

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

GABRIEL INACIO PONTIN

**MICROESTRUTURA DO METAL DE SOLDA GTAW REFORÇADO COM
CARBONETOS DE TITÂNIO, PARCIALMENTE REFUNDIDO POR LASER
ND:YAG PULSADO**

Ilha Solteira
2017

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

GABRIEL INACIO PONTIN

**MICROESTRUTURA DO METAL DE SOLDA GTAW REFORÇADO COM
CARBONETOS DE TITÂNIO PARCIALMENTE REFUNDIDO POR LASER Nd:YAG
PULSADO**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de conhecimento: Materiais e Processos de Fabricação.

Prof. Dr. Juno Gallego
Orientador

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

Pontin, Gabriel Inacio.

P816m Microestrutura do metal de solda GTAW reforçado com carbonetos de titânio, parcialmente refundido por laser Nd:YAG pulsado / Gabriel Inacio Pontin. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2014
48 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Materiais e Processos de Fabricação, 2014

Orientador: Juno Gallego
Inclui bibliografia

1. Refusão a laser. 2. Revestimento duro. 3. Microestrutura. 4. Ligas de titânio. 5. Carbonetos de titânio. 6. Desgaste abrasivo.

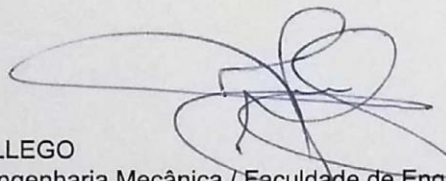
CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: Microestrutura do metal de solda GTAW reforçado com carbonetos de titânio, parcialmente refundido por laser Nd: YAG pulsado

AUTOR: GABRIEL INÁCIO PONTIN

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:

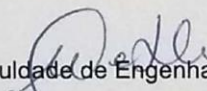


Prof. Dr. JUNO GALLEGO

Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

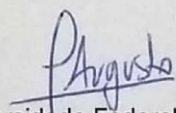
Prof. Dr. VICENTE AFONSO VENTRELLA

Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira



Prof. Dr. FREDERICO AUGUSTO PIRES FERNANDES

Centro de Engenharia, Modelagem e Ciências Sociais / Universidade Federal do ABC



Ilha Solteira, 28 de julho de 2017

Dedico em especial a minha mãe Sebastiana Aparecida Gonçalves Inácio Pontin e a todos amigos e familiares que me acompanharam e apoiaram em minha trajetória pessoal e profissional.

AGRADECIMENTOS

A minha mãe, Sebastiana, por sempre acreditar nos meus sonhos, pelos conselhos e incentivos que me nortearam a chegar onde estou. A meu pai e meus irmãos que sempre torceram para meu sucesso, e acompanharam minha trajetória.

Ao meu prezado orientador professor Dr. Juno Gallego, por todo incentivo, paciência, dedicação e ensinamentos; que me auxiliaram a chegar a este trabalho. Agradeço pelas orientações e conselhos que não somente me auxiliariam só academicamente, mas também profissionalmente e pessoalmente.

Ao Departamento de Engenharia Mecânica – DEM e ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica – PPGEM pela oportunidade oferecida e ao acolhimento.

A todos professores que, de forma direta ou indireta, auxiliaram durante o mestrado, em especial ao professor Dr. Vicente Afonso Ventrella pelo apoio e paciência, que também foram imprescindíveis para essa conquista.

Aos técnicos do DEM – FEIS pelo auxílio durante os procedimentos experimentais e preparação das amostras.

A todos meus amigos de Guaíra e região por meu apoiarem quando eu sempre precisei, em especial agradeço Léo Rodrigues Biscassi e Olegario de Souza da Silva Junior que durante todo processo sempre me incentivaram e nunca me deixaram desistir independente dos problemas, obrigado pelos conselhos, repreensões e vivência.

A todos amigos que fiz em Ilha Solteira e região, sem os quais não conseguiria ter a tamanha experiência de vida que obtive.

A empresa IMPLALIFE BIOTECNOLOGIA – Jales (SP), pela doação dos cavacos das ligas de titânio.

Ao Laboratório de Caracterização Microestrutural da Universidade de São Carlos.

A CAPES pelo apoio financeiro.

Não vos aconselho o trabalho, mas a luta. Não vos aconselho a paz, mas a vitória! Seja o vosso trabalho uma luta! Seja vossa paz uma vitória!

Friedrich Nietzsche

RESUMO

O desgaste abrasivo é uma das causas de falhas em equipamentos e responsável por prejuízos nos processos industriais. Uma técnica capaz de minimizar os efeitos deste fenômeno é a aplicação de revestimentos duros nas superfícies críticas. Recentemente foram desenvolvidos revestimentos contendo carbonetos de titânio formados pela fusão de misturas contendo cavacos das ligas ASTM F67 e ASTM F136 sobre peças de aço-carbono ASTM A-36. Após a aplicação do processo de soldagem GTAW obteve-se significativa fração volumétrica de TiC grosseiro com elevada dureza. No presente trabalho foi investigada a refusão dessas soldas pelo processo de soldagem a Laser Nd:YAG pulsado. A microestrutura das amostras foi analisada por difração de raios-X (DRX), microscopia eletrônica de varredura (MEV) e microdureza Vickers. A caracterização microestrutural mostrou que houve refinamento dos carbonetos de titânio (TiC) na matriz ferrítica refundida com o Laser, cujo principal efeito foi um endurecimento do metal de solda. A caracterização mecânica demonstrou um aumento na microdureza da superfície do material. Este comportamento favorece o uso da refusão a Laser para a melhoria da qualidade das superfícies que demandam maior resistência ao desgaste abrasivo.

Palavras-chaves: Refusão a laser. Revestimento duro. Microestrutura. Ligas de titânio. Carbonetos de titânio. Desgaste abrasivo.

ABSTRACT

The abrasive wear is one of the causes of failures in equipment and responsible for damages in industrial processes. A technique capable of minimizing the effects of this phenomenon is the application of hard coatings on critical surfaces. Recently, coatings containing titanium carbides produced by melting mixtures containing ASTM F67 and ASTM F136 chip blends on ASTM A-36 carbon steel parts have been developed. After an application of the GTAW get process, an important volumetric fraction of coarse TiC with high hardness was obtained. In the present work the remelts is investigated for welds by the pulsed Nd: YAG Laser process. A microstructure of the samples was analyzed by X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM) and Vickers microhardness. The microstructural characterization showed that there was a refinement of the titanium carbides (TiC) in the ferritic matrix remelt with the Laser, whose main effect was a hardening of the weld metal. The mechanical characterization showed an increase in the microhardness of the material surface. This behavior favors the use of laser cladding to improve the quality of surfaces that require high abrasive wear resistance.

Keywords: laser cladding, hard coating, microstructure, titanium alloys, titanium carbides, abrasive wear.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Modelo tribológico simplificado.	14
Figura 2 - Desgaste abrasivo de dois e três corpos.	16
Figura 3 - Micromecanismos do desgaste abrasivo.	16
Figura 4 - Técnicas para deposição de revestimentos.	17
Figura 5 - Densidade de potência e geometria de cordões de processo de soldagem típicos.	19
Figura 6 - Esquema de um equipamento de soldagem a laser.	20
Figura 7 - (a) Diagrama de fase carbono titânio e (b) Diagrama de Ellingham.	23
Figura 8 - Dispositivo para moagem dos cavacos.	25
Figura 9 - Corte da amostra após a solda GTAW.	26
Figura 10 - Equipamento para soldagem da camada carbonetante.	26
Figura 11 - Equipamento UW 150A – United Winners.	27
Figura 12 - Processamento de imagens pelo ImageJ: (a) imagem real, (b) uso do comando threshold, (c) imagem convertida em preto e branco e (d) partículas separadas pelo comando watershed.	30
Figura 13 - Representação do diâmetro equivalente.	31
Figura 14 - Camada transversal das amostras refundidas a laser.	32
Figura 15 – (a) Micrografia da amostra na divisão entre o processo de refusão a laser e o de (b) soldagem GTAW.	34
Figura 16 - Análise de variância com nível de significância de 5% das frações volumétricas dos carbonetos.	35
Figura 17 - Variação da fração volumétrica das ligas ASTM F67 e F136 em função da energia de soldagem GTAW antes (a) e após (b) a refusão a laser.	36
Figura 18 – Comparação da circularidade (a) com a morfologia dos carbonetos de titânio e a variação deste parâmetro em relação a energia de soldagem GTAW das amostras (b). Fonte: Próprio autor.	36
Figura 19 - Diâmetro equivalente para as amostras F67 e F136.	37
Figura 20 - Comparação do diâmetro equivalente entre autores.	38
Figura 21 - Difratoograma dos cordões de solda GTAW com camada carbonetante de (a) Liga F67 e (b) Liga F136.	39
Figura 22 - Difratoograma dos cordões refundidos à laser com camada carbonetante de (a) Liga F67 e (b) Liga F136.	39
Figura 23 - Análise de variância com nível de significância de 5% da região refundida à laser.	40
Figura 24 - Variação da microdureza do metal base, soldagem GTAW e refusão à laser nas condições: (a) amostra F67 com energia de soldagem de 1,8 kJ/mm, (b) amostra F136 com energia de soldagem de 1,8 kJ/mm, (c) amostra F67 com energia de soldagem de 2,5 kJ/mm, (d) amostra F136 com energia de soldagem de 2,5 kJ/mm, (e) amostra F67 com energia de soldagem de 3,2 kJ/mm, (f) amostra F136 com energia de soldagem de 3,2 kJ/mm.	41
Figura 25 - Comparação da microdureza com outros autores.	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Categorias dos principais tipos de revestimentos.	18
Tabela 2 - Publicações recentes sobre soldagem a laser.	22
Tabela 3 - Composição química das ligas ASTM F67 e ASTM F136.....	24
Tabela 4 - Identificação das amostras.....	28
Tabela 5 - Tabela de análise de variância.....	33
Tabela 6 - Parâmetro cristalográficos das fases encontradas por difração de raio-X.	38

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ASTM	American Society for Testing and Materials
BSE	Back Scattering Electron
CFC	Cúbico de Face Centrada
CIF	Crystallographic Information File
DRX	Difração por Raio-X
FRX	Fluorescência de Raio-X
GTAW	Gas Tungsten Arc Welding
GMAW	Gas Metal Arc Welding
HV	Hardness Vickers
ICDS	Inorganic Crystal Database Structure
LBW	Laser Beam Welding
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
NBR	Norma Brasileira
PIB	Produto Interno Bruto
SMAW	Shielded Metal Arc Welding
YAG	Yttrium Aluminium Garnet
ZTA	Zona Termicamente Afetada

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	REVISÃO DE LITERATURA	14
2.1	Sistemas tribológicos	145
2.2	Desgaste	15
2.3	Revestimentos	17
2.4	Soldagem	18
2.5	Carbonetos	22
3	MATERAIS E MÉTODOS	24
3.1	Preparação da camada carbonetante	24
3.2	Refusão da camada carbonetante	26
3.3	Identificação das amostras	28
3.4	Preparação Metalográfica	28
3.5	Análise estrutural e mecânica das amostras	28
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	34
5	CONCLUSÕES	43
6	SUGESTÕES PARA TRABALHO FUTURO	44
	REFERÊNCIAS	45
	APÊNDICE A – PUBLICAÇÕES REFERENTES A ESTE TRABALHO	488

1 INTRODUÇÃO

A preocupação com as falhas e danos ocasionados aos equipamentos é refletida através de seus gastos; estima-se que em torno de 2% a 4% do PIB – Produto Interno Bruto de países industrializados sejam destinados ao reparo de peças e equipamentos (1).

Uma das formas de mitigar a ação do desgaste, destacando o abrasivo que se apresenta de forma mais agressiva, é a deposição de revestimentos duros superficiais. O avanço tecnológico no setor industrial tem demonstrado uma crescente fonte de oportunidades para área de manutenção e melhoria de processos. Dentre os elementos avaliados no ramo da manutenção o desgaste é destacado; ele busca prever o comportamento físico dos sistemas para melhorar a produtividade e reduzir os custos de manutenção do setor(2-4).

No ramo sucroalcooleiro temos o desgaste abrasivo nas ferramentas que envolvem o corte, desfibramento e a moagem da cana; as facas e os martelos desfibradores são os primeiros elementos a entrarem em contato com a cana-de-açúcar. O desgaste acentuado deve-se a elevada velocidade do impacto na presença de elementos considerados abrasivos como areia, pedras e ferro provindos dos processos anteriores (5-6).

Há diversos processos de revestimentos divididos em quatro grupos principais; sendo estes a aspersão térmica, tratamentos superficiais, processos eletroquímicos e a soldagem, considerado o mais utilizado para proteção de desgastes do tipo abrasivos (2-3). Por meio da soldagem, seja ela por eletrodo revestido ou GTAW (Gas Tungsten Arc Welding), temos a formação de carbonetos metálicos através da adição de carbono em conjunto de metais com elevada dureza como o cromo (2150 HV), titânio (2800 HV), tungstênio (2350HV), vanádio (2900 HV), entre outros; lembrando-se que a dureza é um indicador comparativo referente a resistência a abrasão (7-8).

Os carbonetos metálicos apontam estabilidade química, elevado ponto de fusão e alta dureza. Outra forma de alterar as propriedades do material após a soldagem é refundindo o material pelo processo a laser, buscando assim refinar os carbonetos do processo anterior (9).

Na busca de redução de custo para o processo temos o reprocessamento de cavacos, por exemplo, de ligas de titânio ASTM F67 e ASTM F136 utilizadas

normalmente em implantes ortodônticos para formação da camada carbonetante a ser soldada no metal de base. Assim temos a criação de soluções alternativas para reinserção deste elemento, considerado refugo, na cadeia produtiva.

O objetivo do presente trabalho é estudar a refusão dos carbonetos de titânio, primordialmente formados pelo processo de soldagem GTAW a partir da deposição de misturas de finos de cavaco de titânio e grafite em pó, conforme a normativa NBR 13043. Dessa forma visando averiguar as mudanças microestruturais e de microdureza dos elementos (10).

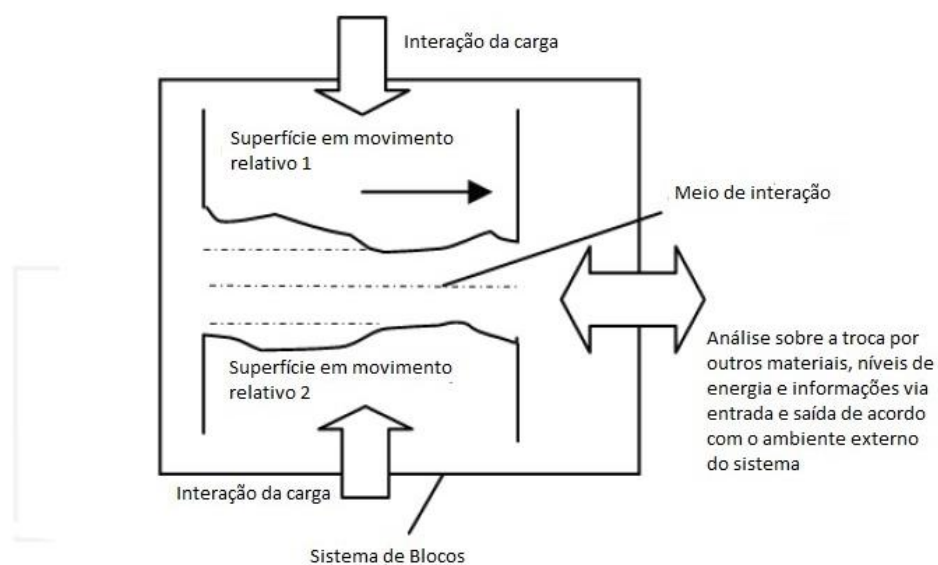
2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Sistemas tribológicos

O estudo de sistemas tribológicos, que visa analisar a interação das superfícies de componentes em movimento relativo, pode contribuir para garantir uma performance mecânica apropriada, sem significativas perdas de rendimento (3). Os sistemas são caracterizados através de três axiomas que relacionam o tipo de interação, as propriedades superficiais e o tempo sob condições tribológicas em movimento relativo (11).

O modelo simplificado de um sistema tribológico é mostrado na Figura 1, contendo as superfícies em movimento relativo e o meio de interação. A partir do modelo tribológico pode-se observar que as informações retiradas na entrada e saída do sistema como: a movimentação, o trabalho e a massa nas perturbações referente ao ambiente, calor, tipo de material, ruído, vibrações e perdas em forma de detritos do desgaste; auxiliam a definir formas comparativas para análises de tribosistemas (11-12).

Figura 1 - Modelo tribológico simplificado.



Fonte: Adaptado You-Bai (11).

Dentre os meios para se minimizar o desgaste e o atrito, destacam-se a lubrificação, que também auxilia no transporte de calor e detritos encontrados no meio de interação e o revestimento da superfície através de técnicas apropriadas para deposição. Os revestimentos são de grande utilização para recuperação e prevenção de deteriorações dos mecanismos sobre ação do desgaste através de propriedades como um baixo nível coeficiente de atrito entre os corpos e elevada dureza (13).

2.2 Desgaste

No movimento relativo de duas ou mais superfícies tem-se o desgaste, sendo este a perda progressiva de material de um ou mais corpos presentes no processo. Nas peças metálicas esse fenômeno pode ocorrer pelo contato entre superfícies, resíduos não metálicos e fluidos em movimento. Uma das formas de atenuar o desgaste dessas superfícies é controlar as condições da atrito e lubrificação, na tentativa de reduzir a força tangencial de deslizamento na deformação (11-13).

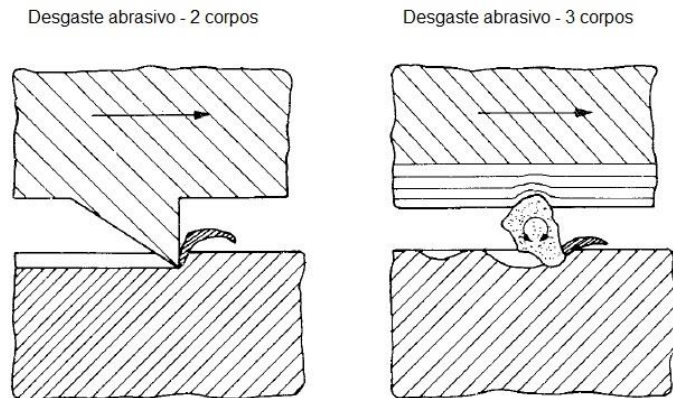
O desgaste pode ser classificado de acordo com a aparência da base metálica, as condições do meio de interação ou os mecanismos físicos e químicos de remoção do material. Ressalta-se que na literatura existe certas divergências sobre a definição dos mecanismos de desgaste devido à similaridade dos mesmos (4).

Os quatro principais mecanismos de desgaste são: (i) adesão, na qual tem-se múltiplas junções superficiais que se rompem pelas forças de cisalhamento geradas pelo atrito; (ii); fadiga, onde ocorre a formação de trincas associadas aos carregamentos cíclicos das superfícies em contato; (iii) reações triboquímicas, que promovem a degradação das superfícies junto ao meio de interação; (iv) abrasão, onde a perda de massa nas superfícies é facilitada pela ação de partículas no meio de contato.(5,9,14).

Conforme a ASTM G40-15 o desgaste abrasivo é resultado da interação entre partículas duras forçadas contra a superfície provocando danos superficiais intensos. Este ainda pode ser classificado de acordo com o ambiente em contato como abrasão de dois corpos, onde desgaste ocorre através de protuberâncias ou elementos aderidos em uma das superfícies, ou de três corpos, no qual a remoção

do material ocorre por meio de partículas soltas no meio de interação, conforme mostra a Figura 2 (5,15,16).

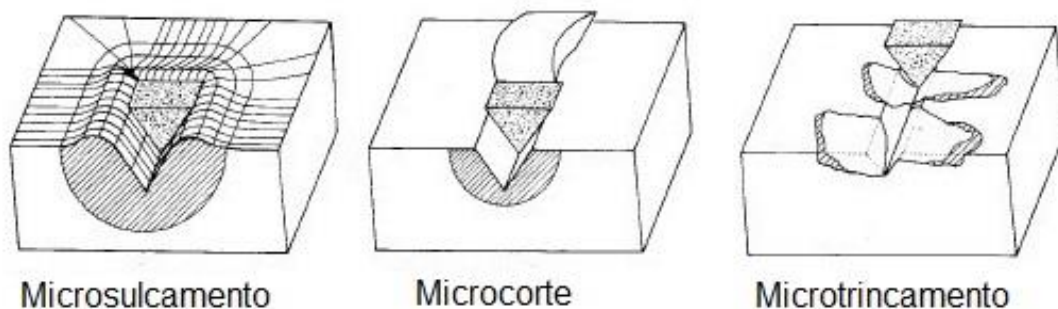
Figura 2 - Desgaste abrasivo de dois e três corpos.



Fonte: Adaptado de Gahr (5).

O desgaste abrasivo também pode ser classificado de acordo com o nível de tensão exercido sobre a superfície, sendo dividido em abrasão a baixa tensão (lixamento), alta tensão e goivagem, processo pelo qual algumas regiões submetidas a alta tensão sofrem deformação plástica e o arrancamento de grande partículas metálicas. Os micromecanismos envolvidos no processo definem o tipo de interação entre o abrasivo e a superfície desgastada, podendo ser dúcteis como o microsulcamento (amassamento) e o microcorte, ou frágeis como o microtrincamento ou lascamento das superfícies conforme demonstrado na Figura 3 (5,9,16).

Figura 3 - Micromecanismos do desgaste abrasivo.



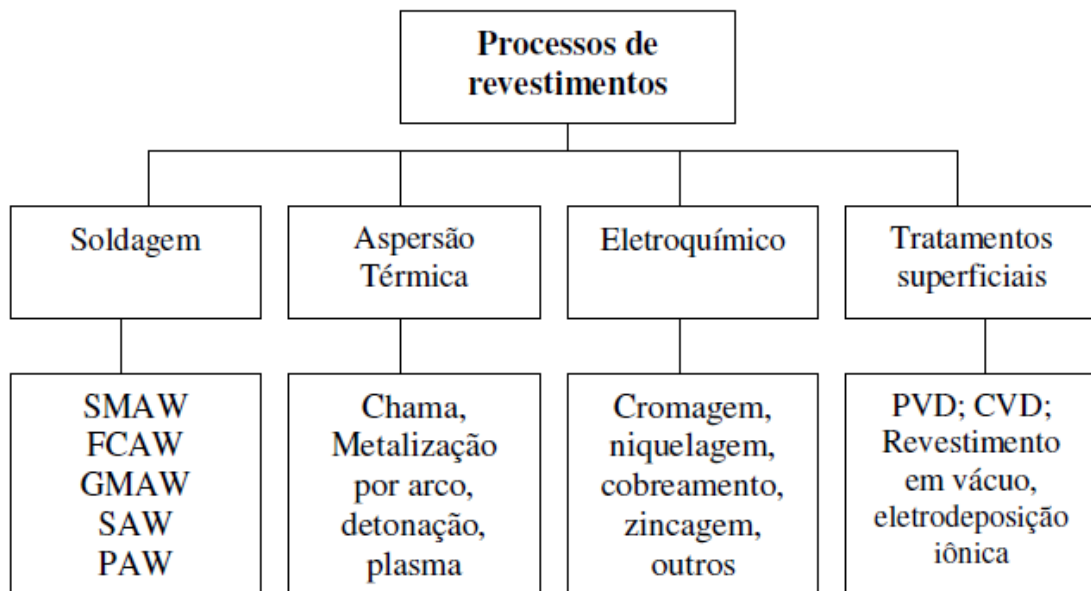
Fonte: Adaptado de Gahr (5).

2.3 Revestimentos

Com o surgimento de novas tecnologias busca-se equipamentos mais confiáveis e com maior vida útil, dessa forma os revestimentos são utilizados com o propósito de atender as necessidades dos projetos visando diminuir os custos de produção e redução de possíveis paradas industriais. Os revestimentos podem ser considerados como recobrimentos da superfície de materiais metálicos através de uma liga homogeneamente depositada, que reforça as propriedades mecânicas da superfície relacionadas ao desgaste (16,17).

Atualmente tem-se várias técnicas para deposição de revestimentos sobre o metal base como a aspersão térmica, eletroquímica, tratamentos superficiais e a soldagem (Figura 4), sendo esta última uma das tecnologias mais aplicadas no âmbito industrial. Os revestimentos reforçados com carbonetos metálicos são utilizados para inibir os mecanismos de desgaste, principalmente o desgaste abrasivo, devido à estabilidade química e a alta dureza (2,18,19).

Figura 4 - Técnicas para deposição de revestimentos.



Fonte: Adaptado Henderson (19).

Os metais de adição para aplicação de revestimentos por soldagem mais utilizados são enriquecidos com cromo e carbono. Os carbonetos de cromo formados possuem dureza de 1800 HV, porém estudos mostram a existência de

outros carbonetos com melhores propriedades de resistência ao desgaste como o carboneto de titânio que pode alcançar uma dureza de 3200 HV.

Além do material de base e de adição, pode-se também alterar o número de camadas utilizadas no processo de deposição dos metais de adição para se buscar diferentes níveis de resistência ao desgaste abrasivo. A técnica de soldagem também pode afetar os resultados, pois cada processo apresenta um diferente tipo de eficiência na soldadura, nível de diluição no material a ser soldado e no valor da produção do consumível no processo de soldagem. Pode-se também categorizar o tipo do revestimento de acordo com as propriedades desejadas como apresentadas na Tabela 1. As técnicas de tratamentos superficiais dependem do tipo de mecanismo, pois o desgaste não é considerado uma propriedade específica de cada material e sim de todo o sistema que o envolve (5,9,20).

Tabela 1 - Categorias dos principais tipos de revestimentos.

Tipo de revestimento	Objetivo
Revestimento em aços inoxidáveis (cladding)	Obter uma superfície de proteção contra corrosão
Revestimento de reconstrução (build-up)	Restauração de dimensões de peças
Amanteigamento (buttering)	Aplicação de passes de solda em uma face da junta
Revestimento duro (hardfacing)	Aumentar a resistência ao desgaste

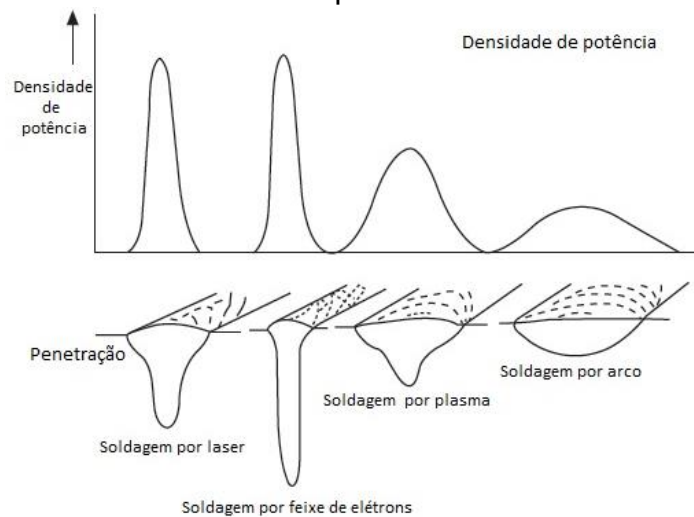
Fonte: Adaptado García (5)

2.4 Soldagem

Os revestimentos duros são depositados pelos processos de soldagem e tendem a minimizar os efeitos do desgaste nos equipamentos. A deposição de camadas pode ser realizada através de todos processos de soldagem dependendo de sua aplicação e desempenho desejados, sendo convencional a utilização dos processos de soldagem por eletrodo revestido (shielded metal arc welding – SMAW), por arco elétrico com gás de proteção (gas metal arc welding – GMAW) e por eletrodo de tungstênio (gas tungsten arc welding – GTAW) (20).

Outras modalidades de soldagem são viabilizadas dependendo do desempenho requerido, assim em processos em que se busca mais versatilidade, maior velocidade de soldagem e menor entrega térmica é indicada a soldagem a laser (Laser Beam Welding – LBW). Em comparação com os demais processos, este utiliza uma alta densidade de potência e energia formando um cordão de solda mais estreito e profundo do que os processos usuais (Figura 5), assim sua maior dificuldade para o processo de revestimento é a diluição, na qual busca-se de 10-20% de diluição na primeira camada (21-23).

Figura 5 - Densidade de potência e geometria de cordões de processo de soldagem típicos.



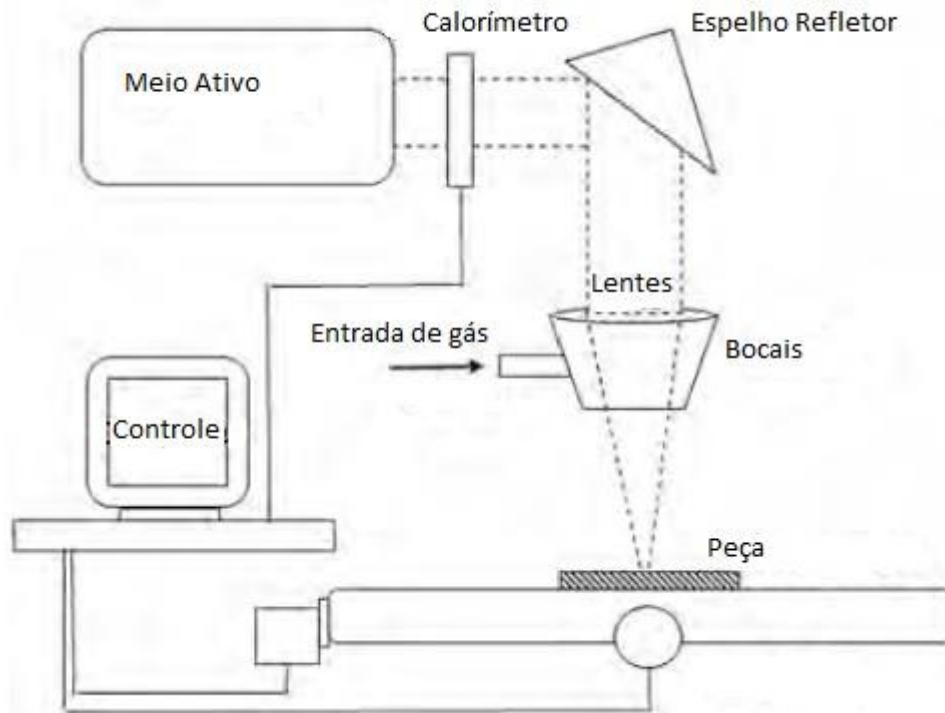
Fonte: Adaptado Katayma (23).

A soldagem a laser é caracterizada pelo bombardeamento de um feixe de luz monocromático concentrado de alta intensidade sobre a superfície do material, podendo funcionar de forma autógena garantindo uma alta reprodutibilidade em processos de produção. Os feixes de luz colimados e coerentes garantem ótima qualidade e homogeneidade das soldas (22-23).

Os equipamentos para o processo à laser podem ser classificados pelo meio ativo utilizado na conversão da energia elétrica em luz, sendo estes de corpo sólido (normalmente utilizado o neodímio YAG: ítrio-alumínio-granada) ou de corpo gasoso (CO₂); porém ambos tem a mesma disposição de montagem conforme demonstra a Figura 6. Estes tem o mesmo princípio de funcionamento, no qual uma alta intensidade de radiação do feixe interage com o material, sendo uma grande parte

absorvida pelo material aquecendo-o, de forma que haja a fusão (soldagem por condução) e/ou vaporização do material (21,23).

Figura 6 - Esquema de um equipamento de soldagem a laser.



Fonte: Adaptado YLBAS (21).

O meio ativo encontra-se em um dispositivo chamado cavidade óptica ressonante constituída por dois espelhos refletores que transmitem entre eles uma onda eletromagnética amplificando seu campo. Esse meio faz a conversão de energia devido à excitação provocada pela inversão de população, fenômeno no qual temos o aumento da intensidade devido a população de átomos no estado excitado ser maior do que a população de átomos no estado de equilíbrio energético, assim o meio é progressivamente bombardeado até chegar a um nível de excitação suficiente para produzir o laser (22-23).

Para controlar esse sistema tem-se dois parâmetros de fundamental importância, a potência do feixe que é selecionada de acordo com as variáveis do material atuando na especificação dos limites da espessura da soldagem e o modo do feixe também é de grande importância e está relacionado com o percurso do feixe.

Através do ajuste dos espelhos refletores consegue-se determinar o diâmetro do feixe, a zona de interação, sua simetria e potência máxima. Eles são selecionados de acordo com potência de pico do laser, largura temporal do pulso, frequência e energia do pulso requeridos (23).

Além dos parâmetros mencionados, algumas variáveis intrínsecas do sistema são de fundamental importância para adequar-se ao que se pretende executar. O nível de absorção na peça, a velocidade de soldagem, o gás de proteção e a posição focal são as variáveis que se deve utilizar para preparação do processo (24).

A soldagem a laser tem algumas vantagens quando comparada aos processos de soldagem a arco elétrico, como uma pequena zona termicamente afetada (ZTA), mínima distorção e tensão residual e capacidade de soldar materiais dissimilares. Porém tem uma baixa eficiência na conversão de energia, sensibilidade à formação de trincas e custos de investimento e consumíveis (gases e lentes especiais) altos (17,20).

Trabalhos sobre soldagem a laser em ligas de alumínio tem auxiliado ao norteamento de estudos futuros; a Tabela 2 demonstra alguns dos atuais estudos sobre o assunto e as variáveis utilizadas pelos pesquisadores. Elementos relacionados com o processamento como a velocidade de soldagem, gás de proteção, a fluência e o modo do feixe e relacionados com a peça, como o tratamento superficial, são citados. Assim os parâmetros mencionados na tabela podem ser otimizados para se melhorar a qualidade da solda de acordo com a finalidade desejada. Durante a soldagem a zona termicamente afetada é submetida a altas taxas de calor sofrendo assim mudanças microestruturais, por exemplo a liga Ti6Al4V pode gerar com altas potências uma estrutura acicular martensítica formada por grão colunares, com tamanho entre 160 e 350 μm (20,24).

No processo de soldagem pode-se encontrar defeitos relacionados a homogeneidade superficial, sendo o Fe promotor da fase martensítica. Quando realizado em atmosfera não protegida, o titânio reage com o oxigênio (oxidação superficial) do ambiente gerando uma camada indesejada que atenua o decréscimo das propriedades de fadiga. Contaminação de elementos intersticiais como O e o N auxiliam na diminuição da ductilidade à ruptura (22,23).

Tabela 2 - Publicações recentes sobre soldagem a laser.

SOLDAGEM A LASER DE LIGAS DE TITÂNIO													
Referências	Liga	Tratamento superficial	Tipo de Solda (Topo, Sobreposta ou Autógena)	Gás de proteção	Tipo	LASER		Análise da Soldagem					
						Energia (kW)	Velocidade de soldagem (m/min)	Modo (Contínuo ou Pulsado)	Microestrutura	Microdureza	Defeitos	Resistência à tração	Fadiga
Squillace et. al. (2012)	Ti6Al4V		A	HeAr	Nd-YAG	0.8 – 1.2	1.02– 3.48		X	X		X	X
Akman et. al. (2009)	Ti6Al4V		T	He	Nd-YAG	1.12– 2.68	1.5	P	X	X		X	
Bertrand et. al. (2007)	TIG1	X		Ar	Nd-YAG	0.8-1.0	1.5	C	X	X	X		
Gao et. al. (2013)	Ti6Al4V		T	Ar	Nd-YAG	-	0.6	P	X	X	X	X	
Jianxun et. Al. (2012)	Ti6Al4V			Ar	CO2	2.5	1.2-1.5	C	X			X	
Caizzao et. al. (2004)	Ti6Al4V		T	HeAr	CO2	2.5	1.2-1.98	P		X	X		
Wang et. al. (2003)	Ti6Al4V		S	He	CO2	0.65-2.15	0.25-5.37				X		

Fonte: Adaptado Katayma (23).

2.5 Carbonetos

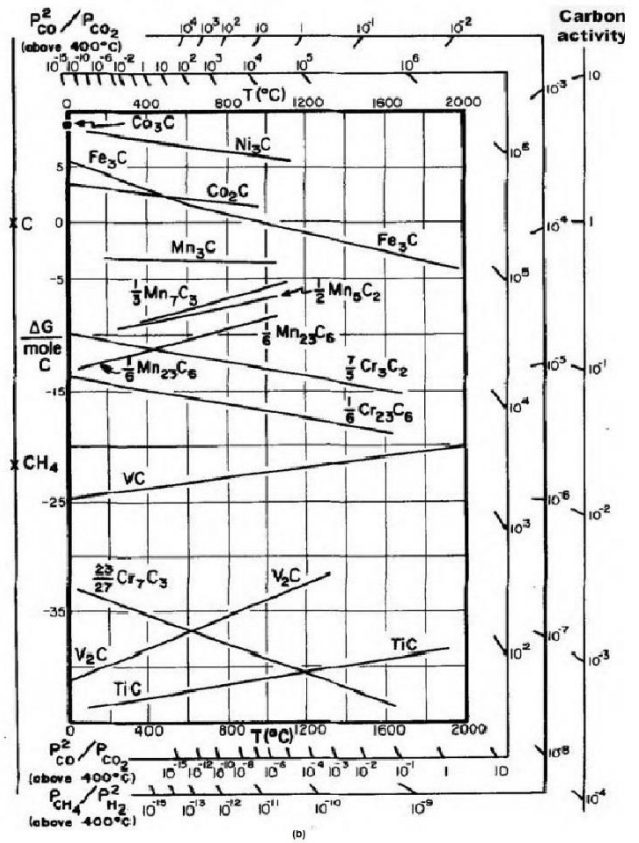
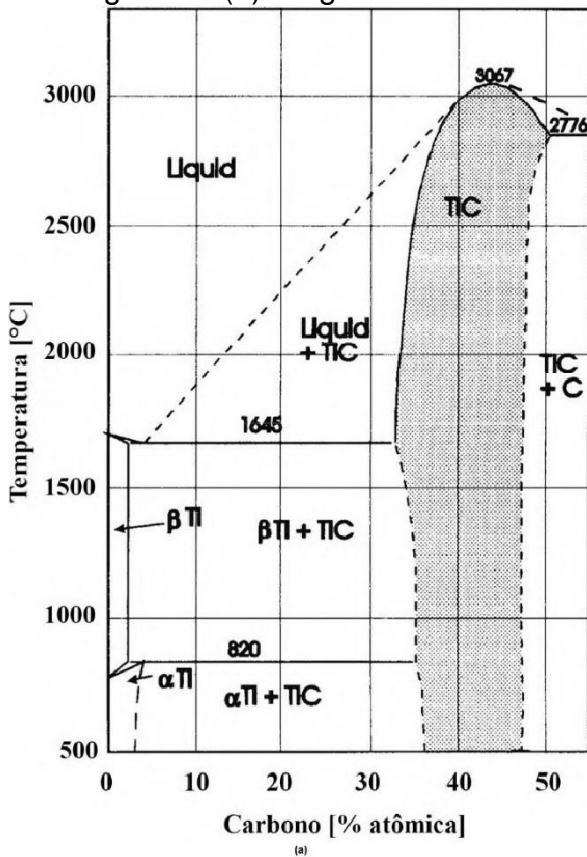
Após o processo de soldagem GTAW, analisando o revestimento duro, pode-se observar a formação de compostos com alto nível de dureza comparados com o metal de base denominados carbonetos. Os carbonetos são compostos formados a partir de ligações entre elementos com eletronegatividade igual ou menor que do carbono, sendo suas características determinadas pela diferença de eletronegatividade dos elementos, a relação entre os raios atômicos e as características da ligação química presentes (18,20,25).

Estas ligas são divididas em quatro grandes grupos: intersticiais, covalentes, intermediários e salinos. O carboneto de titânio (TiC), está no grupo de carbonetos

intersticiais localizado entre os metais do grupo IV, V e VI nos períodos 4,5 e 6 da tabela periódica.

A estequiometria do carboneto TiC é de 1:1, dessa forma são considerados monocarbonetos, e seu ponto de fusão encontra-se em torno de 3067°C, conforme Figura 7(a) (18,20,25). Esse composto cristalino cúbico de face centrada (CFC) é arranjado em uma estrutura compacta com o carbono se alocando nos interstícios octaédricos, contém uma baixa energia de formação se apresentando de forma mais espontânea e estável, conforme na Figura 7(b), dessa forma quanto menor for a energia de formação, mais espontânea se torna a formação do carboneto, consequentemente, ele é mais estável.

Figura 7 - (a) Diagrama de fase carbono titânio e (b) Diagrama de Ellingham.



Fonte: Pierson (18).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A mistura utilizada para obtenção dos carbonetos de titânio na camada superficial do material a ser soldado é tratada como camada carbonetante. Os procedimentos para preparação desta da camada, soldagem e refusão são descritos a seguir.

3.1 Preparação da camada carbonetante

A obtenção do titânio para formação da camada carbonetante deu-se através de cavacos gerados na fabricação de implantes odontológicos a partir da usinagem das ligas ASTM F67 (titânio puro) e ASTM F136 (Ti-6Al-4V). Os cavacos utilizados foram fornecidos pela empresa IMPLALIFE BIOTECNOLOGIA®, sendo apresentada sua composição química nominal apresentada na Tabela 3 (26-27).

Tabela 3 - Composição química das ligas ASTM F67 e ASTM F136.

Ligas	Ti	Al	V	Outros elementos
ASTM F67	98,9	-	-	1,1
ASTM F136	89,5	6,0	4,0	0,5

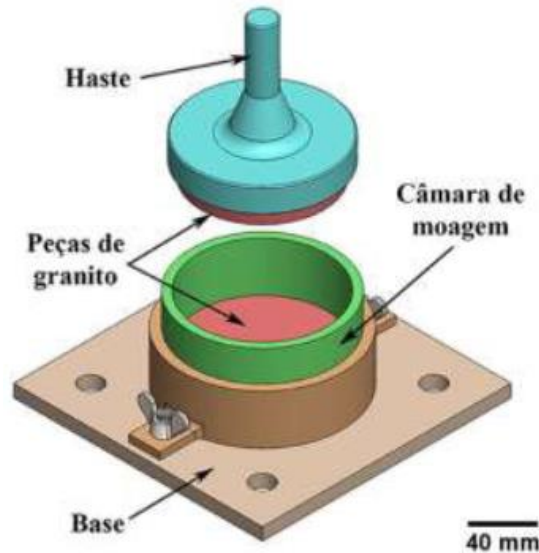
Fonte: Adaptado das normas ASTM (26-27).

Esses cavacos passaram por processos de limpeza grosseira através da imersão em uma solução de detergente e água e banhos ultrassônicos afim de eliminar as impurezas e contaminações provindas do fluido de corte no processo de usinagem. Os procedimentos utilizados para limpeza e controle granulométrico foram idênticos aos reportados em trabalho anterior. Assim foram colocados em uma estufa à 75°C para remoção da umidade antes da operação de moagem dos cavacos grosseiros (10).

Após o processo de limpeza os cavacos foram triturados em um aparato baseando-se em um moinho de grãos (Figura 8), no qual instalou-se duas pedra de granito em uma furadeira de coluna vertical em baixa rotação (90 rpm). Os finos retirados do processo de moagem foram classificados através de peneiras até a granulometria de 40 Mesh (0,42 mm) e sua composição química determinada pela técnica de fluorescência de raio-X (FRX) e as fases dos elementos através da

difração de raios-X (DRX) reportados em trabalhos anteriores por Fagundes Junior (20).

Figura 8 - Dispositivo para moagem dos cavacos.

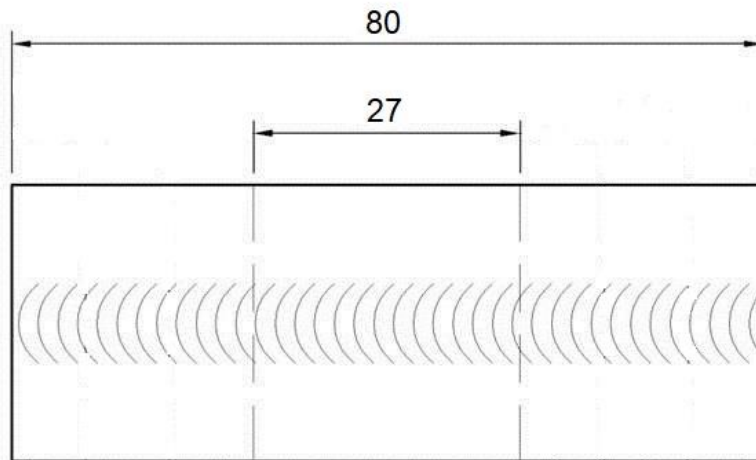


Fonte: Fagundes Junior (3).

Para formação da camada carbonetante adicionou-se aos cavacos moídos, de acordo com a estequiometria do carboneto de titânio (tipo MC), 3 g de grafite em pó para cada 10 g de cavacos moídos e 2% em massa de silicato de sódio (Na_2SiO_3), utilizado como agente vitrificante. A mistura foi umedecida com uma pequena quantidade de água destilada afim de formar uma pasta a ser inserida no molde (uma chapa de 3 mm de espessura com um canal de 6 mm x 80 mm).

Esta pasta foi depositada sobre a superfície de uma peça de aço ASTM A-36 (10 mm x 32 mm x 80 mm), conforme apresentada na Figura 9, para soldagem pelo processo GTAW. Para a fusão utilizou-se uma fonte de energia da marca LINCOLN ELECTRIC, equipado com eletrodo de tungstênio aditivado com 2% de tório e 3,25 mm de diâmetro. Um trator de corte automático portátil White Martins MC46 foi adaptado para fixação da tocha visando uma melhor uniformidade e qualidade no processo (Figura 10). As amostras foram submetidas ao processo com uma corrente máxima de 230 A e tensão média de 29 V. Para estabelecer as energias de soldagem em 1,8; 2,5 e 3,2 kJ/mm foram empregadas, respectivamente, as velocidades de 100, 125 e 175 mm/min no trator (10). Após a soldagem as amostras foram retificadas para nivelar a superfície soldada.

Figura 9 - Corte da amostra após a solda GTAW.

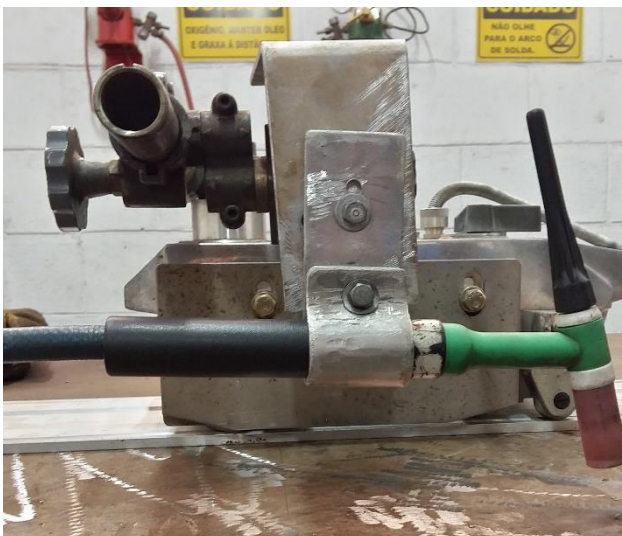


Fonte: Próprio autor.

3.2 Refusão da camada carbonetante

Para refusão da amostra cortou-se a parte central da amostra com comprimento de 27 mm, conforme indicado na Figura 9, em uma cortadeira metalográfica da marca PANTEC, modelo PANCUT 80. O metal de solda na peça obtida será refundido pelo processo de soldagem a laser pulsado.

Figura 10 - Equipamento para soldagem da camada carbonetante.



Fonte: Próprio autor.

Para a refusão da superfície do metal de solda foi utilizado a fonte laser de estado sólido Nd: YAG, modelo UW 150A da United Winners (Figura 11).

Figura 11 - Equipamento UW 150A – United Winners.



Fonte: Próprio autor.

As especificações técnicas da máquina são frequência (F) de 9Hz, largura temporal (Lt) de 10 ms, potência de pico (Pp) 0,5 W, energia de pulso (Ep) de 5 J. Assim através da Equação 1, temos que a energia gasta (Pt) no processo é de 45 W.

$$Pt = F * Lt * Pp \quad (1)$$

Para o deslocamento controlado da amostrada em relação ao feixe laser, foi empregado uma mesa microprocessada acionada com motor de passo, ajustado para uma velocidade de soldagem (v) de 3,56 mm/s, que relacionada com a potencia gasta tem-se o aporte térmico de acordo com a Equação 2 de 0,013 kJ/mm. Após testes foi definido que a melhor qualidade de soldagem foi obtida através da sobreposição de 50%.

$$Pt = \frac{Pp}{v} \quad (2)$$

3.3 Identificação das amostras

As amostras foram identificadas para controle das variáveis envolvidas no processo, como a liga utilizada na camada carbonetante e os parâmetros de soldagem GTAW. Para a refusão a laser foi empregada a condição de soldagem descrita no item anterior para todas as amostras analisadas. Assim sendo, os cordões foram identificados levando-se em consideração a liga de titânio, a velocidade e a energia de soldagem utilizada na produção das amostras, conforme apresentado na Tabela 4.

Tabela 4 - Identificação das amostras.

<i>ASTM F 67</i>			<i>ASTM F 136</i>		
Identificação	v (mm/s)	E (kJ/mm)	Identificação	v (mm/s)	E (kJ/mm)
P1	175	1,8	L1	175	1,8
P2	125	2,5	L2	125	2,5
P3	100	3,2	L3	100	3,2

Fonte: Próprio autor.

3.4 Preparação Metalográfica

As superfícies das amostras foram preparadas através dos métodos convencionais para análise microestrutural e realização de ensaios de microdureza Vickers. Utilizando peças produzidas pelo corte do cordão de solda refundidos, Figura 10, foram feitos os embutimentos em resina de fenol-formaldeído (baquelite). A superfície transversal do cordão foi desbastada por lixamento por meio de lixas com granulometria variando de 80 a 1200 mesh e polidas em suspensão de alumina de 1µm. Aplicou-se banho ultrassônico para a remoção de resíduos e na sequência fez-se o ataque metalográfico das amostras com Nital 2% para revelação microestrutural.

3.5 Análise estrutural e mecânica das amostras

Examinou-se as fases do revestimento pela difração de raio-X (DRX) usando-se um difratômetro SIEMENS, modelo DL-5005 equipado com tubo de cobre (Cu

$K\alpha=1,5405\text{\AA}$) e monocromador de grafite. A intensidade difratada pelas amostras foi registrada no intervalo entre 30 a 100°, varrida com velocidade de 2° por minuto. A identificação das fases foi baseada em fichas de informação cristalográficas (CIF- *Crystallographic Information File*) consultadas pelo banco de dados do *Inorganic Crystal Structure Database* - ICDS (28).

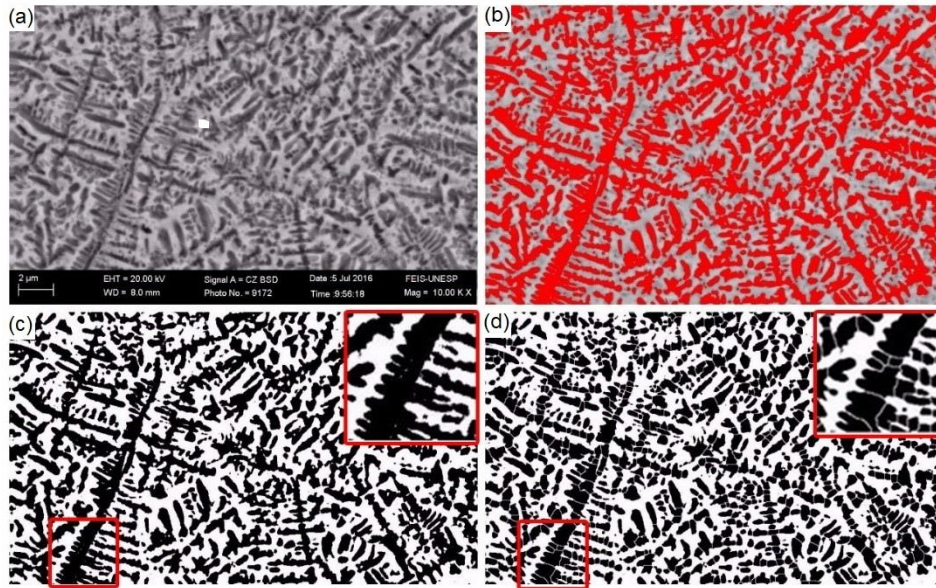
A caracterização microestrutural das amostras foi realizada com auxílio do microscópio eletrônico de varredura (MEV) ZEISS EVO, modelo LS15. O contraste das imagens foi determinado pela detecção de elétrons retroespalhados (BSE) provenientes da superfície, sendo que as imagens foram obtidas aleatoriamente com ampliações de 5000 e 10000 vezes. O contraste BSE facilita a identificação dos carbonetos, considerando que este sinal é fortemente afetado pelo número atômico de elementos químicos que compõem a amostra. Assim sendo, regiões compostas por elementos mais leves apresentam tons escuros enquanto regiões ricas em elementos mais pesados possuem tons mais claros.

A análise metalográfica quantitativa foi determinada, para cada uma das amostra, em uma série de dez micrografias eletrônicas MEV com auxílio do aplicativo *ImageJ* e determinadas pelos seus recursos (29). Nesse trabalho de caracterização objetivou-se a determinação do tamanho e da morfologia dos carbonetos de titânio, por meio de funções pré-estabelecidas no aplicativo para a circularidade, diâmetro equivalente e fração volumétrica.

As imagens podem ser trabalhadas através dos comandos fornecidos na aba *Image* do software. No comando *Image > Adjust > Brightness/Contrast*, pode-se aplicar ajustes de brilho e contraste para melhorar a qualidade da imagem original Figura 12(a).

Para as análises quantitativas e qualitativas as imagens foram convertidas em duas faixas tonais (preto e branco) Figura 12(b) pelo comando *Image > Adjust > Threshold*. Nele pode-se ajustar a área e o contorno das áreas através de um ajuste de limites, transformando as áreas vermelhas em porções negras na imagem binária Figura 12(c). Em seguida aplica-se o comando *Process > Binary > Watershed* que executa o desmembramento das partículas conforme ilustra a Figura 12(d).

Figura 12 - Processamento de imagens pelo ImageJ: (a) imagem real, (b) uso do comando threshold, (c) imagem convertida em preto e branco e (d) partículas separadas pelo comando watershed.



Fonte: Próprio autor.

O Software realiza a análise através da contagem do formato ocupado pelos contornos das partículas desmembradas ocupadas pelos pixels em tons escuros. Assim, através do comando *Analyze > Analyze Particles*, temos os fatores de formas das partículas, destacando-se a fração de área, diâmetro equivalente e a circularidade.

A fração de área (*area fraction - %Area*) representa a porção de área ocupada pelas partículas determinadas no desmembramento do recurso *threshold*. Este recurso pode ser utilizado para determinar a fração volumétrica ($\%V_{\alpha}$) de determinadas fases, como por exemplo, os carbonetos de titânio conforme a Equação 3:

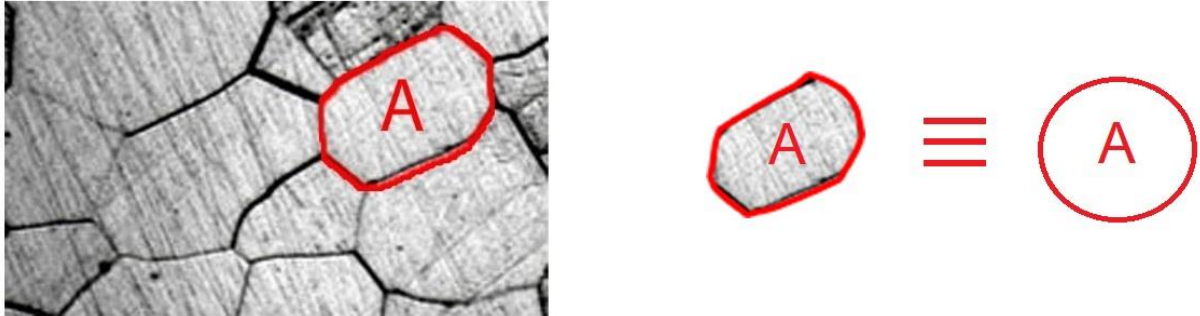
$$\%V_{\alpha} = \frac{V_{\alpha}}{V} = \frac{A_{\alpha}}{A} \quad (3)$$

A igualdade da relação de área e volume é utilizada para microestruturas anisotrópicas, porém é usualmente utilizada para casos gerais nas análises microestruturais. O diâmetro equivalente (D_2) é representado através da relação da fração de área e a área total (Average Size – A_s) conforme a Equação 4 (30). Esse

diâmetro é apresentado através de uma circunferência de mesma área que a partícula analisada conforme a Figura 13.

$$D_2 = \sqrt{\frac{A_s}{4\pi}} \quad (4)$$

Figura 13 - Representação do diâmetro equivalente.



Fonte: Próprio Autor.

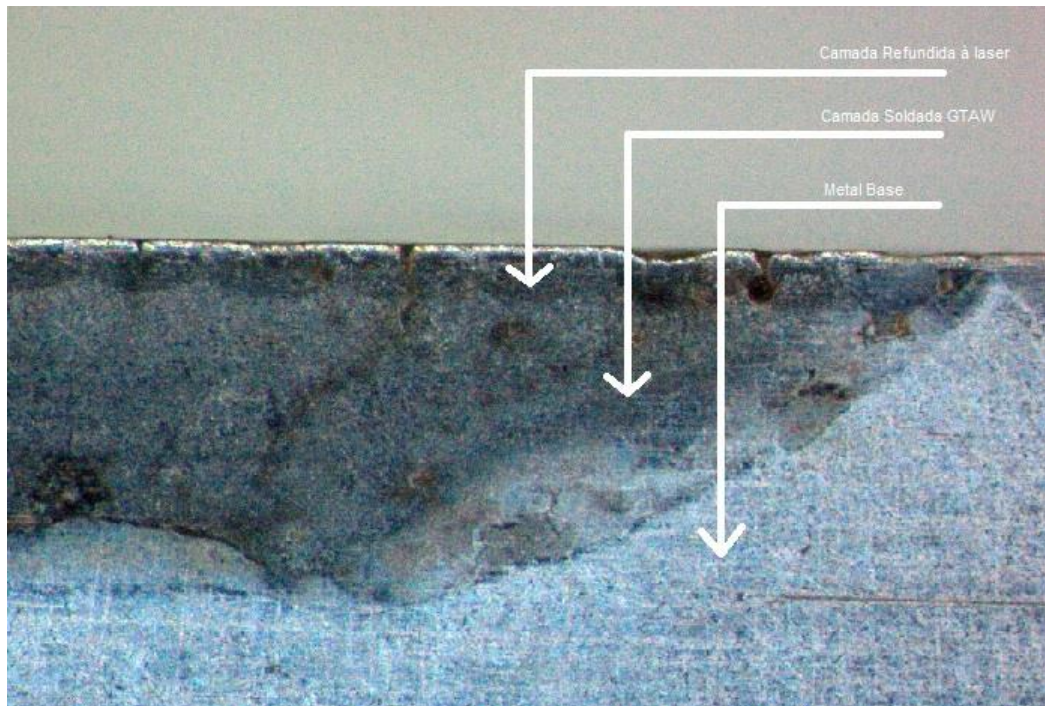
A circularidade (C) demonstra a forma geométrica das partículas através da comparação com um modelo ideal de uma circunferência de valor igual a 1. A Equação 5 calcula a circularidade levando em consideração a área (A) e o perímetro (P) da partícula.

$$C = 4\pi * \frac{A}{P^2} \quad (5)$$

A variação da microdureza Vickers foi medida através de um ultramicrodurômetro da marca SHIMADZU – DUH, modelo 211s, com carga máxima de 1000 mN (101,97 gf) aplicada durante cinco segundos.

As medidas foram retiradas a partir de uma profundidade de 20 µm da superfície da solda, distantes uma das outras em incrementos de 20 µm na camada de refusão, 70 µm no metal de solda GTAW e 1000 µm para o metal base, sendo essas camadas indicadas na Figura 14. Para fins estatísticos foram consideradas, no mínimo uma série de cinco medições por região da amostra.

Figura 14 - Camada transversal das amostras refundidas a laser.



Fonte: Próprio Autor.

A partir das médias retiradas das repetições das amostras foi utilizada a técnica de análise de variância – ANOVA, para confirmar a significância das propriedades aferidas. O modelo de ANOVA com nível de 5% de significância foi utilizado e comparado através do teste F, afim de avaliar a magnitude das diferenças a partir de comparações múltiplas entre os elementos no modelo de regressão linear múltipla (31). Ele baseia-se na soma de quadrados de regressão (SQR) onde se relaciona a soma de quadrados dos erros residual (SQE) e a soma de quadrados total (SQT) conforme Equação 6.

$$SQR = SQT - SQE \quad (6)$$

A tabela da ANOVA (Tabela 5) apresenta os métodos para se calcular as variáveis para o teste F. Tem-se que ao se calcular o F crítico (F_0) e comparar com F, a hipótese será nula se F for maior que F_0 , assim existe significância na análise de variância.

Tabela 5 - Tabela de análise de variância.

FONTE	SOMA DOS QUADRADOS	GRAUS DE LIBERDE	QUADRADO MÉDIO	F₀
Regressão	SQR	p	$QMR = \frac{SQR}{p}$	$F_0 = \frac{QMR}{QME}$
Erro Residual	SQE	$n - p - 1$	$QME = \frac{SQE}{n - p - 1}$	
TOTAL	SQT	$n - 1$		

Fonte: Adaptado de Bussad (31).

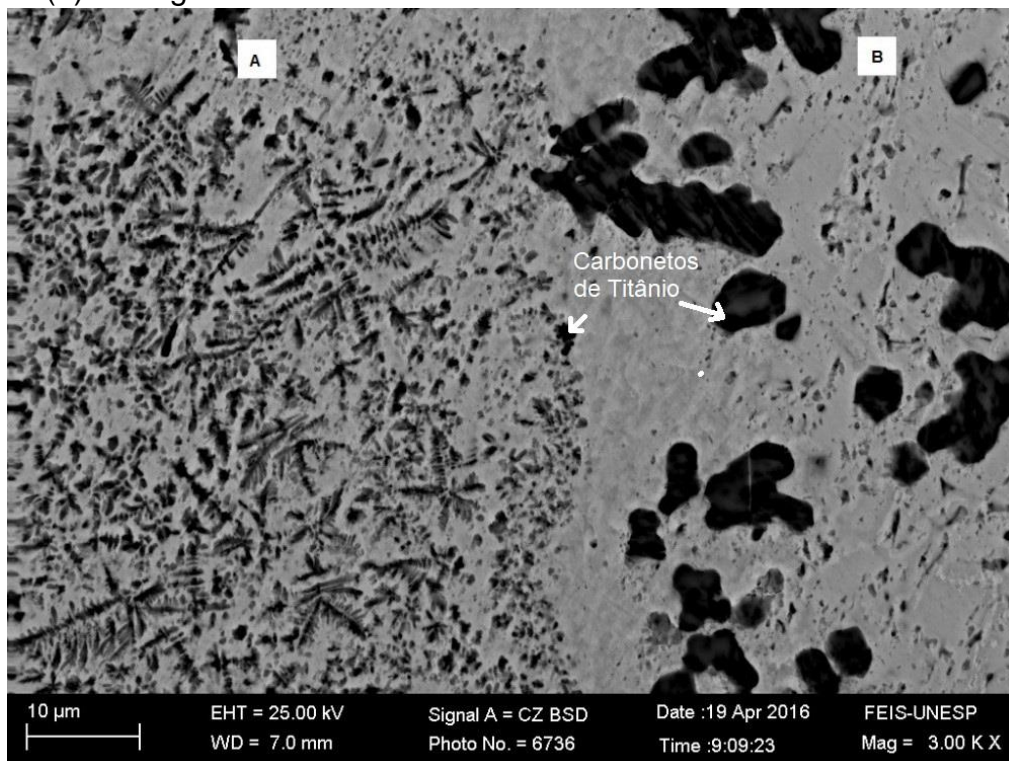
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Caracterização microestrutural

As análises microestruturais realizadas pelo MEV através do detector de elétrons retroespalhados mostra a matriz ferrítica como fase predominante e os carbonetos de titânio como segunda fase (Figura 15), que aparecem nas micrografias com contraste escuro. Verifica-se uma distribuição uniforme dos carbonetos na matriz, a microdureza confirma que a presença desta partículas favoreceu o aumento da dureza na superfície, as ramificações dendríticas são características de tais elementos sendo que na refusão tem-se uma maior dispersão destes elementos na matriz ferrítica.

O refinamento dos carbonetos ocorre devido ao alto nível de energia localizada em uma pequena área, dessa forma os carbonetos refundidos a laser apresentam perfil dendrítico mais ramificado e estão mais espalhados pela matriz. Assim a mudança do processo de soldagem para a refusão favorece a mudança superficial.

Figura 15 – (a) Micrografia da amostra na divisão entre o processo de refusão a laser e o de (b) soldagem GTAW.



Fonte: Próprio autor.

A fração volumétrica corresponde a relação do volume dos carbonetos na matriz, sendo os resultados obtidos através da análise do software ImageJ® das imagens do MEV. Analisando a variância da fração volumétrica entre as amostras, tem-se que o valor de F é maior que o F crítico (Figura 16), demonstrando que há variação significativa entre os elementos de fração volumétrica das amostras.

Figura 16 - Análise de variância com nível de significância de 5% das frações volumétricas dos carbonetos.

Anova: fator único					
RESUMO					
<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>	
P1	15	840.123	56.0082	56.43797	
L1	15	844.566	56.3044	97.34494	
P2	15	838.5	55.9000	104.5696	
L2	15	744.715	49.64767	229.6181	
P3	15	739.544	49.30293	56.09801	
L3	15	573.236	38.21573	60.08897	

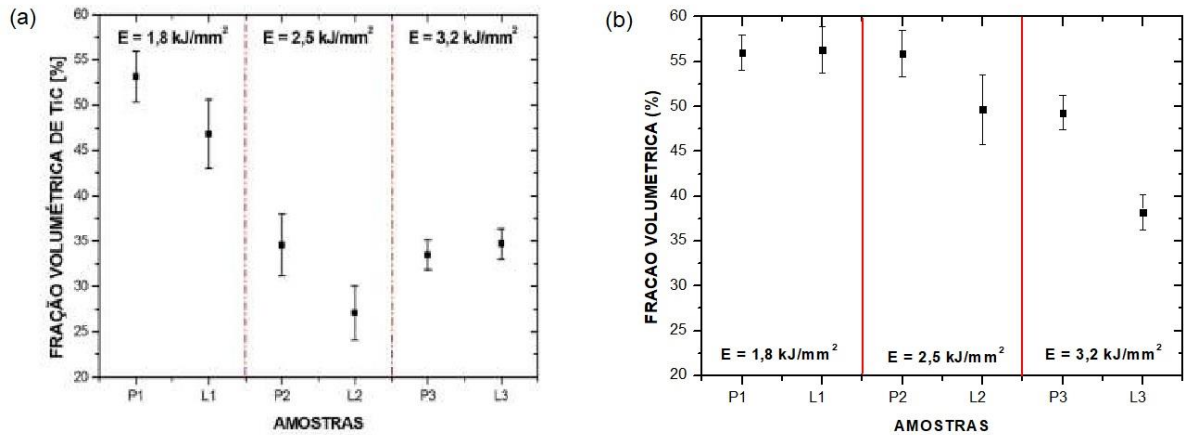
ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	3679.661	5	735.9323	7.308678	9.97E-06	2.323126
Dentro dos grupos	8458.207	84	100.6929			
Total	12137.87	89				

Fonte: Próprio autor.

A fração volumétrica de carbonetos de titânio na formação dos materiais soldados na condição de 1,8 kJ/mm² de energia está variando cerca de 1%, de 2,5 kJ/mm² cerca de 6% e de 3,2kJ/mm² cerca de 10% de fração volumétrica média entre as amostras puro e ligado. Assim quanto maior o nível de energia de soldagem maior a variação entre as frações da camada com titânio puro e titânio ligado e também o decaimento da fração volumétrica das amostras, sendo que na camada de titânio puro obteve-se maiores níveis de fração volumétrica em comparação com o titânio ligado (Figura 17).

Em comparação com o estudo realizado sobre a soldagem GTAW da camada carbonetante pode-se visualizar que o comportamento é idêntico e a fração volumétrica é consideravelmente menor do que na refusão devido a diferença na taxa de diluição dos processos.

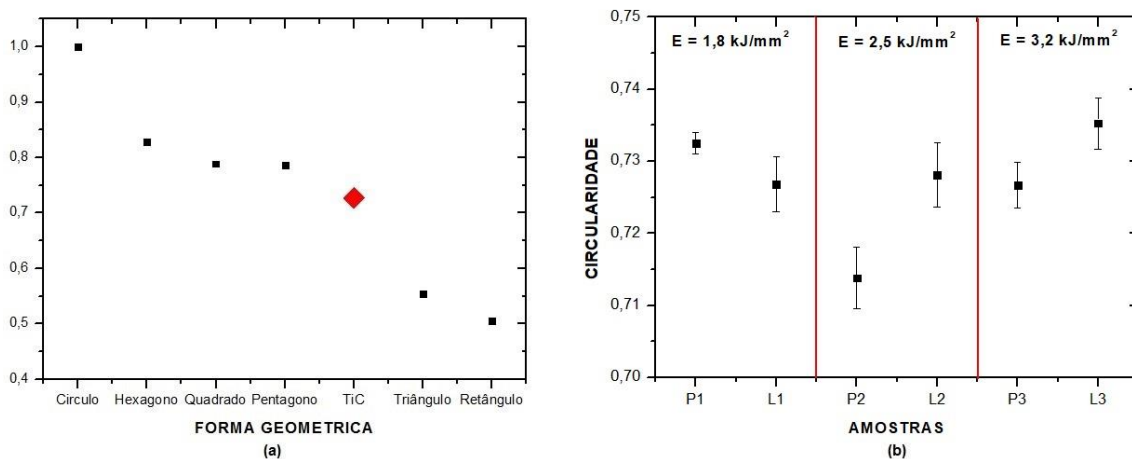
Figura 17 - Variação da fração volumétrica das ligas ASTM F67 e F136 em função da energia de soldagem GTAW antes (a) e após (b) a refusão a laser.



Fonte: Próprio autor.

A definição da morfologia dos carbonetos é de grande importância para definição dos revestimentos duros, sendo quanto mais próximo do formato circular a partícula melhor é sua resistência ao desgaste devido não ter concentração de tensões na interface da matriz. A circularidade nos traz a medida de quão próximo as partículas estão do formato circular, conforme a Figura 18, temos os valores das partículas da camada carbonetante F67 e F136 e comparado com valores dos formatos das partículas temos que sua forma está entre um pentágono, quadrado e triângulo, características da formação dendrítica (8).

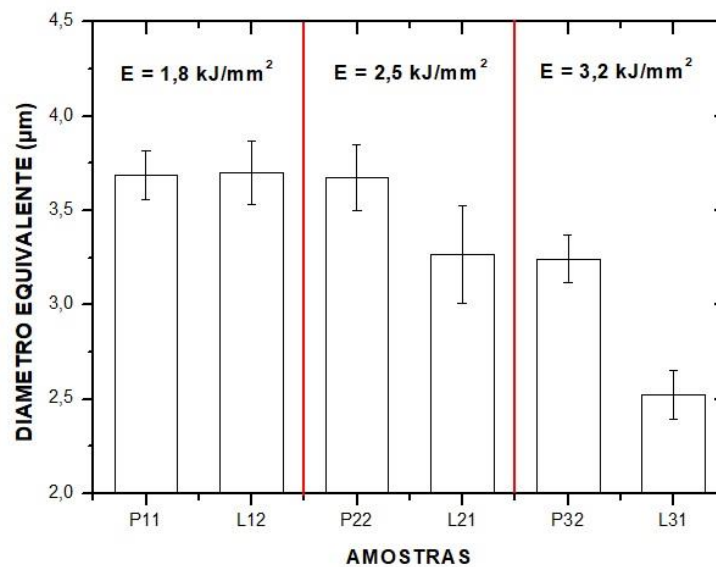
Figura 18 – Comparação da circularidade (a) com a morfologia dos carbonetos de titânio e a variação deste parâmetro em relação a energia de soldagem GTAW das amostras (b).



Fonte: Próprio autor.

O diâmetro equivalente é determinado pela medida do tamanho da partícula com dimensão linear através do software ImageJ®. O tamanho do diâmetro equivalente dos carbonetos variou de acordo com o aumento da energia de soldagem, sendo que quanto maior a energia de soldagem, maior a variação entre as amostras da camada pura e ligada. Além disso, pode-se visualizar no gráfico com aumento de energia de soldagem houve uma redução do diâmetro equivalente conforme reportado em trabalhos anteriores por Fagundes Junior (Figura 19).

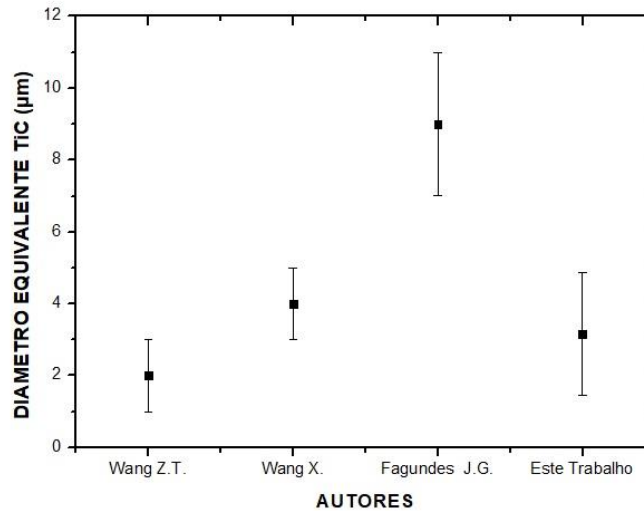
Figura 19 - Diâmetro equivalente para as amostras F67 e F136.



Fonte: Próprio autor.

Comparando o diâmetro equivalente com outros autores que trabalharam com o processo GTAW, Figura 20, tem-se uma maior dispersão devido ao processo de refusão da solda (32). Essa variação é visualizada devido a diluição no processo de refusão.

Figura 20 - Comparação do diâmetro equivalente entre autores.



Fonte: Próprio Autor.

4.2 Difração de Raio-X

Os resultados das análises por meio da difração de raio-X determinaram as fases presentes nos cordões obtidos pelo processo GTAW e posteriormente refundidos à laser com auxílio das fichas CIF indicadas na Tabela 6 (28). Por esse sistema ser ativo e complexo, tem-se a migração do TiC para o Fe mutuamente, assim através de ensaios determinou-se as principais fases presentes: carbonetos de titânio (TiC) e ferrita (Fe).

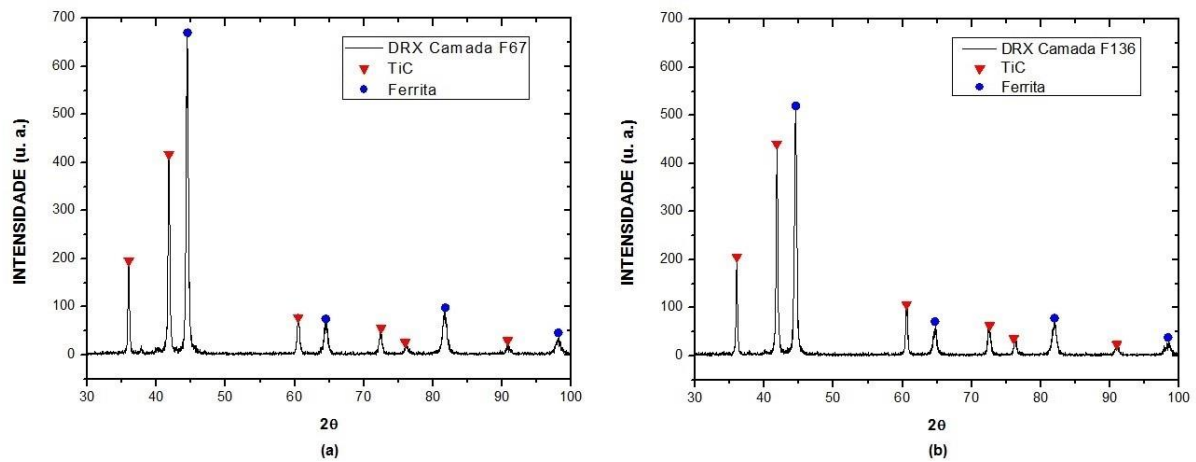
Tabela 6 - Parâmetro cristalográficos das fases encontradas por difração de raio-X.

Fase	Ficha ICSD	Parâmetro de rede [Å]		
		a	b	C
TiC	44494	4,318	-	-
Ferrita	38308	2,866	-	-

Fonte: Inorganic Crystal Structure Database (28).

Dessa forma tem-se que o titânio foi o elemento predominante nos cordões de solda das ligas ASTM F67 e F136 confirmando assim a formação de carbonetos de titânio compostos pela deposição da mistura carbonetante no metal de base fundidos pelo processo de soldagem GTAW e refundidos pelo processo à laser. Todos as amostras apresentaram o mesmo modelo no difatograma independente da energia de soldagem, sendo representadas pelas amostras de 1,8 kJ/mm na Figura 21.

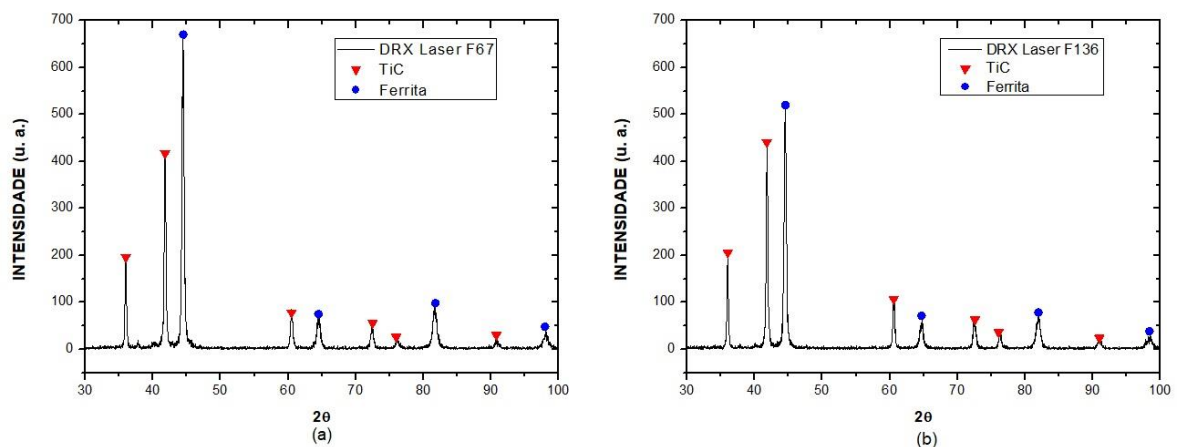
Figura 21 - Difratoograma dos cordões de solda GTAW com camada carbonetante de (a) Liga F67 e (b) Liga F136.



Fonte: Próprio autor.

Analisando-se os dois difratogramas em conjunto é possível identificar que os picos dos carbonetos de titânio são coincidentes para as duas ligas utilizadas na camada carbonetante como mostra a Figura 22, representada pela energia de soldagem de 3,2 kJ/mm. Assim tem-se que em ambos são apresentados os carbonetos de titânio formados através de seus picos de intensidade no mesmo padrão, independente da energia de soldagem. Para liga ASTM F136 tanto o titânio quanto o vanádio participam da formação de carbonetos, facilitando assim a formação de um carboneto complexo do tipo $(\text{Ti,V})\text{C}$ cuja cristalografia é similar ao TiC (18).

Figura 22 - Difratoograma dos cordões refundidos à laser com camada carbonetante de (a) Liga F67 e (b) Liga F136.



Fonte: Próprio autor.

4.3 Ensaios de microdureza

As medições de microdureza pelo DUH mostraram que houve um aumento progressivo de acordo com a proximidade da superfície do material, assim a camada refundida apresentou maior dureza que a camada soldada, que por sua vez, foi maior que o metal base.

A elevação na microdureza dentro do cordão foi determinada pela presença e o tamanho dos carbonetos de titânio formados, e a dispersão dos valores em cada ponto determinada pelo perfil da região do indentador Vickers observada em regiões com grandes densidades de carbonetos de titânio tem-se valores de dureza mais altos comparados a regiões com baixa densidade.

Com a análise da variância da microdureza na região da refusão a laser (Figura 23), tem-se que o fator F é maior que o F crítico, assim demonstrando que há significância entre os valores apresentados.

Figura 23 - Análise de variância com nível de significância de 5% da região refundida à laser.

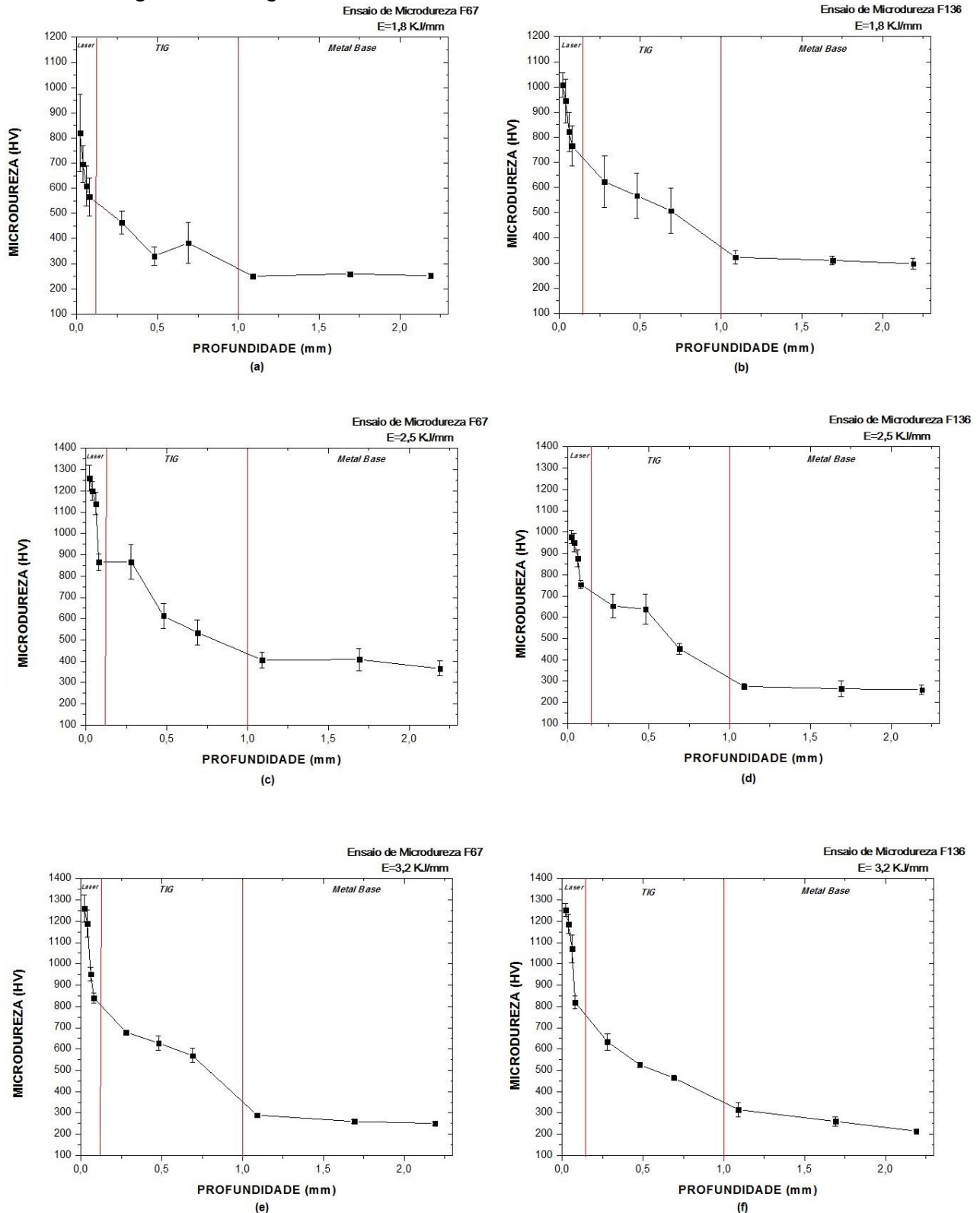
Anova: fator único					
RESUMO					
Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância	
P1	15	10619.47	707.9647	58027.99	
P2	15	17646.09	1176.406	9735.377	
P3	15	17011.48	1134.098	31790.82	
L1	15	13863.74	924.2492	29158.17	
L2	15	14027.2	935.1467	8458.197	
L3	15	18450.77	1230.052	31329.68	

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	2929694	5	585938.7	20.86426	1.7E-13	2.323126
Dentro dos grupos	2359003	84	28083.37			
Total	5288697	89				

Fonte: Próprio autor.

A variação da energia da soldagem inicial (GTAW) também apresentava uma modificação nos valores obtidos pelo ensaio, assim quanto maior a energia de soldagem maiores foram os valores de dureza Vickers conforme é demonstrado na Figura 24.

Figura 24 - Variação da microdureza do metal base, soldagem GTAW e refusão à laser nas condições: (a) amostra F67 com energia de soldagem de 1,8 kJ/mm, (b) amostra F136 com energia de soldagem de 1,8 kJ/mm, (c) amostra F67 com energia de soldagem de 2,5 kJ/mm, (d) amostra F136 com energia de soldagem de 2,5 kJ/mm, (e) amostra F67 com energia de soldagem de 3,2 kJ/mm, (f) amostra F136 com energia de soldagem de 3,2 kJ/mm.

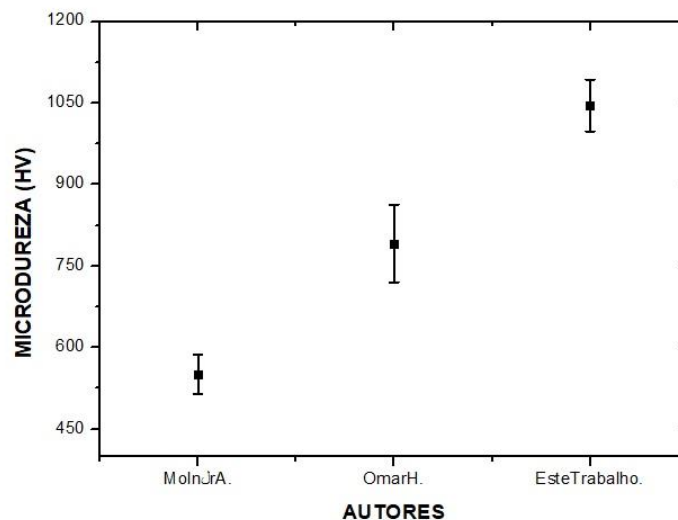


Fonte: Próprio autor.

A variação demonstrada pela dispersão nos gráficos indica a influência da fração volumétrica nas amostras, assim temos diferentes resultados devido a concentração de carbonetos diversificada por toda a matriz. Na solda refundida a dispersão pode ser verificada pelo perfil da região do indentador, dessa forma em regiões com grande densidade de carbonetos tem-se valores superiores comparados à regiões de baixa densidade.

Em comparação com outros tipos de revestimentos como AZ-40 (33) e NiCrBSi(34) tem-se que a camada carbonetante de titânio apresenta um valor relativamente maior de microdureza Vickers conforme mostra a Figura 25. Essa variação é devido a variação da composição do material utilizado na camada de revestimento e as variáveis do equipamento de soldagem a laser que influenciam diretamente na microdureza das amostras (33,34).

Figura 25 - Comparação da microdureza com outros autores.



Fonte: Próprio autor.

5 CONCLUSÕES

A partir da análise dos resultados foi possível observar que a refusão a laser promoveu significativa alteração da microestrutura do revestimento GTAW. Houve uma maior redução do tamanho dos carbonetos de titânio formados no metal de solda GTAW de maior energia, que resultou no endurecimento dos revestimentos refundidos à laser.

Em relação à composição temos que as amostras de revestimentos puro apresentaram maior fração volumétrica e diâmetro equivalente comparado com as de revestimentos ligado. Com aumento da energia de soldagem, em ambos pode-se notar um decaimento na fração volumétrica e no diâmetro equivalente.

Os cordões formados à partir da liga ASTM F67 apresentaram microdureza relativamente maior que a liga ASTM F136 devido a sua porcentagem maior de titânio na composição, aumentando a possibilidade de formação de carbonetos. Sendo que quanto maior a energia de soldagem utilizada no processo de soldagem inicial (GTAW) maior foi a microdureza encontrada.

Os carbonetos de titânio formados após a refusão à laser apresentaram morfologia dendrítica, assim a dispersão de valores de dureza se dá pela estrutura formada pela matriz da solda.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHO FUTURO

- Alterações dos parâmetros de refusão do equipamentos à laser como a velocidade, potência de pico e largura temporal;
- Alteração da condição de sobreposição entre pulsos do processo laser;
- Verificar a influência do gás utilizado nos processos de soldagem e refusão nas propriedades das amostras;
- Repetição dos passes de soldagem e refusão sobre os cordões formados (múltiplos passes);
- Aplicação de estudos tribológicos (ensaio de desgaste) afim de verificar as propriedades da refusão quanto ao fenômeno de desgaste.

REFERÊNCIAS

- 1 INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Índice de categoria por uso de atividade**. Rio de Janeiro, 2015. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/indicadores/industria/pimpfuso_atividade/default.shtm>. Acesso em: 15 jun. 2016.
- 2 BULLOCH, J. H.; HENDERSON, J. L. Some considerations of wear and hardfacing materials. **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, London, v. 43, n. 3, p. 251-267, 1990.
- 3 BLAU, P. J.; et. al. **Friction, lubrication, and wear technology**. Materials Park: ASM Internacional Handbook Committee, 1992. v. 18.
- 4 BAYER, R. G. **Mechanical wear: fundamentals and testing**. 3. ed. New York: Marcel Dekker, 2004.
- 5 GARCÍA, D. B. C. **Aplicação de revestimento duro utilizando o processo arame tubular com e sem adição de arame não energizado para diferentes tipos de consumíveis**. 2011. 120 f. Tese de mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia – UFU, Uberlândia, 2011.
- 6 LIMA, A. C.; WINCK, L. B. Análise comparativa de dois eletrodos revestidos utilizados na aplicação de revestimentos duros em facas picadoras de cana-de-açúcar. In: CONGRESSO NACIONAL DE SOLDAGEM - CONSOLDA, 32., 2006, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: [s. n.], 2006.
- 7 CHARTTERJEE, S.; PAL, T. K. Wear behavior of hardfacing deposits on cast iron. **Wear**, Amsterdam, v. 255, n. 1-6, p. 52-54, 2005.
- 8 BUCHELY, M. F. et. al. The effect of microstructure on abrasive wear of hardfacing alloys. **Wear**, Amsterdam, v. 259, n. 1-6, p. 54–60, 2005.
- 9 GAHR, K. H. Z. **Microstructure and wear of materials**. New York: North Holland, 1987. v. 10.
- 10 FAGUNDES JÚNIOR, J. G.; MANERA, R. S.; TOKIMATSU, R. C.; VENTRELLA, V. A.; GALLEGOS, J. Aplicação de cavacos de titânio para produção de revestimentos resistentes ao desgaste. **Soldagem e Inspeção**, São Paulo, v. 19, p. 264-270, 2014. DOI: 10.1590/0104-9224/SI1903.09.
- 11 YOU-BAI, X. **Tribology: lubricants and lubrication**. Shanghai: Dr. Chang-Hung Kuo, 2011.
- 12 TOVBIN, R.; PINEDO, C. E. Utilização de revestimentos tribológicos em ferramentas de trabalho a frio. In: ENCONTRO DA CADEIA DE FERRAMENTAS, MOLDES E MATRIZES DA ABM, 7., 2009, São Paulo. **Anais...** São Paulo: [s. n.], 2009. p. 50-59.

- 13 RIBEIRO, R. **Avaliação da resistência ao desgaste abrasivo de revestimentos soldados do tipo Fe-C-Cr utilizados na indústria sucroalcooleira**. 2004. 118 f. Tese de mestrado em Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP, Ilha Solteira, 2004.
- 14 SHACKELFORD, J. F.; ALEXANDER, W. **Materials science and engineering handbook**. 3. ed. Boca Raton: CRC, 2001.
- 15 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS - ASTM. **ASTM – G40 – 15** – standard terminology relating to wear and erosion. Materials Park: Annual Book of ASTM, 2015.
- 16 HUTCHINGS, I. M. **Tribology: friction and wear of engineering materials**. Boca Raton: CRC, 1992.
- 17 CAI, B. et. al. Tribological properties of TiC particles reinforced Ni-based alloy composite coatings. **Transactions of Nonferrous Metals Society of China**, Nanjing, p. 1681-1688, 2012.
- 18 PIERSON, H. O. **Handbook of refractory carbides and nitrides**. New Jersey: Noyes, 1996.
- 19 HENDERSON, J. L.; BULLOCH, J. H. Alloy classification of hardfacing materials. **Int. J. Pressure Vessels and Piping**, London, v. 47, p. 127-158, 1991.
- 20 FAGUNDES JUNIOR, J. G. **Reciclagem de cavacos para a formação de carbonetos de titânio no metal de solda SATG em aço-carbono**. 2015. 80 f. Tese (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP, Ilha Solteira, 2015.
- 21 YILBAS, B. S.; AKHTAR, S.; SHUJA, S. Z. **Laser forming and welding processes: materials forming, machining and tribology**. 2. ed. New York: Springer, 2014.
- 22 OLSEN, F. O. **Híbrido laser arc welding**; Woodhead publishing in materials. New York: WP, 2009.
- 23 KATAYAMA, S. **Handbook of laser welding technologies**: woodhead publishing in materials. New York: WP, 2013.
- 24 NA, X. **Laser welding**. 2. ed. Rijeka: Sciyo, 2010.
- 25 COTTON, F. A.; WILKINSON, G. **Advanced inorganic chemistry**. 3. ed. New York: John Wiley & Sons, 1972.
- 26 AMERICAN STANDARD MATERIALS - ASTM INTERNATIONAL. F 67 - 06. **Standard specification for unalloyed titanium, for surgical implant applications (UNSR 50250, UNSR 50400, UNSR 50550, UNSR 50700)**. West Conshohocken, 2006. 5 p.

- 27 AMERICAN STANDART MATERIALS - ASTM INTERNATIONAL. F 136 - 02A. **Standard specification for wrought titanium-6aluminum-4vanadium eli (extra low interstitial) alloy for surgical implant applications (UNSR 56401)**. West Conshohocken, 2002. 4 p.
- 28 INORGANIC CRYSTAL STRUCTURE DATABASE – ICSD. Site. [S. I.], 2014. Disponivel em: <<http://icsd.fizkarlsruhe.de.w31001.dotlib.com.br/search/basic.xhtml>>. Acesso em: 23 fev. 2016.
- 29 IMAGEJ. **Image processing and analysis in JAVA**. [S. I.], 2016. Disponível em: <<https://imagej.nih.gov/ij/>> . Acesso em : 14 out. 2016.
- 30 KURZIDLOWSKY, K. J.; RALPH, B. **The quantitative description of the microstructure of materials**. Florida: CRC, 1995. p. 246-294.
- 31 BUSSAD, W. O.; MORETTIN, P. A. **Métodos quantitativos: estatística básica**. 5. ed. São Paulo: Atual, 2002.
- 32 LIN, Y. C.; WANG, S. W. Microstructure of TiC–W cladding on steel in nanoscale. **Wear**, Taiwan, v. 256, n. 7/8, p. 720-725, 2003.
- 33 OMAR, H.; IBRAHIM, A.; SALEM, H.; SEDKY, S. Effect of pulsed laser on the structure and morphology of alumina-zirconia coatings. **Journal of Surface Engineered Materials and Advanced Technology – JSEMAT**, Irvine, v. 3, n. 3, p. 249-256, 2013.
- 34 MOLNÁR, A.; BUZA, G.; BALOGH, A. Hardness test and microstructure analysis of NiCrBSi sprayed, laser remelted coatings. **Production, Processes and Systems**, Dedham, v. 6,n. 1, p. 35-46, 2013.

APÊNDICE A – PUBLICAÇÕES REFERENTES A ESTE TRABALHO

PONTIN, G. I.; EGITO, G. M. P.; FAGUNDES JUNIOR, J. G.; VENTRELLA, V. A.; GALLEGU, J. Caracterização microestrutural de revestimentos duros à base de carbonetos de titânio refundidos com laser pulsado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 22., 2016, Natal. **Anais...** Natal: CBECiMat, 2016. p. 5306-5316.

EGITO, G. M. P.; PONTIN, G. I.; FAGUNDES JUNIOR, J. G.; GALLEGU, J.; VENTRELLA, V. A. Revestimentos duros produzidos com cavacos de titânio: avaliação da resistência ao desgaste abrasivo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 22., 2016, Natal. **Anais...** Natal: CBECiMat, 2016. p. 6884-6894.

GALLEGU, J.; PALERMO, E. S.; GODOY, H. S.; PONTIN, G. I.; EGITO, G. M. P. Caracterização microestrutural de carbonetos formados a partir de ferro-ligas por fusão a arco elétrico. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 22., 2016, Natal. **Anais...** Natal: CBECiMat, 2016. p. 5817-5828.

FAGUNDES JUNIOR, J. G.; OLIVEIRA, D. L.; PONTIN, G. I.; EGITO, G. M. P.; VENTRELLA, V. A.; GALLEGU, J. Estudo Comparativo entre Soldas Contendo Diferentes Carbonetos (Cromo ou Titânio), Visando a Produção de Revestimentos Resistentes ao Desgaste. In: CONGRESSO NACIONAL DE SOLDAGEM - CONSOLDA, 41., 2015, Salvador. **Anais...** São Paulo: Associação Brasileira de Soldagem, 2015. p. 1-9.

GALLEGU, J.; PONTIN, G. I.; EGITO, G. M. P.; FAGUNDES JUNIOR, J. G.; VENTRELLA, V. A. Laser surface remelting of GTAW weld metal reinforced with titanium carbide. In: CONGRESSO DE MICROSCOPIA DOS MATERIAIS, 9., 2016, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: [s. n.], 2016.