



COMPARATIVO ENTRE OS MATERIAIS FOTOABSORVEDORES NEGRO DE FUMO E BISSULFETO DE MOLIBDÊNIO EM UM TRATAMENTO SUPERFICIAL VIA LASER DE CO₂ EM SUBSTRATO DE AÇO

^aPacheco dos Santos, J.J.; ^bTroysi, F.D.; ^aCunha, D.F.; ^aAlves, R.R.; ^{b*}Contin, A.

^aUniversidade Federal de Goiás (UFG) - Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação (EMC).

^bUniversidade Federal de Goiás (UFG) – Faculdade de Ciências e Tecnologia (FCT).

*autor correspondente: Universidade Federal de Goiás (UFG) – Faculdade de Ciências e Tecnologia (FCT), Estrada Municipal, qd, 04, Bairro Fazenda Santo Antônio, 74971-451, Aparecida de Goiânia - GO- Brasil. andre.contin@ufg.br

RESUMO

O tratamento térmico via laser visa o endurecimento seletivo da superfície de ligas de engenharia. Neste trabalho é empregado um laser de CO₂ de 100 W na qual tem uma refletância da irradiação sobre o aço da ordem de 90%, a partir disso há necessidade do emprego de materiais fotoabsorvedores de radiação. O objetivo deste trabalho é a comparação de dois materiais fotoabsorvedores de irradiação, negro de fumo e bissulfeto de molibdênio sobre o tratamento superficial em um aço 4340. A caracterização das amostras incluiu a Microscopia Ótica, Microdureza Vickers. Os resultados mostraram que todas as irradiações com diferentes parâmetros levaram ao aumento da microdureza superficial quando comparado com o substrato sem tratamento. Observou-se também uma tendencia do aumento da microdureza superficial com o aumento da densidade de energia e com o aumento da resolução do laser. O emprego do negro de fumo proporcionou os maiores aumentos de microdurezas superficiais.

Palavras-chave: aço 4340, tratamento via laser, tratamento superficial.

1. INTRODUÇÃO

O tratamento de superfície via laser emerge como uma técnica viável afim de modificar as propriedades superficiais dos materiais, tais como a dureza, resistência ao desgaste. Uma fonte de laser possui algumas propriedades únicas para aquecimento superficial já que a radiação é absorvida apenas na região varrida pelo feixe. As vantagens comuns do emprego do laser em comparação com processos alternativos são: limpeza química, difusão térmica controlada, processamento remoto, perfil de zona tratada termicamente controlada e processo rápido (1). Muitas técnicas de tratamento via laser foram desenvolvidas, tais como: endurecimento a laser, refusão a laser, vitrificação, liga, revestimento a laser, choque a laser e texturização a laser

(2). Dentre essas técnicas, o endurecimento via laser é usado para incrementar a dureza superficial e para melhorar a resistência ao desgaste. Durante o processo, a superfície do material é aquecida devido a irradiação de um feixe de laser e consequente resfriada com uma elevada taxa na qual causa o processo de têmpera superficial, desenvolvendo uma estrutura martensítica na superfície (2), (3).

Existem vários fatores que afetam o processamento via laser, tais como a potência do laser (P), o diâmetro do feixe de laser (D), velocidade de varredura do feixe (V) e resolução. O conceito de densidade de energia é dado por: $(E = P / (D.V))$ que é um indicador da quantidade de energia transferida através do feixe durante o processo (4). Outro fator interessante é absortividade da radiação, que é dependente do comprimento de onda da radiação empregada (2). Para o comprimento de onda do laser empregado neste trabalho, a refletância é da ordem de 90% para os substratos de aço. Com isso há a necessidade do emprego de materiais fotoabsorvedores de radiação, tais como bissulfeto de molibdênio, grafite e negro de fumo. No trabalho de Reis et al. (5), foi empregado o pó de grafite como fotoabsorvedor em um substrato de aço AISI M2, via laser de CO₂. Os resultados mostraram que o tratamento superficial via laser promoveu um aumento da dureza superficial do aço em 30%.

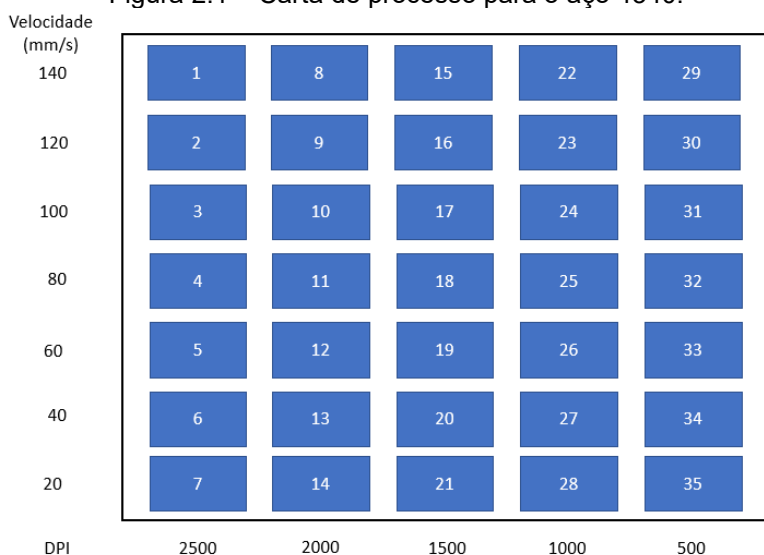
Neste trabalho avaliou-se dois materiais fotoabsorvedores de radiação sobre um aço 4340 via laser de CO₂ de 100 W.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Foram empregadas amostras de aço 4340 como substratos, com diâmetro de 1,5 polegada. As amostras foram lixadas com lixas de granulometria de 80, 220, 320, 600 e 2000 e em seguida polidas, usando alumina com granulometria de 1,0 µm e 0,5 µm. O aditivo a base de bissulfeto de molibdênio em spray, da marca FBS e modelo laser mark, foi aplicado pelo método de pulverização sobre o substrato de aço 4340. Já o método de aplicação do pó de negro de fumo foi a pré-deposição, no qual foi feita pelo método de imersão, que consiste na imersão da amostra, com o auxílio de uma pinça anatômica em uma solução contendo 15 g de negro de fumo e 100 ml álcool etílico 92,8 % em um substrato de aço inox 304. Em seguida, após a secagem para cada método, foi feita a irradiação com o feixe de laser sobre o substrato). Para a realização do tratamento via laser, foi empregada um equipamento laser pertencente ao Laboratório de Materiais e Processos de Fabricação (LAMAF-UFG), com parâmetros de: potência de saída de 100 W, diâmetro de feixe de 300 µm e comprimento de onda de 10,6 µm

Foi realizada uma carta de processo contendo 35 retângulos de 15 mm², com as variáveis de: velocidade de irradiação do laser (mm/s) versus DPI (resolução- número de pontos por polegada), conforme figura 2.1. O número de ciclo de operações foi fixado em 1. A carta de processo foi empregada tanto para a amostra com a aplicação de bissulfeto de molibdênio quanto para a de negro de fumo.

Figura 2.1 – Carta de processo para o aço 4340.

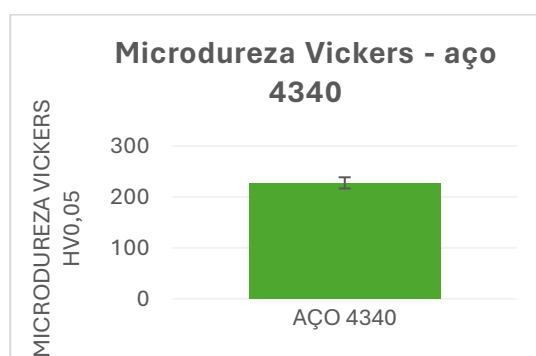


As imagens de Microscopia Ótica (MO) foram empregadas para examinar as morfologias das superfícies dos substratos após o processo de irradiação via laser. As imagens foram realizadas no microscópio ZEISS Stereo Discovery V.8 pertencente a Universidade Federal de Goiás-UFG. As análises de microdureza Vickers (HV) foram realizadas com microdurômetro de Marca Mitutoyo modelo HM-200 pertencente a Universidade Federal de Goiás-UFG. Os parâmetros para a análise na superfície da amostra foram: 50 gf de carga e tempo de 10 s.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

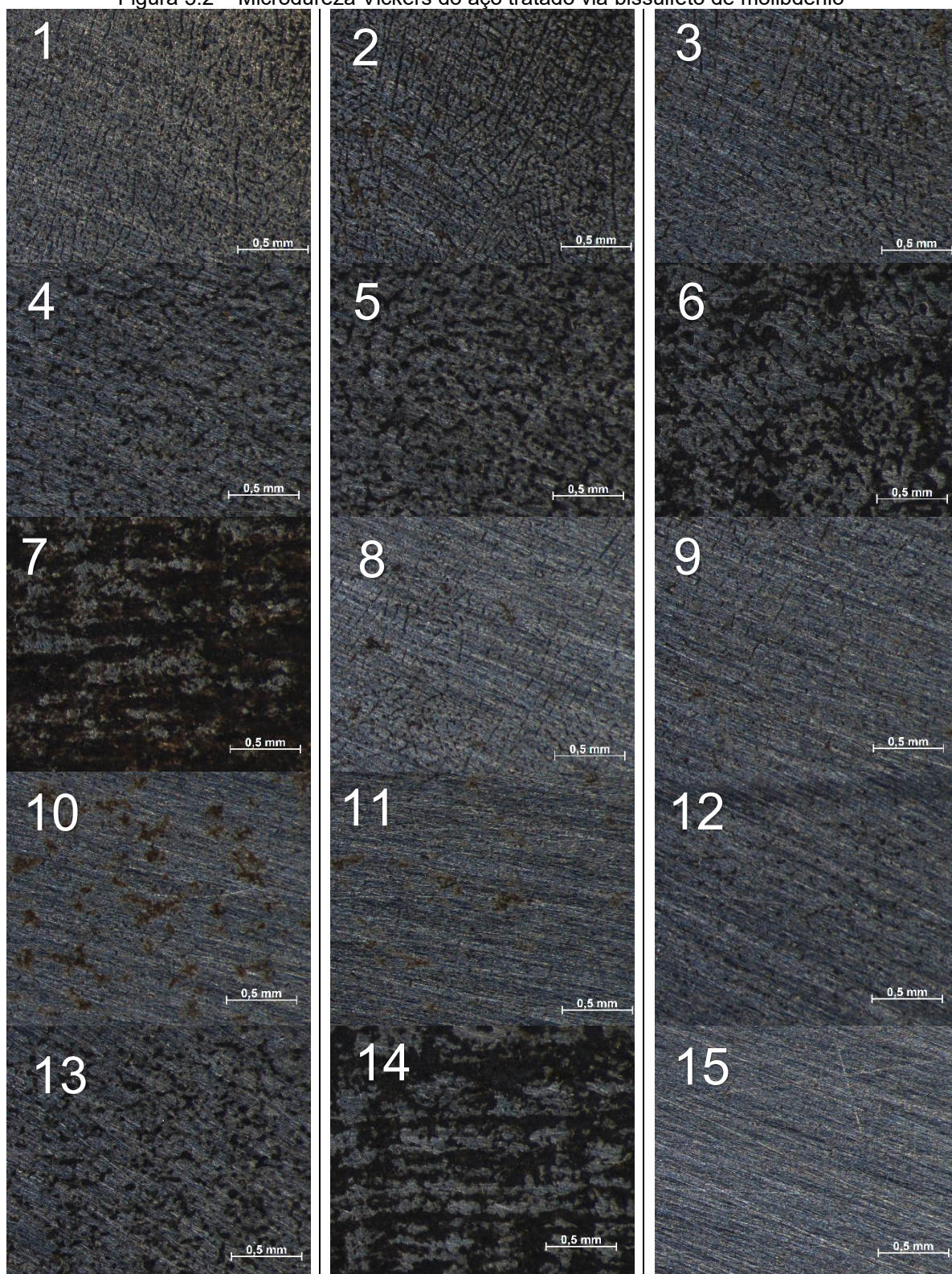
A figura 3.1 mostra a microdureza Vickers da superfície do aço 4340 antes do tratamento via laser, com dureza média de 228 HV_{0,05}.

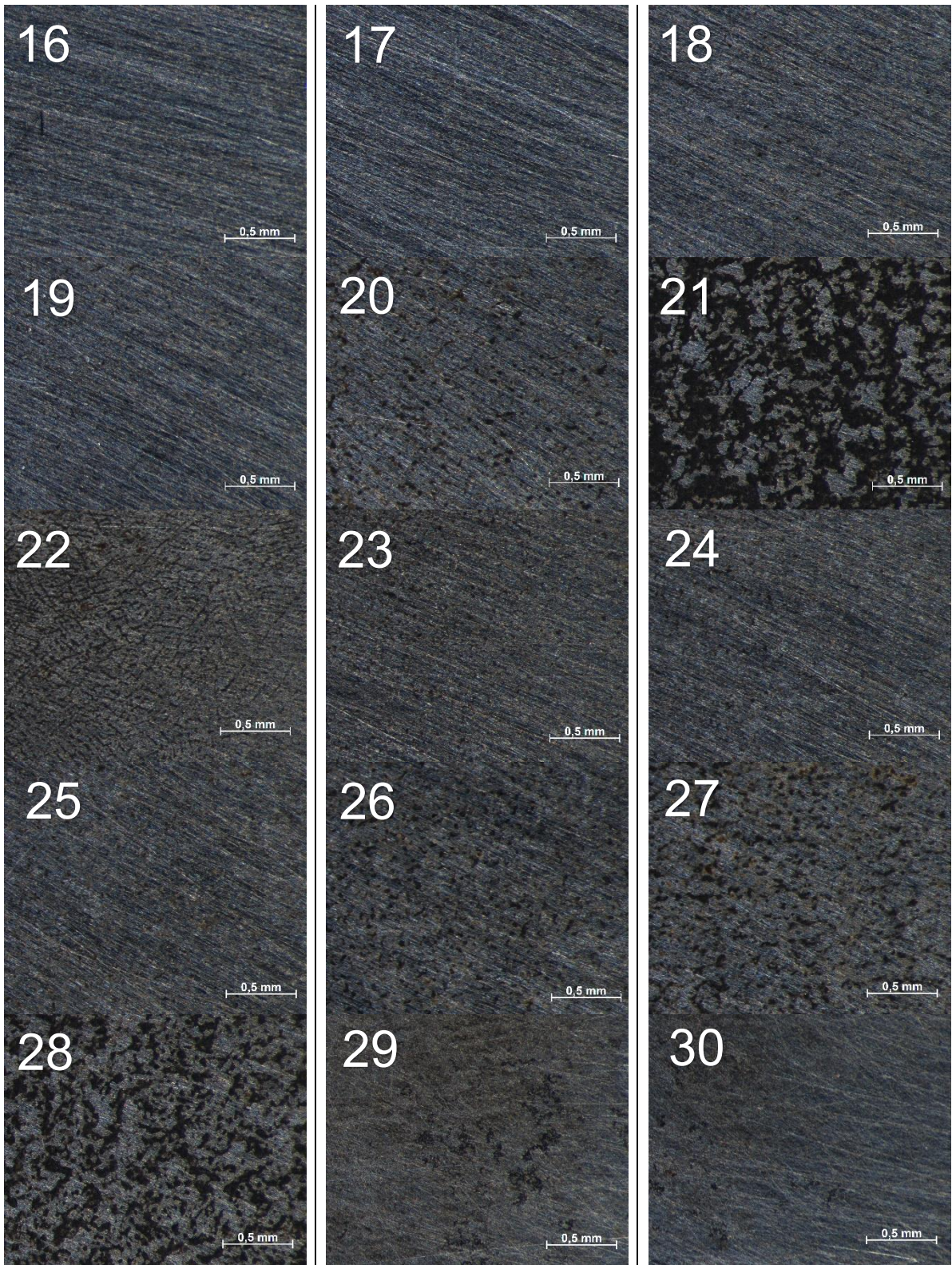
Figura 3.1 – Microdureza Vickers do aço sem tratamento

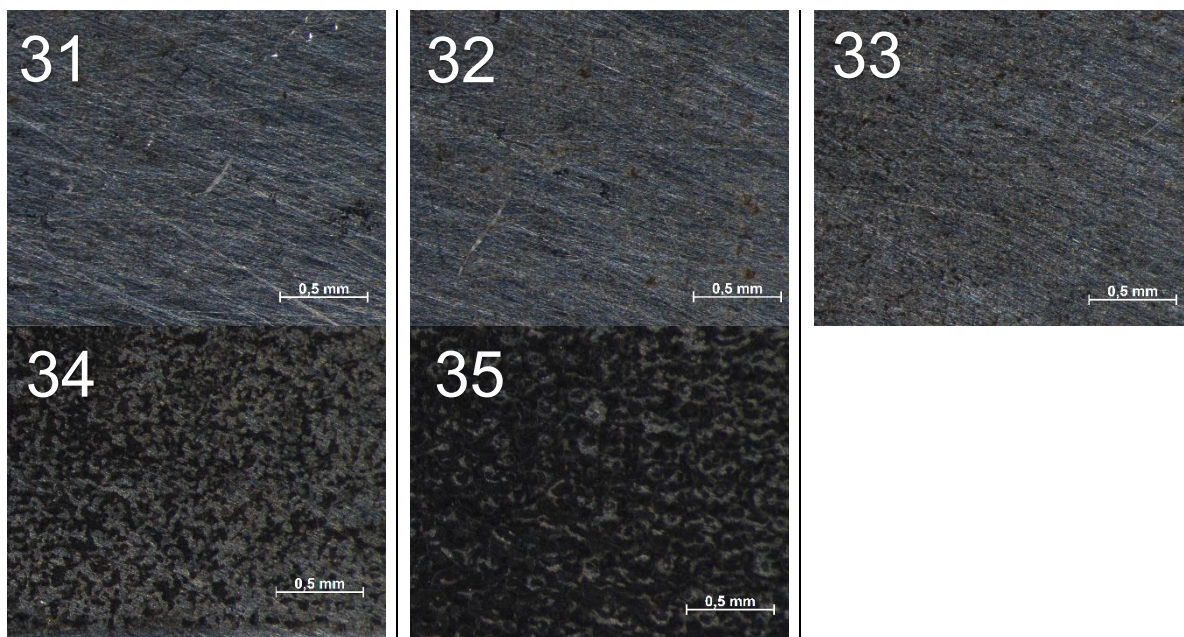


A figura 3.2 mostra as imagens MO das superfícies dos retângulos sobre o aço 4340 após aplicação via spray a base de bissulfeto de molibdênio.

Figura 3.2 – Microdureza Vickers do aço tratado via bissulfeto de molibdênio





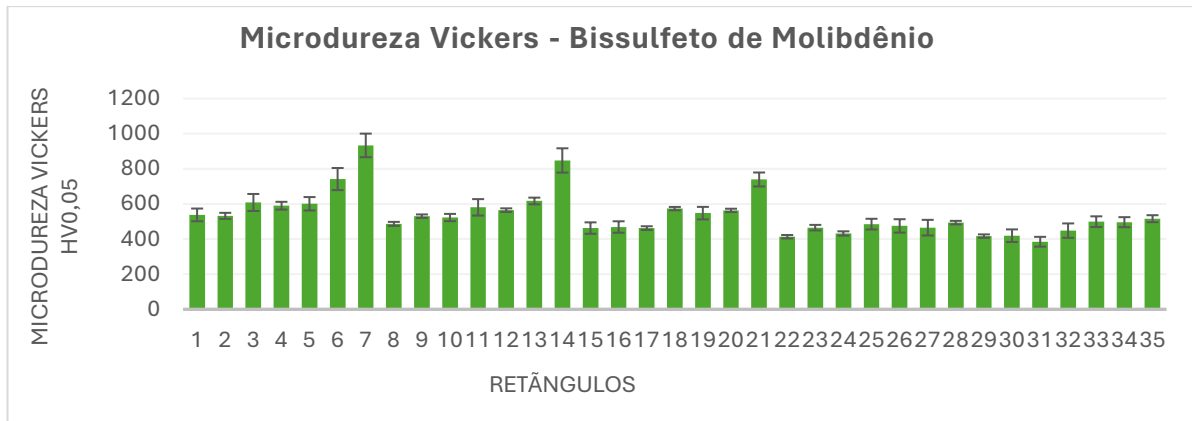


As áreas acinzentadas de cada retângulo correspondem a superfície reflexiva do substrato enquanto as áreas escuras evidenciam as partículas do aditivo aderido na superfície. Outro fato a ser notado é que não foram observadas trincas superficiais nos retângulos.

Observa-se que a alteração da resolução, para um grupo com densidade de energia constante, leva a uma modificação na morfologia da superfície, por exemplo, figuras 3.2 (1, 8, 15, 22 e 29). O parâmetro da resolução é definido como pontos por polegada quadrado; sendo a área do ponto o diâmetro do feixe do laser, no caso, 300 μm . Se a resolução fosse de 85 dpi, cada ponto estaria adjacente ao ponto ao lado; resoluções acima de 85 dpi levam a sobreposição do feixe do laser durante a varredura. Consequentemente, quanto maior a resolução, maior será a sobreposição do feixe, como também maior a densidade de energia total transferida para a superfície do substrato. A figura 3.2.7 evidencia a morfologia do retângulo com a maior resolução e maior densidade de energia. Além do fator da resolução, a velocidade de varredura do feixe influencia na densidade de energia, sendo quanto maior a velocidade de varredura do feixe menor a densidade de energia. As figuras 3.2 (1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7) possuem a mesma resolução, mas velocidades decrescentes.

A Figura 3.3 mostra a microdureza Vickers das superfícies dos retângulos após aplicação via spray a base de bissulfeto de molibdênio.

Figura 3.3 – Microdureza Vickers do aço tratado via bissulfeto de molibdênio



O aço 4340 é temperável e tem transformações bainíticas e perlíticas retardadas pela presença de elementos de liga, facilitando o processo de tempera (6). O mecanismo de endurecimento por irradiação via laser envolve a formação de austenita no ciclo de aquecimento e então a transformação em martensita após o resfriamento (7). A velocidade de resfriamento deve ser suficientemente rápida para evitar as transformações perlíticas e bainíticas (6). Os diferentes parâmetros de velocidade de varredura e resolução levaram a diferentes resultados na microdureza superficial dos retângulos. De um modo geral, todas as irradiações com diferentes parâmetros levaram ao aumento da microdureza superficial quando comparado com o substrato sem irradiação via laser. Este fato já demonstra a eficácia do emprego de um laser como fonte de calor para tratamento superficial, principalmente no aço 4340 e na utilização de um material foto absorvedor. Além da densidade de energia, uma elevada resolução denota em uma alta taxa de sobreposição do feixe, contribuindo então para uma sobreposição da densidade de energia e consequentemente ao aumento da temperatura superficial. Observa-se uma tendencia de aumento da microdureza superficial com o aumento da densidade de energia e com o aumento da resolução, vide retângulo 7, que apresenta a maior microdureza (maior densidade de energia e maior resolução). Este fato indica que possivelmente nessas condições, maior é a taxa de transferência de calor para o substrato, o que leva ao maior volume do substrato a alcançar a temperatura de austenitização e consequentemente ao incremento do volume de formação da estrutura martensítica durante o resfriamento, levando ao aumento da microdureza superficial. Os retângulos 7, 14, 21, 28 e 35 possuem a maior dureza dos seus conjuntos, no entanto o retângulo 35 possui a menor resolução e consequentemente a menor microdureza dentre eles.

Os melhores resultados apresentados são aqueles que apresentaram as condições de maiores densidade de energia e resolução, já que obtiveram maiores

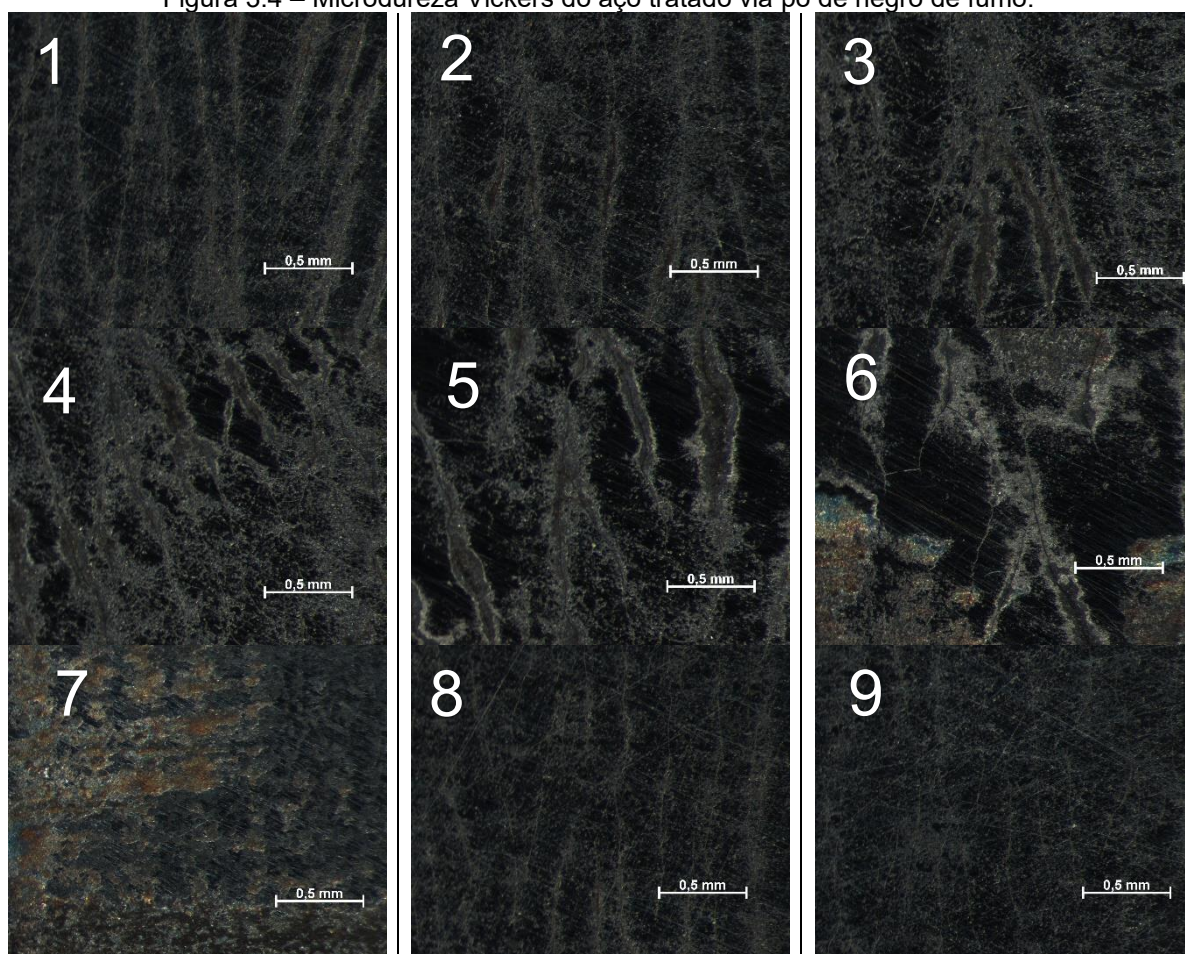
microdurezas, além de ausência de trincas superficiais.

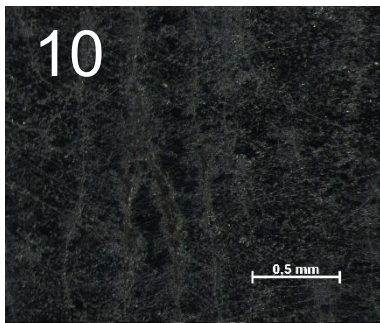
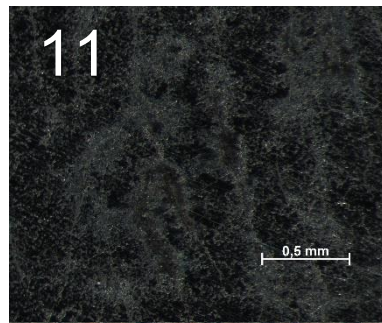
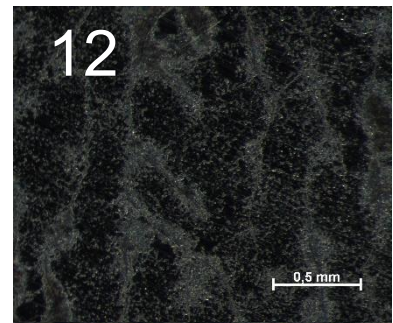
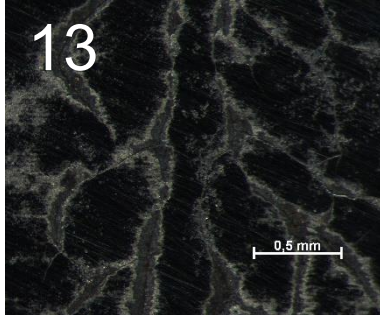
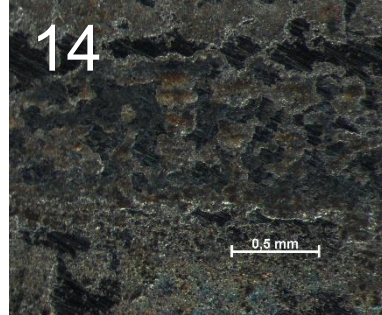
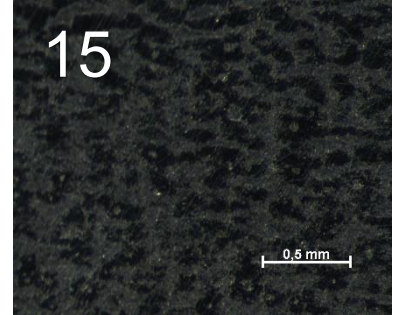
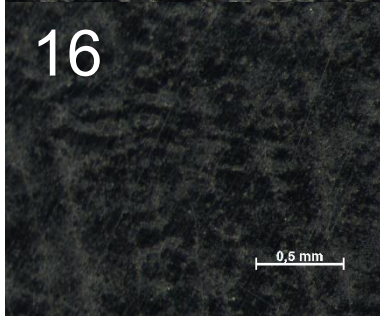
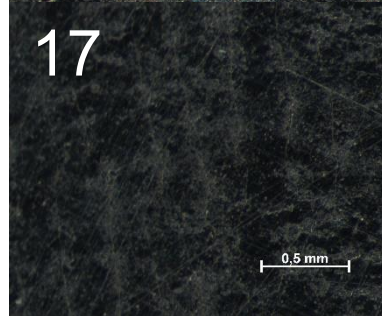
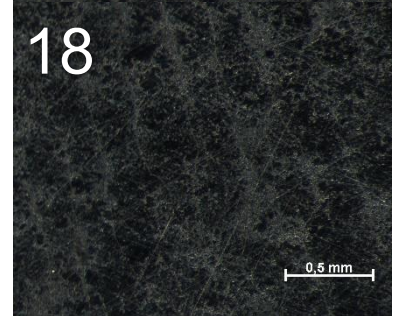
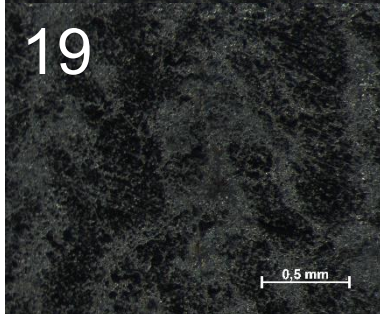
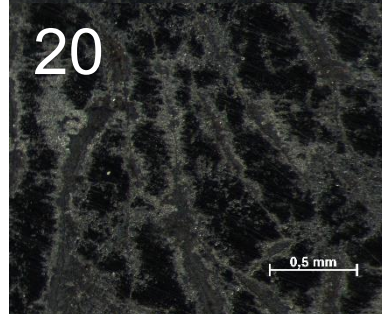
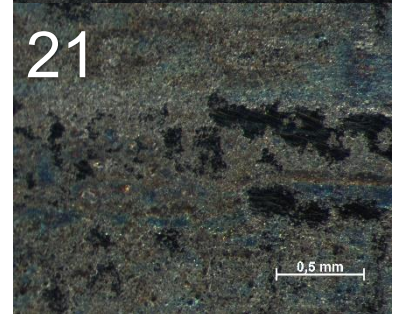
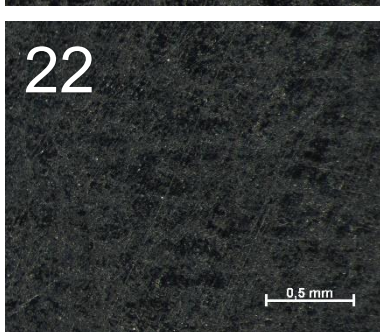
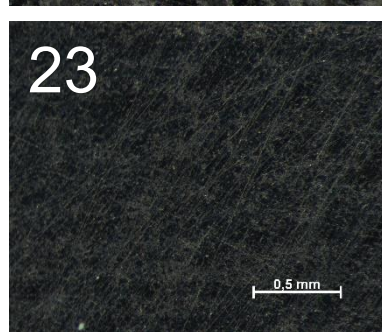
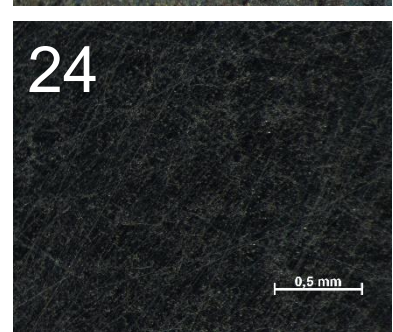
A figura 3.4 mostra as imagens em MO dos retângulos sobre o aço inox 304, com a aplicação do pó de negro de fumo como material fotoabsorvedor. As áreas acinzentadas de cada retângulo correspondem as partículas de negro de fumo aderidas ao substrato enquanto as áreas escuras evidenciam a superfície do substrato.

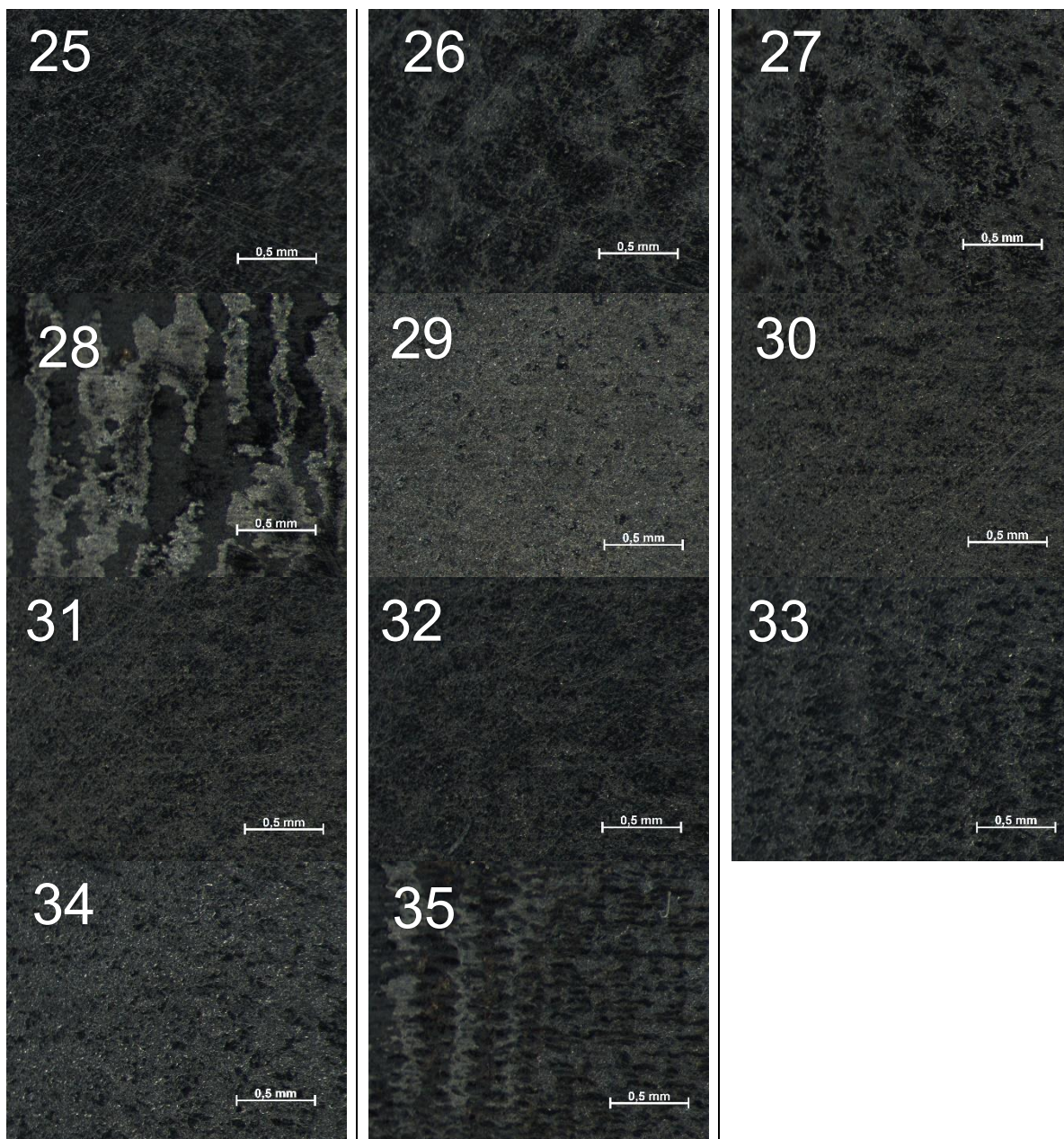
Nota-se que ocorreu o processo de refusão superficial, com aumento da magnitude para a condição com menor velocidade de varredura e maior resolução, além da possível oxidação superficial, figuras 3.4 (7, 14 e 21).

Elevadas densidades de energia elevam a temperatura superficial e podem levar ao processo de refusão superficial, com o aumento da rugosidade superficial e o aparecimento de trincas (8) devido ao rápido resfriamento da superfície após a irradiação via laser. As trincas são notadas nos grupos com maiores resoluções, sendo as figuras 3.4 (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13 e 14).

Figura 3.4 – Microdureza Vickers do aço tratado via pó de negro de fumo.

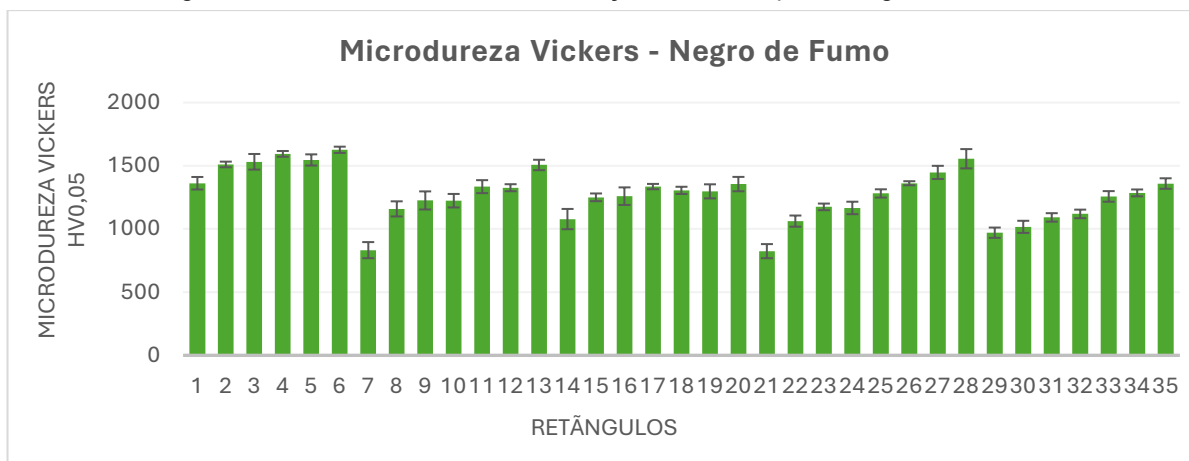






A figura 3.5 mostra a microdureza Vickers dos retângulos após a irradiação via laser. Todos os retângulos apresentaram microdurezas maiores do que o substrato sem a irradiação via laser. Isso evidencia também aumento da microdureza pelo emprego do pó de negro de fumo. Os resultados também mostraram uma tendência de aumento da microdureza com o aumento da densidade de energia e resolução, exceto nas condições dos retângulos 7, 14 e 21, nas quais as imagens em MO mostram superfícies com morfologia de refusão superficial e possível oxidação.

Figura 3.5 – Microdureza Vickers do aço tratado via pó de negro de fumo.



Nota-se um incremento maior da microdureza superficial quando comparado com o emprego do bissulfeto de molibdênio. Possivelmente, além da atuação como material fotoabsorvedor, o carbono presente no negro de fumo é introduzido na superfície do substrato devido ao processo de difusão no estado sólido durante a irradiação via laser; esse processo é conhecido como cementação via laser (9). Os melhores resultados, em termos de isenção de trincas superficiais, são encontrados para as condições de velocidades mais elevadas, acima de 100 mm/s, como também de densidades de energia igual ou abaixo de 1000 dpi, como por exemplo para as condições 22, 23, 24, 25, 26. Conclui-se que o emprego do negro de fumo atuou como material absorvedor da radiação, além de fonte de carbono, o que acarretou o aumento da microdureza superficial nos retângulos. Além desses fatos, o negro de fumo é um lubrificante sólido, o que acarreta também em uma diminuição do coeficiente de atrito.

4. CONCLUSÃO

Ficou demonstrado a eficácia na utilização de um laser de baixa potência e baixo custo no tratamento superficial com o emprego de materiais fotoabsorvedores de radiação. O emprego do spray a base de bissulfeto de molibdênio foi eficaz como material fotoabsorvedor de radiação, fato imprescindível para o processo de tempera no aço 4340. Já o emprego do pó de negro de fumo atuou também como material absorvedor da radiação, além de fonte de carbono, o que acarretou um maior aumento da microdureza superficial. Verificou-se a importância nos parâmetros de irradiação, o que levou a diferenças em termos de microdurezas e morfologias das superfícies.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao CNPq (Processos: 425037/2018-5 e 405623/2023-2) e à EMC da UFG.

6. REFERÊNCIAS

- (1) STEEN, W. M.; MAZUMDER, J. Laser material processing. [s.l.] Springer Science & Business media. Ed of 4 th, 558 p 2010.
- (2) ARULVEL, S.; DSILVA, W. R. D.; et al.; Laser processing techniques for surface property enhancement: Focus on material advancement. SURFACES AND INTERFACES, v. 42, p. 103293, 2023.
- (3) SIDDIQUI, A.; DUBEY, A. Recent trends in laser cladding and surface alloying. OPTICS & LASER TECHNOLOGY, v. 134, 2020.
- (4) WENG, F.; CHUANZHONG, C.; HUIJUN, Y. Research status of laser cladding on titanium and its alloys: A review. MATERIALS & DESIGN, v. 58. p. 412-425, 2014.
- (5) VASCONCELOS, G.; REIS, L. J.; CAMPANHA, V. M.; SILVA, F. A. Thermal treatment of the AISI M2 high speed steel promoted by a CO₂ laser beam. MATERIALS SCIENCE FORUM, v. 591-593, p. 62, 2008.
- (6) COSTA E SILVA, V. L. A.; MEI, R. P. Aços e ligas especiais, 4 ed, 576 p., 2021.
- (7) SHIUE, R. K.; CHEN, C. Laser Transformation Hardening of Tempered 4340 Steel. METALL TRANS A, p. 163-170, 1992.
- (8) MORADI, M.; MOGHADAM, K. M.; KAZAZI, M. Improved laser surface hardening of AISI 4130 low alloy steel with electrophoretically deposited carbon coating. OPTIK (STUTT), v. 178, p. 614–622, 2019.
- (9) KATSAMAS, A.; HAIDEMENOPOULOS, G. Laser-beam carburizing of low-alloy steels. SURFACE AND COATINGS TECHNOLOGY, v. 139, p. 183–191, 2001.

COMPARISON BETWEEN THE PHOTO-ABSORBING MATERIALS CARBON BLACK AND MOLYBDENUM DISULFIDE IN A SURFACE TREATMENT VIA CO₂ LASER ON A STEEL SUBSTRATE

ABSTRACT

Laser heat treatment aims at selective hardening of the surface of engineering alloys. In this work, a 100 W CO₂ laser is used, which has an irradiation reflectance on the steel of around 90%, from which it is necessary to use radiation photo-absorber materials. This work aims to compare two irradiation photo-absorber materials, carbon black and molybdenum disulfide, on the surface treatment of a 4340 steel. The characterization of the samples included Optical Microscopy and Vickers Microhardness. The results showed that all irradiations with different parameters led to an increase in surface microhardness when compared to the untreated substrate. A tendency for surface microhardness to increase with increasing energy density and laser resolution was also observed. The use of carbon black provided the most significant increases in surface microhardness. **Keywords:** 4340 steel, laser treatment, surface treatment.