

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

MANOEL HENRIQUE ALVES

**CICLAGEM TÉRMICA NO AÇO AISI 1020 COM REVESTIMENTO DE
CARBONETO DE TUNGSTÊNIO VIA HVOF**

Alegrete

2018

MANOEL HENRIQUE ALVES

**CICLAGEM TÉRMICA NO AÇO AISI 1020 COM REVESTIMENTO DE
CARBONETO DE TUNGSTÊNIO VIA HVOF**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia
Mecânica da Universidade Federal do
Pampa, como requisito parcial para
obtenção do Título de Bacharel em
Engenharia Mecânica

Orientadora: Prof.^a Dr. Ana Cláudia Costa
de Oliveira

Alegrete

2018

MANOEL HENRIQUE ALVES

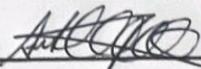
**CICLAGEM TÉRMICA NO AÇO AISI 1020 COM REVESTIMENTO DE
CARBONETO DE TUNGSTÊNIO VIA HVOF**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia
Mecânica da Universidade Federal do
Pampa, como requisito parcial para
obtenção do Título de Bacharel em
Engenharia Mecânica

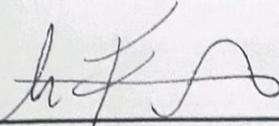
Orientadora: Prof^ª Dr. Ana Cláudia Costa
de Oliveira

Trabalho de Conclusão de Curso 2 defendido e aprovado em 28 de junho de 2018.

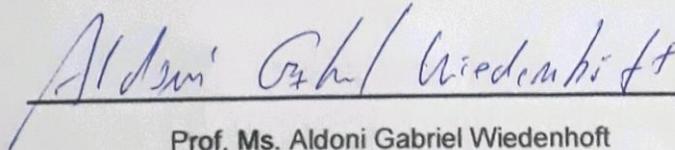
Banca Examinadora:



Prof^ª Dr. Ana Cláudia Costa de Oliveira



Prof. Dr. Cesar Flaubiano da Cruz Cristaldo



Prof. Ms. Aldoni Gabriel Wiedenhoft

Alegrete

2018

Dedico este trabalho a Vinícius Vargas de
Oliveira

AGRADECIMENTO

Agradeço primeiramente ao criador por permitir a minha existência e a dádiva da vida.

Ao meu namorado e companheiro Vinícius Vargas de Oliveira que muito me incentiva em minha caminhada profissional.

Aos meus pais e meu irmão pelo subsídio e apoio durante todo o curso.

Aos professores responsáveis pela minha formação acadêmica e profissional, em especial à Professora Doutora Ana Cláudia Costa de Oliveira, por me orientar com excelência nesse estudo

Aos meus amigos Pedro Eça, Natasha Mayhassen e Isadora Castelo Branco que me acompanham desde o início do curso com muita garra.

À Universidade Federal do Pampa pelo respaldo acadêmico aos alunos e pela sua formação.

“A medida do amor é amar sem medida”.

Santo Agostinho

RESUMO

Hoje em dia na indústria metal-mecânica há uma crescente expansão em pesquisa tecnológica dos materiais, visando aumentar propriedades específicas para aplicações industriais. Na área de fabricação pelo processo de conformação mecânica uma grande barreira é a limitação entre plasticidade e elasticidade; a qual apresenta, por característica do processo, desgaste nas ferramentas e matrizes. Logo, a aplicação do revestimento metálico Carboneto de Tungstênio em suas superfícies apresentou-se como um bom redutor deste dano. Ainda em muitos processos surge a necessidade de implementar calor, como na conformação a quente, para diminuir também o desgaste e facilitar a deformação do material, porém este revestimento não apresentou boa resistência nestes processos a quente, logo o estudo deste trabalho é avaliar o impacto quando este for solicitado por ciclagens térmicas. Com isso adotou-se como metodologia, a realização dos ensaios de microdureza e de choque térmico, além das análises no microscópio óptico e eletrônico. As amostras analisadas são com o revestimento aspergido via HVOF, acabamento polido e refundido via laser de CO₂. Os resultados apresentados foi a exposição da fragilidade do material quando solicitada por tensão térmica, diminuindo inclusive a dureza. Com a análise dos coeficientes de dilatação, mostrou-se que este revestimento quando aspergido em aço, seja qual for sua composição, não apresenta resistência as ciclagens térmicas.

Palavras Chaves: Ciclagem térmica; Carboneto de Tungstênio; Revestimento metálico.

ABSTRACT

Nowadays in the metal-mechanic industry there is a growing expansion in technological research of the materials, aiming to increase specific properties for industrial applications. In the area of manufacture by the process of mechanical conformation a great barrier is the border between plasticity and elasticity; which presents, by process characteristic, wear on tools and matrices. Therefore, the application of the metallic coating Tungsten Carbide on its surfaces presented itself as a good reducer of this damage. Even in many processes the need arises to implement heat, as in hot forming, to reduce wear and facilitate deformation of the material, however this coating did not show good resistance in these hot processes, so the study of this work is to evaluate the impact when requested by thermal cycling. With this methodology, the microhardness and thermal shock tests were adopted, as well as the optical and electronic microscope analyzes. The samples analyzed are with the coating sprayed via HVOF, polished finish and rectified by CO2 laser. The results presented were the exposure of the brittleness of the material when requested by thermal stress, even reducing the hardness. With the analysis of the coefficients of expansion, it was shown that this coating when sprayed on steel, whatever its composition, does not present resistance to thermal cycling.

Keywords: *Thermal cycling; Tungsten Carbide; Metallic coating.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Resistencia ao choque térmico	5
Figura 2 – Curvas de temperatura que produzem falha por choque térmico	6
Figura 3 – Características da formação da camada depositada por AT.....	11
Figura 4 – Processo metalográfico.....	14
Figura 5 – Microscópio Eletrônico de Varredura	15
Figura 6 – Microdurômetro de modelo MicroMet 6010.....	16
Figura 7 – Corpos de Prova fornecidos pela empresa Rijeza	17
Figura 8 – Forno Utilizado do laboratório de química da UNIPAMPA	18
Figura 9 – Amostra com acabamento no laser submetida a 1000°C	19
Figura 10 – Amostra sem acabamento no laser submetida a 1000°C	20
Figura 11 – Amostra sem aplicação de Laser (400°C).....	20
Figura 12 - Amostra com aplicação de laser (400°C).....	21
Figura 13 – Amostra sem aplicação de laser (600°C).....	21
Figura 14 – Amostra com aplicação de laser (600°C).....	21
Figura 15 – Amostra sem aplicação de laser (400°C).....	22
Figura 16 – Amostra com aplicação de laser (400°C).....	22
Figura 17 – Amostra sem aplicação de laser (600°C).....	23
Figura 18 – Amostra com aplicação de laser (600°C).....	23
Figura 19 – Amostra com aplicação de laser (600°C).....	24
Figura 20 – Gráfico de Comparativo de Dureza pós choque térmico.....	25
Figura 21 – Análise das propriedades térmicas do revestimento e do substrato	26

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
AISI – *American Iron and Steel Institute*
Al – Alumínio
ASTM – American Society for Testing and Material
AT – Aspersão térmica
Co – Cobalto
CO₂ – Dióxido de Carbono
Cr – Cromo
EB-PVB – *Electron beam physical vapor deposition*
EPI'S – Equipamento de Proteção Individual
GPa – Giga Pascal
h – Horas
HV – Dureza Vickers
HVOF – *High Velocity Oxy-Fuel Flame*
Kg – kilogramas
kV – kiloVolts
lbf/pol² – Libra-força por polegada quadrada
MEV – Microscópio Eletrônico de Varredura
mm – milímetro
µm – micrometro
O – Oxigênio
PSI – *Pound force per square inch*
r_{mh} – Parâmetro de transferência de calor em caloria por segundo
TBC – *Thermal Barrier Coating*
TNT – Tipo de tecido baseado em fibras sintéticas.
WC – Carboneto de Tungstênio
°C – Graus Celsius

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1. Objetivos	2
1.2. Justificativa	2
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1 Aço e suas Propriedades	3
2.2 Choque térmico	4
2.3 Revestimentos	7
2.4 Carbetos de Tungstênio (WC)	8
2.5 Aspersão Térmica	9
2.6 Acabamento à Laser	12
3. METODOLOGIA	13
3.1 Materiais e Métodos	13
3.2 Processo Metalográfico e Micrografia	14
3.3 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	14
3.4 Teste de Microdureza	15
3.5 Ensaio de Choque Térmico	16
4. RESULTADOS	19
4.1 Choque Térmico	19
4.2 Metalografia	20
4.3 Microscopia Eletrônica de Varredura	22
4.4 Microdureza	24
4.5 Análise do Coeficiente de Dilatação	25
5. CONCLUSÃO	27
5.1 Sugestões para trabalhos futuros	27
REFERÊNCIAS	29
ANEXOS	31

1 INTRODUÇÃO

A crescente utilização de revestimentos, depositados nas mais diversas formas, desenvolvendo-se dentro da engenharia de superfície, vem crescendo com destaque em diversas aplicações industriais, como aeronáutica e automobilística, revestimentos são aplicados com objetivos de proteção, seja contra desgaste, corrosão ou até a compatibilidade biológica, aumentando-se assim suas propriedades utilizadas em cada aplicação. Como por exemplo, as turbinas a gás e motores a diesel, os quais operam em altas temperaturas e pressões, solicitando assim mais integridade estrutural dos componentes.

Com foco nos estudos na ciência e engenharia de materiais, é necessário compreender como o material se comporta mediante as solicitações impostas, seja física, química ou mecânica. Assim entender suas respectivas propriedades assegura maior confiabilidade nos processos.

A aplicação de revestimentos especiais, por diferentes processos tornou-se uma ferramenta essencial na durabilidade e vida dos componentes mecânicos, ou mesmo nos processos de otimização. A eficácia destas proteções está fortemente vinculada, com o tipo de material depositado, bem como também os processos de deposição e seus parâmetros.

Uma das formas encontradas e amplamente utilizada para se diminuir o desgaste em ferramentas de conformação, é aumentar a dureza superficial da peça depositando sobre ela uma camada fina de revestimento. Esses revestimentos são formados normalmente, por materiais cerâmicos de dureza bastante elevada e baixa afinidade, bom equilíbrio químico, em relação as peças que serão conformadas. Porém em processos de conformação a quente, há além do desgaste, o choque térmico que dependendo da variação abrupta de temperatura, ocasiona fratura no revestimento.

Tais processos necessitam de um profundo estudo, visto a viabilidade econômico-financeira de se executar uma tarefa com parâmetros ajustados e otimizados.

Assim, abordar-se-á a revisão bibliográfica dos estudos já realizados sobre os revestimentos cerâmicos, teste de choque térmico e de caracterização do material.

1.1. Objetivos

Com o objetivo de otimizar os processos de fabricação, verificar-se-á a resistência mecânica do revestido de Carbetto de Tungstênio (WC) depositado sobre o aço AISI 1020, quando solicitado com ciclagem térmica, o choque térmico.

1.2. Justificativa

As propriedades dos materiais são importantes valores obtidos na sua respectiva caracterização, realizado por meio do teste de choque térmico neste estudo. Assim tendo os resultados satisfatórios procede-se a verificação dos parâmetros presentes nos objetivos, concluindo e sugerindo possíveis trabalhos futuros relevantes, pois realizando-se satisfatoriamente tal ensaio, será possível utilizar os dados obtidos como parâmetro industrial na produção de revestimentos e ferramentas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O desenvolvimento do trabalho é baseado em um referencial teórico, o qual desenvolve uma parte fundamental na análise dos resultados e conclusões, pois organiza as ideias principais, com objetividade no foco da pesquisa, trazendo de forma clara os conhecimentos científicos, filosóficos e empíricos a respeito do assunto abordado, segundo (MARCONI, M. A.; LAKATOS, 2003) o conhecimento filosófico é valorativo, pois é delineado pelo esforço da razão de questionar problemas.

Desta forma faz-se necessário contextualizar e conceituar o tema desta pesquisa, descrevendo o material que será utilizado nesse estudo, como o tipo de revestimento e sua aplicação, os testes de choque térmico, além dos pontos essenciais de análise das ciências dos materiais, como suas respectivas propriedades e resistências

2.1 Aço e suas Propriedades

Atualmente, os aços desempenham funções de grande empregabilidade, nas mais diversas aplicações, incluindo os aços de baixa liga. Desde que o homem iniciou a descoberta da natureza dos metais e de suas diversas utilizações, a ciência e engenharia dos materiais evoluíram ao longo anos de estudo, considerável um curto espaço de tempo. A natureza molecular dos materiais e seu comportamento foram avaliados a ponto de serem responsáveis pela grande evolução dos processos industriais globais. Como exemplo dos romanos que utilizavam os benefícios da têmpera, para cravar no corpo dos seus inimigos, nas espadas que previamente aquecidas, aumentando a dureza das lâminas (RIBEIRO; LOPES; VAZ, 2009).

Como exemplo da notória aplicação dos aços, e também das necessidades de adapta-los as aplicações tecnológicas, trabalhando em cima das suas propriedades, na indústria automobilística, há necessidade de barreira térmica (*Thermal Barrier Coating* – TBC) em motores diesel, assim são utilizados revestimentos que protegem os componentes contra oxidação em altas temperaturas, reduzindo as temperaturas dos substratos e os efeitos da fadiga térmica e, via radiação, ajudam a converter mais calor em energia útil (TAYMAZ, 2007). Em motores diesel, é imprescindível reduzir as perdas de calor entre a câmara de combustão e os outros componentes, para que assim se alcancem bons resultados, tanto ao nível da eficiência, quanto ao nível de

redução de emissões. A aplicação de barreiras térmicas nas câmaras de combustão previne a perda de calor, aumentando, assim, a eficiência do motor. Por outro lado, a utilização de TBC nos componentes metálicos que se encontram na vizinhança da câmara de combustão admite aumentar as temperaturas de serviço, alcançando maiores eficiências. Em questão de produção, vê-se a necessidade do bom emprego de revestimentos em diferentes componentes de equipamentos que estão cada vez mais exigentes em termos de desempenho, durabilidade e confiabilidade. Estas propriedades estão direta ou indiretamente conexas a qualquer tipo de desgaste (ou perda de massa) e outras possíveis causas de danos, como oxidação ou choque térmico. Para melhores implicações dos revestimentos, são estudados e empregados vários métodos que possam ser utilizados à aplicação destes (BELÉM; FALS; LIMA, 2015).

2.2. Choque térmico

Quando um material em seu estado sólido é aquecido ou resfriado, o gradiente de temperatura interna é variante de acordo com seu tamanho e sua forma, além da condutibilidade térmica do material e da taxa de mudança de temperatura. Tensões térmicas aparecem e são dimensionadas como um produto da variação de temperatura no corpo, que é devido por um instantâneo diferencial de temperatura, aquecimento ou resfriamento (Callister, 2002).

Normalmente materiais cerâmicos são aplicadas tecnologicamente em um alto grau de solitação oxidativa. Apresentando-se muitas vezes com pouca reatividade química, quando inseridas em um ambiente oxidante em alta temperatura. Devido sua forte ligação interatômica, apresenta refratariedade e boa resistência ao choque térmico, mesmo com grandes variações de temperatura. Contudo, nestas temperaturas fabris, há altas variações, gerando tensões térmicas resultantes dentro do material, podendo gerar microfissuras (Smallman, 1999).

A absorvidade ou condutibilidade de calor é uma característica intrínseca do material, relacionado também diretamente com sua resistência mecânica em solitações de choques térmicos. Estas duas propriedades físicas, em observância com sua dilatação térmica, descrevem e explicam sua resistência ao choque térmico. Esta compreensão física é explicada também pelo ponto de visto do equilíbrio

energético do material, onde este, se comporta de modo a se dispor de microtrincas (Segadães, 1997).

Um exemplo característico é a alumina, pois é um óxido com íons Al^{+} e O^{-} altamente ligados, comportando assim com alta resistência mecânica, mas não em relação a resistência a solitação térmica, com variações de temperatura altas, tendo que apresenta um elevado coeficiente de dilatação térmica (Gonçalves, 2011).

Nesse aspecto, a superfície do material se contrai mais do que o interior, que ainda está comparativamente quente. Com isso, a superfície gera uma tensão compressiva e trativa, na forma de ação e reação, com o interior e ela mesma sofre a maior solitação, como pode-se observar na figura 1 (Quintela, M.A., Melo, T. M. F.; 2001).

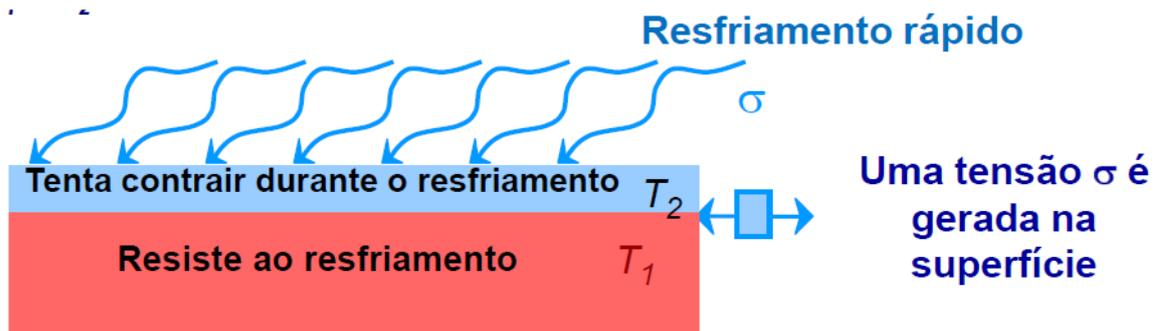


Figura 1- Resistencia ao choque térmico

Podendo tal grandeza ser dimensionada pela seguinte equação:

$$\sigma = -E\alpha(T_1 - T_2)$$

Onde:

- σ é a tensão gerada na superfície;
- α é o coeficiente de dilatação/expansão;
- $(T_1 - T_2)$ é a diferença crítica de temperatura;
- E é o módulo de elasticidade.

Contudo com a solitação de choque térmico, falhas na superfície é algo eminente neste processo, além que combinada com uma tensão trativa na superfície aumenta

ainda mais a probabilidade de fraturas. A Figura 2 esclarece as curvas de resfriamento de alguns materiais cerâmicos, com o potencial térmico que acarreta fraturas devido o choque térmicos.

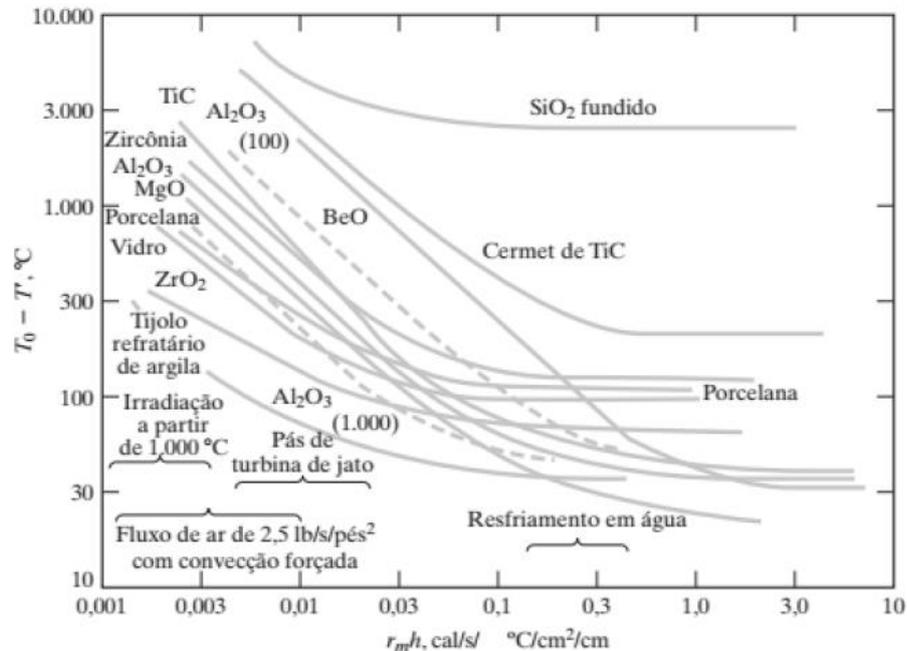


Figura 2- Curvas de temperatura que produzem falha por choque térmico (Kingery, et al., 1976).

Como é explicitado na figura, a variação de temperatura necessária para gerar fratura ($T_0 - T$) é esboçada com dependência de coeficientes de transferência de calor ($r_m h$). É interessante observar também que os respectivos valores de $r_m h$ são de acordo com a maneira de resfriamento, com o resfriamento em água correspondente a um $r_m h$ em média de 0,25 (Kingery, et al., 1976).

Os esforços devido as variações térmicas podem ser solicitadas também por fatores como: temperatura de operação maior à de produção; mudanças de estrutura causadas por impurezas como escórias ou ataque de gases. Devido a magnitude destes fenômenos, principalmente em relação a quantidade de variáveis que são inerentes as solicitações de choque térmico, torna-se complexo a formulação um juízo crítico para a resistência de um material às solicitações térmicas. A bibliografia expõe claramente, havendo ainda diversos autores os quais desenvolveram uma metodologia própria, com vários preceitos científicos, métodos diferenciados para analisar das propriedades físicas e mecânicas dos materiais, tornando-o um estudo experimental, analítico e empírico. Em matéria de choque térmico há uma

independência da contribuição das transformações de fase, com isso é claro e possível afirmar que o estudo do choque térmico está justaposto e ligado ao conhecimento da mecânica da fratura térmica em refratários (Segadães, 1997).

Nos processos de fabricação em geral onde há choque térmico, principalmente em materiais frágeis, pelo equilíbrio químico-físico, o material tende a gerar fissuras como forma de destensioná-lo, minimizando as tensões decorrentes da variação de temperatura. Os materiais devido ao processamento metalúrgico sempre possuem algumas microtrincas e vazios na sua estrutura (Martins, 2006), logo o mecanismo de fratura pode ser de diversas formas distintas, compreendendo uma simples sobrecarga. A fratura decorrente tensões térmicas em ciclos térmicos constantes entre aquecimentos, é outra forma de fratura. Contudo como o material vai se comportar dada uma solicitação pode ser abrupto, ocasionando o deslocamento por completo do revestimento. Além que, pelo efeito exclusivo do choque térmico pode advir o aparecimento de termoclase (*spalling*), a nucleação de trincas e esfoliação, reduzindo propriedades do revestimento, fragilizando-o. Logo, a falha não aparecerá sempre de forma catastrófica, podendo surgir apenas defeitos em operação, de forma que o material resiste até um certo limite, as vezes imperceptível, e conseqüentemente fraturar, ou também resistir e dependente da solicitação, sendo ela compressiva, o material fecha os poros e trincas contando com as altas temperaturas (Cunha; Bradt, 2003).

2.3 Revestimentos

A aplicação de revestimentos, seja de natureza metálica ou cerâmica, para proteção de elementos ou peças metálicas em serviço apresentou-se com uma evolução significativa ultimamente, entre as mais diversas finalidades, pode-se citar o alto preço dos materiais estruturais e o impacto a nível de produção e projeto devido a manutenção corretiva, como compra e troca por peças novas. Assim, a concepção principal está em empregar um material mais viável financeiramente no substrato e utilizar um revestimento, analisando as tecnologias mais viáveis e disponíveis com resistência as solicitações e ambiente de funcionamento. Esse raciocínio que desencadeou o emprego de revestimento como parte integradora, inovadora e essencial de projeto.

Existe uma diversa gama de materiais cerâmicos e metálicos que podem ser utilizados sobre outro com objetivo de melhorar uma dada resistência. Em sua grande parte, os revestimentos cerâmicos são bons isolantes, possuem baixa densidade e maior resistência a abrasão comparativamente aos metais além da sua resiliência em atividades em altas temperaturas. Porém, para selecionar tais materiais, principalmente quando utilizado para atuar como revestimentos, alguns princípios devem ser analisados (CAO *et al*,2003):

- (1) ausência ou controle de alteração de fase entre a temperatura de uso e a ambiente;
- (2) adequado coeficiente de expansão térmico com o metal e;
- (3) boa aderência com o substrato metálico.

A aplicação destes revestimentos é muito ampla, como em ferramentas de conformação mecânica e siderurgia, válvulas de motores e elementos de naves aeroespaciais onde a temperatura ultrapassa os 3000°C, e suas espessuras de aspersão variam de acordo com a necessidade tecnológica, variando entre micrometros a milímetros. A metodologia de aplicação pode ser de diversas formas, como por fonte de calor pelo potencial de um combustível, ou até mesmo por eletricidade. Contudo, há algumas restrições específicas de cada processo, devido seus aspectos físico-constructivos, configurando também por consequência, maléficos, como pouca pressão de adesão, alto índice de porosidade, não reprodutibilidade das propriedades interessadas, além dos custos de processo, com isso há uma necessidade crescente de estudo dessas técnicas.

2.4 Carboneto de Tungstênio (WC)

O Carboneto de tungstênio (WC) é uma liga metálica formado pelos elementos carbono e tungstênio, estruturado de forma cristalina hexagonal compacta. Esse material oferece alta dureza e alta resistência ao desgaste; que é sua principal aplicação tecnológica, com isso é utilizado contemporaneamente em ferramentas de corte, brocas, perfuratrizes, matrizes, abrasivos, esferas para moagem de alta energia, entre outras. As principais propriedades do carboneto de tungstênio são além da elevada dureza e resistência ao desgaste, a alta tenacidade e estabilidade dimensional e térmica, bem como boa resistência à corrosão (Gutiérrez, 2002). Esses materiais têm sido vastamente explorados e usados na indústria em virtude da ótima

combinação de propriedades de resistência à abrasão, ao impacto e à compressão, alto módulo de elasticidade, resistência ao choque térmico e à corrosão (Yao *et al.*, 2003).

O carboneto de tungstênio está dentro de um grupo dos materiais de grande importância industrial. Devido a seu conjunto único de propriedades, de grande interesse tecnológico (Krishna, *et al.*, 2002).

Apresentando uma temperatura de fusão de 2800°C, alto valor de módulo de elasticidade (699 GPa), baixo coeficiente de expansão térmica ($5,2 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) e elevada dureza (1800 a 2200 HV), mantendo-se relativamente estável até cerca de 1000°C. Em virtude da estabilidade química e dos elevados valores de propriedades mecânicas, o WC é amplamente aplicada na produção de materiais ligados para aplicações que necessitam-se de suas propriedades pertinentes, principalmente como para ferramentas de conformação mecânica (Ybarra, *et al.*, 2008).

Upadhyaya, G. S. (2001) explicita que o carboneto de tungstênio institui o principal constituinte dos chamados carbonetos cimentados (*cemented carbides*). Assim, o carboneto de tungstênio cimentado é formado em duas fases: uma formada por partículas finas e bem distribuídas de carboneto de tungstênio que são duras e frágeis e, outro, do metal ligante, relativamente tenaz e dúctil. Estas fases podem ser trabalhadas de forma que o objetivo de suprir as necessidades físicas e mecânicas de um processo.

2.5 Aspersão Térmica

Este processo tecnológico é metodologia desenvolvida utilizada para revestir superfícies de componentes metálicos. As vantagens em utilizar a aspersion térmica (AT) visam conseguir elementos de máquinas mais baratos, otimizando a funcionalidade, o desempenho, e a vida do componente em serviço. Afora das utilizações principais da peça em serviço, os revestimentos aspergidos recuperam peças gastas e melhoram suas propriedades demandadas. As novas configurações nos processos de aspersion e nos materiais de revestimento obtiveram recursos tecnológicos interessantes para diversos campos de atuação, como no setor aeronáutico, motores e turbinas, indústrias químicas e principalmente em empresas de fabricação mecânica (Machine Design, 1998).

Procedimentos de aspersão térmica são utilizados em um vasto campo de aplicação em diversos segmentos, com isso, a sua validação é averiguada com o melhoramento tecnológico e também econômico-financeiro. Tal critério de análise incluem a atuação técnica otimizada do produto ou ferramenta revestida, logo espera-se também melhoras em relação a manutenção, como um tempo maior necessário para trocar de peças, viabilizando assim sua utilização. Além disso para escolher um qual método de aspersão e qual revestimento, é importante analisar os materiais, suas propriedades e processos. O custo varia em relação ao material, o trabalho e custos dispersos, como combustível, eletricidade e eletrodos. Dependendo da situação, o revestimento que ampara melhor as necessidades requeridas, não necessariamente pode ser o melhor em decorrência do preço total envolvido na aplicação. Logo há implicações diretas no custo da aspersão, como a espessura do revestimento, o valor da matéria-prima, a eficácia da aspersão (DORFMAN, 2002b).

A vida em operação de alguns elementos mecânicos como bomba e válvulas pode estar completamente comprometida, devido a solicitações naturais de desgaste e oxidação. Caracteristicamente, fluidos corrosivos em sistemas de óleo e gás, contêm também particulados abrasivos como impurezas, areia e partes desgastadas soltas no processo, gerando danos severos e reduzindo assim as verificações de qualidade; além disso, em processos onde há também uma temperatura e pressão, só aumentam as possibilidades destes maléficos. Conquanto ainda há outras formas de tratar a superfície, de maneira mais elaboradas na engenharia, com maior capacidade de proteção, são ferramentas as quais requisitam maiores custos de aplicação ou até aumentando o grau de complexidade (DORFMAN, 2002b). Com isso a aspersão térmica viabiliza uma escolha interessante em custo-benefício, nas mais diversas áreas e desígnios.

Essa ferramenta é um aparato de processos em que materiais metálicos ou não, metodicamente particulados, são aspergidos; fundindo-os em um material base, formando uma camada depositada (Machine Desig, 1998; LIMA & TREVISAN, 2001).

Neste processo, o material do revestimento é superaquecido, onde há alguns meios distinto para isso, e logo após, o material particulado é colocado sob pressão de forma a ir contra a superfície interessada (SAMPSON, 1997). Ao colapsarem contra o substrato, as partículas são deformadas, e trocam calor com este, unindo-se à

rugosidade superficial, formando o revestimento tipicamente lamelar (DORFMAN, 2002a) e distinta de outras estruturas metalúrgicas.

A estrutura formada pelo processo de aspersão pode ser analisada conforme a figura 3 ilustra, onde devido as características naturais e mecânicas do processo, pode apresentar partículas estranhas, vazios, panquecas e partes oxidadas.

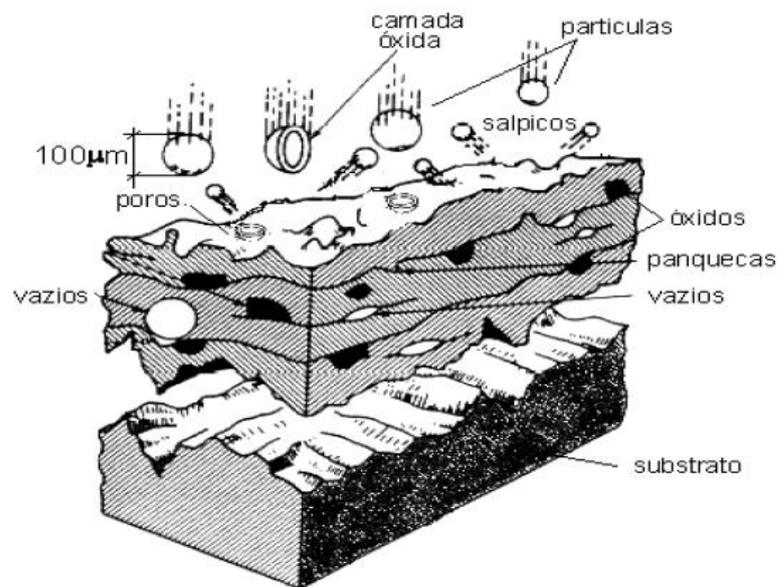


Figura 3 - Estrutura formada pelo processo de aspersão térmica (THORPE, 1993).

A união do revestimento com o material base ocorre por uma interação de forças mecânicas e físico-químicas (THORPE, 1993; LIMA e TREVISAN, 2001; DORFMAN, 2002a). A mecânica de junção ocorre visto o choque causado pela energia de impacto, assim o revestimento é depositado nas rugosidades. Já a ligação química e metalúrgica varia com relação ao material e sua energia interna, na constituição de solução sólida. E pela abordagem física é explicada pela ação intermolecular de van der Waals e dipolos elétricos (THORPE, 1993). Esses meios interativos são essenciais, pois implicam diretamente na adesão do revestimento, e conseqüentemente na aplicabilidade. As propriedades tanto físicas como mecânicas do revestimento são inteiramente interdependentes da associação da energia cinética e térmica do procedimento característico (DORFMAN, 2002a).

Dorfman (2002a) explica que inicialmente o revestimento é unido pela ação mecânica do processo, forçado, com a intensidade de forças interativas variando de 7 MPa a 83 MPa, dependente também da forma como foi aspergido e do material. Os

novos estudos estão direcionando-se para a estimativa dimensional dessas interações para adesão, bem como ASTM C633, que explica que a força para aderir certos revestimentos é maior que o adesivo aplicado no ensaio, logo causa a invalidação do resultado.

2.6 Acabamento à Laser

Atualmente a utilização do laser cresceu exponencialmente nos últimos anos, ele é uma ferramenta com grande potencial em diversas aplicações, como na soldagem e para a melhoria de revestimentos depositados via aspensão térmica. Suas propriedades características, como alta radiação da luz laser, são as bases de suas vantagens sobre métodos convencionais de processamento de materiais. Fazendo um análogo do laser com as tecnologias mais consolidadas, o mesmo ainda vem sendo utilizado em escala pequena, contudo tem-se observado um aumento na demanda por produtos de diferentes materiais, espessuras e geometrias. (GEHRKE, G. A., 2017).

O laser de CO₂ – o mesmo utilizado neste experimento – é empregado em aplicações de corte, solda e inclusive no tratamento de superfície. O processo de interação do laser com os metais pode ser comparado ao problema de uma fonte de calor localizada na superfície de um metal. Quanto maior a potência dessa fonte, maior é o aumento da temperatura na superfície, e com isso maior é a profundidade de calor no material, aumentando assim, suas propriedades mecânicas. Este laser é um laser de estado gasoso e o elemento ativo é o dióxido de carbono, que emite um feixe com comprimento de onda de 10,6 µm (GEHRKE, G. A., 2017).

A utilização do laser como forma de melhorar propriedades de uma dada superfície é uma ferramenta eficiente, que modifica a microestrutura e propriedades físicas e mecânicas do elemento revestido. Esta aplicação na superfície traz como principal benefício a diminuição da rugosidade, dando assim um melhor acabamento. Porém, em casos de trinca superficiais, a utilização do laser tornar um dano acumulado ao material, solicitando-o uma resistência, podendo a trinca aumentar (Chikarakara, E. *et al.*, 2010).

3. METODOLOGIA

Este trabalho científico visa o estudo do Aço AISI 1020 revestido com Carboneto de Tungstênio. Este material é utilizado pela empresa Rijeza Metalurgia, onde também Panziera (2016) e Ronzani (2017) desenvolveram pesquisas sobre desgaste e cavitação do mesmo, e assim, um estudo tecnológico e metodológico sobre ciclagens de choque térmico é abordado a seguir.

3.1 Materiais e Métodos

A aplicação deste revestimento sobre o aço AISI 1020 é amplamente utilizado em processos que visam a diminuição do desgaste, como em componentes de ferramentaria e matrizes de conformação mecânica, porém com a ciclagem térmica desses processos surge o choque térmico, um possível fator responsável pelo deslocamento do revestimento sobre o substrato. A tabela 1 a seguir apresenta as propriedades física do revestimento aspergido, fornecido pela empresa, aplicado via HVOF em duas amostras em formato retangular, cujas dimensões de comprimento, espessura e altura são respectivamente 55 mm, 10 mm e 19 mm, sendo uma das amostras com acabamento no laser CO₂.

Tabela 1 – Propriedades Físicas do pó de aspersão

Propriedades Físicas	Valores
	Carboneto de Tungstênio
Micro Dureza	1200 a 1350 Vickers
Porosidade	< 1%
Temperatura máxima de Trabalho	450°C
Adesão	> 10.000 PSI
Camada Máxima	0,5 mm

Para aplicação do laser foram utilizados os seguintes parâmetros:

- Potência de saída de 125 W;
- Comprimento de onda de 10,6 µm;
- Distribuição Gaussiana de energia.

Cada uma das amostras será seccionada em 3 partes, podendo assim ser feito o ensaio de choque térmico e vezes por partição, garantindo assim maior validação experimental.

Antes do ensaio, verificar-se-á a estrutura do material com processo metalográfico e por meio também de microscopia eletrônica de varredura, concluindo-se a caracterização com o teste de dureza.

3.2 Processo Metalográfico e Micrografia

O procedimento metalográfico consiste na preparação da amostra para a obtenção de micrografias e até para viabilizar o teste de dureza, sendo substancial para conseguir uma boa visualização das microestruturas, e conseqüentemente uma caracterização do material. Os equipamentos e processos necessários são: o corte, embutimento, lixamento, polimento, ataque químico e por fim micrografia, obtida em microscópio óptico. A figura 4 a seguir ilustra o processo:



Figura 4 - Processo metalográfico

Faz-se necessário para realização do teste de microdureza, embutir o corpo de prova em baquelite (polímero termofixo), onde neste trabalho é realizado na embutidora digital da marca Fortel, modelo 30, utilizando-se uma pressão de trabalho de 1000 lbf/pol². Logo após, o corpo de prova embutido é lixado com as lixas de 80, 120, 220, 320, 400, 600, 800 e 1200 grãos/pol², rotacionando em 90° a amostra entre cada troca de lixa, até obter uma superfície espelhada. Para realizar o ataque químico é utilizado o reagente Nital 3%, que é o ácido nítrico diluído em álcool.

3.3 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

O fundamento físico da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) consiste na emissão de feixes de elétrons por um filamento capilar de tungstênio, o eletrodo negativo, mediante a aplicação de uma diferença de potencial, que pode variar de 0,5

a 30 kV. Essa faixa de tensão possibilita variar a aceleração dos elétrons rumo ao eletrodo positivo (DEP. DE GEOLOGIA - UFOP, 2017). Este equipamento (MEV) é um tipo de microscópio eletrônico com potencial para produzir imagens de alta resolução de uma dada superfície. Conforme sua utilização, a forma com que as imagens são obtidas, o MEV aborda aspectos tridimensionais, os quais são importantes para compreender a estrutura superficial de uma amostra.



Figura 5 – Microscópio Eletrônico de Varredura

Assim, para análises de alta resolução microestrutural das amostras revestidas com WC e posteriormente irradiadas com laser de CO₂, utilizou-se o MEV, do Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura da Unipampa, modelo EVO MA10 da Marca Zeiss, como mostra a Figura 5.

3.4 Teste de Microdureza

A Microdureza é uma propriedade mecânica do material, responsável por uma parcela de sua caracterização; assim o microdurômetro utilizado é do Laboratório de Ensaio Mecânicos da Unipampa, da marca Buehler, modelo MicroMet 6010, como ilustra a Figura 6. Utiliza-se uma carga de 0,5 kg para ser possível realizar quatro endentações no revestimento quanto no substrato, para que seja possível dimensionar a microdureza ao longo do revestimento.

As endentações distanciam-se entre si numa medida de três vezes o diâmetro da endentação, para que se obtenha valores estatisticamente aproximados de sua propriedade mecânica como um todo, como pode-se observar na figura a seguir:



Figura 6 – Microdurômetro de modelo MicroMet 6010

3.5 Ensaio de Choque Térmico

O ensaio de choque térmico se sucederá através de 3 partições de cada amostra de cada material fornecido pela empresa Rijeza; uma amostra é o aço AISI 1020 com o revestimento de Carboneto de Tungstênio, e a outra amostra é feita do mesmo material e mesmo revestimento, porém com acabamento feito no laser de CO₂. Para que assim seja possível verificar o efeito físico e mecânico desta solicitação térmica.

Na figura 7 a seguir pode-se observar as amostras, uma com acabamento no laser (apresentando aparência mais opaca) e outra não; apenas com a aplicação do revestimento WC.



Figura 7 – Corpos de Prova fornecidos pela empresa Rijeza

Como método experimental de validação dos dados obtidos, far-se-á uma repartição em 3 de cada amostra, podendo executar assim 3 faixas de temperatura.

A avaliação quantitativa, experimental e estatística, do efeito do choque térmico e ciclagem térmica dos corpos de prova é planejada com embasamento nas normas ASTM 1171 e ABNT NBR 13202. O ensaio consiste em aquecer o forno, conforme Figura 8 ilustra, até a temperatura de 400°C e com auxílio de um tenaz, colocam-se os corpos de prova no interior do forno. As amostras permanecem com um patamar de 12 minutos no forno, (uma com aplicação do laser sobre o revestimento e outra sem) para homogeneização da temperatura das mesmas. Em seguida, são retirados e refrigerados bruscamente num recipiente contendo água a temperatura ambiente (25 °C), com profundidade suficiente para garantir extração de calor no processo de choque térmico. No recipiente deve assegurar um fundo protegido por tecido resistente, tipo TNT, para amortecer o impacto da queda nos corpos de prova. Após permanência em água por 5 minutos, as amostras ficam por 5 minutos em temperatura ambiente, garantindo um equilíbrio termodinâmico e completando dessa forma um ciclo. De acordo com a norma ASTM, devem-se concluir 20 ciclos, descartando do ensaio o corpo de prova que visivelmente frature e tomando nota do número do ciclo onde surgiu a primeira trinca visível em cada amostra e o número de ciclos até ruptura.



Figura 8 – Forno Utilizado do laboratório de química da UNIPAMPA

Como medida de verificação da aplicação do revestimento e se o material resiste a um choque térmico, far-se-á em seguida com o mesmo ensaio propriamente especificado, 10 ciclos a 600°C e 10 ciclos a 1000°C.

O uso de EPI's (equipamentos de proteção individual) é imprescindível, uma vez que o trabalho em altas temperaturas apresenta risco.

Após a realização da ciclagem térmica as amostras foram mantidas em temperatura ambiente por 24 h, sendo em seguida observadas por microscopia óptica para avaliar as trincas existentes nos corpos não fraturados.

4. RESULTADOS

Realizando-se o processo metodológico, afim de obter resultados experimentais científicos válidos, esta seção apresenta, primeiramente as implicações do choque térmico e consecutivamente sua respectiva caracterização.

4.1 Choque Térmico

Com objetivo específico de avaliar a resistência ao choque térmico nas amostras de aço AISI 1020 com revestimento de Carboneto de Tungstênio, com e sem aplicação de laser no acabamento, fez-se conforme explicitado na seção 3.5.

As amostras foram submetidas as temperaturas de 400°C, 600°C e 1000°C inicialmente, e depois faria um refino entre as faixas de 600°C e 1000°C, porém não foi preciso pois já houve um bom resultado tecnológico a ser discutido.

As que foram submetidas ao ensaio com 1000°C visivelmente não resistiram ao choque térmico com a temperatura ambiente, tanto a com acabamento no laser como a sem, de modo abrupto, trincando já no 8º ciclo e realmente caracterizando inaplicabilidade para esta temperatura, como pode-se observar nas figuras 9 e 10 a seguir:



Figura 9– Amostra com acabamento no laser submetida a 1000°C



Figura 10 – Amostra sem acabamento no laser submetida a 1000°C

As amostras submetidas aos choques térmicos com temperaturas de 400°C e 600°C, visivelmente não houveram trincas, fazendo-se necessário assim que uma análise microscópica seja realizada.

4.2 Metalografia

Concluído o processo de preparação metalográfica da amostra, obteve-se micrografias através do microscópio óptico, das amostras que foram submetidas ao ensaio de choque térmico, às temperaturas de 400°C e 600°C; tendo que à temperatura de 1000°C houve fratura visível a olho nu, não se fez necessário analisá-la. As figuras 11 e 12 a seguir são referentes ao ensaio de 400°C:

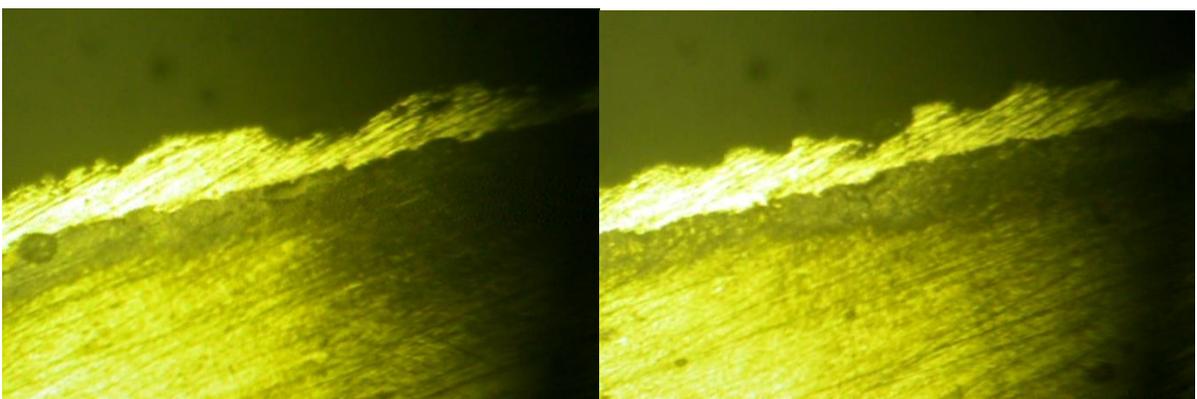


Figura 11– Amostra sem aplicação de Laser (400°C)

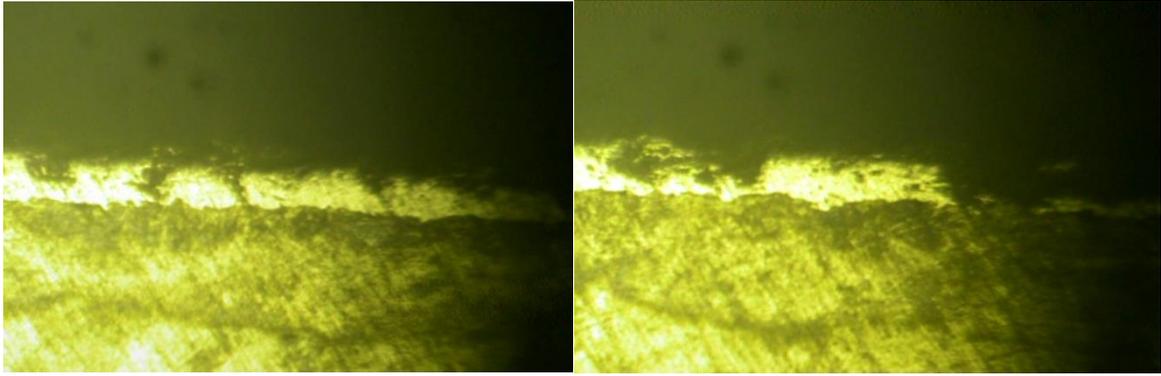


Figura 12- Amostra com aplicação de laser (400°C)

Nas figuras apresentadas embora não houve deslocamento dos revestimentos nas peças, a amostra que tem aplicação de laser apresenta pequenos danos.

As figuras 13 e 14 a seguir apresentam as amostras referente ao ensaio de choque de 600°C.

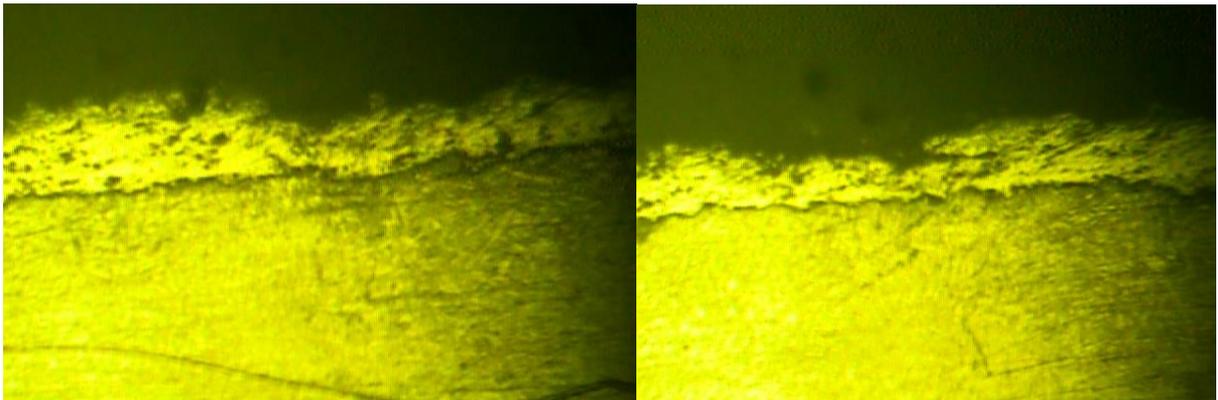


Figura 13– Amostra sem aplicação de laser (600°C)

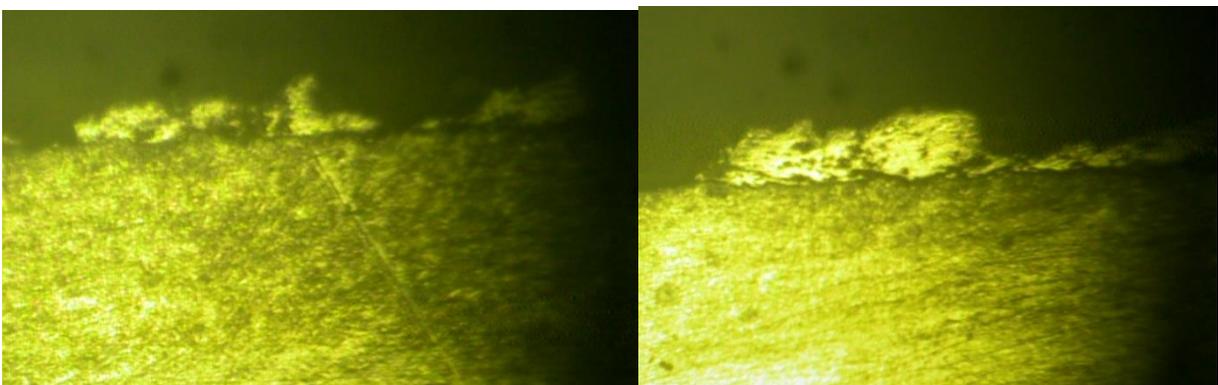


Figura 14– Amostra com aplicação de laser (600°C)

As micrografias pelo microscópio óptico em ambos ensaios de choque térmico, evidenciam uma fragilidade maior em relação a aplicação do laser de CO₂, ou seja,

mostrando uma maior resistência o choque térmico para as amostras as quais não foram aplicados o laser.

4.3 Microscopia Eletrônica de Varredura

A seguir as micrografias apresentadas são feitas pelo microscópio eletrônico de varredura, onde possibilita uma melhor resolução as imagens, além de aspectos tridimensionais. Como mostram as figuras 15 e 16 do ensaio de 400°C.

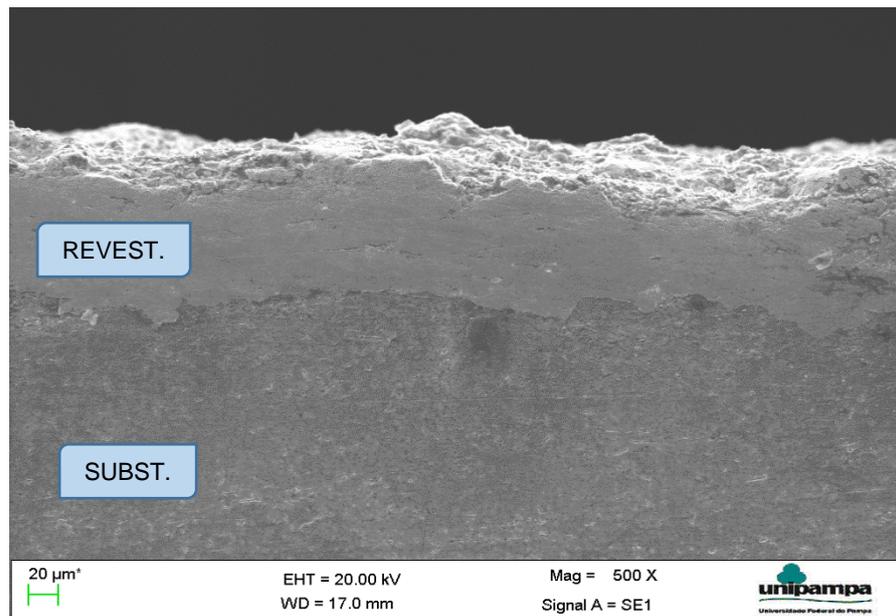


Figura 15– Amostra sem aplicação de laser (400°C)

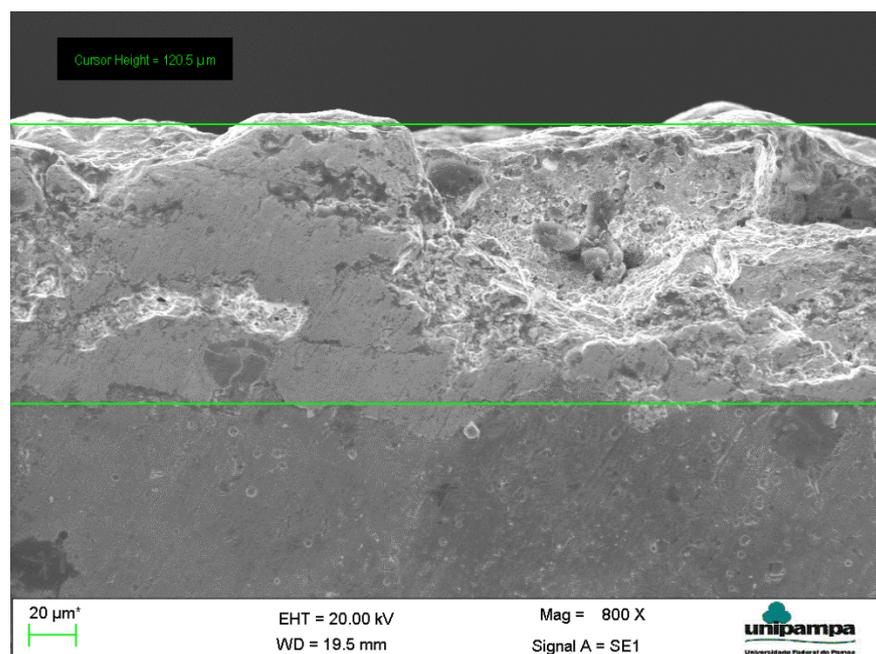


Figura 16– Amostra com aplicação de laser (400°C)

Pode-se visualizar também que a amostra com aplicação de laser apresenta uma maior fragilidade em relação ao choque térmico. A seguir apresentam-se as amostras relativas ao ensaio de 600 °C.

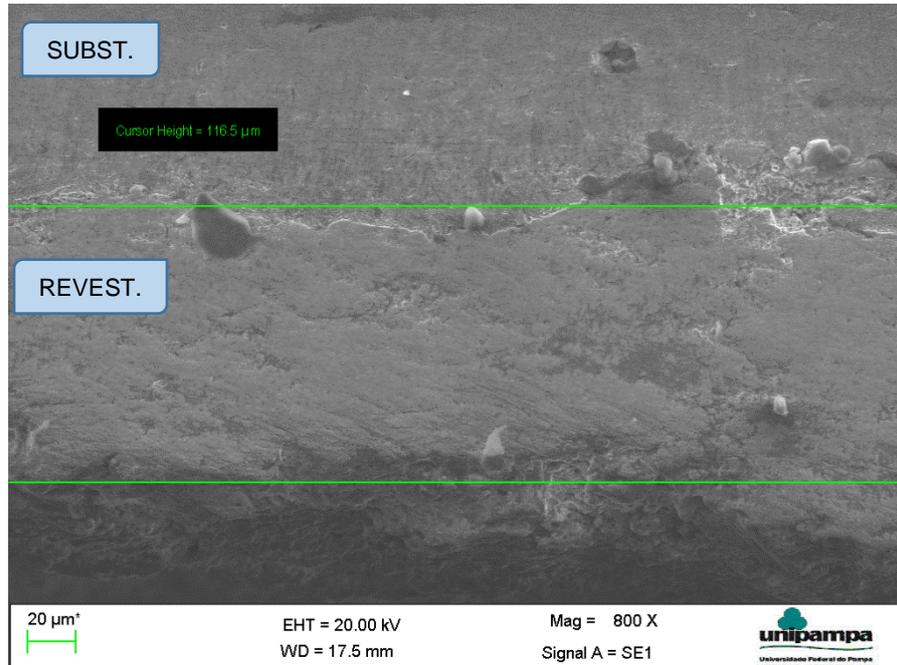


Figura 17– Amostra sem aplicação de laser (600°C)

As figuras 18 e 19 são as amostras com aplicação de laser, também submetida ao ensaio de choque térmico a 600°C. Onde pode-se visualizar que há inúmeras falhas, e defeitos de ligação metalúrgica entre o revestimento e substrato.

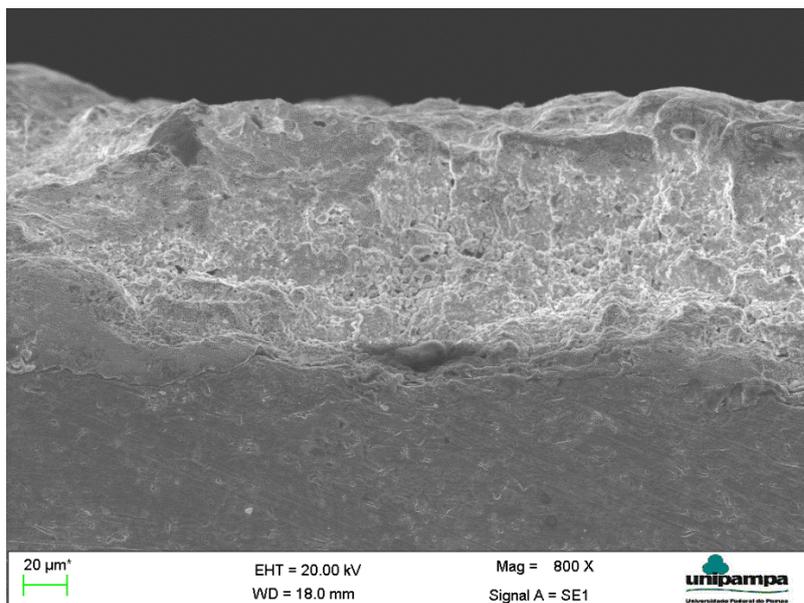


Figura 18– Amostra com aplicação de laser (600°C)

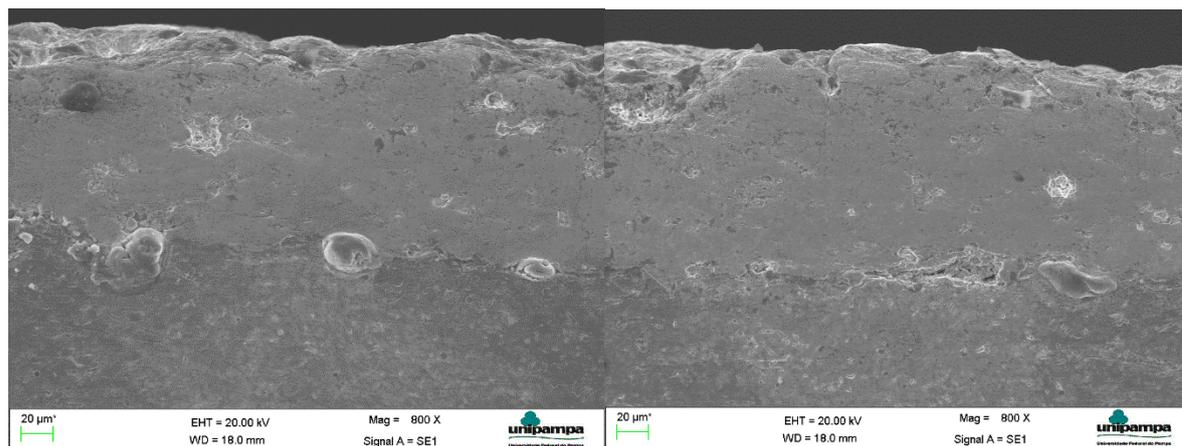


Figura 19 – Amostra com aplicação de laser (600°C)

Conforme mostra as figuras 17 e 16, em todas as amostras pós choque térmico, a espessura dos revestimentos não apresenta grandes variações relativas, mensurando-se todas as amostras aproximadamente com 118 micrometros.

4.4 Microdureza

Ao total das endentações foram 20 por amostra, convergindo todas aos valores esperados do material, tanto do revestimento como do substrato, visto que é um aço com baixo teor de carbono, não ocorre nenhum possível tratamento térmico no material.

O ensaio de microdureza foi realizado na escala Vickers (HV) com uma carga de 0,5 kg. As endentações distanciaram entre si de modo que não haja interferência com a anterior endentação realizada, fazendo assim um mapa pontual de quatro colunas e cinco linhas. Foi possível obter endentações no revestimento aspergido de WC e também no substrato. Esse procedimento foi realizado nas 4 amostras e assim feita uma média aritmética dos valores. Os gráficos das médias de dureza em cada amostra encontram-se no anexo deste trabalho. A figura 20 a seguir expressa comparativamente as durezas entre as amostras após o choque térmico.

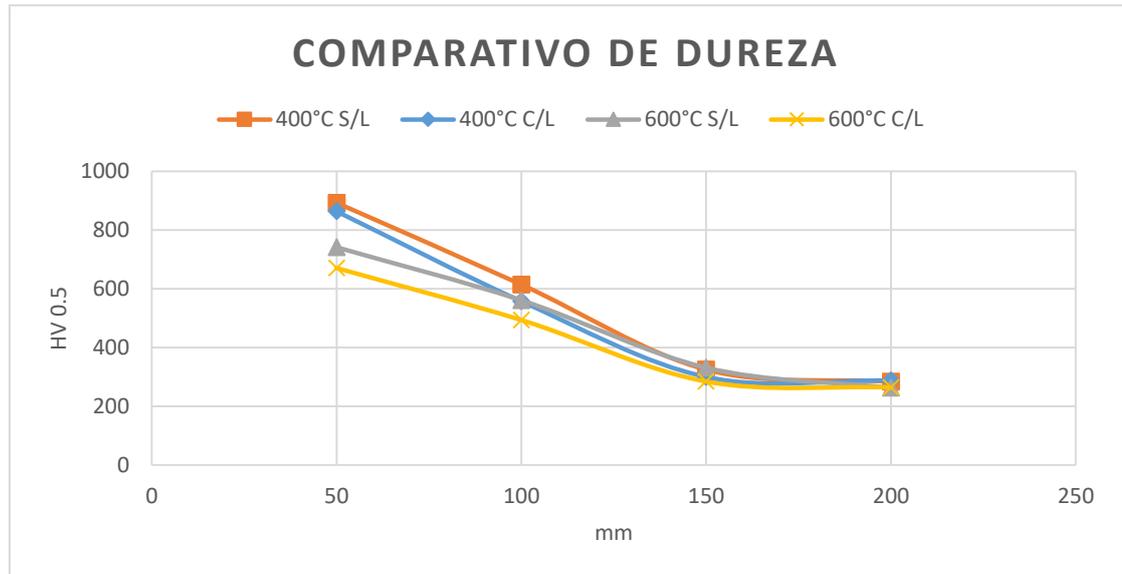


Figura 20 – Gráfico de Comparativo de Dureza pós choque térmico.

Após as ciclagens de choque térmico, como pode-se visualizar na Figura 20, o revestimento apresenta uma diminuição de dureza quanto maior é a solicitação térmica, fragilizando assim o revestimento. Contudo pode-se observar também que os revestimentos onde têm aplicação de laser de CO₂ apresentaram uma menor dureza. Visto que a aplicação de laser é uma refusão do material, neste ensaio tal aspecto assume forma de um dano acumulado por uma tensão térmica, gerada no revestimento, onde inclusive pode ter ocorrido um processo de oxidação.

4.5 Análise do Coeficiente de Dilatação

Nesta seção é apresentado um estudo a partir do equacionamento proposto na revisão bibliográfica, de tensão térmica, e com base na tabela 2 desenvolveu-se um gráfico de tensão em função variação da temperatura final do ensaio de choque térmico.

Tabela 2 – Propriedades do WC e do Aço

	E (GPA)	COEF. DIL.
AÇO	210	14*10 ⁻⁶
WC	696	5,2*10 ⁻⁶

Fonte: (Ribas, H, I. 1991)

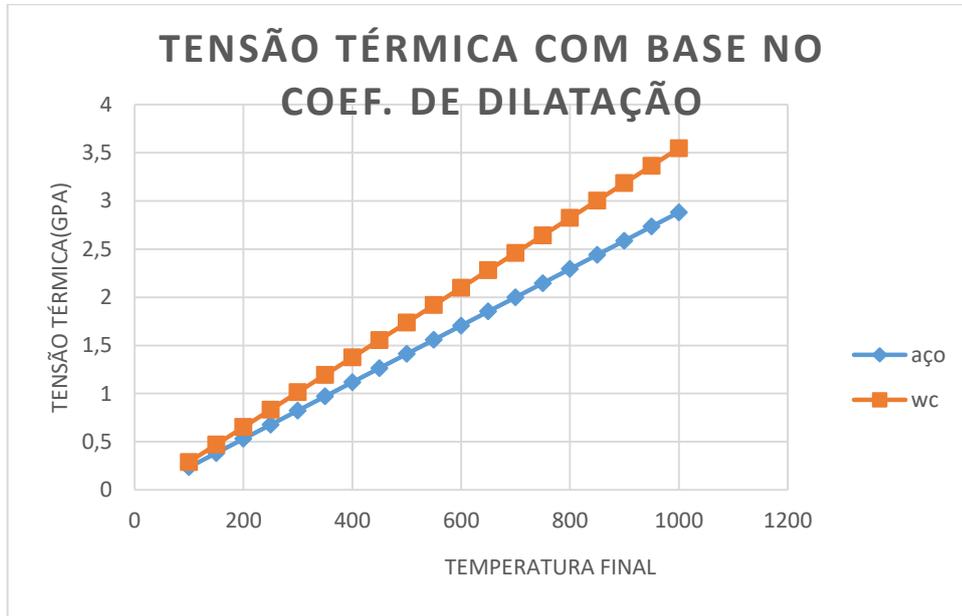


Figura 21 – Análise das propriedades térmicas do revestimento e do substrato

Com base na Figura 21 pode-se visualizar que, quanto maior é a temperatura de choque térmico, maior é a diferença entre as dilatações do Carboneto de Tungstênio e do Aço de substrato, gerando assim mais uma tensão no revestimento metálico aspergido. Este resultado é com base em um coeficiente de dilatação térmico de $14 \cdot 10^{-6}$, que é para um aço AISI 1020, porém em ferramentas de conformação, tal coeficiente é na ordem de 28% menor, pois são usados aços com uma melhor resistência mecânica, logo, a discrepância seria ainda maior entre revestimento e substrato.

5. CONCLUSÃO

Neste trabalho foi desenvolvido um estudo sobre a resistência do carboneto de tungstênio aspergido em aço em ciclagens térmica. Assim, foi utilizada metodologia do ensaio de choque térmico e de microdureza além das análises microscópicas ópticas e eletrônicas. Com isso conclui-se que:

- Durante o ensaio de choque térmico, as amostras ensaiadas à temperatura de 1000°C apresentaram um resultado muito abrupto, gerando visivelmente trincas no oitavo ciclo. Evidenciando o quão severo é a ciclagem térmica neste revestimento aspergido em Aço.
- Pode-se visualizar nas micrografias as quais o laser de CO₂ é aplicado, em qualquer das temperaturas testadas, que quando o revestimento é refundido com laser, fragilizaram-se os materiais após o ensaio de choque térmico; estando evidente com maior proporção de fraturas.
- Nos resultados de microdureza, conclui-se que quanto maior é a temperatura dos ciclos de choque térmico, maior é a diminuição da dureza do revestimento, evidenciando também a fragilidade do material quando submetido ao ensaio.
- Uma outra análise feita é a do coeficiente de dilatação térmica de cada material, onde mostra que o do aço é 3 vezes maior, em média, que o revestimento, logo como estão ligados metalurgicamente, o aço gera uma tensão sobre o revestimento, logo é mais uma solicitação adicional no revestimento. Mesmo que se altere o tipo de aço, a ordem de grandeza é ainda proporcionalmente muito maior.

Com isso, em princípio, não se recomenda o uso do revestimento de Carboneto de Tungstênio aspergido em aço para processos a quente, ou ainda que ocorra ciclagens térmica.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Tendo em vista a finalidade principal deste material como a aplicação em processos de conformação a quente, sugere-se uma análise numérica das tensões geradas neste processo, levando-se em conta as forças que são impostas nas matrizes e suas respectivas reações na estrutura da máquina. De modo a evidenciar as parcelas de carga devido a cada solicitação.

Um outro aspecto que pode ser abordado é a forma como o revestimento é depositado sobre o aço, bem como um estudo experimental da espessura do revestimento; se para uma dada espessura e ou uma dada velocidade de aspersão, até qual temperatura o revestimento suportaria?

Visto a fragilidade do resultado da aplicação do laser de CO₂ sobre o revestimento, sugere-se estudar os parâmetros deste, bem como também o tipo de laser que é usado para refundir; como possibilidade o laser *Cladding*, que é um processo de revestimento por fusão e sinterização da liga no substrato.

REFERÊNCIAS

- BARRA L. A. C. Y., MOLISANI A. L., RODRIGUES D., YOSHIMURA H. N. **Efeitos das características dos pós industriais de tungstênio e carboneto de tungstênio na microestrutura e dureza de metal duro para ferramentas de perfuração de rochas**. Revista Eletrônica de Materiais e Processos, v.3.2 (2008) 10-25.
- CALLISTER, W. D., *Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução*. John Wiley & Sons, Inc., 2002.
- CAO, X.Q., VASSEN, R., STOEVEER, D.; **Ceramic materials for thermal barrier coatings**. Journal of the European Ceramic Society, v. 24, p. 1-10, 2004.
- CHIKARAKARA, E; PUNSET, M; PICAS, J.A; BRABAZON, D; NAHER, S. **Characterisation of Laser Modified WC-CoCr Coatings**. Exposição, 24; 08800 Vilanova i la Geltrú; Espanha (2010).
- COSTA, R. C. *et al.* **Avaliação da Resistência a Corrosão de Revestimentos Metálicos Depositados por Aspersão Térmica a Arco: Uma Aplicação em Trocadores de Calor**. Soldagem e Inspecao, 2014. v. 19, n. 4, p. 292–301.
- CUNHA-DUNCAN, F.N.; BRADT, R.C. **Fatura de refratários**. Cerâmica, v. 49, p. 199-215, 2003.
- DEP. DE GEOLOGIA - UFOP. Microscopia Eletrônica - JEOL 5510. **Degeo**, 2017. Disponível em: <<http://www.degeo.ufop.br/laboratorios/microlab/mev.htm>>. Acesso em: 20 Janeiro 2017.
- DORFMAN M. R. Thermal spray basics. **Advanced Materials & Processes**, v. 170, n. 7, p. 47-50, jul 2002a.
- DORFMAN M. R. Thermal spray. **Advanced Materials & Processes**, v.160, n. 10, p. 66-68, oct. 2002b.
- FAVALESSA, D. *et al.* **Tratamentos Térmicos: Efeito Da Velocidade De Resfriamento Sobre As Microestruturas Dos Aços Abnt 1045**. [s.d.].
- GABRIEL, A. G. **Revestimento de Roscas Helicoidais Agrícolas a Base de CrC depositado via HVOF posteriormente irradiadas com Laser de Nd Yag e de CO₂**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Pampa. Alegrete, 2017.
- GONÇALVES, L.R.G. **Erosimetria a quente: equipamento, adequações e correlações dos valores obtidos com as propriedades de concretos refratários**. Dissertação (Mestrado) - Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas. Universidade Federal de São Carlos – UFSCar, São Carlos 2011. 124p.

GUTIÉRREZ, J. A. E. **Extração de ligantes e sinterização por plasma de metal duro**. Florianópolis, SC, 2002.

KRISHNA, B. V.; MISRA, V. N.; MUKHERJEE, P. S.; SHARMA, P. **Microstructure and properties of flame sprayed tungsten carbide coatings**. Refractory Metals and Hard Materials, v. 20, p. 355-374. (2002).

LIMA, C. C. ; TREVISAN, R. **Aspersão térmica – fundamentos e aplicações**. São Paulo: Artliber Editora, 1ed. 2001.148p.

MACHINE Design. **Thermal-spray coatings cover corrosion and wear needs**. Cleveland v. 70, n. 14, p.90-91. Aug 6 , 1998.

MARCONI, M. A.; LAKATOS, E. M. **Fundamentos de metodologia científica**. [S.l.]: Editora Atlas, 2003.

MARTINS, M.M. **Simulação numérica por volumes finitos da distribuição de temperatura transiente e tensões no choque térmico de uma placa**. Dissertação (Mestrado) - Centro de Ciências Tecnológicas, UFSC, Joinville, 2006. 158p.

QUINTELA, M. A., Melo, T. M. F., Lage, I. J., Pandolfelli, V. C., Rodrigues, J. A. **Análise da resistência ao choque térmico de refratários contendo carbono**. Ceramica v.47 (304). São Paulo. 2001.

RIBAS, H. I. **Resistência Ao Desgaste Abrasivo De Metais Duros Sem Cobalto**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1991. 63p.

SAMPSON, E. R. Thermal spray coatings for corrosion protection: An overview. **Coatings & Linings**, Houston, v. 36, n. 12, p.27- 29, dec 1997.

SEGADÃES, A.M. **Refractários**. 1ª ed. Aveiro: Universidade de Aveiro, 1997.

SMALLMAN, RE.; BISHOP, R.J. **Modern Physical Metallurgy and Materials**.

THORPE, M.L. Thermal Spray. **Advanced Materials & Processes**. p. 50-61. 5/1993

UPADHYAYA, G. S. **Materials science of cemented carbides – An overview**. Materials and Design, v. 22, p. 483-489, Elsevier. (2001).

YAO, Z.; STIGLICH, J. J.; SUDARSHAN, T. S. **Nanograined tungsten carbide-cobalt (WC/Co)**. Materials Modification, Inc. 2929 Eskridge Road, 2003.

ANEXOS

Gráficos do ensaio de microdureza para as amostras testadas ao choque térmico a 400°C e 600°C, sem e com aplicação de laser de CO₂, respectivamente. Com curva de tendência polinomial explicitada.

Gráfico 1 – Amostra ensaiada a 400°C

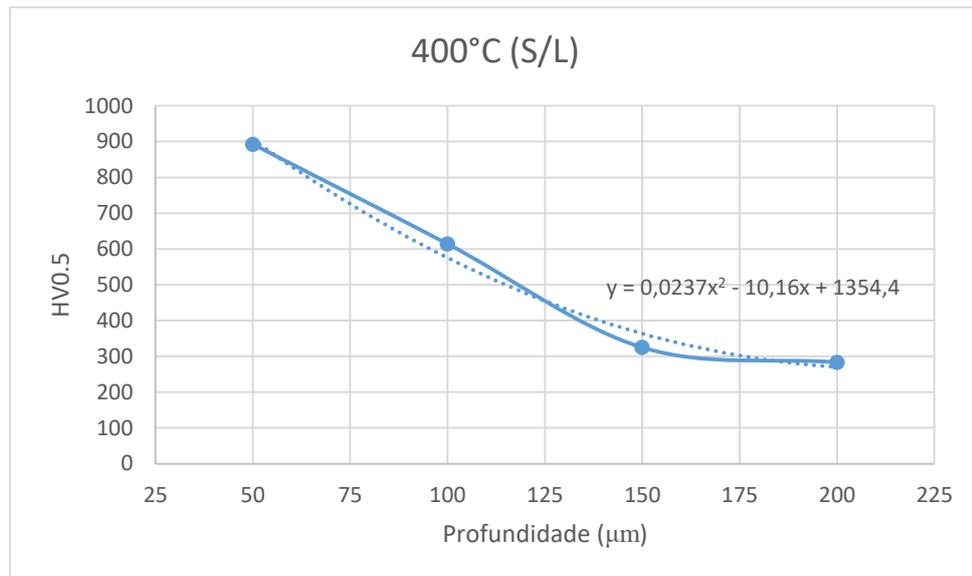


Gráfico 2 – Amostra ensaiada a 400°C com aplicação de laser de CO₂

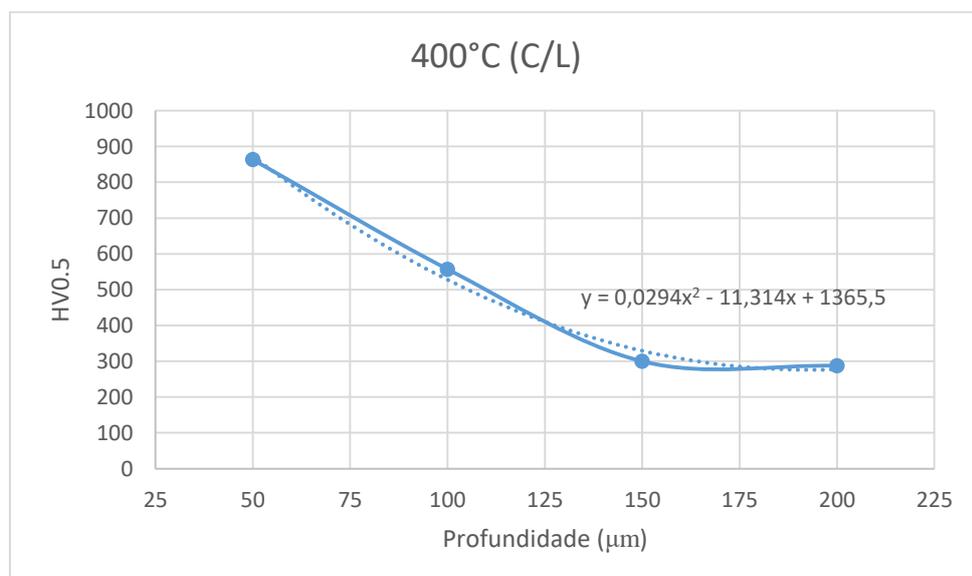
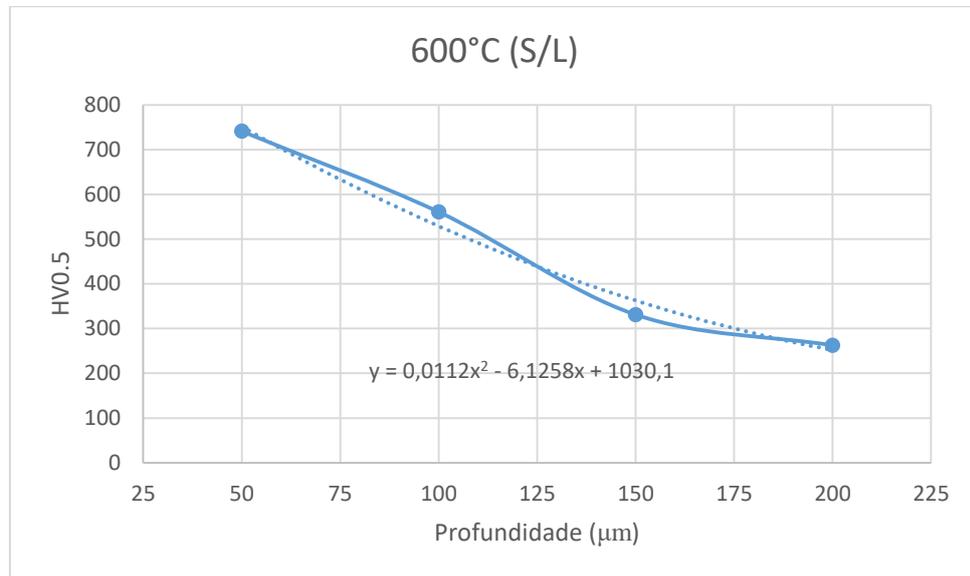


Gráfico 3 – Amostra ensaiada a 600°C

Gráfico 4 – Amostra ensaiada a 600°C com aplicação de laser de CO₂