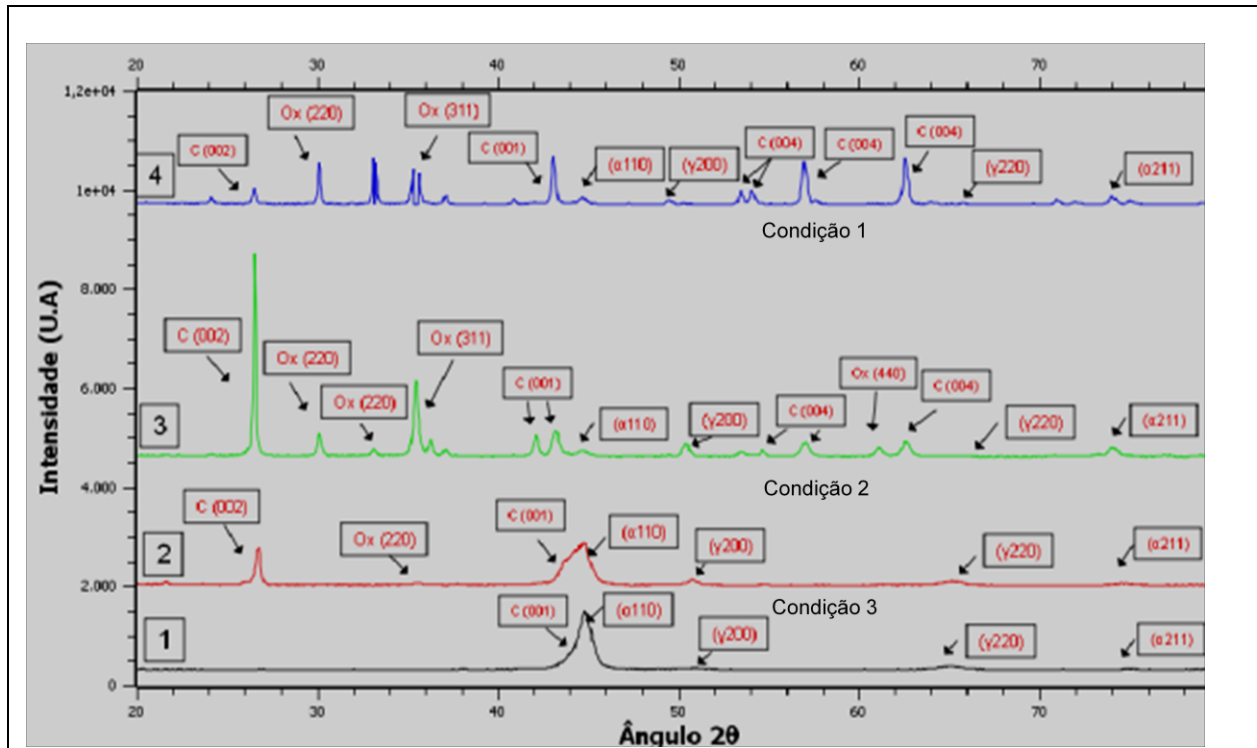


Figura 47 - Difratoograma de raios-X das fases presentes no aço AISI 52100. Nas condições de sem tratamento laser e com tratamento nas Condições 1, 2 e 3.

As fases formadas pelas diferentes condições de processamento aplicadas, segundo o difratograma são:

α – fase martensítica, onde o pico principal é identificado por α 110 e o segundo pico em α (211).

γ – Fase austenítica, onde o pico principal é identificado por γ (200) e o segundo pico em γ (220).

C – Carbono, onde o pico principal ocorre C (002) e os de menor intensidade em C (101), e em pequenas intensidades C (004) e C (103).

Cr₇C₃- Carbeto de cromo (Cr₇) é um dos possíveis carbonetos complexos (30% no Cr₂₃ C₆, 50% no Cr₇C₃ o restante em menores teores no Cr₃C₂).

Fe₂O₃ – Óxido de ferro (Ox), onde o pico mais intenso ocorre em Ox311 e em menores intensidades em Ox 220, Ox 440.

No difratograma número 1 refere-se à superfície do aço AISI 52100 sem tratamento laser (têmperado e revenido). Observa-se a presença de duas fases predominantes a martensítica e austenítica.

No difratograma número 2 (amostra recoberta com grafita e irradiada com a Condição 3, velocidade de 100 mm/s e 5 ciclos de aquecimento) observa-se além das duas fases presentes no substrato (difratograma 1) observa-se um intenso pico de carbono. Além disso, o surgimento a 75° de uma fase α 110. O pico de carbono presente a 25° refere-se ao revestimento de grafita fixado na superfície. as fases α 110 e 220 referem-se, possivelmente, a têmpera local (aquecimento e resfriamento) decorrente da ação do feixe de laser.

No difratograma número 3 (amostra recoberta com grafita e irradiada com Condição 2, velocidade de 30 mm/s e 5 ciclos de aquecimento). Observa-se, que o pico referente ao carbono tornou-se mais intenso e estreito, indicando, possivelmente, uma cristalização do revestimento sobre a superfície do aço AISI 52100. A fase α 110 que se delineava no difratograma 1 e 2 torna-se mais intensa. Isto se dá, provavelmente, pelo fornecimento de carbono, ocasionado pela dissolução de carbonetos próximos a superfície da amostra. Ainda, ocorre a formação de óxidos.

No difratograma número 4. (amostra recoberta com grafita e irradiada com Condição 1, velocidade de 10 mm/s e 1 ciclo de aquecimento), observa-se além dos picos da fase α 110, os picos de carbono apresentam-se mais intensos.

As bandas de Carbono 001, 004 e 103 tornam-se mais estreitos indicando, possivelmente, uma cristalização do revestimento.

4.5.4 - Análise dos constituintes da camada tratada por EDS

Neste tópico serão discutidos alguns aspectos químicos da ação do tratamento de superfície por laser (Condição 2). Este ensaio foi realizado por um espectrômetro Dispersivo em Energia (EDS). Vale salientar que a escolha desta amostra deve-se a mesma apresentar a maior extensão de zona tratada termicamente (ZTT).

A análise química foi efetuada na secção transversal do aço AISI 52100, conforme apresentado na Figura 48.

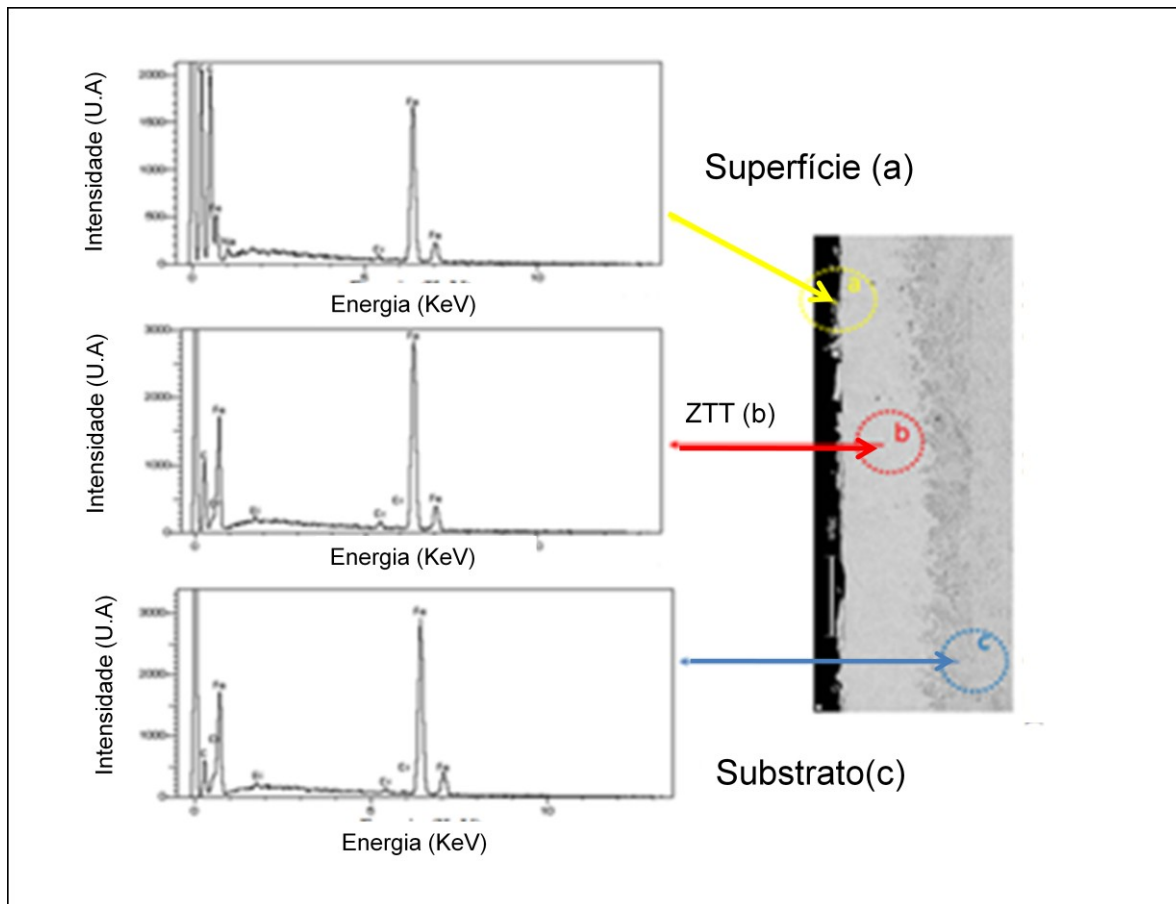


Figura 48 - Modelo esquemático da análise química por EDS.

Percebe-se que a concentração de carbono varia de uma região para outra. Na região mais próxima da superfície (a) a intensidade é elevada. Este fato deve-se ao revestimento de grafita. Na região b, trata-se da ZTT (zona termicamente tratada) pelo laser nota-se a redução desta intensidade. A região c, onde encontra-se o substrato permanece inalterado.

As Figuras 49, 50 e 51 apresentam os espectros do EDS de cada região analisada.

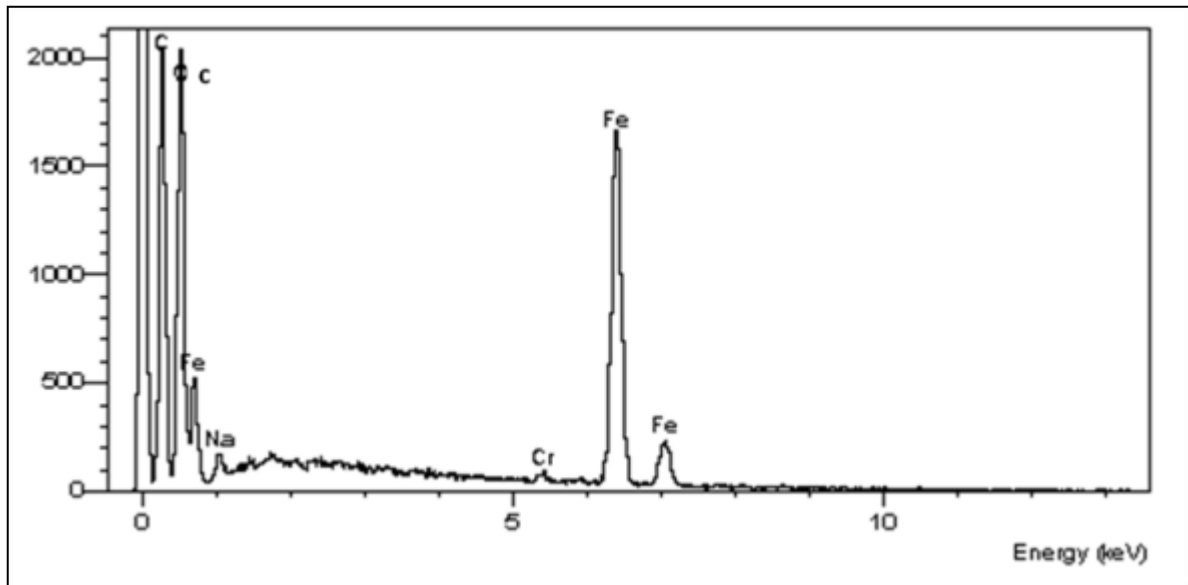


Figura 49 - Espectro da análise por EDS realizado na superfície do revestimento de grafita fixado sobre o substrato de AISI5210.

Na superfície (borda) do material tratado com a Condição 2 (amostra recoberta com grafita e irradiada com velocidade de 30 mm/s e 5 ciclos de aquecimento) nota-se, o aumento do teor de carbono e ausência de óxidos. Este teor de carbono elevado é provavelmente devido à difusão decorrente do processo de aquecimento e resfriamento proporcionado pela ação laser. Esta hipótese é confirmada pelo ensaio de DRX.

Analisando a região “b” mais clara nota-se a redução da concentração de carbono em relação à superfície de grafita. Este comportamento é esperado, pois na superfície do revestimento a concentração de carbono é elevada (Figura 50).

A Figura 50 apresenta o espectro da análise química da seção transversal da área tratada com laser na Condição 2.

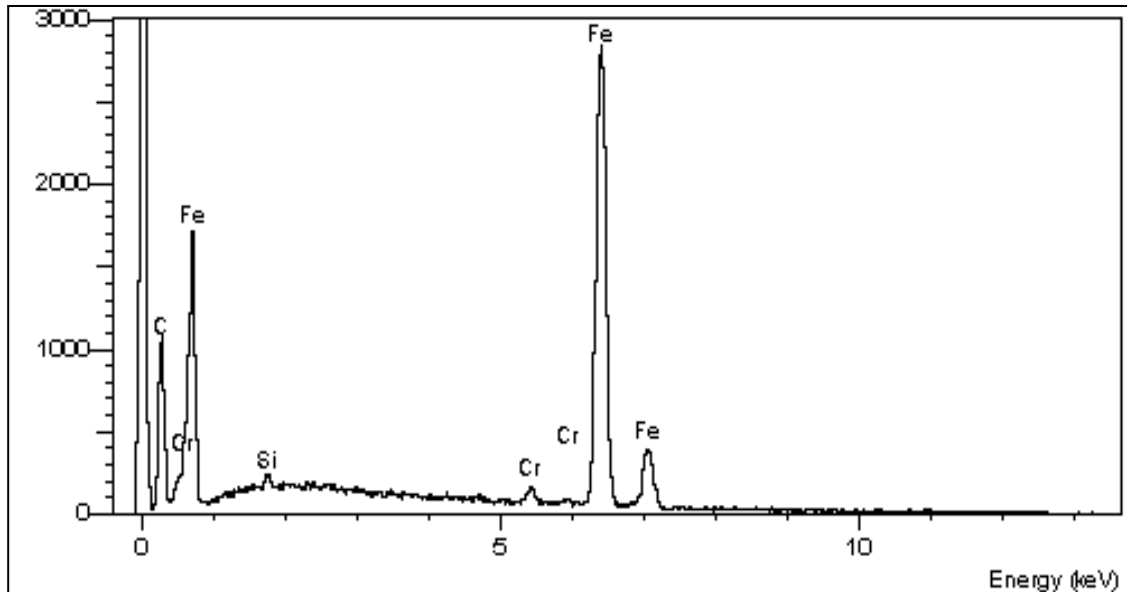


Figura 50 - EDS da ZTT nota-se, um aumento do teor de carbono.

Analisando o substrato do aço AISI 52100, nota-se a redução do teor de carbono em relação à superfície e a ZTT (Figura 51).

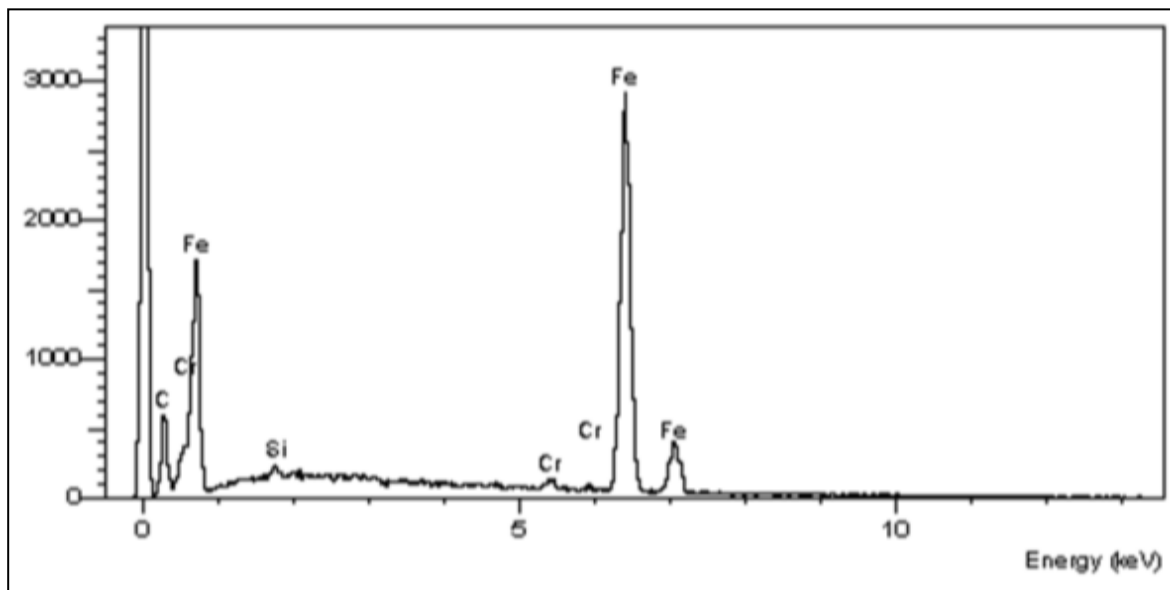


Figura 51 - EDS do substrato do aço AIS 52110, sem alterações na concentração de carbono.

Podemos notar nos espectros apresentados, à medida que se distancia da borda, o teor de carbono reduz, ou seja, a elevação ou redução do teor de carbono está ligado diretamente as zonas tratadas pelo laser. Isto é, ocorre difusão atômica de curto alcance.

Para complementar aos resultados obtidos por EDS, foram realizados ensaios químicos por espectroscopia de fluorescência de raios -X, na superfície das amostras tratadas nas Condições 1, 2 e 3 respectivamente.

4.5.5 - Análise química por Fluorescência de raios - X

As análises realizadas por fluorescência de raios-X foram feitas na superfície dos revestimentos para determinar: a espessura do revestimento, a concentração de carbono na superfície e a ocorrência de oxidações. Essa técnica não possui uma norma específica, por se tratar de uma técnica complementar.

Os resultados das análises realizadas nas superfícies das amostras irradiadas são apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 - Análise química da camada de revestimento

Condição de processamento laser	Elementos e Espessura			
	C %	Cr (%)	Fe ₂ Ox(%)	Camada de grafita (µm)
1	90	1,42	0,2	9±0,2
2	85	1,41	0,0	7±0,1
3	78	1,42	0,0	5±0,3

Para facilitar a análise os elementos Ferro (Fe) e Carbono (C) contido no substrato do aço AISI 52100, foram colocados em balanço estequiométrico.

As espessuras das camadas de grafita fixadas, na superfície do aço AISI 52100 são estimadas por meio de softwares dedicados do próprio equipamento. Basicamente é mensurada a diferença de energia utilizada para excitar os elétrons das primeiras camadas e os do substrato do material de base. As diferenças entre essas energias são interpretadas pelo software que apresenta o resultado de forma de espessura.

A espessura da camada varia conforme a energia entregue a superfície.

Vale salientar, que os ensaios foram realizados em temperatura (20°C) e umidade (50%) controlados.

Após as análises de dureza Vickers, MEV, MO, DRX e EDS, o atrito e o desgaste das amostras irradiadas por laser foram avaliados, os resultados são apresentados a seguir.

4.5.6 - Ensaios de desgaste

Para os ensaios de desgaste, utilizou-se de amostras processadas por laser nas Condições 1,2 e 3. (amostras recobertas com grafita e irradiadas com velocidade de 10,30 e 100 mm/s e com 1 e 5 ciclos de aquecimento, respectivamente) Para cada condição de processamento, foi realizado ensaios tribológicos específico. Em termos de controle dos ensaios tribológicos os mesmos foram realizados em ambiente com temperatura e umidade controlados, (20±1°C) e (50±2%), respectivamente.

Para cada medida utilizou-se uma nova área da esfera e do plano. Cada teste foi repetido três vezes e o valor médio do coeficiente de atrito e da taxa desgaste, estes foram utilizados para ilustrar o comportamento das condições. O resumo do tipo de ensaio e os respectivos parâmetros utilizados no ensaio tribológico são apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 - Ensaios tribológicos, parâmetros do ensaio pino contra- disco.

Par estudo (Pino / Amostra)	Ensaios tribológicos	Movimento	Parâmetros do teste	
			Carga (N)	Velocidade (mm/s)
Esfera de AISI 52100 contra disco de AISI 52100 sem tratamento laser	Atrito	Rotacional	10	10
	Desgaste			
	Volume perdido			
Esfera de AISI 52100 contra disco de AISI 52100 com tratamento laser (condição 1,2 e 3)	Perda de massa (g)	Rotacional	10	10
	Atrito			
	Desgaste			
	Volume perdido			
	Perda de massa (g)			

Os sulcos formados pelo ensaio foram medidos por microscopia óptica. Enquanto o desgaste e o volume perdido foram calculados utilizando as equações 7, 9 e 11. Os respectivos resultados dos ensaios tribológicos são apresentados na Tabela 16

A avaliação do comportamento tribológico dos pares testados são apresentados na Tabela 16.

Tabela 16 - Resultados dos ensaios tribológicos

Par estudado amostra	Largura do sulco (mm)	Perda de massa (g)	Volume de perda (mm ³)	Taxa de desgaste (mm ³ /m)	Dureza (HV)	Desgaste (mm ³ / Nm)
Sem Tratamento laser	0,3631	0,027	0,00344	$2,73 \times 10^{-7}$	640	$2,05 \times 10^{-5}$
Condição 1	0,2032	0,017	0,0021	$1,72 \times 10^{-7}$	1013	$1,29 \times 10^{-5}$
Condição 2	0,1597	0,008	0,010	$8,1 \times 10^{-7}$	1050	$6,08 \times 10^{-6}$
Condição 3	0,1811	0,012	0,001	$1,21 \times 10^{-7}$	895	$9,1 \times 10^{-6}$

De acordo com a metodologia empregada para a obtenção dos dados, primeiramente, foram avaliadas as amostras sem tratamento laser e posteriormente, executados os ensaios com os tratamentos laser com as condições 1,2 e 3. É interessante observar que, para cada condição existe um valor diferente para a largura do sulco formada pelo contato entre a esfera e o plano, ou seja, para cada condição de tratamento laser existe um comportamento tribológico distinto. Deve-se salientar que a largura do sulco das amostras tratadas independente da condição aplicada, é menor que as amostras sem tratamento laser. Desta forma, é possível, afirmar que o tratamento por laser possibilita o aumento da resistência ao desgaste por deslizamento.

Bru em seu trabalho correlacionou à largura do sulco (ou ranhura) formada, durante o ensaio tribológico com ao aumento da dureza superficial. É interessante observar um comportamento similar conforme apresentado na Figura 52 [26].

Pode-se notar na Figura 51 que, a condição a qual apresentou o menor valor de perda de massa é a Condição 2 (velocidade de processamento 30 mm/s e 1 ciclo de aquecimento). Esse comportamento era previsto, pois segundo a literatura [21, 22, 23, 24, 26, 27,28,29], superfícies com dureza elevada apresentam um menor desgaste.

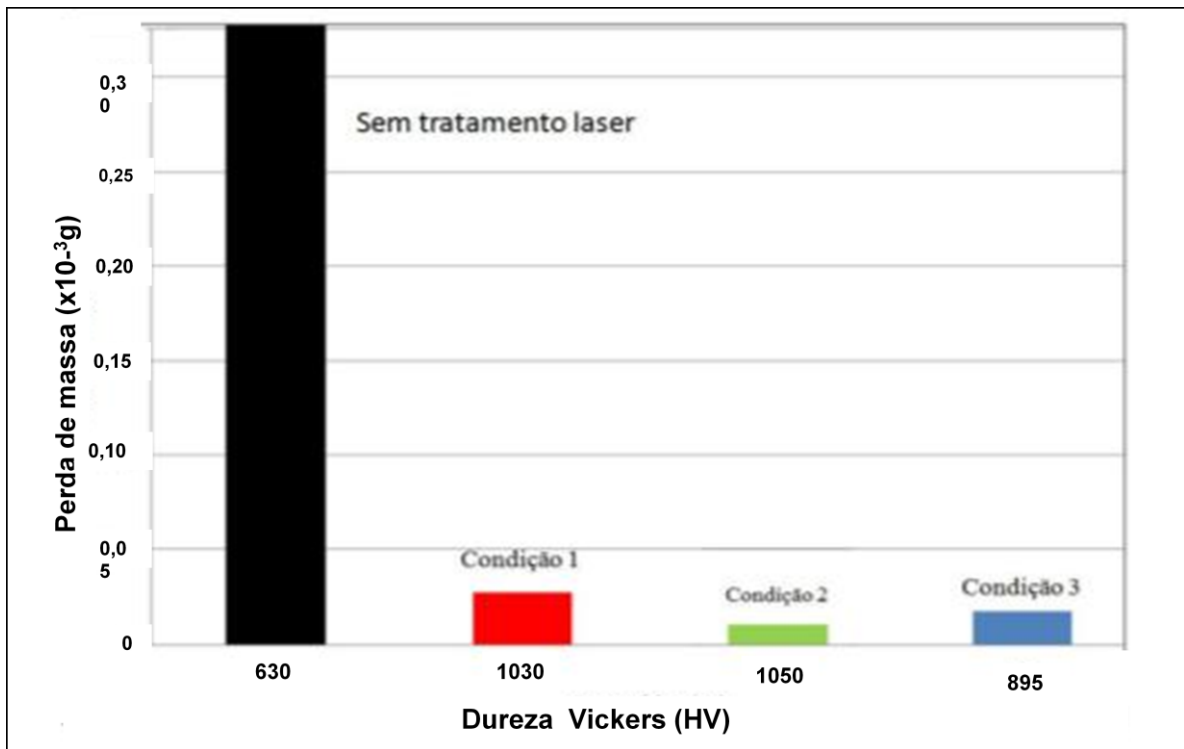


Figura 52 - Comportamento da perda de massa (desgaste) em função da dureza Vickers.

Conforme apresentado na secção de materiais e métodos, o mesmo equipamento utilizado para avaliar o desgaste também pode medir coeficiente de atrito, os respectivos resultados são apresentados a seguir.

4.5.7 - Coeficiente de atrito

O estudo do comportamento do coeficiente de atrito nos pares testados, de amostras com e sem tratamento laser, utilizaram-se da mesma metodologia empregada no ensaio de desgaste. A Figura 53 apresenta os resultados.

Coefficientes de atrito dos pares testados obtidos, por meio de software dedicado do equipamento.

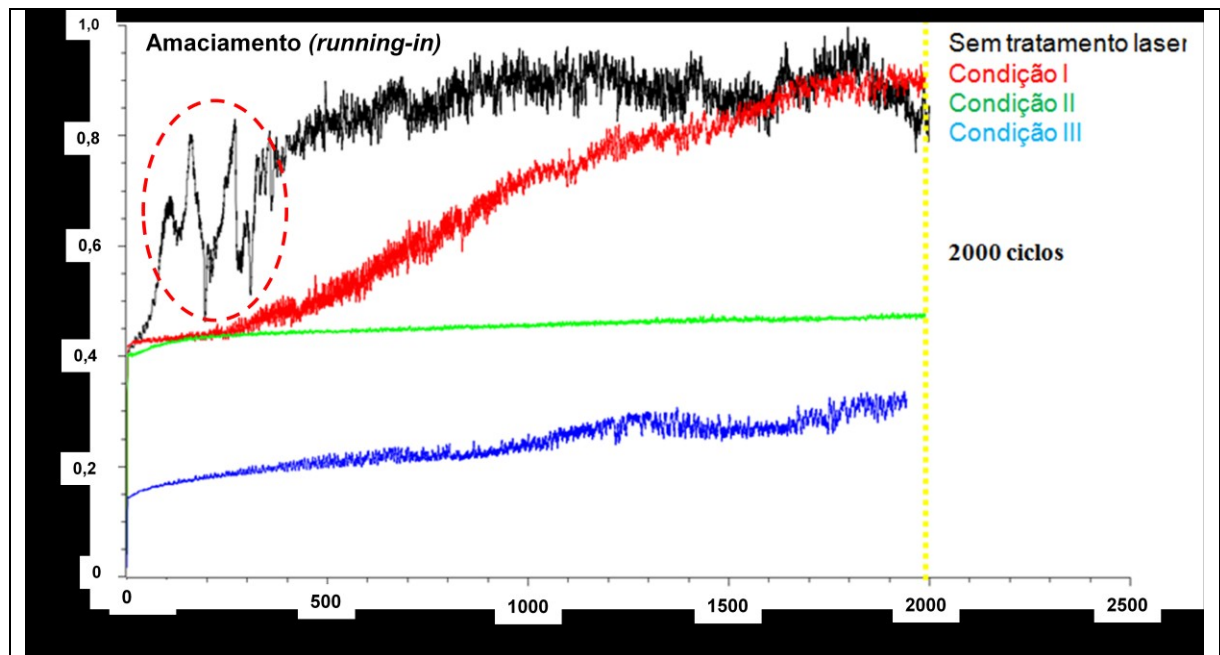


Figura 53 - Resultado dos coeficientes de atrito das amostras tratadas com tratamento laser e sem tratamento laser

Observa-se neste ensaio, que o coeficiente de atrito das amostras com tratamento laser independente, da condição de processamento aplicada é menor que a do substrato sem tratamento laser.

Na Condição sem tratamento laser o coeficiente de atrito médio é da ordem de 0,7. Enquanto, na Condição 1 (tratamento laser com velocidade 10 mm/s e 1 ciclo de aquecimento), observa-se um coeficiente de atrito de 0,4 até o limite de 1500 ciclos onde ocorreu um aumento no coeficiente de atrito aonde o mesmo atingiu 0,7.

Na Condição 2 (tratamento laser com velocidade de 30 mm/s e 5 ciclos de aquecimento) o coeficiente de atrito foi da ordem de 0,4. Neste caso o coeficiente de atrito manteve-se estável até o fim do ensaio que no caso foi de 2000 ciclos.

Na Condição 3 (tratamento laser com velocidade de 100 mm/s e 5 ciclos de aquecimento), o coeficiente de atrito foi da ordem de 0,2 até o limite de 1000 ciclos onde ocorreu um aumento para 0,3. No entanto, permaneceu estável até o fim do ensaio.

Na Figura 53 as Condições 1 e 3 propiciaram um melhor resultado na redução do atrito. Para refinamento destes resultados, foi realizado mais um ensaio com velocidades de 50 mm/s e 5 ciclos de aquecimento (Condição 4), repetindo os outros parâmetros de teste. O resultado é apresentado na Figura 54.

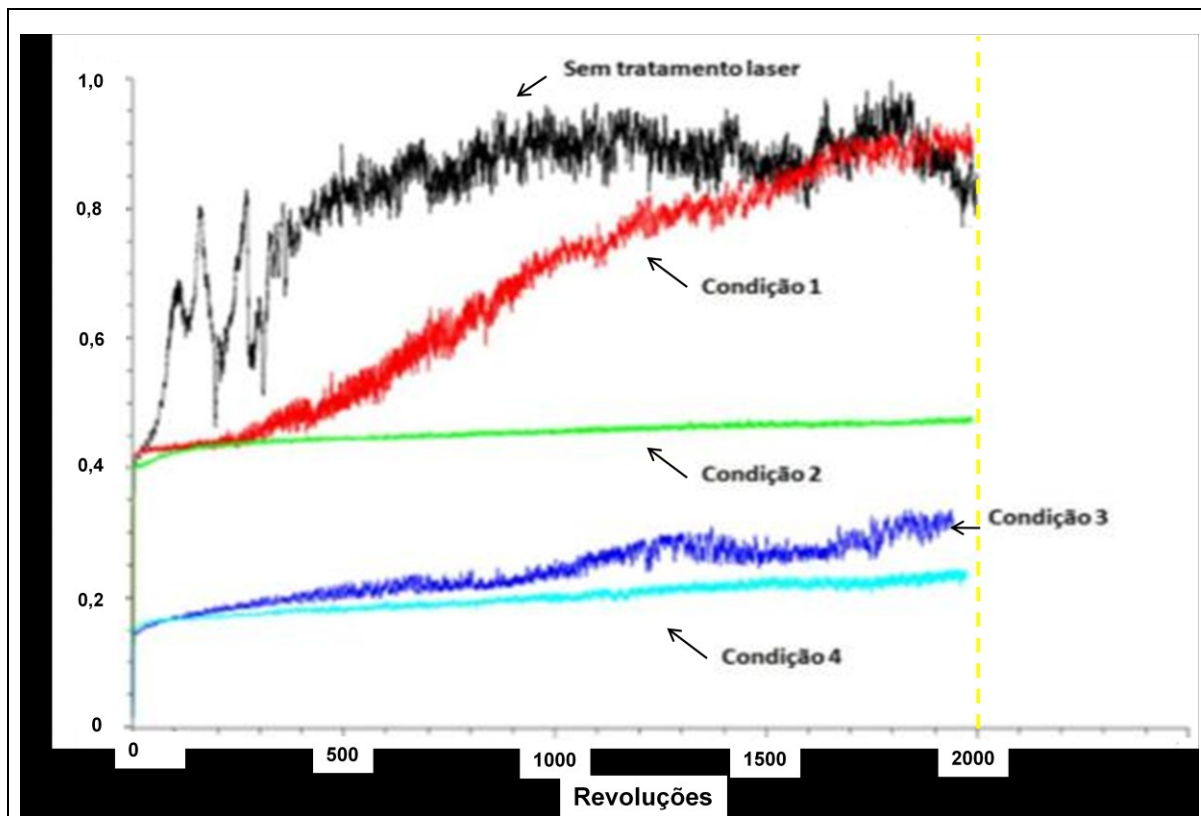


Figura 54 - Resultados tribológicos do coeficiente de atrito da Condição 4, em comparação com as Condições 1, 2, 3 e sem tratamento laser.

Nota-se que na Condição 4, o coeficiente de atrito manteve-se abaixo de 0,2 apresentando um suave aumento em aproximadamente 1200 revoluções. Entretanto, manteve-se constante até o término do ensaio. Ao calcularmos a perda de massa utilizando a mesma metodologia dos resultados apresentados na Tabela 16 para as Condições 1, 2 e 3.

A perda de massa para a Condição 4 é da ordem de 0,0162 gramas. A Figura 55 apresenta a correlação da largura do risco dos ensaios de desgaste dos pares tratados com as Condições 1, 2, 3 e 4.

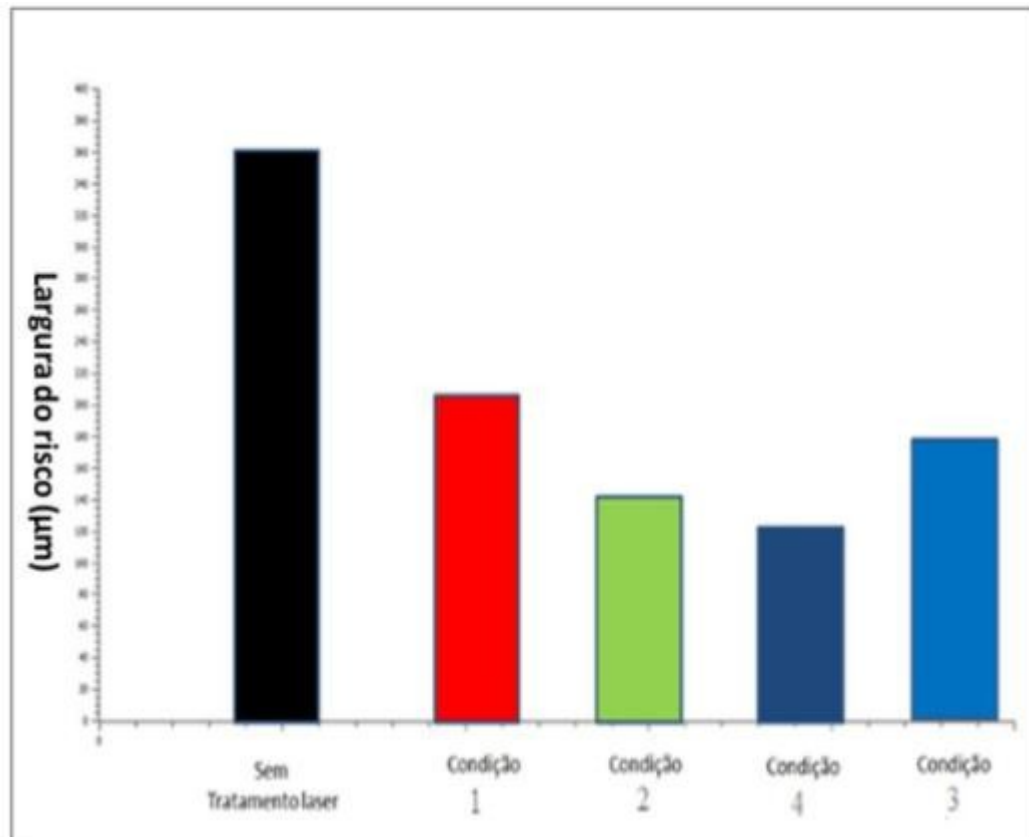


Figura 55 - Correlação dos valores de largura do risco em relação às condições de processamento laser aplicadas.

Com estes ensaios, buscou-se encontrar as tendências de comportamento do coeficiente de atrito e do desgaste, mais genéricos que possam auxiliar na caracterização rápida e eficiente no tratamento de superfícies por laser.

Um fato que podemos comprovar é a existência de uma faixa de tratamento superficial por laser, situadas entre a Condição 3 e a Condição 4 (velocidade de processamento entre 30 mm/s e 50 mm/s).

Para refinar ainda mais o processo, realizou-se mais um ensaio com velocidade de processamento de 80 mm/s com 5 ciclos de aquecimento (Condição 5), repetindo os outros parâmetros. O resultado deste novo ensaio é apresentado na Figura 56.

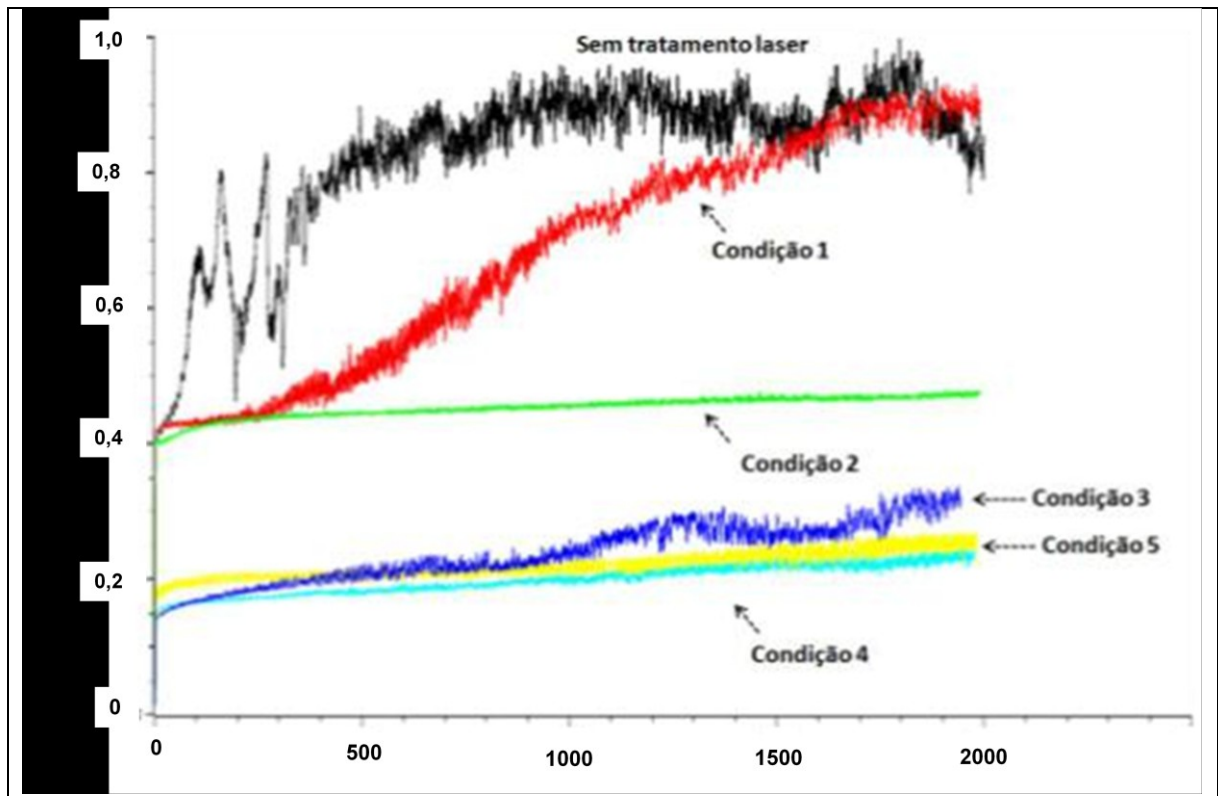


Figura 56 - Coeficiente de atrito do para tratado com laser na Condição 5.

Observa-se que o coeficiente de atrito da Condição 5 (processamento laser com velocidade 50 mm/s e 5 ciclos de aquecimento) é da ordem de 0,2. No entanto, a partir dos 1000 ciclos ocorre um leve aumento.

Com os resultados obtidos no estudo do coeficiente de atrito, conclui-se que os pares tratados com as Condições de processamento laser 3, 4 e 5 são os limiares do processo, pois, não sofrem alterações abruptas.

As variações sofridas no coeficiente de atrito, observadas em todas as condições de tratamento laser são devidas, a formação do terceiro corpo que neste caso, referem-se às primeiras camadas do revestimento grafita que desprendem-se devido ao contato metal contra metal. O comportamento observado no ensaio corrobora com a literatura, pois segundo Bowden e Tabor [35] o contato com os fragmentos do revestimento ou terceiro corpo, por se tratar de um material macio (mole) auxilia na redução do coeficiente de atrito. A Figura 57 apresenta o esquema simplificado deste comportamento.

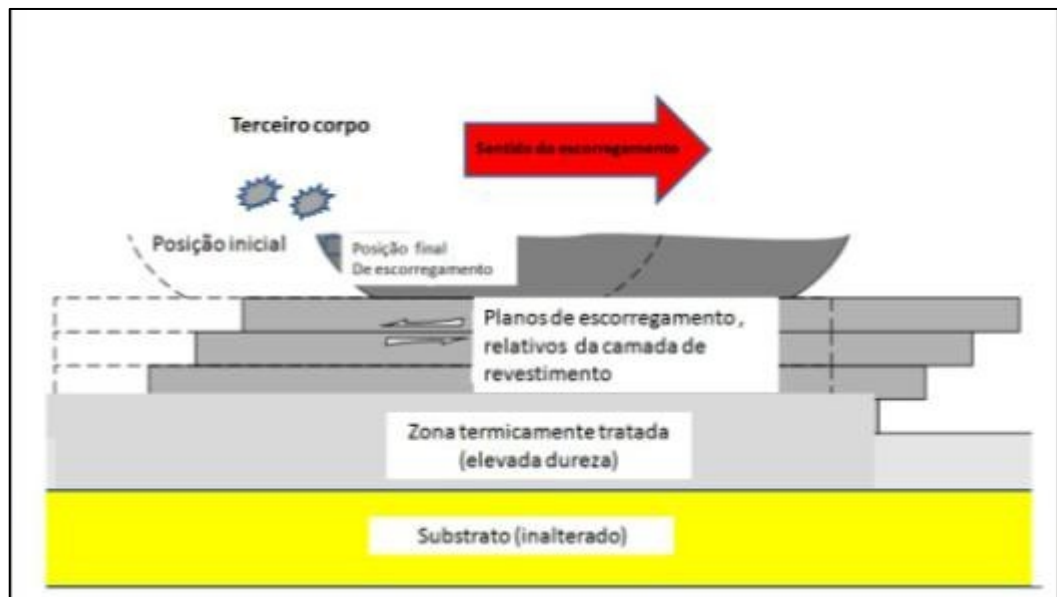


Figura 57 - Esquema simplificado da formação do terceiro corpo, adaptado de [35].

Após a realização destes experimentos o seguinte comportamento é observado que os coeficientes de atrito em todos os pares tratados com laser apresentam redução, quando comparados com os pares sem tratamento laser. Dessa forma, decidiu-se, realizar um ensaio tribológico mais severo com apenas uma condição de tratamento laser.

A seleção da condição de tratamento laser a ser avaliada levou em consideração os seguintes fatores:

- Maior zona tratada termicamente;
- Coeficiente de atrito mais estável, durante o ensaio de 2000 ciclos.

Baseado nestes requisitos selecionou-se a Condição 3 (velocidade de processamento laser de 30 mm/s com 5 ciclos de aquecimento). Os parâmetros do ensaio tribológico aplicado foram os seguintes: carga de 60N, número de revoluções de 60000 e sem lubrificação externa (óleos ou graxas).

A Figura 58 apresenta os resultados do coeficiente de atrito deste dos pares com e sem tratamento laser.

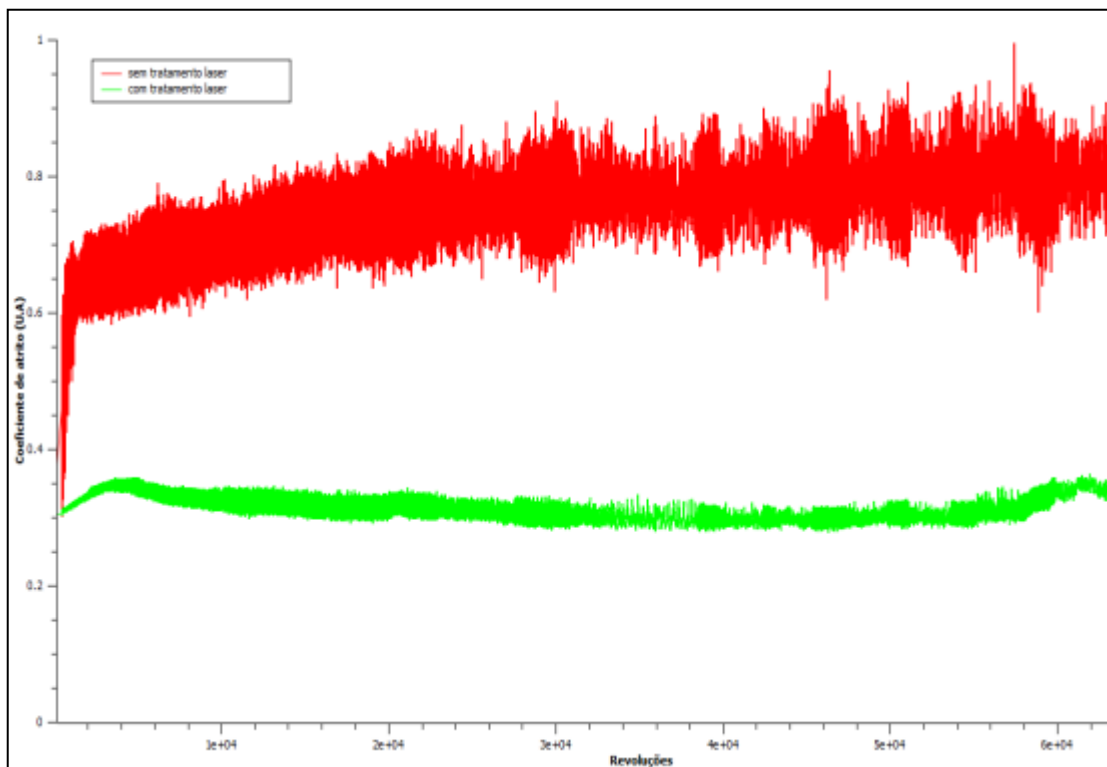


Figura 58 - Coeficiente de atrito dos pares com e sem tratamento laser, sob ensaio tribológico mais severo.

Nota-se que mesmo aplicando um ensaio tribológico mais severo, o coeficiente de atrito da Condição 3 mantém-se da ordem de 0,3. Enquanto, o coeficiente de atrito do par sem tratamento laser é da ordem de 0,6 ~ 0,7. Este comportamento já era esperado devido aos outros ensaios realizados anteriormente. A redução do atrito não se dá somente devido a camada de revestimento fixada na superfície do aço AISI 52100, mas também pelo aumento da dureza do substrato. Para evidenciar o desgaste sofrido pelas superfícies com e sem tratamento laser após o ensaio de desgaste, um perfil da secção transversal das superfícies foi realizado e são apresentados a seguir.

Os perfis de desgaste foram realizados por meio de perfilômetro da marca *Taylor Robson* com resolução de 100 nm.

O sentido de deslocamento da ponteira laser foi no sentido transversal ao sulco formado pelo ensaio tribológico. As Figuras 59 e 60 apresentam os perfis brutos, dos sulcos formados na superfície do aço AISI 52100 com tratamento e sem tratamento laser, após o ensaio de desgaste.

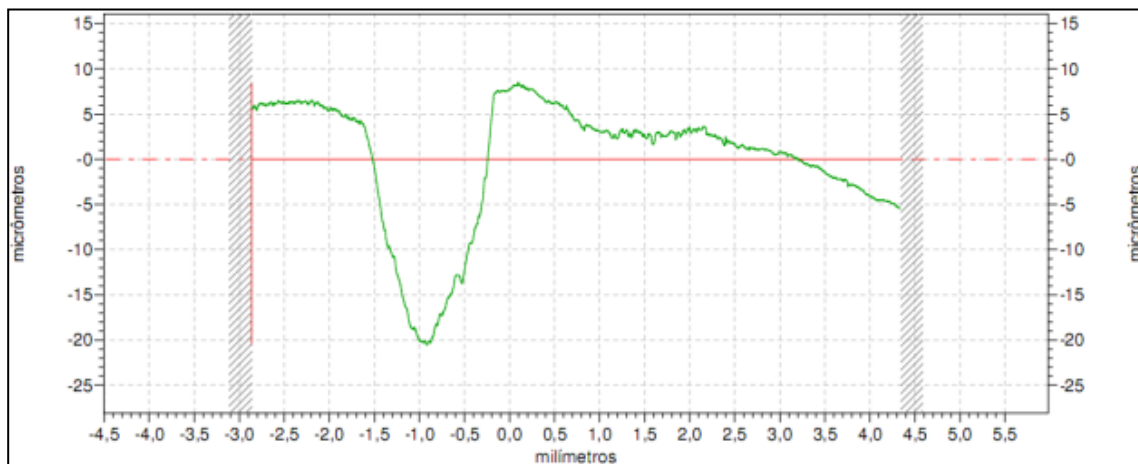


Figura 59 - Perfil bruto da superfície do aço AISI 52110 sem tratamento laser.

Observa-se que a superfície sem tratamento apresenta um sulco, devido ao material removido, em consequência da deformação plástica (contato metal-metal) sofrida e grande profundidade do risco, sendo que a deformação é da ordem de $24\mu\text{m}$.

A superfície tratada com laser apresenta menor profundidade do risco e menor deformação plástica de material (Figura 60).

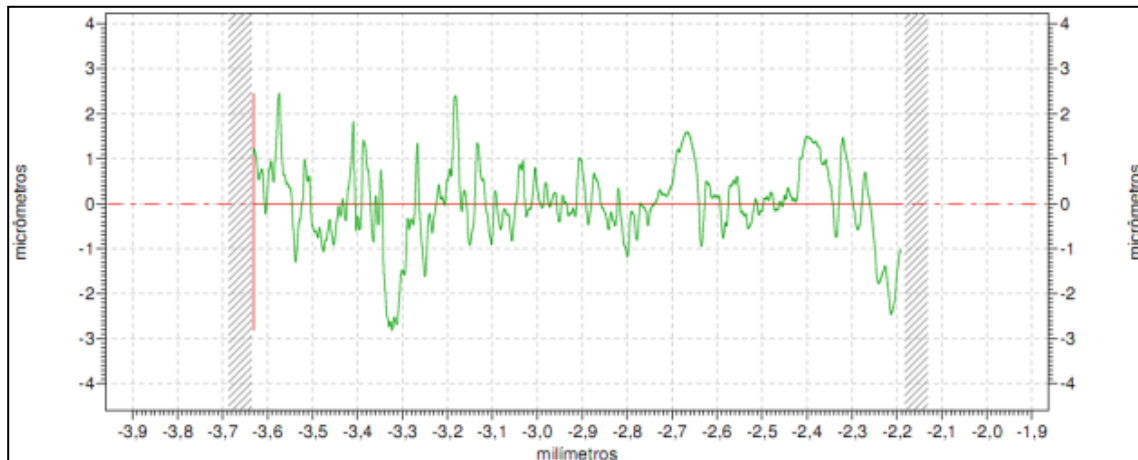


Figura 60 - Perfil bruto da superfície do aço AISI 52100 com tratamento laser na Condição

3.

A superfície com tratamento laser na Condição 3 (velocidade de processamento de 30 mm/s e 5 ciclos de aquecimento) apresenta um desgaste homogêneo, a profundidade do sulco formado é da ordem de $5,7\mu\text{m}$.

Os resultados em ambos os casos eram esperados uma vez que materiais mais macios apresentam menor resistência à deformação e à remoção de material [31, 32, 33, 34, 36, 37]. Desta maneira, podemos afirmar que embora a camada de material fixado na superfície seja removida, a região tratada com laser apresenta o menor volume de material deformado e removido.

5.0 - Conclusões

Neste trabalho foram realizados estudos a respeito dos comportamentos tribológicos do aço AISI 52100 tratado com um laser de CO₂ de 50W.

Observando-se o proposto nos objetivos do trabalho, o presente estudo permite concluir o que se segue.

A aplicação ou fixação de revestimentos por laser de CO₂ é uma técnica que permite obtenção de várias vantagens, como a fixação de um revestimento de lubrificante sólido e a geração de uma zona termicamente tratada com durezas da ordem de 1000 HV, em tempos extremamente curtos.

Ao irradiar o aço AISI 52100 recoberto com grafita ocorreram as transformações de fases de interesse (fases martensítica). Ainda, ocorreu um aumento na concentração de carbono na zona tratada termicamente, identificada pelo ensaio químico (EDS). Este aumento indica um processo difusional de curto alcance.

Os efeitos dos parâmetros operacionais do laser como velocidade, tempo de interação da radiação laser e resolução influenciam na profundidade da zona tratada, na microestrutura e nas propriedades tribológicas do material. Neste trabalho foi possível selecionar uma faixa de tratamento, cujas Fluências (energia por área) variam de 3 a 11 J/m² que atendem os requisitos propostos de reduzir o atrito e aumentar a dureza superficial. A extensão da ZTT e a espessura de revestimento variam conforme a energia entregue ao material. No entanto, não podemos afirmar categoricamente que não haja outras condições com características semelhantes além das avaliadas. Entretanto, podemos afirmar que em todos os pares tratados com laser apresentaram uma redução do atrito e do desgaste da ordem de 50% quando comparados com o material sem tratamento laser.

O revestimento de grafita devido ao contato com as asperezas superficiais pode ser removido, gerando o terceiro corpo. Contudo, é interessante destacar que a interposição de um corpo macio auxilia no processo amaciamento (*running*) das superfícies.

Podemos ainda relacionar diretamente que com o aumento da dureza superficial ocorreu à redução da largura e da profundidade dos sulcos formados indicando numa maior resistência ao desgaste do material.

Devido à fixação do revestimento e a ZTT de elevada dureza, a profundidade da máxima pressão de contato (*Hertz*) entre os corpos pode ser ampliada.

Este trabalho mostrou-se promissor em melhorar as propriedades mecânicas e tribológicas e abre um campo de possibilidades que serão abordadas, provavelmente, em trabalhos futuros.

6.0 - Sugestões para Trabalhos Futuros

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

- 1 - Estudar as propriedades resultantes do tratamento superficial por laser para outros materiais e/ou ligas de interesse científico.
- 2 - Estudar o processo de difusão de curto alcance do carbono por meio de laser.
- 3 - Realizar ensaios de corrosão considerando a influência do tempo de exposição ao meio sobre camada formada pelo laser sobre a superfície.
- 4 - Mesclar outras técnicas de processamento laser, por exemplo, texturização da superfície para aumentar a fixação do revestimento de grafita.
- 5 - Utilizar-se de processos híbridos, por exemplo, plasma com laser para o tratamento superficial.

7.0 - Referências

- [1]. CAMPANHA, M. V. **Estudo sobre a vida útil de rolamentos fixos de uma carreira de esferas**. 2008 110 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

- [2]. PINTO, M. A. **Deposição de revestimentos compósitos metal cerâmico WC-Co por fusão a laser**: avaliação da resistência ao desgaste e a corrosão. 2004 120 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia dos Materiais) – Universidade de Campinas, Campinas.

- [3]. SOARES, E. J. F. **Tratamento superficial a laser dos aços AISI 1045 e AISI 4340**: transformações microestruturais e propriedades. 2005 170 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade de Campinas, Campinas.

- [4]. ERDEMIR, A. Solid Lubricants and self - lubricant films. .In: **Modern Tribology Handbook**: principles of trybology. Boca Raton: CRC Press LCC, 2001. v.2 , Cap 22.

- [5]. VASCONCELOS, G et al. Thermal treatment of the AISI M2 high speed steel promoted by CO₂ laser beam. **Materials Science Forum**, v. 591-593, p 62 - 67. 2008

- [6]. BASU, A. et al. Laser hardening of austempered (bainitic) ball bearing steel. **Surface & Coatings Technology Scripta Materialia**, v. 56, , n. 10, p. 887 – 890, 2007

- [7]. JENDRZEJEWSKI, R. et al Investigation of têmperature and stress fields in laser claddd coatings. **Applied Surface Science**, v. 254, n. 4, p. 921–925, 2007.

- [8]. YAO, Jianhua, et al. Microstructure and wear property of carbon nanotube carbon steel by laser surface remelting. *Applied Surface Science*. **Surface Science** , , p. 811–814,2006.

- [9]. GANEEV, R.A. Low-power laser hardening of steels. **Journal of Materials Processing Technology**, v.121, n. 2/3, p. 414–419, 2002.
- [10]. VISSCHER, H. et al. The influence of laser line hardening of carbon steel AISI 1045 on the lubricated wear against steel AISI 52100. **Wear**, v. 181-183, p. 638-647, 1995
- [11]. SVELTO, O. **Principles of lasers**. 3. ed. New York: Plenum Press, 1989. 494p.
- [12]. CHARSEAN, S. S. **Lasers in industry**. New York: Van Nostrand Reinhold Company, 1972.
- [13]. REIS, J. L. **Tratamento térmico superficial do aço AISI M2 via laser de CO₂**. 2009.105 f. Dissertação (Mestrado em Física Química dos Materiais) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.
- [14]. STEEN, W. M. **Laser material processing**. 3. New York: Springer, 2008. 347p.
- [15]. READY, John F.; FARSON, D. F.; FEELEY, T (Ed.). **LIA handbook of material processing**. Orlando: LIA, 2001.
- [16]. LIMA, M. S. F. et al. Laser surface remelting and hardening of an automotive shaft using a high-power fiber laser. **Materials Research**, v. 10, n. 4, 461-467, 2007.
- [17]. CARSLAW, H. S.; JAEGER, J. C. **Conduction of heat in solids**. 2.ed. London: Oxford University, 1960.
- [18]. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM G99-95a**: test method for wear testing with a pin - on-disk. Philadelphia, 2000

- [19]. BLAU, P. J. The significance and use of friction coefficient. **Tribology International**, v. 34, p.585 - 591. 2001.
- [20]. HOLMBERG, K. Coatings tribology contact mechanisms and surface design. **Tribology International**.v. 31, n. 1–3, p. 107–120, 1998.
- [21]. STOETERAU, R. L.; LEAL, L. C. **Apostila de tribologia**. Santa Catarina: Universidade Federal de Santa Catarina, 2002.
- [22]. RADI, P.A. **Estudos de fenômenos tribológicos em materiais carbonosos**. 2008. 148 f. Dissertação (Mestrado em Física Química dos Materiais) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.
- [23]. JOHNSON, K. L. **Contact mechanics**. Cambridge: Cambridge University Press, 1985. 452 p.
- [24]. VINGSBO, O. Wear and wear mechanisms. In: INTERNATIONAL CONFERENCE WEAR OF MATERIALS, 1979, Dearborn. **Proceedings...** New York: ASME, 1979. p.620-635.
- [25]. MÜLLER, R. **Spectrochemical analysis by x-ray fluorescence**. New York: Plenum, 1972.
- [26]. BRU, R. J. B.W. **Avaliação mecânica de superfícies do aço SAE 4144**. 2008. 70 f . Dissertação (Mestrado Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba.
- [27]. VAN ESSEN, P. et al. Scratch resistance and wear of CrNx coatings. **Surface & Coatings**, v. 200, n. 11, p. 3496-3502, 2004.

- [28]. LARSEN-BASSE, J. Basic theory of solid friction. In: ASM. **ASM Handbook friction, lubrication and wear technology**. Materials Park: ASM International, 1992. v 18, p. 27-38.
- [29]. SHARMA, G. et al. Sliding wear resistance of iron aluminides. **Mater Sci.**, v. 26, n. 3, p. 311 – 314 , 2003.
- [30]. NEVES, J.C.K . **Desenvolvimento de um equipamento para ensaio de fadiga de contato esfera sobre plano e sua aplicação na caracterização de ferros fundidos com matrizes de elevada dureza**. 2006, 162 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- [31]. RABINOWICZ. **Friction and wear of materials**: New York: Wiley, 1965.
- [32]. ERDEMIR, A. Review of engineered tribological interfaces for improved boundary lubrication. **Tribology International**, v.38, n.3, p. 249–256, 2005.
- [33]. SANDOR, L. T. **Uma metodologia para a avaliação dos gradientes de tenacidade à fratura ao longo da camada cementada do aço SAE 5115**. 2005.180 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade de Campinas, Campinas.
- [34]. WOO, H. G.; CHO, H. S. Estimation of hardened layer dimensions in laser surface hardening processes with variations of coating thickness. **Surface and Coatings Technology**, v. 205 - 217, 2008.
- [35]. BOWDEN, F.P.; TABOR, D. **Friction and lubrication of solids**. Part 1. London: Oxford University Press, 1954.
- [36]. VERÁSTEGUI, R.N. **Análise da refusão superficial de aços por laser**. 2007. .93 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Minas, Metalúrgica e de Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

- [37]. HOLMBERG, K.; RONKAIINEN, H; MATTHEWS, A. Tribology of thin films coatings. **Ceramics International**, v. 26, p.787- 795, 2000.

8.0 Apêndices

Anexo 1A - Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

As figuras a seguir apresentam o MEV da solução de grafita antes e após o processamento laser e a interface do revestimento de grafita e o aço AISI 52100.

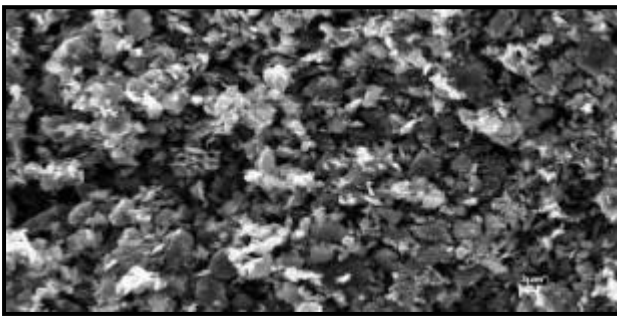


Figura 1A - Material particulado de grafita sem ação laser.

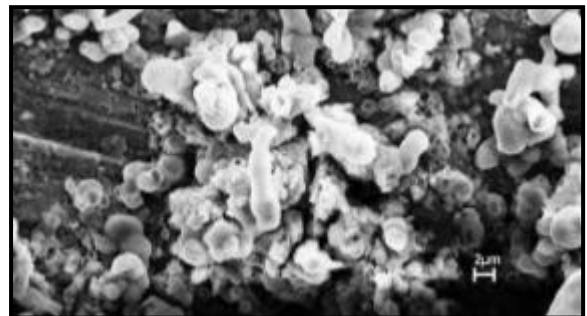


Figura 2A - Material particulado de grafita após a ação laser.

Analisando as Figuras 1A e 2A nota-se que o grafita ao ser irradiada pelo laser, ocorre a sinterização. A ação laser promove a fixação e a densificação do revestimento de grafita, na superfície do aço AISI 52100 como podemos observar nas Figuras 3A e 4A.

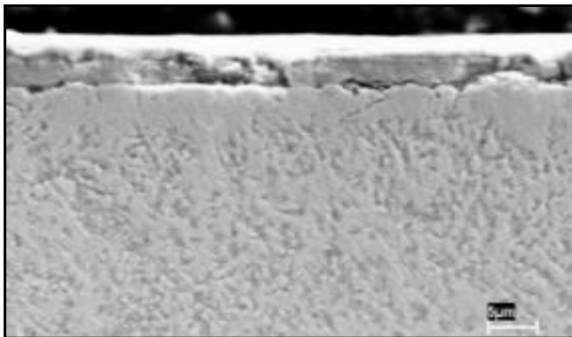


Figura 3A – Seção transversal do revestimento de grafita (1) fixado na superfície do aço AISI 52100.

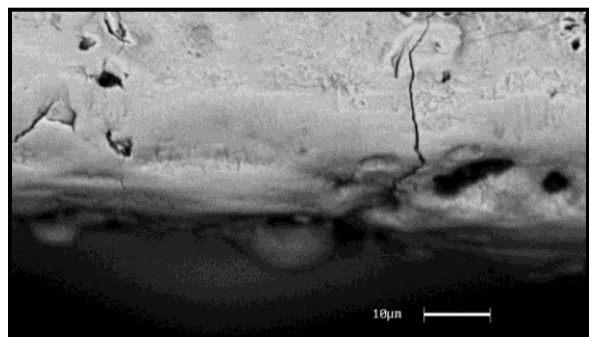


Figura 4A - Detalhe do revestimento de grafita densificado pela ação laser.

Observa-se a fixação do revestimento de grafita na superfície do aço e uma ZTT logo abaixo. Esta ZTT possui uma elevada dureza quando comparado com o restante do material.

Anexo 1B - Perfis de Dureza Vickers

As Figuras a seguir apresentam as microestruturas das secções transversais após diferentes tratamentos laser onde variaram-se a velocidade de processamento e ciclos de aquecimentos aplicados na superfície do aço AISI 52100 previamente recobertas com grafita.

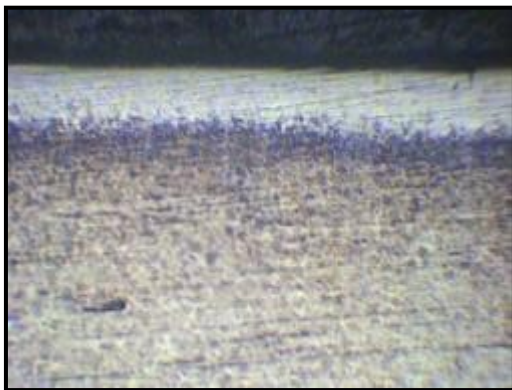
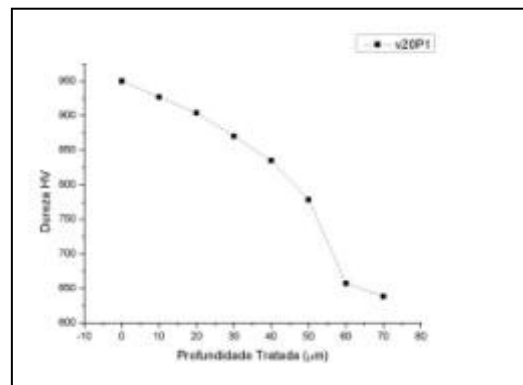


Figura 1B - Secção transversal do aço AISI 52100 processada com 20 mm/s e 1 ciclo de aquecimento.



Perfil de dureza HV da ZTT

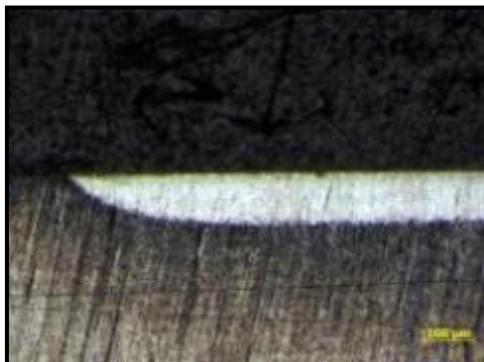
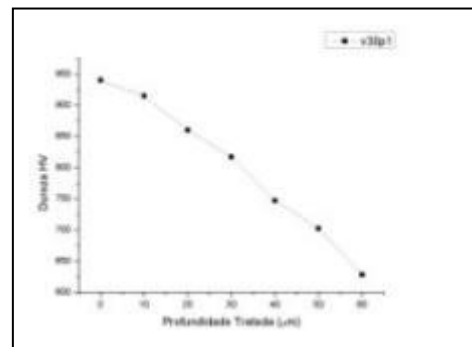


Figura 2B - Secção transversal do aço AISI 52100 processada com 30 mm/s e 5 ciclos de aquecimento



Perfil de dureza HV da ZTT

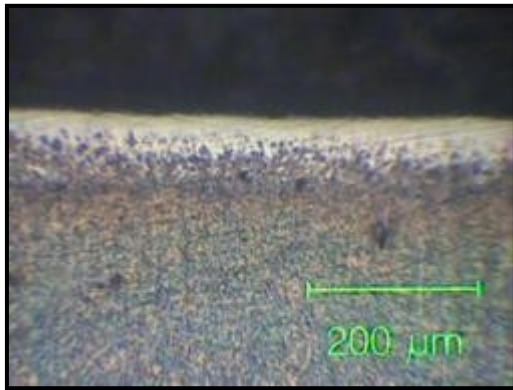
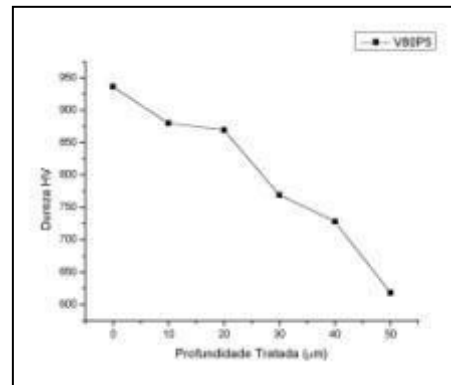


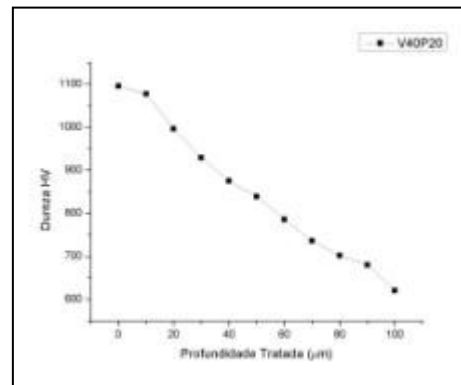
Figura 3B - Secção transversal do aço AISI 52100 processada com 80 mm/s e 1 ciclo de aquecimento.



Perfil de dureza HV da ZTT



Figura 4B - Secção transversal do aço AISI 52100 processada com 40 mm/s e 10 ciclos de aquecimento



Perfil de dureza HV da ZTT

FOLHA DE REGISTRO DO DOCUMENTO			
1. CLASSIFICAÇÃO/TIPO DM	2. DATA 20 de agosto de 2010	3. REGISTRO N° DCTA/ITA/DM-042/2010	4. N° DE PÁGINAS 109
5. TÍTULO E SUBTÍTULO: Avaliação tribológica da aplicação de lubrificantes sólidos com laser de CO ₂ em atmosfera ambiente em aço AISI 52100			
6. AUTOR(ES): Anderson Ferreira da Silva			
7. INSTITUIÇÃO(ÕES)/ÓRGÃO(S) INTERNO(S)/DIVISÃO(ÕES): Instituto Tecnológico de Aeronáutica - ITA			
8. PALAVRAS-CHAVE SUGERIDAS PELO AUTOR: 1. Laser. 2. Tratamento térmico. 3. Tribologia. 4. Lubrificante sólido			
9. PALAVRAS-CHAVE RESULTANTES DE INDEXAÇÃO: Tratamento de superfícies; Aços-ferramenta; Lasers de dióxido de carbono; Tratamento térmico; Tribologia; Lubrificante sólido; Aplicação de laser; Grafita; Engenharia de materiais			
10. APRESENTAÇÃO: X Nacional Internacional ITA, São José dos Campos. Curso de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Aeronáutica e Mecânica Área de Física e Química dos Materiais. Orientador: Prof. Dr. Getúlio de Vasconcelos;. Defesa em 12/08/2010. Publicada em 2010			
11. RESUMO: <p>Neste trabalho, são apresentados os resultados da avaliação tribológica da aplicação de lubrificantes sólidos, no caso grafita, sobre a superfície do aço AISI 52100 via laser de CO₂. O trabalho surgiu da busca pela melhoria das propriedades superficiais dos materiais que têm solicitações diferenciadas na superfície. A utilização do laser para tratamentos de superfícies, por exemplo, aplicação de lubrificantes sólidos em atmosfera ambiente, tem possibilitado grandes avanços nesta área. No entanto, determinar quais parâmetros operacionais do laser e a resultante destas influências sobre as propriedades tribológicas dos materiais tem sido uma busca incessante.</p> <p>Os resultados deste trabalho confirmam que existe uma faixa de processamento laser eficaz na redução do atrito e do desgaste. Sendo que as energias necessárias variam de 3 a 11 J/m². Ainda, verifica-se que as amostras tratadas com laser, apresentam um coeficiente de atrito da ordem de 0,3 enquanto, amostras sem tratamento laser o atrito é da ordem de 0,7.</p> <p>As análises químicas por EDX e EDS demonstram uma difusão atômica de curto alcance nas zonas tratadas com o laser.</p>			
12. GRAU DE SIGILO: (X) OSTENSIVO () RESERVADO () CONFIDENCIAL () SECRETO			