



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"

LUIZ GUSTAVO FREDDI LOMBA FILHO

**APLICAÇÃO DE MICRO-ONDAS PARA A PRODUÇÃO DE PÓS
USADOS EM REVESTIMENTOS ENDURECIDOS POR CARBONETOS
DE TITÂNIO FORMADOS DURANTE SOLDAGEM COM ARCO
ELÉTRICO GTAW**

Ilha Solteira

2019



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

LUIZ GUSTAVO FREDDI LOMBA FILHO

**APLICAÇÃO DE MICRO-ONDAS PARA A PRODUÇÃO DE PÓS
USADOS EM REVESTIMENTOS ENDURECIDOS POR CARBONETOS
DE TITÂNIO FORMADOS DURANTE SOLDAGEM COM ARCO
ELÉTRICO GTAW**

Dissertação apresentada à Faculdade
de Engenharia - UNESP – Campus de
Ilha Solteira, para obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Mecânica.

Prof. Dr. Juno Gallego
Orientador

Área do conhecimento: Materiais e
Processos de Fabricação.

Ilha Solteira

2019

FICHA CATALOGRÁFICA
Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

L844a Lomba Filho, Luiz Gustavo Freddi.
Aplicação de micro-ondas para a produção de pós usados em revestimentos endurecidos por carbonetos de titânio formados durante soldagem com arco elétrico GTAW / Luiz Gustavo Freddi Lomba Filho. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2019 49 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Materiais e Processos de Fabricação, 2019

Orientador: Juno Gallego
Inclui bibliografia

1. Reciclagem de titânio. 2. Irradiação de micro-ondas. 3. Processos de soldagem. 4. Carbonetos de titânio. 5. Revestimento. 6. Caracterização microestrutural.

Raiane da Silva Santos
Raiane da Silva Santos
Supervisora Técnica de Seção
Seção Técnica de Referência, Atendimento ao usuário e Documentação
Divisão Técnica de Referência e Documentação
UNESP - 9999

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: Aplicação de micro-ondas para a produção de pós usados em revestimentos endurecidos por carbonetos de titânio formados durante soldagem com arco elétrico GTAW

AUTOR: LUIZ GUSTAVO FREDDI LOMBA FILHO

ORIENTADOR: JUNO GALLEGO

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em ENGENHARIA MECÂNICA, área: Materiais e Processos de Fabricação pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. JUNO GALLEGO

Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Prof. Dr. APARECIDO CARLOS GONCALVES

Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Prof. Dr. RUBENS RIBEIRO

Departamento de Engenharia de Produção / Universidade Federal de Mato Grosso do Sul -UFMS/CPTL

Ilha Solteira, 08 de agosto de 2019

DEDICO

Ao meus Pais, Luiz Gustavo Freddi Lomba e Valéria de Castro Lomba, A minha esposa, Ana Carolina Arces de Souza Lomba, e ao meu irmão Luiz Vinicius de Castro Lomba, que me motivaram e deram a possibilidade e todo suporte para essa conquista.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus.

Agradeço ao Prof. Dr. Juno Gallego pela sua relevante contribuição na orientação da elaboração dessa dissertação. Sou eternamente grato por essa oportunidade.

Aos meus pais Luiz Gustavo Freddi Lomba e Valéria de Castro Lomba por todo suporte, conselhos e compreensão ao longo dessa caminhada.

A minha esposa Ana Carolina Arces de Souza Lomba que sempre esteve ao meu lado.

Ao meu irmão Luiz Vinicius de Castro Lomba pelo companheirismo.

Aos professores Ruís Camargo Tokimatsu e Vicente Afonso Ventrella pelos conselhos e por toda ajuda concedida de bom grado.

A todos os professores do curso de Engenharia Mecânica de UNESP – Ilha Solteira por colaborarem com a minha formação profissional e pessoal.

A todos os técnicos e funcionários do Departamento de Engenharia Mecânica, em especial ao Diego e Nilton, que contribuíram, de forma direta ou indireta, para a concretização deste trabalho.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001

“O que sabemos é uma gota; o que ignoramos é um oceano”

(Isaac Newton)

RESUMO

As superfícies desgastadas são normalmente revestidas com ligas metálicas resistentes ao desgaste abrasivo, nos quais durante a soldagem o metal de solda com matriz ferrosa é reforçado pela formação de carbonetos grosseiros durante a solidificação da poça de fusão. O propósito deste trabalho é investigar a aplicação de micro-ondas para o preparo de cavacos das ligas de titânio ASTM F67 e ASTM F136, visando a sua fragilização pela formação de uma fina camada de carbonetos que facilitam a moagem e a obtenção de pós finos. O pó obtido da reciclagem do titânio foi misturado com grafite, tornando possível a formação de carbonetos de titânio (TiC) durante a fusão da mistura sobre peças de aço-carbono ABNT 1020 com uma tocha a arco elétrico com proteção gasosa (GTAW). A aplicação de micro-ondas foi bem-sucedida, permitindo a obtenção da mistura carbonetante com granulometria inferior a 45 μ m. O metal de solda mostrou uma microestrutura ferrítica reforçada por partículas grosseiras TiC, que incrementaram significativamente a dureza do material. Os resultados obtidos indicam que a reciclagem de cavacos de titânio seja potencialmente interessante para o desenvolvimento de um consumível de soldagem para revestimentos resistentes ao desgaste abrasivo, mais econômico e ambientalmente sustentável.

Palavras-chave: Reciclagem de titânio. Irradiação de micro-ondas. Processos de soldagem. Carbonetos de titânio. Revestimento. Caracterização microestrutural.

ABSTRACT

The worn surfaces are usually coated with abrasive resistant metal alloys, where the weld metal is reinforced by the formation of coarse hard carbides during the melt pool solidification. The aim of this work is investigate the irradiation of microwaves on scrap (chips) of ASTM F67 and ASTM F136 titanium alloys, becoming easier grinding of the residues for obtaining fine powder due to chips embrittlement by thin TiC coating. The titanium-rich recycled powder was mixed with graphite, making possible the formation of titanium carbides (TiC) during the melting of the mixture by Gas-Tungsten Arc Welding (GTAW) carried out on ABNT 1020 carbon steel pieces. The microwave application was very successful, allowing to obtain a fine carbide-former mixture with granulometry less than 45 μ m. The weld metal have showed a microstructure composed by ferrite (BCC iron) reinforced by coarse dendritic TiC particles, which promoted significantly hardness increasing. The experimental results have indicate that microwave irradiation for titanium alloys chips recycling is potentially interesting for the development of a economical and environmentally sustainable consumables for abrasive wear resistant hardfacing.

Keywords: Titanium recycling. Titanium carbides. Microwave irradiation. GTAW. Hardfacing. Microstructural characterization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Descrição esquemática dos quatro mecanismos de desgaste.	14
Figura 2 - Tipos de desgaste abrasivo	15
Figura 3 - Equipamento de Soldagem TIG: (a) Detalhe da região do arco e (b) montagem usual.....	17
Figura 4 - Carboneto de Titânio.....	19
Figura 5 - (a) Magnetron e (b) vista esquemática em corte transversal da cavidade do magnetron.	21
Figura 6 - Esquema de um forno de micro-ondas	22
Figura 7 - Interação das micro-ondas com os materiais.....	23
Figura 8 - Fenômeno de aquecimento (a) convencional e (b) puro por micro-ondas	24
Figura 9 - Aquecimento híbrido com a utilização de susceptores	25
Figura 10 - Procedimento experimental empregado neste trabalho.....	28
Figura 11 - a) Forno de micro-ondas BluEsky BLU-M191; b) Cadinho refratário	29
Figura 12 - Sequência usada na preparação dos cavacos MW. Determinação da massa de cavacos em (a), resíduo após separação do susceptor (b), aspecto do material após o peneiramento leve (c) e cavaco MW após trituração no almofariz (d).	30
Figura 13 - Camada de mistura carbonetante depositada sobre o substrato.	32
Figura 14 - Variação da temperatura durante a irradiação de micro-ondas pelo processo MW.	35
Figura 15 - Variação da taxa de aquecimento durante o processo MW.....	36
Figura 16 - Amostras revestidas pelo processo de soldagem GTAW	37
Figura 17 - Difratoograma do pó de cavaco MW moído.....	38
Figura 18 - Difratoograma dos resultados de DRX do revestimento preparado com a mistura carbnetante.....	40
Figura 19 - Micrografias MEV da região central do revestimento após a fusão da mistura carbonetante. (a) aumento de 160x; (b) aumento de 315x; (c) aumento de 630x; (d) aumento de 1600x.....	41
Figura 20 - Distribuição de frequência dos tamanhos dos carbonetos de titânio	41
Figura 21 - Análise da dureza (HV) em uma linha horizontal abaixo da superfície do revestimento.....	43

Figura 22 - Comparação da dureza com outros autores. (A) MOGHADDAM *et al*, 2019;
(B) GEDAEL, 2015; (C) BUSHUEVA, 2018; (D) PONTIN, 2017.44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Exemplos de materiais que podem ser utilizados como susceptores	26
Tabela 2 - Composição química nominal das ligas de titânio (% em peso).	27
Tabela 3 - Procedimento de limpeza dos cavacos.	28
Tabela 4 - Regressão exponencial da curva de aquecimento no processo MW	36
Tabela 5 - Parâmetros cristalográficos das fases encontradas por difração de raios-X.	38
Tabela 6 - Fração em massa e volumétrica das fases nos cavacos MW	39
Tabela 7 - Fração em massa e volumétrica das fases no revestimento	39
Tabela 8 - Parâmetros microestruturais dos carbonetos de titânio.	42

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	REVISÃO DA LITERATURA.....	14
2.1	MECANISMOS DE DESGASTE.....	14
2.2	SOLDAGEM	16
2.2.1	Gas Tungsten Arc Welding (GTAW).....	16
2.3	CARBONETOS DE TITÂNIO.....	18
2.4	MICRO-ONDAS.....	19
2.4.1	Interação do micro-ondas com o material	22
2.4.2	Tipos de aquecimento por micro-ondas.....	23
2.4.3	Susceptores	25
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	27
3.1	LIMPEZA DOS CAVACOS	27
3.2	IRRADIAÇÃO DOS CAVACOS POR MICRO-ONDAS (MW).....	28
3.3	PREPARAÇÃO DO REVESTIMENTO PARA SOLDAGEM	31
3.4	PREPARAÇÃO DO METAL DE SOLDA.....	32
3.5	PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS METALOGRÁFICAS.....	32
3.6	ANÁLISE MICROESTRUTURAL.....	33
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	35
4.1	PREPARAÇÃO DOS CAVACOS MW	35
4.2	ANÁLISE POR DIFRAÇÃO DE RAIOS-X.....	37
4.2.1	Cavaco MW moído	37
4.2.2	Revestimento	39
4.3	ANÁLISE POR ELÉTRONS RETROESPALHADOS - MEV	40
4.4	ANÁLISE DE MICRODUREZA (DUH)	42
5	CONCLUSÕES	45
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	46
	REFERÊNCIAS	47

1 INTRODUÇÃO

Devido à alta produtividade do setor industrial, as empresas sofrem constantemente com o desgaste superficial de seus equipamentos, provocado pelas condições de trabalho (condições climáticas, horas de trabalho, manutenções etc.) e ao atrito em que é submetido. Como consequência disso, os equipamentos têm a sua vida útil diminuída, que por sua vez promove custos de manutenção e de troca do material. Além disso, pode ocorrer uma paralização não programada no processo, o que resulta em grandes prejuízos econômicos.

A superfície sempre foi um problema a ser solucionado, Ashby (2011) comenta que “Deus criou os materiais, mas o demônio criou a superfície”. Ainda segundo o autor, os Tribologistas costumam citar os enormes custos, por meio de energia perdida e equipamentos desgastados resultantes desse fenômeno. Estima-se que cerca de 2 a 4% do PIB de um país seja destinado a reparos de equipamentos sujeitos a danos causados pelo desgaste, destacando o desgaste abrasivo como principal contribuinte para isso (GAHR, 1987).

A aplicação de revestimentos duros (*hardfacing*) é a técnica utilizada para reparar peças e sistemas mecânicos sujeitos ao desgaste abrasivo. Normalmente a composição química dos consumíveis de solda empregados para esta finalidade contém grandes quantidades de cromo e carbono, elementos necessários para a formação de carbonetos durante a fusão e a solidificação do metal de solda. Os carbonetos são compostos que apresentam alta dureza, estabilidade química e elevado ponto de fusão, sendo estas características fundamentais para os materiais resistentes ao desgaste (GAHR, 1987; MELLOR, 2006; PIERSON, 1996).

Revestimentos produzidos com pós metálicos, visando a formação de carbonetos, têm sido estudados por diversos autores (MOGHADDAM *et al.*, 2019; FAGUNDES, 2019; BUSHUEVA, 2018; PONTIN, 2017). O carboneto de titânio (TiC), por exemplo, apresenta dureza mais elevada (2800 HV) que o carboneto de cromo Cr₇C₃ (2150HV, além de ponto de fusão e estabilidade química mais elevados (PIERSON, 1996). Sendo assim, a aplicação de ligas de titânio para a formação de carbonetos torna-se eficiente para um aumento significativo na dureza superficial de peças e equipamentos.

As ligas de titânio ASTM F67 (titânio puro) e ASTM F136 (Ti-6Al-4V) têm sido bastante utilizadas na indústria biomédica, para a fabricação de implantes e próteses. Na produção dessas peças são gerados resíduos (cavacos), atualmente sem valor comercial ou aplicação tecnológica para a cadeia produtiva. Dessa maneira, a aplicação desses cavacos como consumíveis de soldagem para a produção de revestimentos duros tornam-se uma alternativa para a reciclagem desses materiais. Porém, esses resíduos industriais apresentam propriedades dúcteis, o que dificulta a sua trituração e moagem.

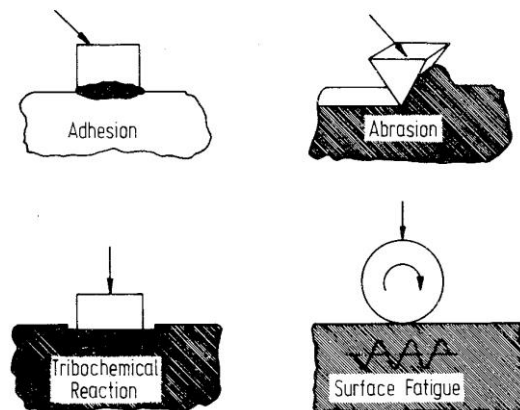
O objetivo deste trabalho é investigar a aplicação da irradiação por micro-ondas para a fragilização e moagem de ligas de titânio ASTM F67 e ASTM F136 para a formação de um metal de solda reforçado por carbonetos de titânio obtidos após fusão com tocha GTAW. O desenvolvimento dessa pesquisa visa a obtenção de uma mistura carbonetante para a produção de revestimentos resistentes ao desgaste abrasivo, economicamente viável e ambientalmente sustentável.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 MECANISMOS DE DESGASTE

Segundo Mellor (2006), a principal definição para o desgaste é o processo de perda de material através do contato de duas superfícies. Já para Gahr (1987), o desgaste pode ser definido como a perda progressiva de material da superfície de um corpo sólido devido a esforços mecânicos, contato e movimento relativo contra outra superfície sólida, líquida ou gasosa. Seguindo, Gahr (1987) comenta que o desgaste é tradicionalmente ligado ao atrito, e os principais mecanismos de desgaste são: adesão, abrasão, por fadiga e por reações triboquímicas. Como pode ser visualizada na Figura 1.

Figura 1 - Descrição esquemática dos quatro mecanismos de desgaste



Fonte: Gahr (1987).

O desgaste adesivo é a formação e quebra de ligações adesivas interfaciais, devido ao calor gerado pelo atrito entre as superfícies de contato e a formações de junções de soldagem a frio. Já o desgaste abrasivo é a remoção de material devido ao atrito, por decorrência de riscamento. A fadiga causa no material a formação de trincas nas regiões superficiais devido a ciclos de estresse tribológico que resultam na separação de materiais, provocando o desgaste por fadiga. Por fim, o desgaste por reações triboquímicas é a formação de reações químicas que geram produtos resultantes de interações químicas entre os elementos do tribosistema, iniciado pela ação tribológica (BAYER, 20014; GAHR, 1987).

A maioria das ocorrências de reparo de peças desgastadas, dentre os vários mecanismos de desgaste, é o desgaste abrasivo. Esse mecanismo de desgaste é responsável por 50% dos problemas industriais (COZZA, 2011).

No desgaste abrasivo, o material é removido ou deslocado de uma superfície por partículas duras forçando um deslizamento ao longo da superfície. As fontes das partículas duras, que podem ser arrastados para o contato deslizante, incluem contaminantes do ambiente externo, desgaste de resíduos, produtos de oxidação formados com o tribocontato ou outros processos químicos (MELLOR, 2006).

Segundo Mellor (2006), o desgaste abrasivo pode ser dividido em dois tipos: desgaste abrasivo de dois corpos e desgaste abrasivo de três corpos. Quando ocorre o desgaste abrasivo de dois corpos, a superfície mais dura remove material da superfície mais mole. Já o desgaste abrasivo de três corpos ocorre quando há a existência de um terceiro corpo entre as superfícies. Note que, a partir do momento que ocorre a remoção de material no desgaste abrasivo de dois corpos, esse cavaco se torna um terceiro corpo, ocasionando o desgaste de abrasivo de três corpos. A Figura 2 ilustra os tipos de desgaste abrasivo.

Uma alternativa para diminuir o atrito entre duas superfícies e, conseqüentemente diminuir o desgaste, é a utilização de revestimento superficial com material duro. Segundo Buchely *et al.* (2005), é possível depositar uma liga homogênea de um metal de alta dureza na superfície do material por soldagem para aumentar a dureza e a resistência ao desgaste, sem perder outras propriedades, como ductilidade e tenacidade.

Figura 2 - Tipos de desgaste abrasivo



Fonte: Adaptado de Mellor (2006)

2.2 SOLDAGEM

Segundo Marques *et al.* (2005), soldagem é o processo de união dos materiais, produzida por um aquecimento até uma temperatura adequada, com ou sem utilização de pressão e metal de adição. Ainda segundo os autores, pode-se considerar soldagem como um processo de deposição de material sobre uma superfície, afim de recuperar peças desgastadas ou a formação de revestimentos especiais.

O material de revestimento pode ser aplicado a uma superfície por um processo de soldagem, conhecido como *weld hardfacing*. O revestimento pode ser formado na superfície de um componente por qualquer método de soldagem. Dependendo do método, o material de revestimento é alimentado na zona de fusão como um eletrodo consumível ou como uma barra de enchimento (MELLOR, 2006).

Os processos de soldagem podem ser divididos em três categorias:

- Soldagem por fusão: o material passa para o estado líquido para ocorrer a união;
- Soldagem no estado sólido: não ocorre fusão dos materiais;
- Brasagem: fusão apenas no metal de adição.

Existem mais de 70 processos de soldagem. Os processos que mais se destacam para revestimentos superficiais são: soldagem ao arco elétrico com eletrodo revestido (*Shielded metal arc welding (SMAW)*), soldagem por arco elétrico com gás de proteção (*Gas metal arc welding (GMAW)*), soldagem a arco elétrico com proteção gasosa e eletrodo de tungstênio (*GTAW*), entre outros. Além disso, os processos de soldagem podem ser aplicados para realizar tratamentos térmicos superficiais, destacando o processo de soldagem a Laser.

Para a aplicação de revestimentos duros a fim de formar Carbonetos de Titânio, o processo mais adequado é o GTAW pois é recomendado para ligas de Titânio, uma vez que não existe reações metal-gás e metal-escória.

2.2.1 Gas Tungsten Arc Welding (GTAW)

A soldagem GTAW que pode ser traduzida como soldagem a arco elétrico com proteção gasosa e eletrodo de tungstênio também é conhecida como solda TIG

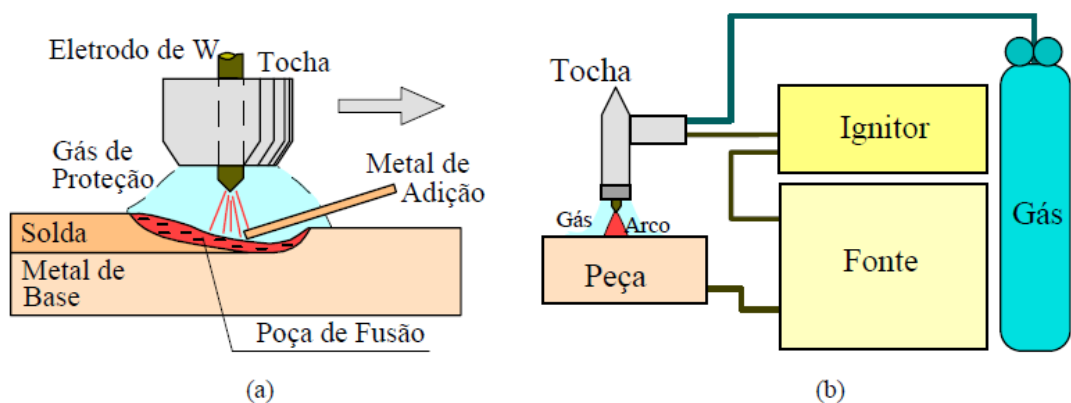
(*Tungsten Inert Gas*). Esse processo de soldagem apresenta eletrodo não consumível de Tungstênio e cria uma atmosfera protetora com gás inerte, geralmente argônio ou hélio (MARQUES *et al.*, 2005).

Este processo é aplicável à maioria dos metais e suas ligas, podendo trabalhar em uma ampla faixa de espessura. Porém, o custo do processo é relativamente elevado. O GTAW é usado na soldagem de metais não ferrosos e aços inoxidáveis, principalmente de peças de pequenas espessuras e no passe de raiz.

O processo de soldagem GTAW é vantajoso pois produz pouca escoria e fumos, apresenta um arco estável, é indicado para peças com alto grau de complexidade e produz um ótimo acabamento. Por outro lado, tem baixo rendimento e limitações de espessura, exige ótima qualificação do soldador e altos custos.

A temperatura de fusão necessária para soldar os materiais é obtida mantendo o arco entre o eletrodo de tungstênio e o metal de base. Sendo assim, a temperatura na poça de fusão pode atingir a casa de 2500°C, sendo esta protegida por um gás inerte. Os equipamentos para soldagem GTAW basicamente são constituídos de uma fonte de energia com corrente contínuo-alternada, a tocha, cabo terra, eletrodo não consumível e o gás de proteção. A Figura 3 ilustra o equipamento utilizado para o processo de soldagem GTAW.

Figura 3 - Equipamento de Soldagem TIG: (a) Detalhe da região do arco e (b) montagem usual.



Fonte: Marques *et al* (2005)

Os eletrodos de Tungstênio podem ser puros ou com adição de óxido de Tório ou Zircônia. Eletrodos com óxido de Tório suportam maiores correntes sem fundir a

ponta como ocorre com os de tungstênio puro, além disso tende a apresentar menor desgaste.

A forma da ponta do eletrodo influencia no formato do cordão de solda. Dessa maneira, a afiação do eletrodo é muito importante pois proporciona um arco mais estável quando se trabalha com menores densidades de corrente. A extremidade desses eletrodos pode ser afiada com o auxílio de um esmeril.

2.3 CARBONETOS DE TITÂNIO

Segundo Cotton (1972), os carbonetos são compostos formados a partir da ligação entre elementos com eletronegatividade igual ou menor a do carbono. Os carbonos combinados com oxigênio, fosforo, nitrogênio entre outros, não estão nessa categoria.

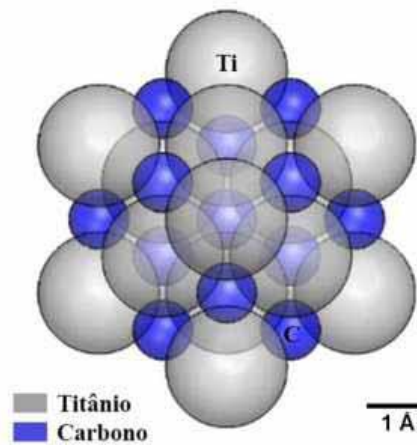
Os carbonetos são geralmente divididos em três categorias: os carbonetos salinos, os carbonetos intersticiais e carbonetos covalentes (COTTON, 1972).

- a) Carbonetos Salinos: formados pelos elementos dos grupos I, II e III.
- b) Carbonetos Intersticiais: formados pelos elementos dos grupos IV, V e VI localizados nos períodos 4,5 e 6 da tabela periódica.
- c) Carbonetos Covalentes: formados pelos elementos boro e silício.

O carboneto de titânio (TiC) está no grupo dos carbonetos intersticiais, que por sua vez são compostos cristalinos entre os metais dos grupos IV, V e VI. O titânio puro tem estrutura cristalina do tipo hexagonal compacta (HCP) até 882°C, após isso apresenta estrutura cubica de corpo centrado (CCC). O carbono se aloca nos interstícios octaédricos desta estrutura. A Figura 4 ilustra como é a estrutura cristalina do carboneto de titânio.

Os carbonetos de titânio possuem elevada dureza, o que os tornam comum na aplicação de peças e componentes que necessitam de alta resistência aos tipos de desgaste. Possuem ponto de fusão elevado em temperaturas acima de 1800° C, por esta característica também podem ser denominados de carbonetos refratários e ainda são quimicamente e termodinamicamente estáveis (PIERSON, 1996).

Figura 4 - Carboneto de Titânio



Fonte: Fagundes Junior (2015).

2.4 MICRO-ONDAS

Segundo Chandrasekaran *et al* (2011), micro-ondas fazem parte do espectro eletromagnético com comprimento de onda variando de 1mm a 1m, no qual corresponde a uma faixa de frequência de 300 MHz a 300 GHz. As micro-ondas podem ser utilizadas em diversas aplicações: telefones celulares, radares, televisão, satélites, processamento metalúrgicos, tratamentos médicos entre outras. O processamento de materiais através da irradiação de micro-ondas tem algumas características, como: aquecimento interno; rápido aquecimento; alta eficiência de aquecimento; aquecimento uniforme e energia limpa; bom funcionamento e segurança de operação (YAHAYA *et al*, 2014; PATHANIA; GUPTA, 2014).

Além disso, Clark e Sutton (1996), cita alguns benefícios, desafios e necessidades do processamento através da irradiação de micro-ondas. Como benefícios são possíveis destacar: redução de custos com energia, tempo e espaço; rápido aquecimento; aquecimento volumétrico e uniforme. O autor destaca os seguintes desafios: aquecimentos de materiais com baixa absorção de micro-ondas; eliminação e controle na formação de plasmas; relutância em abandonar tecnologias convencionais. Já em relação às necessidades, o autor apresenta: disponibilidade de equipamentos e tecnologias de suporte; melhor compreensão e modelagem de

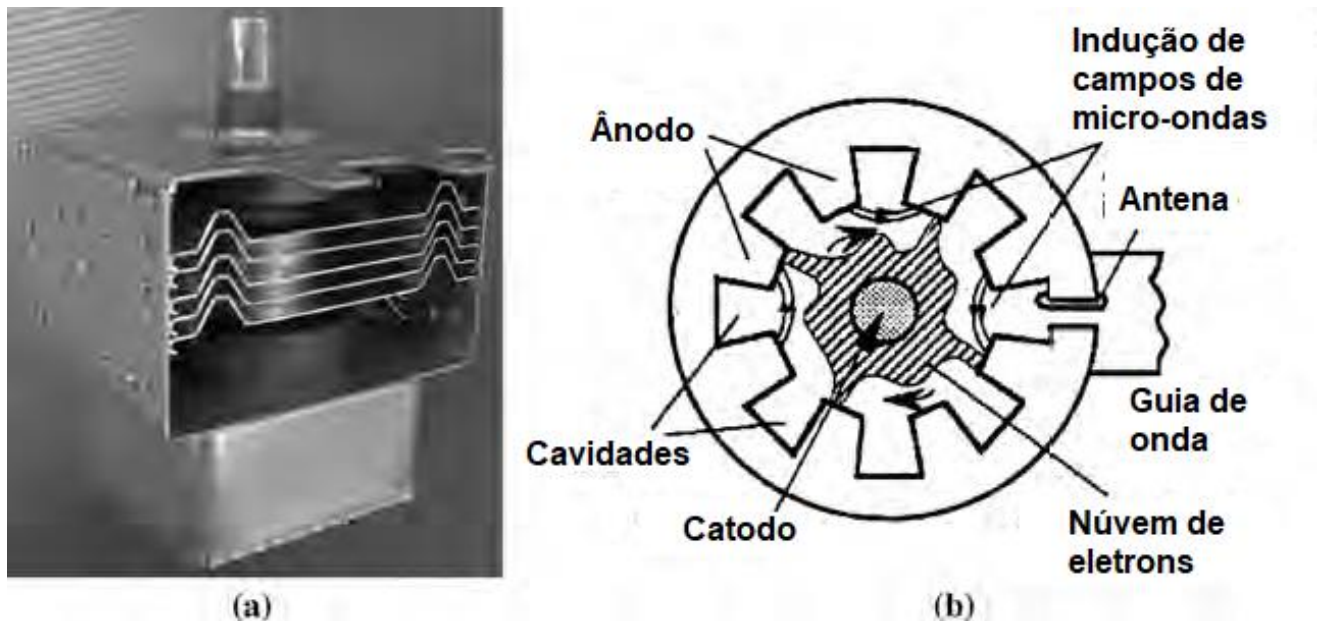
fundamentais das interações micro-ondas/materiais; maior ênfase no processamento de materiais magnéticos.

Os fornos de micro-ondas geralmente são utilizados para aquecimento de materiais, principalmente para o preparo de comida. Para o aquecimento de materiais, a frequência mais utilizada é a de 2,45 GHz, e apresenta comprimento de ondas variando de 12,2 cm a 13,5 cm. Os sistemas de processamento de microondas geralmente consistem em: uma fonte de microondas para a geração dessas micro-ondas, um aplicador para fornecer energia ao material e um sistema de controle para o monitoramento e regulação de energia (GUPTA; LEONG, 2007).

O magnetron é o gerador mais utilizado para a emissão de micro-ondas por conta da sua alta eficiência, compactação e baixo custo. É amplamente utilizado em fornos e sistemas de radares. O magnetron, como pode ser visualizado pela Figura 5, é um dispositivo que converte energia elétrica em micro-ondas. Uma diferença de potencial constante é aplicada entre o ânodo (que é um cilindro circular oco) e o cátodo. Os elétrons são acelerados do cátodo para o ânodo, mas a presença de um forte campo magnético (produzido por um eletroímã colocado entre os dois polos) faz com que os elétrons descrevam uma trajetória curva e seguem um caminho em espiral, produzindo radiofrequência (GUPTA; LEONG, 2007; ZLOTORYNSKI, 1995).

No magnetron, os elétrons emitidos pelo catodo são feitos para girar circularmente no espaço coaxial entre o catodo e o anodo sob a influência de um campo magnético axial. Na presença de um campo eletromagnético, tensões positivas e negativas alternadas são geradas no anodo e elétrons são emitidos a partir do cátodo. O agrupamento de elétrons ocorre devido a presença de regiões de aceleração e desaceleração de campos e na formação de nuvem de elétrons, como pode ser visualizado na Figura 5 (b). A potência do magnetron utilizado em um forno de micro-ondas doméstico varia de 0,3 a 3 kW e para magnetron de alta potência varia de 25 a 100kW (GUPTA; LEONG, 2007).

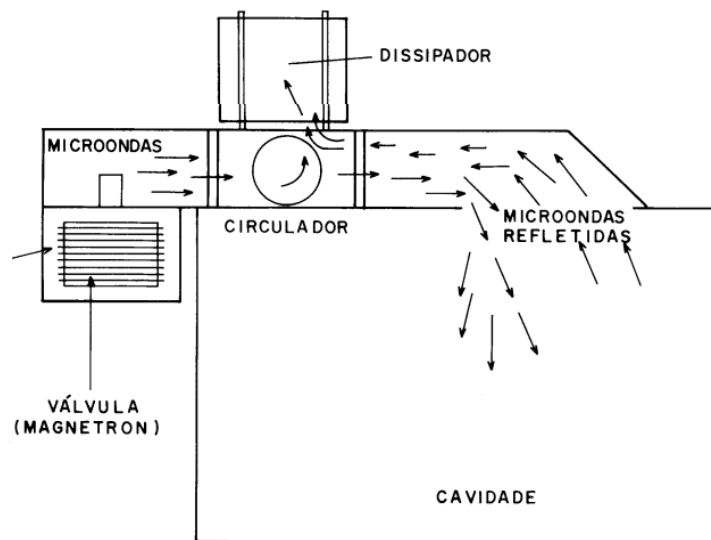
Figura 5 - (a) Magnetron e (b) vista esquemática em corte transversal da cavidade do magnetron



Fonte: Gupta e Leong (2007).

Posteriormente, ocorrerá a emissão de ondas eletromagnéticas por uma antena colocada diretamente sobre o ânodo. As ondas produzidas serão guiadas por um guia de onda até a cavidade contendo o material a ser aquecido. As paredes metálicas do forno absorvem muito pouco da energia. A maior parte é refletida e dissipada em um dispositivo (dummy load), que evita que as MO danifiquem a válvula. Um esquema de um forno de MO está apresentado na Figura 6. (BARBOZA *et al*, 2001; ZLOTORYNSKI, 1995).

Figura 6 - Esquema de um forno de micro-ondas



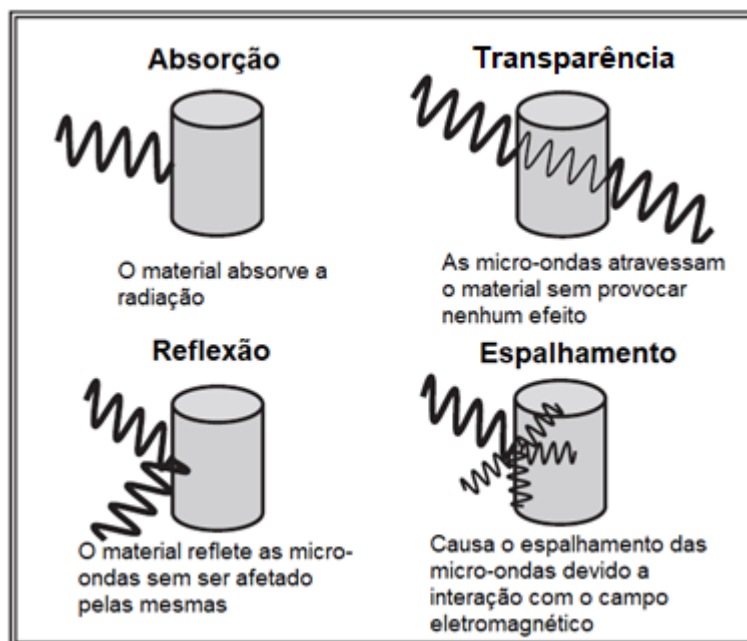
Fonte: Barboza *et al.* (2001).

2.4.1 Interação do micro-ondas com o material

Quando se irradia um material qualquer com micro-ondas, existem três possibilidades quanto à penetração da onda eletromagnética, como mostra a Figura 7. As micro-ondas podem ser refletidas, transmitidas ou absorvidas pelos materiais. Além disso, certos materiais, como materiais magnéticos, interagem com o componente do campo magnético da onda eletromagnética, causando espalhamento das micro-ondas. Segundo Gupta e Leong (2007), as interações das micro-ondas com os materiais podem ser classificadas nas seguintes categorias:

- a) Materiais opacos: esses materiais refletem as micro-ondas não permitindo que as ondas eletromagnéticas atravessem, como por exemplo os metais;
- b) Materiais transparentes: são materiais que permitem que as micro-ondas passem com facilidade como, por exemplo, os vidros, cerâmicas e o ar.
- c) Materiais absorventes: esses materiais absorvem as micro-ondas e transformam a energia eletromagnética em calor tais como a água, carbono e carvão de silício.

Figura 7 - Interação das micro-ondas com os materiais



Fonte: Adaptado de Gupta e Leong (2007).

Conforme Chandrasekaran *et al* (2011), os fatores que afetam o aquecimento por micro-ondas são: distribuição de calor, profundidade de penetração, frequência de operação, modo de operação, posicionamento dentro do forno, geometria de carga, e geometria do forno.

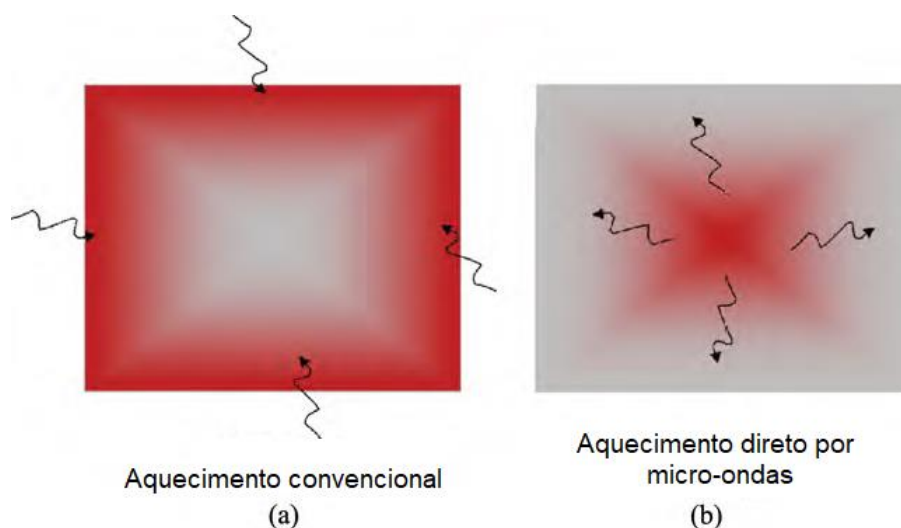
2.4.2 Tipos de aquecimento por micro-ondas

O aquecimento por irradiação de micro-ondas é a capacidade de o material absorver altas energias eletromagnéticas e converte-las em calor. O aquecimento por micro-ondas acontece devido à polarização dipolar das moléculas que são permanentemente polarizadas devido à ligação química, e em seguida, são realinhados na presença de campo elétrico de alta frequência. Devido à alta frequência, o realinhamento ocorre 14 bilhões de vezes por segundo resultando em atrito interno das moléculas causando um aquecimento volumétrico do material (CHANDRASEKARAN *et al.*, 2011).

O aquecimento por micro-ondas pode ser classificado em dois tipos: aquecimento direto por micro-ondas e aquecimento híbrido. No aquecimento direto os materiais são expostos apenas a irradiação de micro-ondas, resultando em aumento

da temperatura pela absorção das ondas eletromagnéticas pelo material. Esse mecanismo de aquecimento é geralmente aplicado a materiais que absorvem micro-ondas. Além disso, o aquecimento direto por micro-ondas converte a energia eletromagnética em calor a partir do interior do material, que se move em direção as extremidades. Esse aquecimento difere do convencional, uma vez que o aumento da temperatura ocorre da superfície dos materiais e segue em direção ao interior. Os mecanismos de aquecimento convencional e direto por micro-ondas está ilustrado na Figura 8. (GUPTA e LEONG, 2007; SINGH *et al*, 2015).

Figura 8 - Fenômeno de aquecimento (a) convencional e (b) puro por micro-ondas



Fonte: Singh *et al.* (2015)

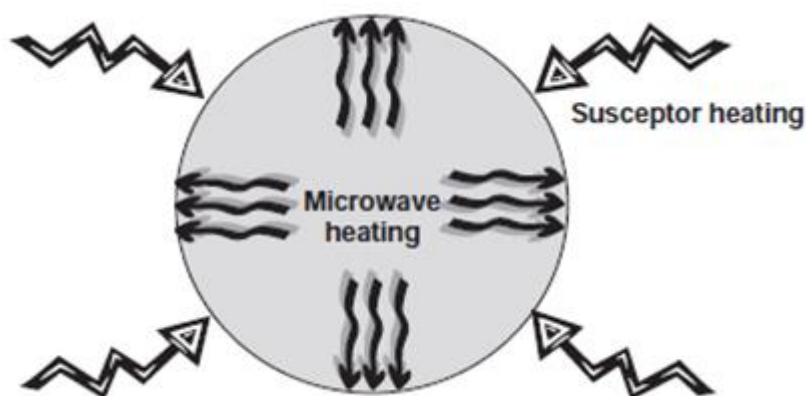
Um grande problema do aquecimento por micro-ondas é lidar com materiais que são transparentes ou opacos, ou seja, em que não há absorção de micro-ondas. Esses materiais requerem um longo tempo de aquecimento para alcançar a temperatura de processamento de micro-ondas. O longo tempo de aquecimento afeta o processamento de duas maneiras: reduz a eficiência energética do processo e introduz o risco adicional de formação de plasmas. A formação de plasmas é indesejável, uma vez que interrompe temporariamente o processo, além de infligir mudanças nos padrões de aquecimento. Uma das alternativas para superar isso é a utilização de um material secundário que tenha propriedades absorventes quando exposto à irradiação de micro-ondas. Esse processamento é chamado de aquecimento híbrido (BHATTACHARYA; BASAK, 2016).

O aquecimento híbrido combina o aquecimento por micro-ondas direto para a realização de um tratamento térmico em materiais com baixa absorção até atingirem a temperatura que irão absorver as micro-ondas de forma eficaz. Esse método de aquecimento envolve dois tipos de energia, sendo que uma dessas fontes é a energia fornecida pelo próprio micro-ondas e a outra uma fonte de energia externa. Essa energia térmica adicional pode ser fornecida pelo uso de susceptores de micro-ondas.

2.4.3 Susceptores

Os susceptores tem a função de acelerar ainda mais o processamento de microondas, proporcionando um aquecimento de duas vias com perdas de calor reduzidas da superfície do material. Em geral, os susceptores apresentam alta taxa de aquecimento, o que permite a eficiência do processamento híbrido. Além disso, o rápido aquecimento inicial do mesmo é determinante para executar o processamento de microondas eficiente em termos de energia para os materiais com pouca absorção de micro-ondas. A Figura 9 ilustra a esquematização do aquecimento híbrido com o uso de materiais susceptores (GUPTA; LEONG, 2007; BHATTACHARYA; BASAK, 2016).

Figura 9 - Aquecimento híbrido com a utilização de susceptores



Fonte: Adaptado de Gupta e Leong (2007).

Uma grandeza que auxilia a escolha do material que pode ser utilizado como susceptor está relacionada a penetração de micro-ondas. A extensão da penetração de micro-ondas dentro do material pode ser determinada a partir da profundidade de

penetração (d_p) que determina a distância em que a intensidade do campo eletromagnético decai para $1/e$ ($\approx 0,368$) da amplitude inicial. A intensidade da profundidade de penetração pode determinar qual o comportamento do material quando exposto a irradiação de micro-ondas (opaco, transparente ou absorvente) (GUPTA; LEONG, 2007; BHATTACHARYA; BASAK, 2016).

Os materiais refletores são caracterizados por apresentarem valores extremamente pequenos de profundidade de penetração, na ordem de μm . Essa pouca capacidade de penetração das micro-ondas no material tem como resultado a reflexão das ondas eletromagnéticas. Já os materiais transparentes a micro-ondas apresentam profundidade de penetração muito grande, com valores maiores que 100 cm. Isso permite que as micro-ondas passem pelo material sem uma significativa absorção de energia. Alumina, quartzo e vidro, por exemplo, apresentam profundidade de penetração maiores que 10 metros na frequência de 2,45 GHz. Por fim, materiais que absorvem ondas eletromagnéticas apresentam valores de d_p na faixa de 1 a 100 cm. Esse grupo de materiais absorvem a energia irradiada por micro-ondas e converte ela em calor. Sendo assim, esse tipo de material são os mais adequados para serem utilizados como susceptores. A Tabela 1 abaixo apresenta alguns exemplos de materiais que podem ser utilizados como susceptores (BHATTACHARYA; BASAK, 2016).

Tabela 1 - Exemplos de materiais que podem ser utilizados como susceptores

Material	Profundidade de penetração (d_p) (cm)
SiC	1,93
Água	3
Grafite	5,75
Carvão	0,6 a 11
Fibra de carbono	0,5 a 0,7

Fonte: Adaptado de Bhattacharya e Basak (2016).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Na pesquisa foram utilizados uma mistura de ligas de titânio ASTM F67 (titânio puro) e ASTM F136 (Ti-6Al-4V) em forma de cavacos oriundos de resíduos industriais da usinagem de implantes dentários. Esse material foi doado pela empresa IMPLALIFE BIOTECNOLOGIA situada na cidade de Jales, estado de São Paulo. A Tabela 2 apresenta a composição química nominal desses resíduos.

Tabela 2 - Composição química nominal das ligas de titânio (% em peso)

Material	Ti	Al	V	Outros elementos
ASTM F67	Bal.	-	-	0,5-0,9
ASTM F136	Bal.	5,6-6,4	3,85-4,15	0,5-0,8

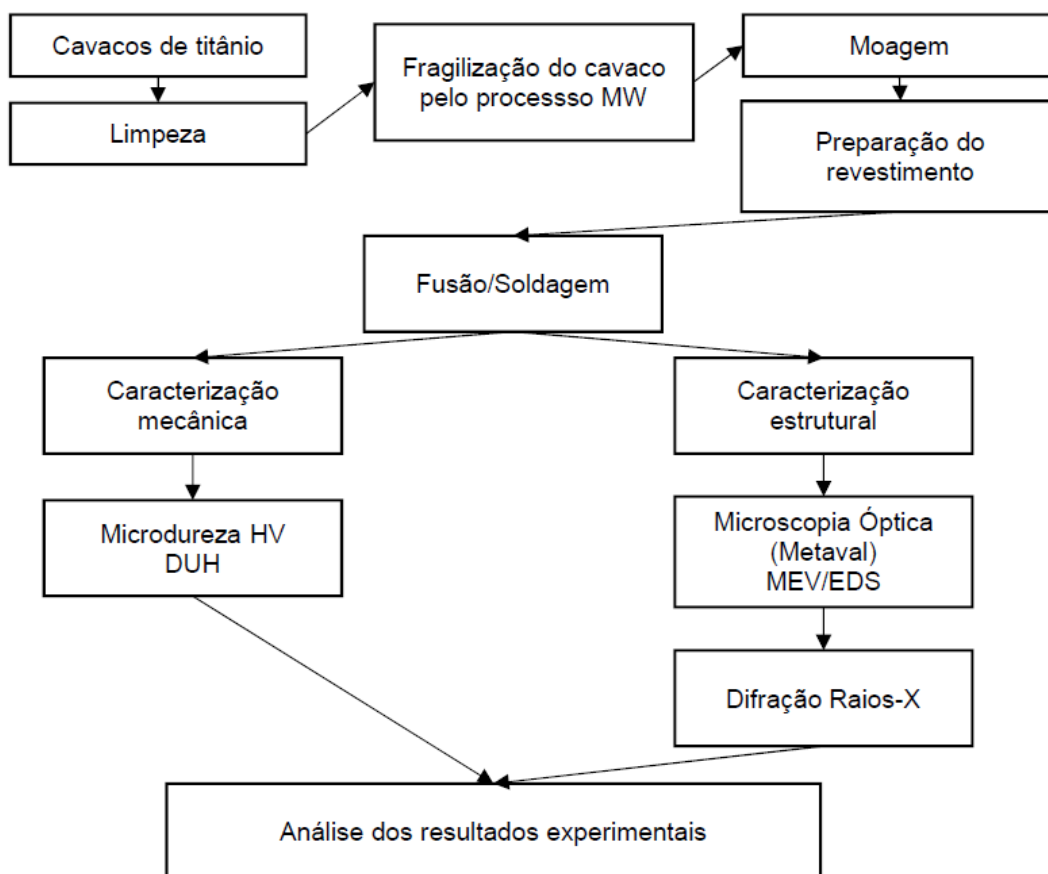
Fonte: Dados da pesquisa do autor.

Os cavacos passaram por um processo de limpeza a fim de eliminar as impurezas do material, uma vez que estavam contaminados com fluidos de corte oriundos da usinagem. Na sequência os cavacos foram submetidos a um método inovador, no qual foram irradiados micro-ondas (MW) com objetivo de realizar um tratamento termoquímico na superfície e facilitar a obtenção do pó após moagem. O fluxograma mostrado na Figura 10 representa o procedimento experimental utilizado na pesquisa.

3.1 LIMPEZA DOS CAVACOS

O método de limpeza foi adaptado de Fagundes (2015), sendo este dividido em quatro etapas. As duas primeiras consistem na aplicação de soluções de água e detergente para a remoção dos fluidos de corte. Banhos ultrassônicos são aplicados em seguida para melhorar a eficiência na remoção das impurezas. A Tabela 3 mostra os procedimentos para a limpeza do cavaco bem como as proporções das soluções utilizadas. Após a limpeza os cavacos foram deixados em estufa com temperatura em torno de 90°C para a remoção da umidade por, pelo menos, 24 horas.

Figura 10 - Procedimento experimental empregado neste trabalho



Fonte: Próprio autor.

Tabela 3 - Procedimento de limpeza dos cavacos

Etapas	Descrição	Cavacos [g]	Água [ml]	Detergente [ml]	Tempo
1	Limpeza grosseira	500	4000	200	6h
2	Limpeza grosseira	500	4000	100	6h
3	Banho ultrassônico	20	500	30	10 min
4	Banho ultrassônico	20	500	-	10 min

Fonte: Próprio autor.

3.2 IRRADIAÇÃO DOS CAVACOS POR MICRO-ONDAS (MW)

Os cavacos passaram por um procedimento de irradiação em um forno de micro-ondas doméstico BluEsky modelo BLU-M191, potência de 1050W. A frequência das ondas eletromagnéticas corresponde a 2,45GHz, tendo um comprimento de onda de 12,2cm. O tratamento termoquímico realizado consiste na exposição dos cavacos misturados com carvão em pó, fazendo com que calor e gases fossem gerados para

a formação de uma “crosta” de carbonetos de titânio (TiC) na superfície dos cavacos. Para isso foi utilizado carvão como susceptor e os gases liberados pelo mesmo reagiram com o cavaco para a formação dos carbonetos. A utilização desse material como susceptor de micro-ondas para realização do aquecimento híbrido foi devido a sua boa absorção de ondas eletromagnéticas, como apresentado no capítulo anterior. Além disso, o carvão é facilmente encontrado e apresenta baixo custo. A formação de carbonetos de titânio, fase dura e frágil, facilitaria a moagem e a obtenção do cavaco em pó.

Para o tratamento termoquímico foi confeccionado um cadinho, usinado a partir de um tijolo de material refratário com medidas de 180 mm de comprimento, 130 mm de largura e 70 mm de altura. Este material é ideal para suportar altas temperaturas e também atua como meio transparente, absorvendo pouco as micro-ondas. Para a proteção da mistura foi feita uma cobertura com o mesmo material refratário para evitar que o calor gerado fosse perdido para o interior do forno.

A proporção cavaco:carvão em pó utilizada na mistura foi 1:12 em massa. As misturas foram submetidas a irradiação por períodos de 10 minutos. Este tempo foi definido após testes nos quais a temperatura foi monitorada por termopar cromel-alumel (tipo K) conectado a um medidor digital durante 40 minutos para avaliar o comportamento da temperatura da carga. A figura 11 ilustra o micro-ondas e o cadinho utilizado nos testes.

Figura 11 - a) Forno de micro-ondas BluEsky BLU-M191; b) Cadinho refratário

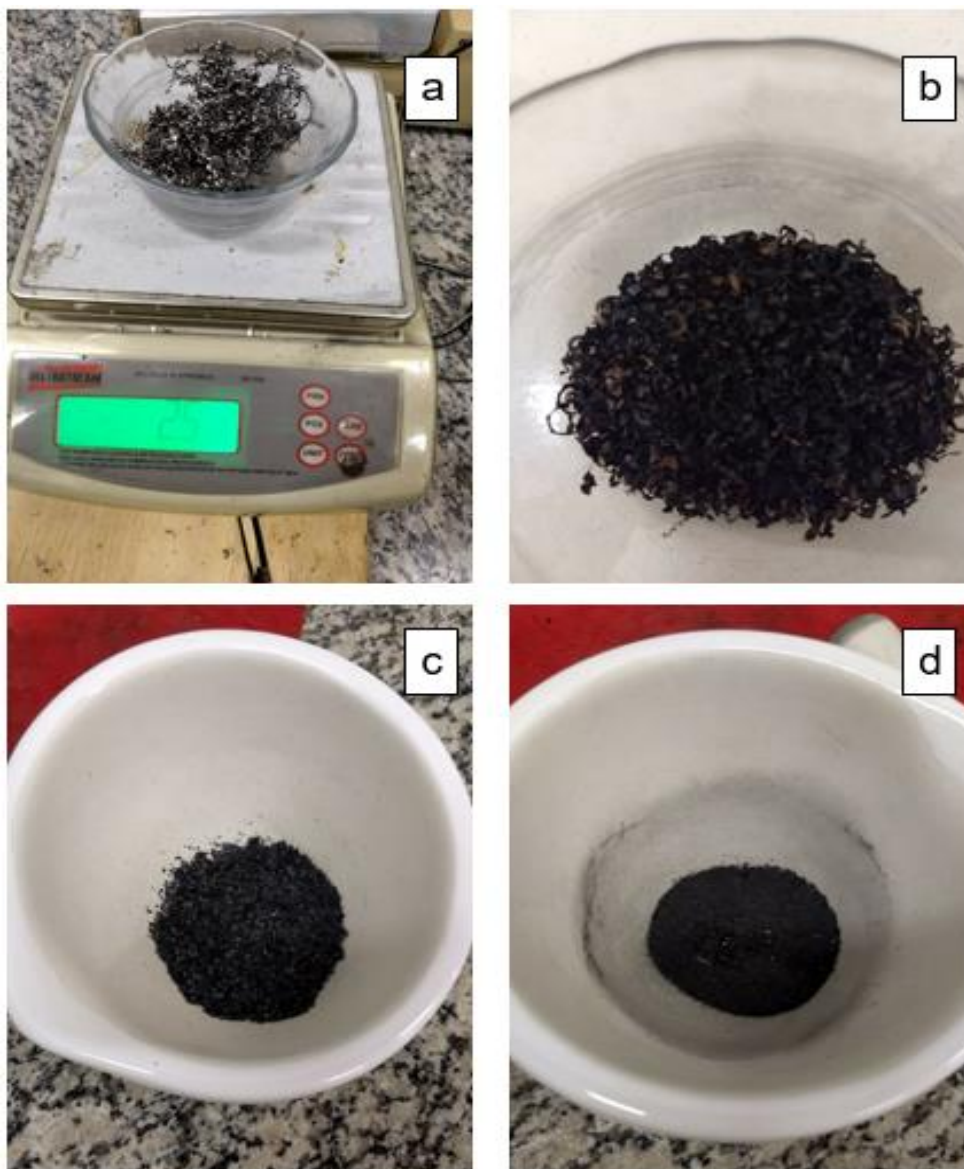


Fonte: Dados da pesquisa do autor.

Após esse tratamento de irradiação foi necessário esperar aproximadamente 6 horas para que o cadinho e a mistura estivessem na temperatura ambiente. A separação entre o carvão e o cavaco foi feita utilizando uma peneira comum. Para o resultado dessas misturas tratadas termoquimicamente foi dado o nome de cavacos MW.

A trituração dos cavacos MW foi feita utilizando um almofariz e pistilo de porcelana. Após o tratamento este material se mostrou muito frágil, sendo quebrado com facilidade. A Figura 12 ilustra o processo de trituração do cavaco MW.

Figura 12 - Sequência usada na preparação dos cavacos MW. Determinação da massa de cavacos em (a), resíduo após separação do suscepter (b), aspecto do material após o peneiramento leve (c) e cavaco MW após trituração no almofariz (d).



Fonte: Próprio autor.

Após a trituração no almofariz notou-se que a granulometria dos cavacos MW foi menor que a obtida por Fagundes (2015). Com o propósito de reduzir ainda mais o tamanho das partículas de pó a mistura foi submetida a um processo de moagem em um moinho de bola, no qual foram utilizados 1,9 kg de bolas cerâmicas (alumina) para o processamento de 95g de cavaco MW. O moinho usado tem estrutura metálica em aço-carbono, com diâmetro interno 153 mm e altura interna 160 mm. A moagem foi realizada montando-se o moinho em um torno mecânico Nardini, cuja rotação foi ajustada em 120 rpm e teve duração de 6 horas. Em seguida, o pó foi classificado em uma série de peneiras com tramas com abertura de tamanho 106 μm (140 mesh) e 45 μm (325 mesh). Para a mistura carbonetante foi utilizado o pó mais fino, com tamanho inferior a 45 μm , sendo misturado grafite ao cavaco MW. A mistura foi calculada para obter os carbonetos TiC, no qual a estequiometria Ti:C é igual a um, de forma que a proporção cavacos:grafite usada foi 4:1 em massa.

3.3 PREPARAÇÃO DO REVESTIMENTO PARA SOLDAGEM

Para a preparação dos revestimentos foram utilizadas amostras de aço-carbono ABNT 1020 medindo 30mm de comprimento, 30mm de largura e 5mm de espessura. As superfícies do metal base foram lixadas para a retirada das camadas oxidadas, provenientes do processo de fabricação e armazenamento, e em seguida limpas em álcool etílico. Esse processo é importante para que ocorra melhor interação metalúrgica entre a camada depositada e o metal base.

Para a aplicação de uma camada uniforme de mistura carbonetante foi preparado um gabarito, feito de material plástico onde foi usinado um recorte nas medidas de 28mm de comprimento, 28 mm de largura e 1,8 mm de espessura. Para a preparação da mistura carbonetante houve a adição de 2% em massa de silicato de sódio, para promover a vitrificação da mistura que foi levemente umedecida. Em seguida houve a aplicação, com o auxílio do gabarito plástico, da mistura sobre a superfície das peças usadas como substrato. Na sequência o gabarito foi removido e as peças de aço-carbono foram deixadas em estufa sob temperatura de 90°C por pelo menos 24 horas antes da soldagem. O resultado desse procedimento pode ser visualizado na Figura 13.

Figura 13 - Camada de mistura carbonetante depositada sobre o substrato



Fonte: Próprio autor.

3.4 PREPARAÇÃO DO METAL DE SOLDA

O processo de soldagem utilizado para o revestimento foi a soldagem a arco elétrico com proteção gasosa e eletrodo de tungstênio (GTAW - *Gas-Tungsten Arc Welding*). A máquina de soldagem utilizada foi da marca Lincoln Electric modelo Precision Tig 225. Na tocha foi utilizado um eletrodo de tungstênio com 2% de tório, diâmetro de 3,25 mm e bocal de proteção cerâmico nº10. A soldagem foi manual, utilizando corrente média de 170 A com polaridade direta. A proteção gasosa foi feita com argônio puro, com vazão de 12 litros por minuto.

3.5 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS METALOGRÁFICAS

Para a realização de análises da microestrutura e da dureza do metal de solda foram realizados cortes transversais nos revestimentos. Algumas das peças foram preparadas para análise por difração de raios-X. As amostras foram embutidas em resina termofixa (baquelite), seguindo-se a preparação da superfície pelo lixamento

tradicional até a grana #1500. Após limpeza ultrasônica efetuou-se o polimento mecânico usando alumina 1,0 μm . A revelação da microestrutura foi realizada com o ataque químico das amostras com Nital 2%.

3.6 ANÁLISE MICROESTRUTURAL

Para identificar as fases dos revestimentos foram utilizadas microscopia óptica e eletrônica de varredura (MEV), bem como difração de raio-X (DRX). O microscópio óptico usado foi o Carl Zeiss Metaval, equipado com câmera digital com resolução de 5 megapixels. As imagens MEV foram obtidas em um microscópio eletrônico de varredura Zeiss EVO, modelo LS-15. Neste equipamento a identificação dos carbonetos de titânio formados durante a soldagem foi facilitada com o uso do contraste de elétrons retroespalhados (BSE), posto que tal contraste é fortemente influenciado pelo número atômico dos elementos químicos que compõe localmente as fases.

A interpretação das micrografias foi auxiliada pelo freeware IMAGEJ, versão 1.52k, com o qual foi possível obter medidas quantitativas relacionadas ao tamanho, forma e dispersão dos carbonetos de titânio existentes no metal de solda. O tratamento estatístico dos resultados foi realizado com um nível de significância de 5%.

Para os testes de difração de raios-X, foi utilizado um difratômetro Siemens, modelo DL5005, equipado com tubo de cobre ($\text{Cu K}\alpha=1,5405\text{\AA}$) e monocromador de grafite. A análise por difração foi feita no intervalo 2θ entre 30 a 100°, com varredura de 2° por minuto. A identificação das fases foi baseada em fichas cristalográficas CIF, disponíveis no banco de dados do Inorganic Crystal Structure Database (ICSD). A interpretação dos difratogramas obtidos foi facilitada com a aplicação do freeware PROFEX, versão 3.14.0.

Por meio de um microdurômetro da marca SHIMADZU, modelo DUH 211S, foram determinadas medidas equivalentes de microdureza Vickers (HV). A medida HV é determinada a partir da dureza sob carregamento máximo e considerando o indentador Vickers com geometria ideal. A carga máxima utilizada para os ensaios foi 1000 mN (HV0,1), mantida durante cinco segundos. Para levantamento da variação de microdureza nos cordões de solda, as medidas foram feitas com espaçamento de

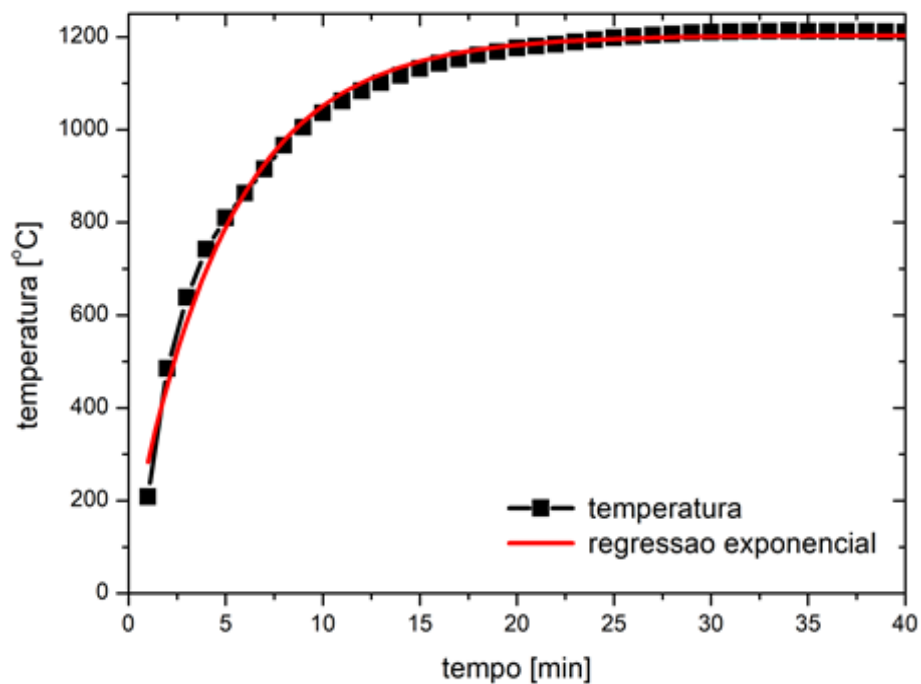
200 μm , até atingirem toda extensão do revestimento. Para fins estatísticos foram feitas o cálculo da média baseado numa série de quatro medições em cada amostra.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 PREPARAÇÃO DOS CAVACOS MW

Uma avaliação dos cavacos após o procedimento usado na limpeza mostrou que a rotina estabelecida foi eficiente na remoção dos fluidos e contaminantes encontrados no material. Após a mistura dos materiais, como descrito no capítulo anterior, foi efetuado o tratamento por irradiação de micro-ondas. O gráfico da Figura 14 apresenta o comportamento da temperatura da mistura de cavaco com carvão durante o processo MW. A temperatura obtida após 10 minutos de irradiação mostrou ser adequada à formação de fases frágeis na superfície dos cavacos, necessária para facilitar a trituração dos mesmos, sendo este tempo usado doravante para a preparação dos cavacos. Foi possível identificar um comportamento exponencial na curva de aquecimento, sendo que o coeficiente de correlação obtido foi de 0,99. A Tabela 4 apresenta os dados da curva de aquecimento obtida durante o processo MW.

Figura 14 - Variação da temperatura durante a irradiação de micro-ondas pelo processo MW



Fonte: Dados da pesquisa do autor.

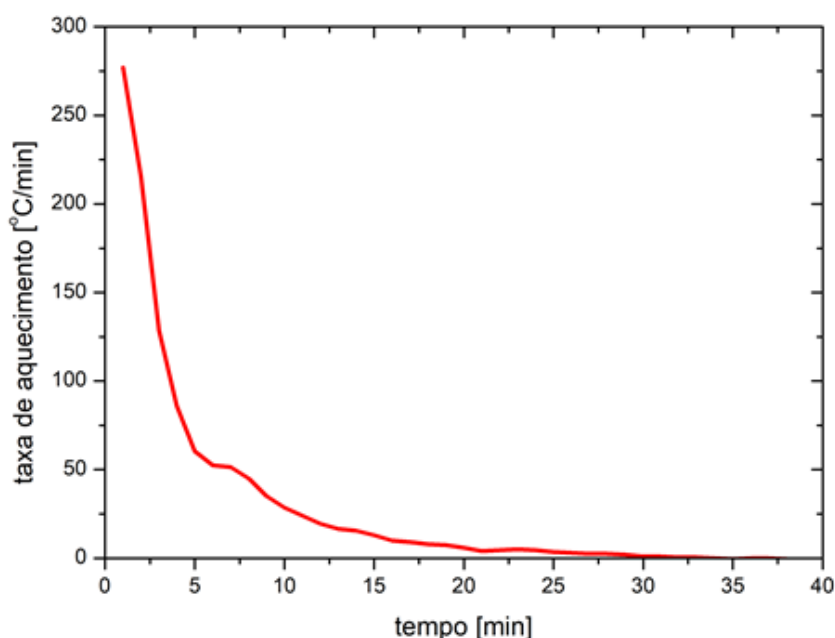
Tabela 4 - Regressão exponencial da curva de aquecimento no processo MW

Equação	$y=A1*\exp(-x/t1) + y0$	
Coefficiente de correlação	0,99136	
	VALOR	DESVIO PADRÃO
y0	1203,3	4,63294
A1	-1123	23,0427
t1	5,0057	0,15941

Fonte: Dados da pesquisa do autor.

Com os dados experimentais foi possível determinar a taxa de aquecimento durante o processamento MW, derivando a regressão exponencial da curva de aquecimento, como pode ser visualizado na Figura 15. A aplicação do carvão triturado como suscepter permitiu uma alta capacidade de aquecimento nos estágios iniciais do processo, chegando a atingir uma taxa de aquecimento máxima de 280°C por minuto. Após esse pico, a taxa de aquecimento começa a diminuir até manter-se praticamente estável após 20 minutos de tratamento.

Figura 15 - Variação da taxa de aquecimento durante o processo MW



Fonte: Dados da pesquisa do autor.

O processamento MW foi bastante eficaz para a fragilização dos cavacos, tornando possível a obtenção de partículas pequenas, menores que 45 µm, após a

moagem dos cavacos MW no moinho de bolas durante 6 horas. O revestimento mostrado na Figura 16 foi obtido após soldagem GTAW, apresentou bom preenchimento da superfície, tendo o metal de solda grande diluição na peça de aço-carbono usada como substrato. Isso se deu devido a pequena espessura da amostra (5 mm), cuja reduzida massa foi facilmente fundida nas condições de soldagem usadas. O revestimento mostrou ainda a formação de porosidades dispersas irregularmente.

Figura 16 - Amostras revestidas pelo processo de soldagem GTAW



Fonte: Dados da pesquisa do autor.

4.2 ANÁLISE POR DIFRAÇÃO DE RAIOS-X

4.2.1 Cavaco MW Moído

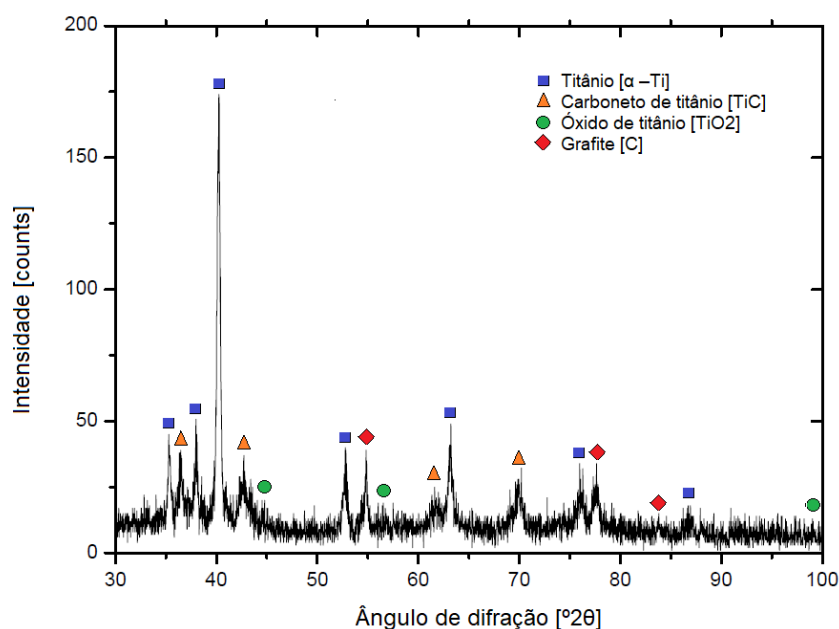
Este pó foi analisado por difração de raios-X, que identificou as fases existentes no material com o auxílio das fichas CIF, conforme identificação apresentada na tabela 5. O difratograma da Figura 17 apresenta o resultado obtido através da análise do pó de cavaco MW moído feita no freeware PROFEX 3.14. Os picos difratados mostraram ser consistentes com os carbonetos de titânio (TiC , cúbico de face centrada, ICSD_159871), titânio α (α -Ti, hexagonal, ICSD_44390) e grafite (C, trigonal/romboédrico, ICSD_29123).

Tabela 5 - Parâmetros cristalográficos das fases encontradas por difração de raios-X

Fase	Fichas ICSD	Estrutura	Parâmetro de rede (Å)		
			a	b	c
TiC	159871	CÚBICO FC	4,318	-	-
α -Ti	44390	HEXAGONAL	2,951	-	4,679
C - grafite	29123	TRIGONAL	3,635	-	-
α -Fe	52258	CÚBICO CC	2,866	-	-
TiO ₂	9161	TETRAGONAL	4,5941	-	2,9589
Fe-Ti	100533	CÚBICO CC	2,975	-	-

Fonte: Inorganic Crystal Structure Database – ICSD (2019)

Figura 17 - Difratoograma do pó de cavaco MW moído



Fonte: Dados da pesquisa do autor.

A Tabela 6 apresenta os valores obtidos da fração em massa e volumétrica das fases encontradas. A fração em massa do grafite (37,7%) se justifica pela moagem do grafite em pó juntamente com os cavacos MW. Por ser mais frágil, há a possibilidade de que o pó de grafite moído seja menor que o de cavaco e tenham passado em maiores quantidades pela classificação na série de peneiras. Devido a isso, é recomendável que o cavaco MW seja triturado no moinho de bolas sem a adição de grafite de pó.

Tabela 6 - Fração em massa e volumétrica das fases nos cavacos MW

Fase	Fração em massa (%)	Fração volumétrica (%)
TiC	17,00%	11,34%
α -Ti	36,00%	26,20%
C - grafite	37,70%	55,25%
TiO ₂	9,30%	7,21%

Fonte: Dados da pesquisa do autor.

4.2.2 Revestimento

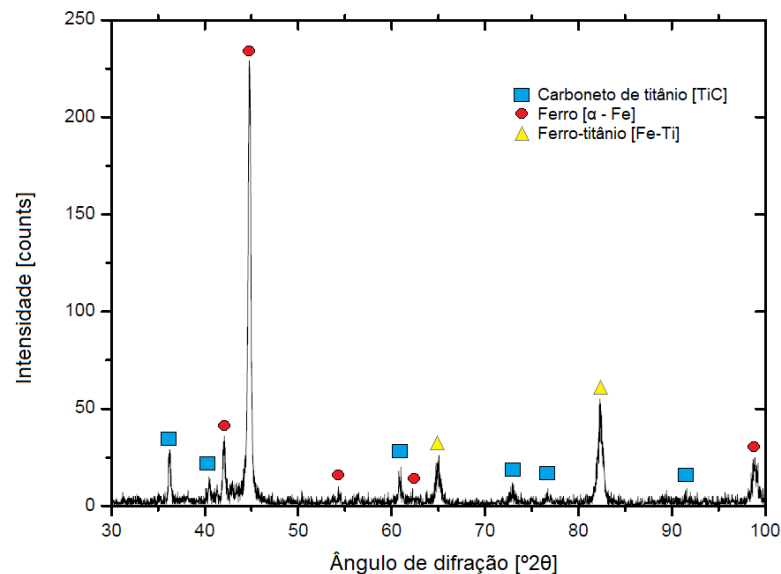
A difração de raios-X para o revestimento contendo o cavaco MW e grafite está mostrada no difratograma da Figura 18. A indexação dos picos difratados revelou que o revestimento é composto por ferrita (cúbica de corpo centrado, ICSD_52258) e carboneto de titânio TiC (cúbico de face centrada – tipo NaCl, ICSD_159871). A Tabela 7 apresentam as frações em massa e volumétrica das fases encontradas pela difração de raios-X. A fração volumétrica do carboneto de titânio foi bastante significativa no revestimento e isso mostra que a utilização do pó carbonetante foi eficiente para a produção dessas partículas duras. A redução do ruído (*background*) foi bastante significativa, em virtude de a amostra do metal de solda ser plana e polida. A amostra na forma de pó leva as partículas a terem diferentes alturas na região de incidência dos feixes de raios-X, contribuindo para o aumento do ruído.

Tabela 7 - Fração em massa e volumétrica das fases no revestimento

Fase	Fração em massa (%)	Fração volumétrica (%)
TiC	20,23%	28,07%
α -Ti	4,24%	6,42%
α -Fe	75,53%	65,51%

Fonte: Dados da pesquisa do autor.

Figura 18 - Difratoograma dos resultados de DRX do revestimento preparado com a mistura carbnetante

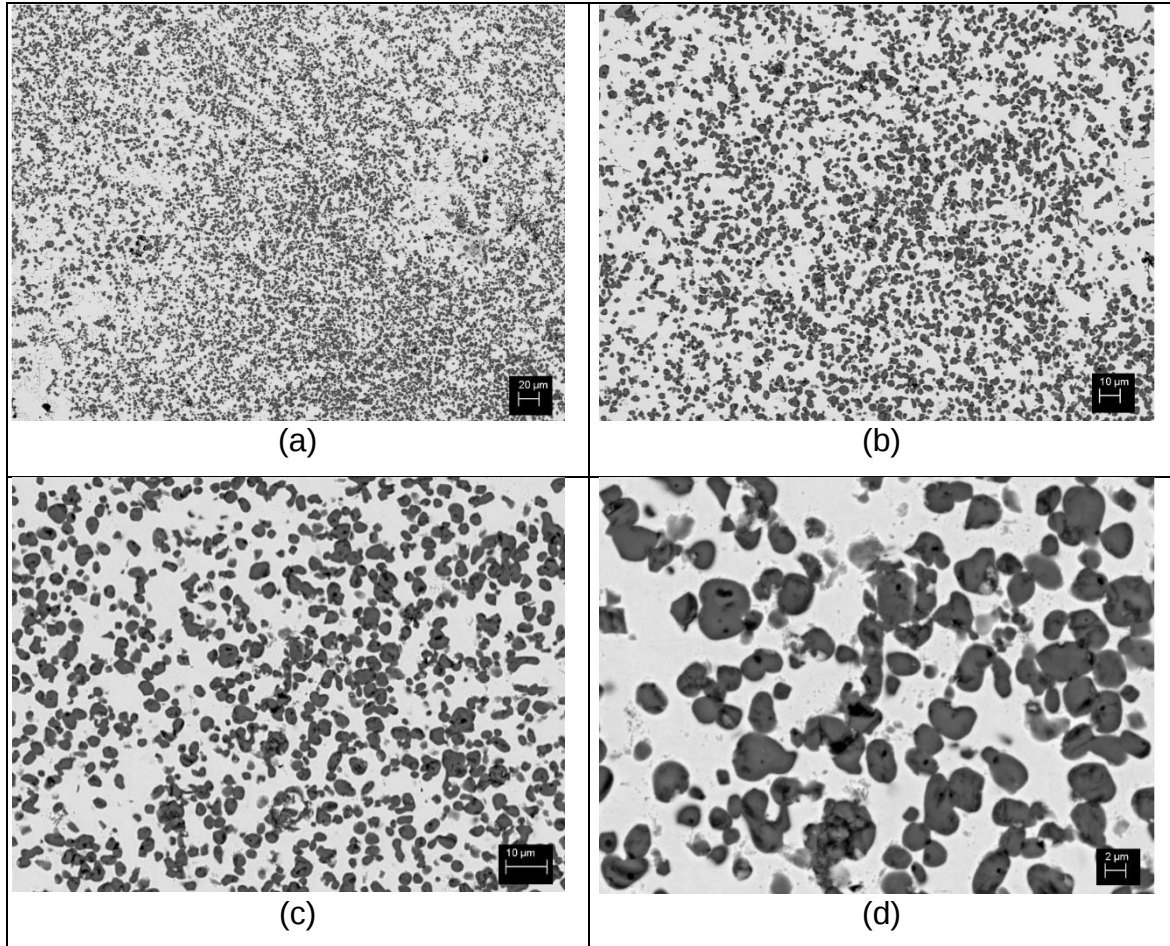


Nota: Ângulo de difração [°2θ]
 Fonte: Dados da pesquisa do autor.

4.3 ANÁLISE POR ELÉTRONS RETROESPALHADOS – MEV

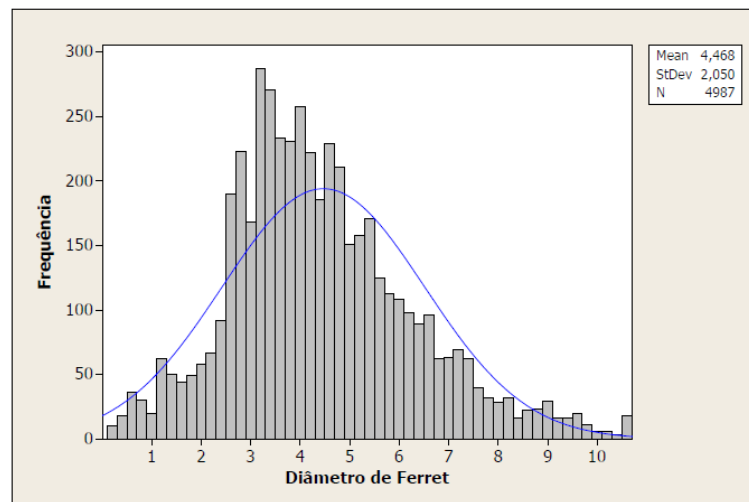
A microscopia eletrônica de varredura possibilitou observar a distribuição de carbonetos de titânio na matriz ferrítica, como exemplifica as micrografias da Figura 19 tiradas da peça revestida. Nota-se que as partículas de TiC apresentam aspecto escuro em uma matriz ferrítica de coloração clara, conforme indicado na Figura 19. A disposição das partículas de carbonetos foi heterogênea no metal de solda, com morfologia e tamanhos variados. Efetivamente o contraste BSE facilitou a identificação dos carbonetos de titânio na matriz. A microestrutura é composta por carbonetos primários grosseiros com morfologia dendrítica. O freeware ImageJ possibilitou ainda fazer a mensuração do tamanho dos carbonetos de titânio através do diâmetro de Ferret. O tamanho dos carbonetos variou entre 0,2 μm (valor mínimo) e 21,9 μm (valor máximo), com tamanho médio de $4,5 \pm 2,0 \mu\text{m}$, com nível de confiança de 95%, mostrada na Figura 20. Tais heterogeneidades foram associadas às variações de composição química na poça de fusão que afetaram a formação dos carbonetos, algo comum nos revestimentos duros (MELLOR, 2006).

Figura 19 - Micrografias MEV da região central do revestimento após a fusão da mistura carbonetante. (a) aumento de 160x; (b) aumento de 315x; (c) aumento de 630x; (d) aumento de 1600x



Fonte: Dados da pesquisa do autor.

Figura 20 - Distribuição de frequência dos tamanhos dos carbonetos de titânio



Fonte: Dados da pesquisa do autor.

Com o auxílio do software ImageJ foi possível identificar ainda a fração volumétrica dos carbonetos de titânio, estimada pela fração em área. Mesmo aparentemente com a diluição do metal de solda durante o processo de revestimento, houve a formação de uma significativa quantidade de carbonetos de titânio. Foram identificadas 6157 partículas de TiC nas imagens analisadas, cujos parâmetros são mostrados na Tabela 8.

Tabela 8 - Parâmetros microestruturais dos carbonetos de titânio

Amostra	Partículas analisadas	Fração volumétrica (%)	Tamanho médio de partícula (µm)
1	893	37,7	3,1
2	227	41,1	2,4
3	1091	26,0	2,3
4	129	15,8	5,7
5	79	25,6	3,3
6	167	26,2	2,2
7	1632	36,0	5,0
8	1939	45,6	5,0
Total: 8	Total: 6157	Média: 31,8	Média: 3,625

Fonte: Dados da pesquisa do autor.

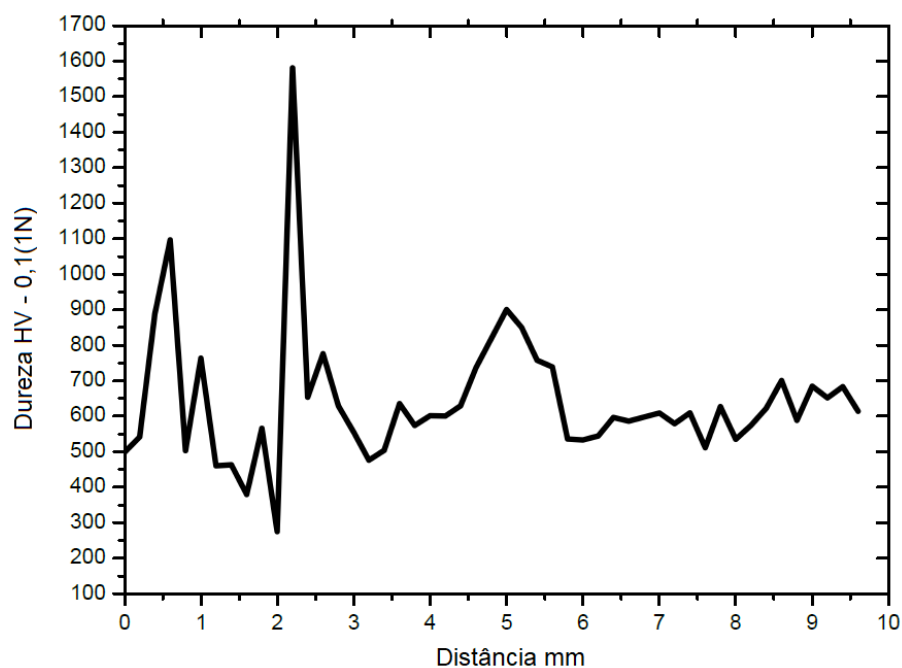
A fração volumétrica variou de 15,8% a 45,6% nas imagens analisadas. Comparado com outros trabalhos (MOGHADDAM *et al*, 2019; GEDAEL, 2018; PONTIM, 2017; WANG, 2006) o diâmetro equivalente dos carbonetos e a fração volumétrica obtidos nesta pesquisa esteve na faixa de variação apresentada pelos autores. Isso mostra que a utilização do processo MW para a fragilização superficial dos cavacos e, posteriormente a preparação de revestimentos duros, foi eficiente na obtenção de uma camada carbonetante.

4.4 ANÁLISE DE MICRODUREZA (DUH)

Os ensaios de microdureza realizados no ultramicrodurômetro digital (DUH) mostraram uma elevação da dureza no revestimento em relação ao metal de base. Essa elevação da dureza foi determinada pela presença dos carbonetos de titânio formados durante a soldagem do revestimento. A Figura 21 apresenta os resultados obtidos sobre ensaios realizados em linha localizada a 200 µm da superfície do

revestimento. A elevação da dureza no revestimento foi determinada pela presença dos carbonetos de titânio formados, obtendo-se um valor médio de 636 ± 198 HV. É possível observar que há uma dispersão dos valores ao longo da trajetória analisada. Isso ocorre devido a regiões com diferentes frações volumétricas na peça revestida. Quando o indentador Vickers é aplicado sobre áreas com maior concentração de carbonetos de titânio ocorre um aumento na dureza. Isso justifica a grande dispersão que ocorreu, por exemplo, nas medidas próximas de 20 mm.

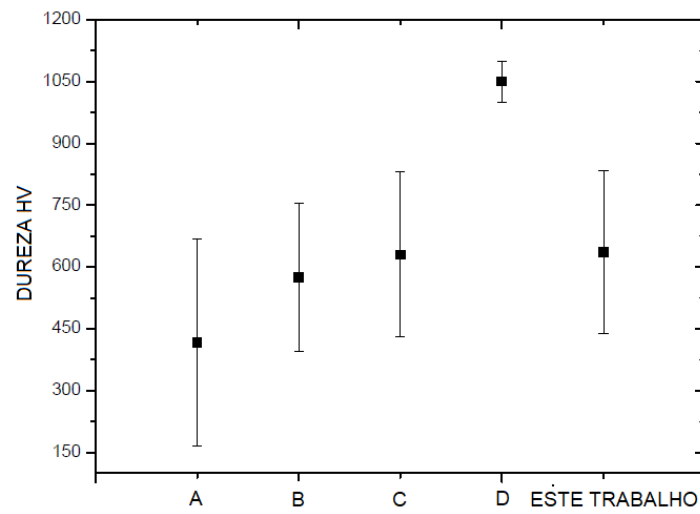
Figura 21 - Análise da dureza (HV) em uma linha horizontal abaixo da superfície do revestimento



Fonte: Dados da pesquisa do autor.

O comportamento da dureza dos revestimentos formados a partir da fusão de cavacos MW apresentou resultados que podem ser comparados a trabalhos realizados por outros autores que aplicaram técnicas semelhantes a utilizadas nessa pesquisa (MOGHADDAM *et al*, 2019; FAGUNDES, 2015; BUSHUEVA, 2018; PONTIN, 2017). O gráfico na Figura 22 ilustra uma comparação das durezas obtidas neste trabalho com os de outros autores.

Figura 22 - Comparação da dureza com outros autores. (A) MOGHADDAM *et al*, 2019; (B) GEDAEL, 2015; (C) BUSHUEVA, 2018; (D) PONTIN, 2017



Fonte: Dados da pesquisa do autor.

5 CONCLUSÕES

A partir da investigação e análise dos resultados encontrados neste trabalho, é possível obter as seguintes conclusões:

- A irradiação dos cavacos das ligas de titânio com micro-ondas facilitou a trituração em moinho de bolas, obtendo-se pó mais fino que 45 μ m e que foi denominado cavaco MW;
- A presença de porosidades e alta taxa de diluição no revestimento foram consequências dos parâmetros de soldagem GTAW utilizados;
- O revestimento preparado pela fusão GTAW contendo a mistura de cavaco MW com grafite foi efetivo na formação de carbonetos de titânio, que promoveram um aumento significativo na dureza do metal de solda;
- Os carbonetos de titânio formados apresentaram morfologia dendrítica grosseira, cuja dispersão heterogênea na matriz ferrítica resultou em variações da dureza do metal de solda;
- O procedimento experimental utilizado nesta pesquisa mostra ser uma alternativa simples para a reciclagem de cavacos de titânio, economicamente viável e ambientalmente sustentável.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Produção de revestimentos utilizando diferentes parâmetros de soldagem (velocidades e correntes de soldagem menores)
- Realização da refusão a laser no revestimento
- Aplicação de estudos tribológicos (ensaios de desgaste) para verificar as propriedades do revestimento quanto ao fenômeno de desgaste.
- Utilização do forno micro-ondas para a produção do revestimento pelo método *cladding*.

REFERÊNCIAS

- ASHBY, M.F. **Materials selection in mechanical design**. 4. ed. London: Elsevier, 2011.
- BAYER, R. G. **Mechanical wear**: fundamentals and testing. New York: Marcel Dekker, 2004.
- BHATTACHARYA, M.; BASAK, T. **A review on the susceptor assisted microwave processing of materials**. Energy 97. London: Elsevier, 2016.
- BUCHELY, M.F.; GUTIERREZ, J.C.; TEON, L.M.; TORO, A. **The effect of microstructure on abrasive wear of hardfacing alloys**. Medellín: Wear, 2005.
- BUSHUEVA, E.; KUZIN, P.; DROBYAZ, E.; GRINBERG, B. Wear resistance increasing of austenitic steel by surface hardening with titanium carbide. **Materials today**: Proceedings, Amsterdam, v. 11, n. 1, p. 342-347, 2018.
- CHANDRASEKARAN, S., RAMANATHAN, S.; BASAK, T. Microwave Material Processing: a review. **Fluid Mechanics and Transport Phenomena**, [S. l.], v. 58. n. 2, p. 330-363, 2012.
- CHANDRASEKARAN, S. *et al.* Microwave heating characteristics of graphite based powder mixtures. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, Kidlington, v. 48, p. 22–27, 2013.
- CLARK, D. E.; SUTTON, W. H. Microwave processing of materials. **Annu. Rev. Mater. Sci.**, Palo Alto, v. 26, p. 299-333, 1996.
- COTTON, F. A.; WILKINSON, G. **Advanced inorganic chemistry**. 3. ed. New York: John Wiley & Sons, 1972. 1145 p.
- COZZA, R. C. **Estudo do desgaste e atrito em ensaio micro-abrasivo por esfera rotativa fixa em condições de força normal constante e pressão constante**. 2011. 290 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.
- DAVIS, J. R. Hardfacing, weld cladding, and dissimilar metal joining. *In*: AMERICAN STANDART METALS. **Metals Handbook: welding, brazing and soldering**. New York: ASM, 1993. p. 1967-2000.
- DÖBELIN, N.; KLEEGERG, R. Profex: a graphical user interface for the Rietveld refinement program *BGMN*. **Journal of Applied Crystallography**, Chichester, v. 48, p. 1573-1580, 2015.
- FAGUNDES JUNIOR, J. G. **Reciclagem de cavacos para a formação de carbonetos de titânio no metal de Solda produzido por soldagem GTAW em Aço-carbono**. 2015. 80 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista - Unesp, Ilha Solteira, 2015.

FAGUNDES JUNIOR, J. G.; MANERA, R. S.; TOKIMATSUR.C.; VENTRELLA, V.A.; GALLEGOS, J. **Application of titanium machining chips in welding consumables for wearresistant hardfacing**. Abingdon: Francis & Taylor Group, 2016.

GAHR, K.Z. **Microstructure and wear of materials**. Amsterdam: Elsevier, 1987.

GUPTA, M.; LEONG, E. W. W. **Microwave and Metals**. Singapore: John Wiley & Sons, 2007.

IMAGEJ. **Image processing and analysis in JAVA**. [S. l.], 2019. Disponível em: <https://imagej.nih.gov/ij/>. Acesso em: 25 mar. 2019.

KHALED, D. EL, *et al.* Microwave dielectric heating: applications on metals processing. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Kidlington, v. 82, p. 2880-2892, 2018.

LIMA, A. C.; FERRARESI, V. A. Análise da microestrutura e da resistência ao desgaste de revestimento duro utilizado pela indústria sucroalcooleira. **Soldagem Insp.**, São Paulo, v. 14, n. 2., p. 140-150, 2009.

LIMA, A.C.; FERRARESI, V.A. Análise da resistência ao desgaste de revestimento duro aplicado por soldagem em facas picadoras de cana-de-açúcar. **Soldagem Insp.**, São Paulo, v. 15, n. 2., p. 94-102, 2010.

LIMA, A.C.; SIQUEIRA, I.L.; OLIVEIRA, F.P.; MORAIS, L.I.; MORAIS NETO, V.P. Soldagem de revestimentos duros em facas picadoras de cana-de-açúcar de indústria sucroalcooleira: eletrodo revestido “versus” arame tubular. *In*: VII CONNEPI, 7., 2012, Palmas. **Anais [...]** [S. l.: s. n.], 2012. p. 1-8.

MARQUES, P. V. **Soldagem**: fundamentos e tecnologia. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2005.

MELLOR, B.G. **Surface coatings for protection against wear**. Cambridge: Woodhead, 2006.

MENEZES, R. R.; SOUTO, P. M.; KIMINAMI, R. H. G. A. Sinterização de cerâmicas em microondas. Parte I: Aspectos fundamentais. **Cerâmica**, São Paulo, v. 53, n. 325, p. 1-10 2007.

MOGHADDAM, H. Z.; SHARIFITABAR, M.; ROUDINI, G. Microstructure and wear properties of Fe–TiC composite coatings produced by submerged arc cladding process using ferroalloy powder mixtures. **Surface & Coatings Technology** Lausanne, v. 361, p. 91-101, 2019.

PENG, D. X. Wear behavior of ceramic powder clad on carbon steel surface by gas tungsten arc welding. **Industrial Lubrication and Tribology**, Bingley, v. 65, n. 2, p. 129-134, 2013.

PIERSON, H. O. **Handbook of refractory carbides and nitrides**. New Jersey: Noyes, 1996. 362 p.

PONTIN, G. I.; EGITO, G. M. P.; JUNIOR, J. G. F.; VENTRELLA, V. A.; GALLEGOS, J. Caracterização microestrutural de revestimentos duros à base de carbonetos de titânio refundidos com laser pulsado. *In*: CBECiMat. 22., 2016, Natal. **Anais [...]** [S. l.: s. n.], 2016.

SHACKELFORD, J. F.; ALEXANDER, W. **Materials science and engineering handbook**. 3. ed. Boca Raton: CRC, 2001. 1949 p.

SINGH, S.; GUPTA, D.; JAIN, V.; SHARMA, A.K. Microwave processing of materials and applications in manufacturing industries: a review. **Materials and Manufacturing Processes**, New York, v. 30, p. 1–29, 2015.

WANG X. H. Microstructure and wear properties of in situ TiC/FeCrBSi composite coating prepared by gas tungsten arc welding. **Wear**, Amsterdam, v. 260, n. 1-2, p. 25-29, 2005.

WANG, Z. T. *et al.* Microstructure and formation mechanism of in-situ TiC-TiB₂/Fe composite coating. **Transactions of Nonferrous Metals Society of China**, Harbin, v. 18, n. 4, p. 831-835, 2008.

YAHAYA, B.; IZMAN, S.; KONNEH, M.; REDZUAN, N. Microwave Hybrid Heating of Materials Using Susceptors- A brief review. **Advanced Materials Research**, Pfaffikon, v. 845 p. 426-430, 2014.