



JOSÉ GEDAEL FAGUNDES JÚNIOR

**RECICLAGEM DE CAVACOS PARA A FORMAÇÃO
DE CARBONETOS DE TITÂNIO NO METAL DE
SOLDA PRODUZIDO POR SOLDAGEM GTAW EM
AÇO-CARBONO**

JOSÉ GEDAEL FAGUNDES JÚNIOR

**RECICLAGEM DE CAVACOS PARA A FORMAÇÃO
DE CARBONETOS DE TITÂNIO NO METAL DE
SOLDA PRODUZIDO POR SOLDAGEM GTAW EM
AÇO-CARBONO**

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

Área de Conhecimento: Materiais e
Processos de Fabricação

Prof. Dr. Juno Gallego

Orientador

Prof. Dr. Vicente Afonso Ventrella

Coorientador

Ilha Solteira

2015

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

F156r Fagundes Júnior, José Gedael.
Reciclagem de cavacos para a formação de carbonetos de titânio no metal de solda produzido por soldagem GTAW em aço-carbono / José Gedael Fagundes Júnior. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2015
80 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Materiais e Processos de Fabricação, 2015

Orientador: Juno Gallego
Co-orientador: Vicente Afonso Ventrella
Inclui bibliografia

1. Revestimento duro. 2. GTAW. 3. Carbonetos de Titânio. 4. Microdureza. 5. Parâmetros de soldagem. 6. Análise microestrutural.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

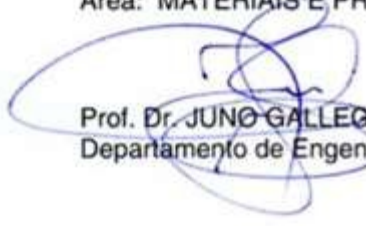
TÍTULO: Reciclagem de cavacos para a formação de Carbonetos de Titânio no Metal de Solda produzido por Soldagem GTAW em Aço-Carbono

AUTOR: José Gedael Fagundes Junior

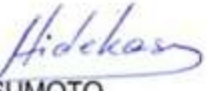
ORIENTADOR: Prof. Dr. JUNO GALLEGÓ

CO-ORIENTADOR: Prof. Dr. VICENTE AFONSO VENTRELLA

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 GALLEGÓ

Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira


Prof. Dr. HIDEKASU MATSUMOTO

Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira


Prof. Dr. WARLEY AUGUSTO PEREIRA

Faculdade de Engenharia Mecânica / Universidade de Rio Verde

Data da realização: 25 de junho de 2015.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho primeiramente aos meus pais pelo apoio incondicional cujos preceitos contribuíram para a minha formação e desenvolvimento pessoal e profissional, e também a todos os ensinamentos passados por todos os professores nos quais eu tive a oportunidade de fazerem parte da minha vida.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus pelo dom da vida.

A meus pais Maria Madalena Fagundes e José Fagundes Rosa; aos meus irmãos Slaine, Quelle e Elias e à minha noiva Amanda pelo profundo apoio e incentivo, me estimulando nos momentos de dificuldades e ainda pela compreensão ao serem privados em muitos momentos de minha companhia.

Minha gratidão especial ao Professor Dr. Juno Gallego, meu orientador e, sobretudo um querido e grande amigo. Agradeço pelas orientações, conselhos e principalmente pela fé e confiança depositadas em mim ao longo da realização deste trabalho, nos quais sem o seu apoio não teria alcançado tantas realizações propiciadas com esta parceria.

Ao meu coorientador Professor Dr. Vicente Afonso Ventrella pelo apoio, paciência e instruções durante o trajeto do curso de mestrado que também foram imprescindíveis para esta conquista.

Um obrigado aos meus colegas de mestrado Carlos Eduardo, Daniel Secco, Daniel Lucas, Newton, Igor, Eli, Valterson, Viviane, Pedro Ayala, Edson e aos demais envolvidos nos projetos realizados, cujos esforços e auxílios tornaram possíveis a concretização deste projeto. A todos os professores do DEM-FEIS pelo ensino das respectivas disciplinas e esclarecimentos de dúvidas surgidas ao longo da pesquisa.

Ao pessoal da secretaria do PPGEM e DEM da FEIS.

Aos colegas do CIC-UNESP (Engenharia Mecânica): Renan, Matheus, Lucas, Pedro.

Aos técnicos do DEM-FEIS Darci Ribeiro, Ronaldo Máscoli, Diego de Alcântara, Edvaldo Silva, Carlos Santana e principalmente ao senhor Marino Teixeira pelo auxílio durante a realização dos procedimentos experimentais na fabricação dos dispositivos e preparação das amostras utilizadas neste trabalho.

Ao Sr. Elton José Souza do DFQ-FEIS pelo auxílio na caracterização microestrutural por microscopia eletrônica de varredura (MEV).

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

Ao Laboratório de Caracterização Estrutural da Universidade Federal de São Carlos.

Ao CNPQ pelo apoio financeiro.

Quando chegar o dia em que você viver apenas de lembranças,
de quais lembranças você quer viver?
Das escadas de que não subiu?
Das praias que não mergulhou?
Das lutas que não desbravou?
Das portas que não abriu?
Das histórias que não conheceu?
Das histórias que não viveu?
Das histórias que não contou?
Viva para ter o que lembrar, pois vai chegar o dia em que sua
maior riqueza será as lembranças e serão elas que te manterá
vivo.

Comercial Honda 2012

RESUMO

O titânio é um metal nobre e possui excelentes propriedades biomecânicas, podendo assim ser plenamente aceito pelo organismo humano. A grande demanda na utilização de implantes dentários, fabricados a partir de ligas de titânio traz consigo um aumento significativo na geração de resíduos (cavacos), resultantes dos processos de usinagem empregados. Com o objetivo de reduzir os impactos ambientais, soluções alternativas para a reutilização de tais resíduos têm sido estudadas. O carboneto de titânio (TiC) possui elevada dureza, o que potencialmente permitiria a sua utilização como reforço em revestimentos antidesgaste aplicados em equipamentos das indústrias sucroalcooleira e mineradoras. Neste trabalho cavacos de ligas a base de titânio foram processadas e utilizadas como matéria prima para a fabricação de consumíveis experimentais. Revestimentos foram produzidos sobre amostras de aço-carbono por soldagem à arco elétrico com proteção gasosa e eletrodo de tungstênio, *GTAW*. A caracterização microestrutural do metal de solda foi realizada por microscopia eletrônica de varredura (MEV) e difração de raios-X (DRX). O comportamento mecânico dos revestimentos foi analisado por meio de um ultramicrodurômetro digital. Verificou-se que a microestrutura do metal de solda era composta por partículas não prismáticas de alta dureza distribuídas em uma matriz ferrítica. Análises químicas composicionais feitas por microanálise mostraram diferenças na concentração de titânio entre a matriz e as partículas, onde maiores teores deste elemento foram identificados. A análise cristalográfica confirmou que houve a formação de carbonetos de titânio e ferrita no metal de solda, comprovando a viabilidade no uso de cavacos de titânio para a fabricação de revestimentos duros.

Palavras chaves: Revestimento duro. Diluição. Parâmetros de soldagem. Microdureza. Análise microestrutural.

ABSTRACT

The titanium element is a noble metal and it owns excellent biomechanical properties and can be accepted by human organism. The enormous necessity for utilization of dental implants fabricated with titanium alloys have caused an increased in generation of scraps or residues (chips) as a result of machining processes applied. Aiming to reduce the environmental impact, alternative solutions for reutilization of these residues have been studied. Titanium carbide (TiC) presents high hardness and potentially can be applied as hardfacing against wear in sugar-cane and mining equipment. In this work, chips of titanium from ASTM F67 (pure Ti) and ASTM F136 (Ti-6Al-4V) have been processed and used as a raw material for fabrication of experimental hardfacing consumables. Weld metals were produced in low carbon steel specimens using GTAW processes (Gas Tungsten Arc Welding). The microstructures were investigated by scanning electron microscopy (SEM) and X-ray diffraction (XRD) techniques. The mechanical behavior of the weld metals was analyzed by a dynamic ultra-micro hardness tester. The microstructure of the welding metal was composed of non-prismatic and very hard particles surrounded by softer ferritic matrix. Measures made by electron dispersive spectroscopy (EDS) showed difference of the concentration of titanium through the particle, where larger contents of titanium were found, and the matrix. The crystallographic analyses performed by XRD reinforced the formation of titanium carbides and ferrite in the welding metal and justifying the viability in using titanium chips as an alternative fabrication of hardfacing.

Keywords: Hardfacing. Dilution. Welding parameters. Microhardness. Microstructure characterization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Causa de falhas em equipamentos (a) desgaste e outras causas (b) desgaste abrasivo e outros mecanismos de desgaste.....	17
Figura 2: Técnicas para deposição de revestimentos	18
Figura 3: Metais formadores de carbonetos intersticiais	22
Figura 4: Carbonetos Intersticiais	22
Figura 5: Estequiometria dos carbonetos intersticiais.....	23
Figura 6: Diagrama de Ellingham para a formação dos carbonetos	24
Figura 7: Diagrama de fase do carbono-titânio. Intervalo de homogeneidade representado pela região hachurada.	25
Figura 8: Variação das propriedades dos carbonetos em função da composição (a) parâmetro de rede (b) dureza.....	26
Figura 9: Equipamento de soldagem a arco elétrico com proteção gasosa e eletrodo de tungstênio (<i>GTAW</i>)	27
Figura 10: Afiação do eletrodo não consumível (a) forma correta: eletrodo perpendicular ao centro de giro do rebolo, (b) forma incorreta: eletrodo paralelo ao centro de giro do rebolo.	28
Figura 11: Cálculo da diluição da solda.....	29
Figura 12: Efeito da velocidade de soldagem na microestrutura	30
Figura 13: Desgaste abrasivo por: (a) dois corpos (b) três corpos.....	31
Figura 14: Fluxograma materiais e métodos.....	34
Figura 15: Aspecto dos cavacos após a limpeza	35
Figura 16: Dispositivo metálico para moagem de cavacos.....	36
Figura 17: Dispositivo com peças de granito.....	36
Figura 18: Aspecto dos cavacos de titânio após a moagem e classificação.....	37
Figura 19: Esquema de preparação da camada com a mistura carbonetante.	39
Figura 20: Processo de soldagem da pré-camada	40
Figura 21: Identificação das amostras.....	42
Figura 22: Esquema de corte das amostras	43
Figura 23: Regiões utilizadas de imagens no MEV	44
Figura 24: Indicação da aquisição de imagens pontuais por EDS (MEV) (a) carbonetos de titânio (b) matriz.....	44
Figura 25: Esquema de medição da dureza ao longo do cordão (L33B).	45

Figura 26: Esquema de medição de microdureza nas fases presentes na solda. (a) Carbonetos de titânio (b) matriz	46
Figura 27: Processamento de imagens no <i>ImageJ</i> com a aplicação do recurso <i>watershed</i> (a) imagem real. (b) aplicação de <i>threshold</i> (c) análise das partículas, presença de áreas maiores que o tamanho real (d) imagem real (e) aplicação de <i>threshold</i> e <i>watershed</i> (f) análise das partículas com maior precisão.	47
Figura 28: Cordões de solda formados a partir de diferentes energias de soldagem. (a) F67, E=1,8 kJ/mm (b) F136, E=1,8 kJ/mm (c) F67, E=2,5 kJ/mm (d) F136, E=2,5 kJ/mm (e) F67, E=3,2 kJ/mm (f) F136, E=3,2 kJ/mm.....	49
Figura 29: Variação da taxa de diluição das amostras com a energia de soldagem	51
Figura 30: Cordões de solda formados a partir de cavacos da liga F67	51
Figura 31: Cordões de solda formados a partir de cavacos da liga F136	52
Figura 32: Difratoograma dos cavacos de titânio (a) liga F67 (puro) (b) liga F136 (Ti6Al4V) ..	54
Figura 33: Comparação dos resultados de DRX dos cordões solda em diferentes energias	54
Figura 34: Comparação do microdureza das diferentes ligas com a variação da energia de soldagem.....	56
Figura 35: Comparação entre a relação da microdureza do cordão e o metal de base entre diversos trabalhos (36-39).	57
Figura 36: Variação da microdureza dos carbonetos com a energia de soldagem	58
Figura 37: Variação da microdureza na matriz com a energia de soldagem	59
Figura 38: Formação de carbonetos finos nos bolsões interdendríticos pouco intensa (menor dureza) em (a) e muito intensa (maior dureza) em (b).	59
Figura 39: Micrografia das amostras geradas por MEV (BSE): (a) F67; E = 1,8kJ/mm – G (b) F136; E = 1,8kJ/mm – G (c) F67; E = 2,5kJ/mm – C (d) F136; E = 2,5kJ/mm – C (e) F67; E = 3,2kJ/mm – F (f) F136; E = 3,2kJ/mm - F.....	60
Figura 40: Variação da fração volumétrica dos TiC com a energia de soldagem	61
Figura 41: Variação do tamanho dos TiC com a energia de soldagem	62
Figura 42: Comparação entre o tamanho dos TiC com trabalho de outros autores	62
Figura 43: Variação da circularidade dos carbonetos de titânio à energia de soldagem (a) cordões de solda (b) comparação da circularidade com os TiC e formas geométricas.	63
Figura 44: EDS (MEV), análise por linha – amostra P23C	65
Figura 45: EDS (MEV), análise por linha – amostra L22D	65
Figura 46: Propriedades da solda relacionada à energia de soldagem	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Composição química nominal das ligas de titânio.....	33
Tabela 2: Procedimento de limpeza dos cavacos.....	33
Tabela 3: Resultados dos cálculos estequiométricos (g/g).....	38
Tabela 4: Composição química nominal da mistura carbonetante.	39
Tabela 5: Parâmetros selecionados na soldagem da camada carbonetante.....	41
Tabela 6: Identificação das amostras	42
Tabela 7: Parâmetros cristalográficos das fases encontradas por difração de raios-X.	53
Tabela 8: Composição química dos carbonetos de titânio (% atômica).	64
Tabela 9: Composição química da matriz (% atômica).	64

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASTM:	American Society for Testing and Materials
AWS	American Welding Society
BSE:	Backscattered Secondary Electrons (elétrons retroespalhados)
CFC	Cúbico de Face Centrada
CIF:	Crystallographic Information File
CVD	Chemical Vapor Deposition (deposição química em fase vapor)
DCEN:	Direct Current Electrode Negative (corrente direta com eletrodo negativo)
DCEP:	Direct Current Electrode Positive (corrente direta com eletrodo positivo)
DRX:	Difração de raios-X
DUH:	Dynamic Ultra Microhardner Tester
EDS:	Energy-dispersive X-ray spectroscopy (espectroscopia por dispersão de energia)
FRX:	Fluorescência de raios-X
GMAW:	Gas Metal Arc Welding (soldagem por arco elétrico com gás de proteção)
GTAW:	Gas Tungsten Arc Welding (soldagem a arco elétrico com proteção gasosa e eletrodo de tungstênio)
HV:	Hardness Vickers (dureza Vickers)
ICSD:	Inorganic Crystal Structure Database
MEV:	Microscopia Eletrônica de Varredura
Na ₂ SiO ₃	Silicato de sódio
PVD	Physical Vapor Deposition (deposição física de vapor)
RPM:	Rotações por minuto
SEM	Scanning Electron Microscopy
SMAW:	Shielding Metal Arc Welding (soldagem ao arco elétrico com eletrodo revestido)
TiC	Carboneto de titânio
TIG	Tungsten inert gas
ZTA:	Zona Termicamente Afetada
XRD	X-ray Diffraction

SUMÁRIO

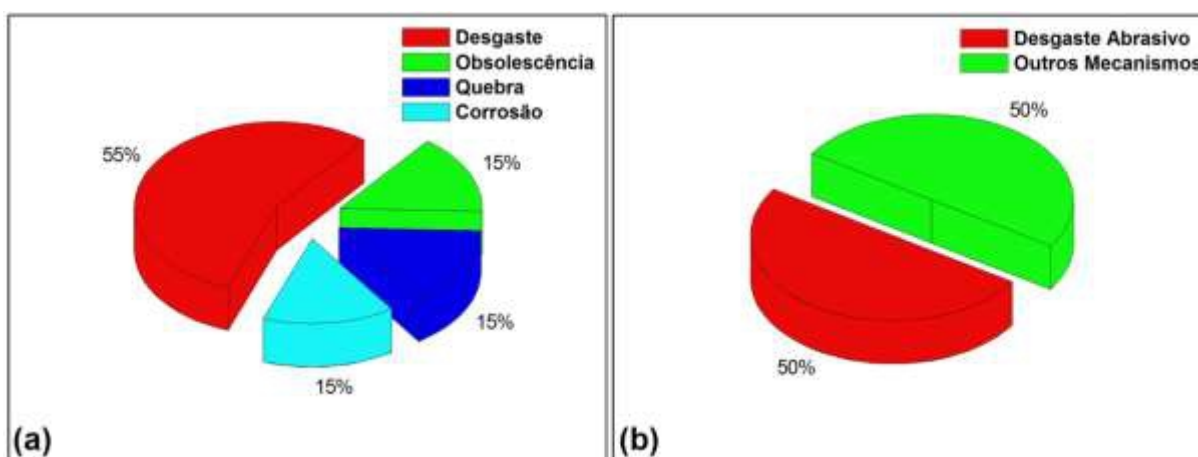
1	INTRODUÇÃO	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1	CARBONETOS DE TITÂNIO	21
2.2	SOLDAGEM	26
2.2.1	Soldagem a arco elétrico com proteção gasosa e eletrodo de tungstênio	27
2.3	PARÂMETROS DE SOLDAGEM	28
2.4	CARACTERÍSTICAS DOS METAIS DE ADIÇÃO PARA A SOLDAGEM DE REVESTIMENTOS DUROS	30
2.5	INTRODUÇÃO AOS MECANISMOS DE DESGASTE	31
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	33
3.1	PROCESSAMENTO DOS CAVACOS DE TITÂNIO	33
3.2	PROCESSO DE LIMPEZA	33
3.3	MOAGEM.....	35
3.4	CLASSIFICAÇÃO DOS CAVACOS MOÍDOS	37
3.5	PREPARAÇÃO DOS CONSUMÍVEIS DE SOLDAGEM.....	37
3.5.1	Preparação da “Mistura Carbonetante”	37
3.5.2	Deposição da Mistura Carbonetante Sobre o Metal de Base	38
3.6	SOLDAGEM.....	40
3.6.1	Equipamento de Soldagem	40
3.6.2	Parâmetros de Soldagem	41
3.7	PREPARAÇÃO DE AMOSTRAS	41
3.7.1	Identificação das amostras	41
3.7.2	Corte das Amostras	42
3.7.3	Preparação das Superfícies.....	43
3.8	ANÁLISE ESTRUTURAL DAS AMOSTRAS	43
3.9	PROCESSAMENTO DAS IMAGENS	46
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	49
4.1	ANÁLISE MACROGRÁFICA.....	49
4.1.1	Cordões de Solda	49
4.1.2	Taxa de Diluição	50
4.2	DIFRAÇÃO DE RAIOS-X.....	52

4.3	ENSAIOS DE MICRODUREZA INSTRUMENTADA	55
4.3.1	Microdureza dos Cordões de Solda.....	55
4.3.2	Microdureza dos Carbonetos de Titânio	57
4.3.3	Microdureza da Matriz do Cordão de Solda.....	58
4.4	CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL	59
4.4.1	Análise por Elétrons Retroespalhados - MEV	59
4.4.2	Caracterização Composicional MEV (EDS)	63
4.4.3	Avaliação das propriedades do cordão de solda com a energia de soldagem	66
5	CONCLUSÕES	67
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	69
	REFERÊNCIAS	71
	APÊNDICE A – PUBLICAÇÕES REFERENTES A ESTE TRABALHO.....	77

1 INTRODUÇÃO

A formação de carbonetos metálicos tem sido uma das formas aplicadas no combate ao fenômeno do desgaste, sendo este um dos principais causadores de danos e falhas em peças e equipamentos industriais (1-5). Estima-se que cerca de 2% a 4% do PIB de um país industrializado seja destinado ao reparo de peças e equipamentos sujeitos aos danos causados pelo desgaste (1), se destacando o desgaste abrasivo, como a forma mais comum e mais agressiva (2), Figura 1. Entre as principais características dos carbonetos metálicos se destacam a alta dureza, a estabilidade química e apresentam elevado ponto de fusão (6).

Figura 1: Causa de falhas em equipamentos (a) desgaste e outras causas (b) desgaste abrasivo e outros mecanismos de desgaste.

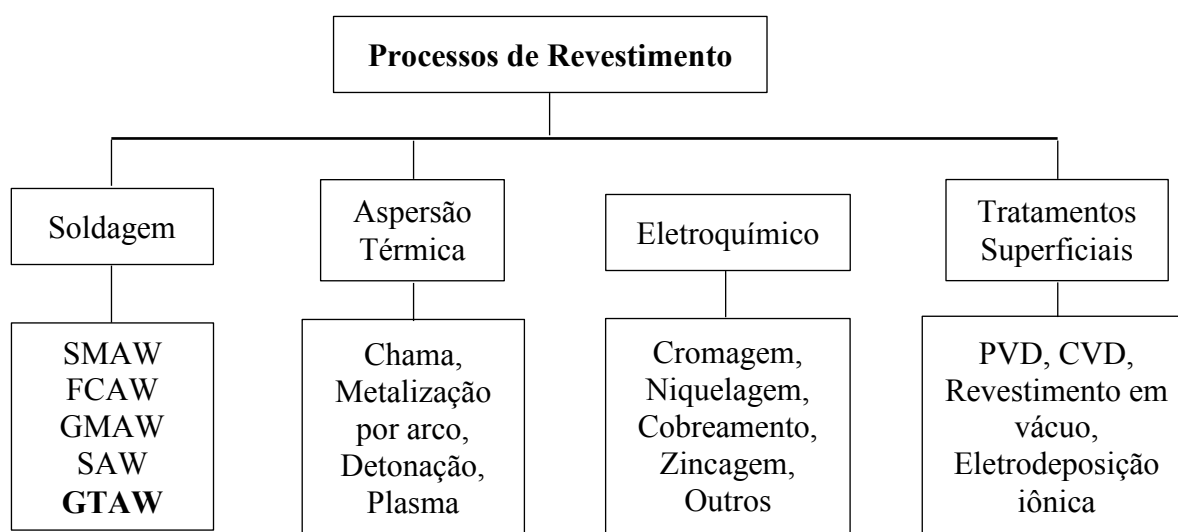


Fonte: Ocorrências do desgaste (a) causa de falhas e danos em máquinas e equipamentos (7). (b) ocorrência dos mecanismos de desgaste (2).

A deposição de revestimentos duros pode ser feita através de diversas técnicas, levando em consideração o mecanismo de desgaste atuante e a espessura da camada de reforço (2,3,8,9), Figura 2. A soldagem é uma técnica que mais tem sido utilizada na deposição de revestimentos duros em componentes sujeitos ao desgaste abrasivo, principalmente na utilização de metais de adição contendo cromo e carbono (Fe-Cr-C) para a formação de carbonetos de cromo (2150HV) (5,6,10-15). Por outro lado, a literatura reporta que existem outros elementos que na forma de carbonetos, são capazes de apresentar propriedades de dureza semelhante ou superior ao carboneto de cromo, nos quais se destacam o vanádio (2900HV), tungstênio (2350HV), titânio (2800HV), entre outros (5,6).

Dizer que um material é duro não significa resistência ao desgaste, porém esta é a propriedade mais importante para os revestimentos duros e pode ser utilizada como um indicador de resistência à abrasão na comparação de diversos materiais (1). Comercialmente, o cromo é mais viável por apresentar menor custo nos processos de fabricação de consumíveis de soldagem quando comparado aos demais elementos citados, o que favorece a sua utilização majoritária na deposição de revestimentos duros.

Figura 2: Técnicas para deposição de revestimentos



Fonte: adaptado de Bulloch (3)

Diversas ligas de titânio, ASTM F67 (titânio puro) e ASTM F136 (Ti6Al4V), têm sido bastante utilizadas na fabricação de aparelhos ortodônticos (16-18). Geralmente essas peças são obtidas por processos de usinagem onde é gerado um volume elevado de resíduos (cavacos). A grande vantagem destas ligas é que elas são constituídas em sua grande parte do elemento titânio (mínimo de 90% em massa), tornando assim um grande atrativo no estudo e análise destes cavacos para aplicação em insumos para a formação de elementos resistentes ao desgaste e assim criando soluções alternativas para a reinserção destes resíduos na cadeia produtiva.

O objetivo deste trabalho é estudar a aplicação de cavacos de titânio como insumos de soldagem no metal de adição para a formação de uma solda a base de carbonetos de titânio a partir da deposição da mistura contendo finos de cavacos das ligas de titânio e carbono (grafite em pó) sobre o metal de base e posteriormente fundidos por soldagem a arco elétrico com proteção gasosa e eletrodo de tungstênio, tradução do termo inglês *gas tungsten arc welding* (GTAW) conforme NBR 13043 (19). A metodologia de deposição em forma de pré-

camada (termo utilizado para definir a camada da mistura antes da soldagem) é uma continuidade dos estudos anteriores com a aplicação de cavacos, onde tal mistura era inserida em tubos de aço inoxidável (20).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CARBONETOS DE TITÂNIO

O carbono pode fazer ligação com diversos elementos químicos, porém por convenção o termo carboneto é aplicado para definir os compostos formados a partir da ligação entre elementos com eletronegatividade igual ou menor a do carbono (6,21).

As propriedades de um carboneto são determinadas por três fatores essenciais: a diferença da eletronegatividade entre o elemento e o carbono, a relação entre os raios atômicos, e as características da ligação química (iônica, covalente e metálica) presentes.

Os carbonetos são divididos em quatro grupos:

Carbonetos Intersticiais: formados pelos elementos dos grupos IV, V e VI localizados nos períodos 4,5 e 6 da tabela periódica.

Carbonetos Covalentes: formados pelos elementos boro e silício.

Carbonetos Intermediários: formado pelos metais de transição dos grupos VII e VIII.

Carbonetos Salinos: formados pelos elementos dos grupos I, II e III.

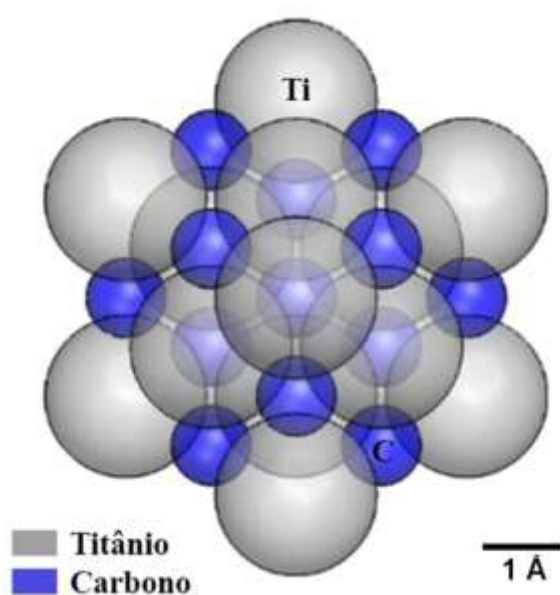
O carboneto de titânio (TiC) está no grupo dos carbonetos intersticiais, que por sua vez são compostos cristalinos entre os metais dos grupos IV, V e VI nos períodos 4, 5 e 6 ligados ao carbono, Figura 3. Geralmente estes metais são arranjados em estruturas compactas e o carbono se aloca nos interstícios octaédricos desta estrutura, Figura 4, por isso o nome carbonetos intersticiais. São compostos que 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 (6).

Figura 3: Metais formadores de carbonetos intersticiais

	Grupo IV	Grupo V	Grupo VI
4º Período	Titânio	Vanádio	Cromo
5º Período	Zircônio	Níbio	Molibdênio
6º Período	Háfnio	Tântalo	Tungstênio

Fonte: adaptado de Pierson (1996) (6)

Figura 4: Carbonetos Intersticiais



Fonte: adaptado de Pierson (1996) (6)

A ocupância do átomo de carbono nos interstícios e o seu arranjo atômico com o metal é que irá determinar a estequiometria do carboneto. Para cada grupo, a estrutura e a composição do carboneto intersticial se torna mais complexa de acordo com a localização do elemento ao longo da tabela periódica, Figura 5.

Figura 5: Estequiometria dos carbonetos intersticiais

Grupo IV	Grupo V	Grupo VI
TiC (cfc)	V ₂ C (hc) V ₄ C ₃ V ₆ C ₅ V ₈ C ₇ VC (cfc)	Cr ₂₃ C ₆ (cfc) Cr ₃ C ₂ (hc)
ZrC (cfc)	Nb ₂ C (hc) NbC (cfc)	Mo ₂ C (hc) MoC (hex)
HfC (cfc)	Ta ₂ C (hc) TaC (cfc)	W ₂ C (hc) WC (hex)

cfc: cúbico de face centrada;

hc: hexagonal compacta;

hex: hexagonal.

Fonte: adaptado de Pierson (1996) (6)

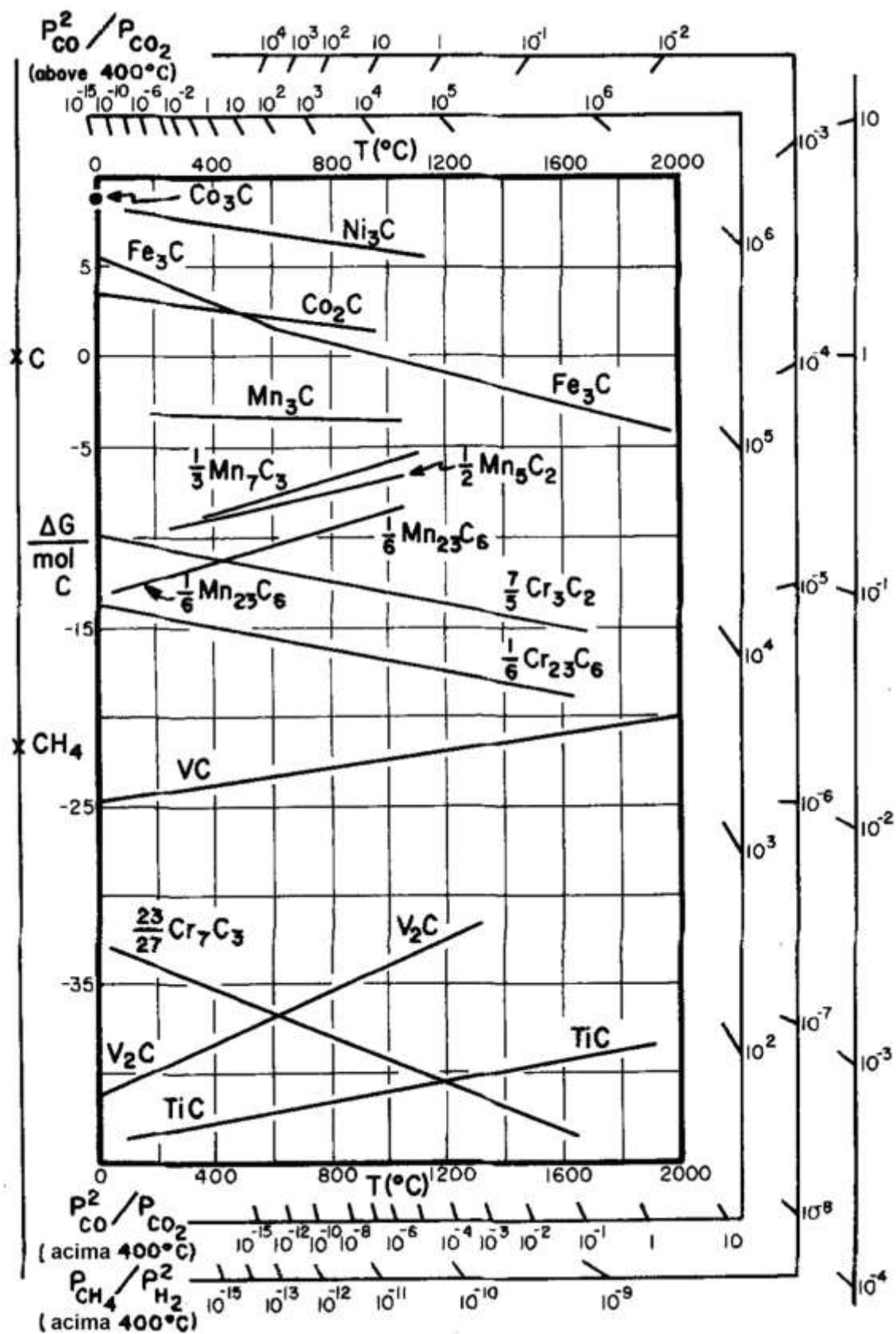
O carboneto de titânio é o que apresenta menor energia de formação, conforme indicado no diagrama de Ellingham, representado pela Figura 6. Quanto menor for a energia de formação, mais espontânea se torna a formação do carboneto e mais estável ele é.

O titânio forma carboneto TiC, com estrutura cristalina CFC (também conhecido como carboneto NaCl por apresentar cristalografia semelhante à estrutura de tal composto), com o carbono ocupando os interstícios octaédricos da célula unitária, Figura 4.

A estequiometria carbono/titânio é de 1:1, por isso os carbonetos de titânio também são conhecidos como monocarbonetos.

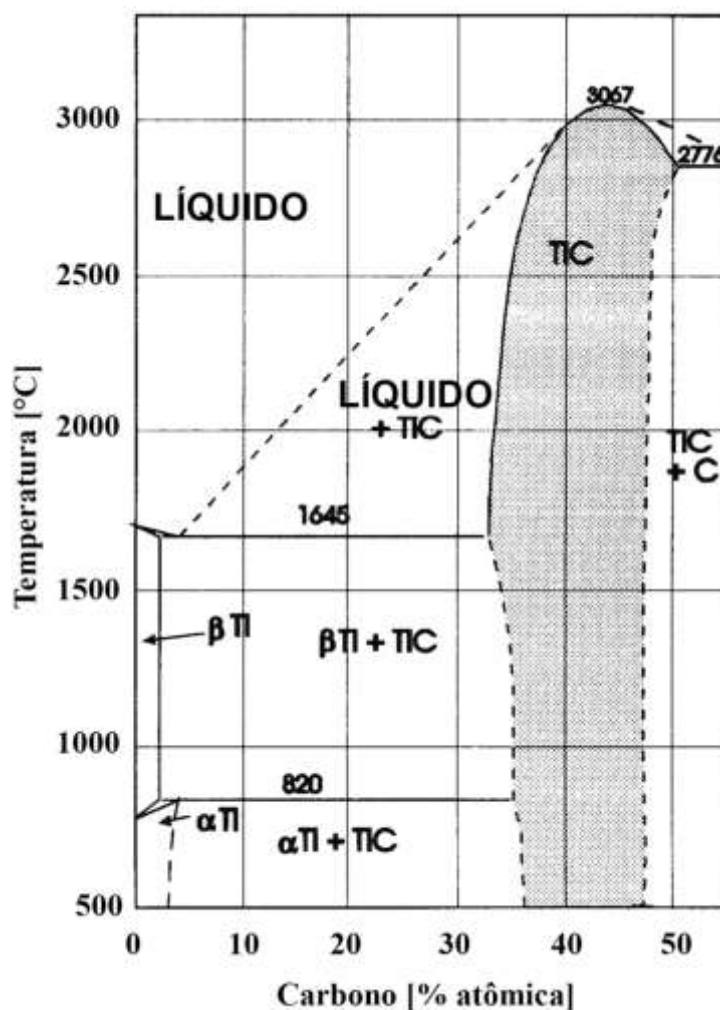
O ponto de fusão dos carbonetos de titânio apresentam temperaturas em torno de 3067 °C, conforme indicado pelo diagrama carbono-titânio apresentado na Figura 7 (6,22).

Figura 6: Diagrama de Ellingham para a formação dos carbonetos



Fonte: Shatysnki (1978) (22)

Figura 7: Diagrama de fase do carbono-titânio. Intervalo de homogeneidade representado pela região hachurada.

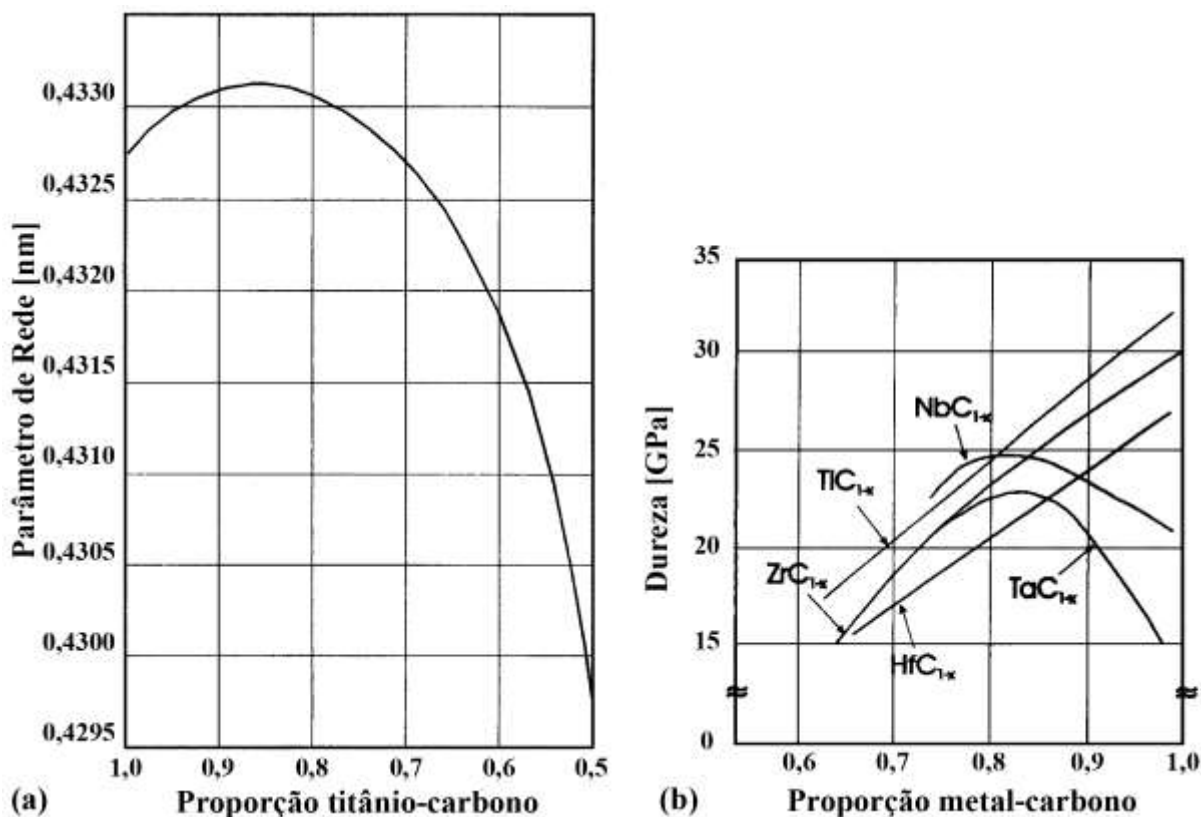


Fonte: adaptado de Pierson (1996) (6)

Alterações nos parâmetros cristalinos dos carbonetos tais como: ausência do átomo de carbono nos interstícios, ausência dos átomos de titânio nos vértices da célula unitária, ou ainda a presença de outros elementos assumindo tanto a posição do titânio quanto do carbono irão causar alterações na estequiometria e na cristalografia resultando em diferenças de comportamento dos carbonetos quanto às suas propriedades. A Figura 8 apresenta a variação dos parâmetros de rede da célula unitária dos carbonetos de titânio com a estequiometria do composto (6). À medida que a relação entre o titânio e o carbono apresenta uma redução nota-se que o tamanho da célula unitária apresenta certa variação.

A dureza dos carbonetos também é outra propriedade que apresenta variações no comportamento de acordo com a estequiometria do composto. A Figura 8(b) mostra que a dureza máxima é atingida quando a relação titânio-carbono se aproxima de 1:1. Os valores de dureza dos carbonetos de titânio podem atingir valores entre 2800 à 3200 HV (5,23).

Figura 8: Variação das propriedades dos carbonetos em função da composição (a) parâmetro de rede (b) dureza



Fonte: Pierson H. O. (1996) (6)

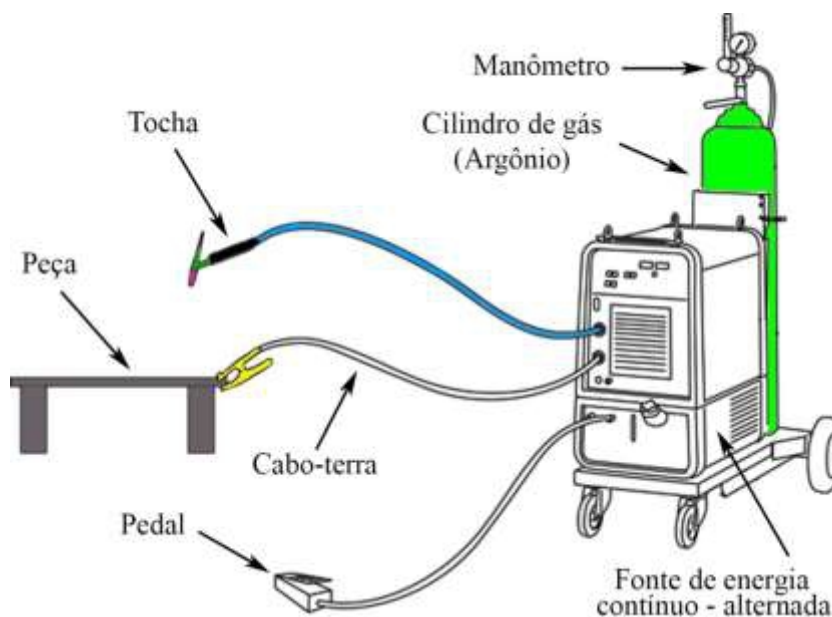
2.2 SOLDAGEM

A deposição de revestimentos duros por soldagem (*hardfacing*) pode ser executada através de todos os processos de soldagem. Entre os processos de deposição de camadas duras por soldagem destacam-se: soldagem ao arco elétrico com eletrodo revestido, conhecida pelo termo em inglês *shielded metal arc welding (SMAW)*, soldagem por arco elétrico com gás de proteção, em inglês *gas metal arc welding (GMAW)*, soldagem a arco elétrico com proteção gasosa e eletrodo de tungstênio, em inglês *gas tungsten arc welding (GTAW)* ou ainda *tungsten inert gas (TIG)*, entre outros. As características de cada aplicação e o tipo de desempenho requerido pelo revestimento irá determinar o processo de soldagem.

2.2.1 Soldagem a arco elétrico com proteção gasosa e eletrodo de tungstênio

A soldagem a arco elétrico com proteção gasosa e eletrodo de tungstênio (*Gas Tungsten Arc Welding - GTAW*) é aplicada para a soldagem de aços ao carbono, aços inoxidáveis, alumínio, magnésio, cobre, titânio e ainda para a soldagem de materiais dissimilares. A temperatura de fusão necessária para soldar os materiais é obtida mantendo o arco entre o eletrodo de tungstênio e o metal de base. A temperatura na poça de fusão pode atingir 2500°C sendo esta protegida por um gás inerte (argônio, hélio) da contaminação atmosférica (24,25). 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, Figura 9.

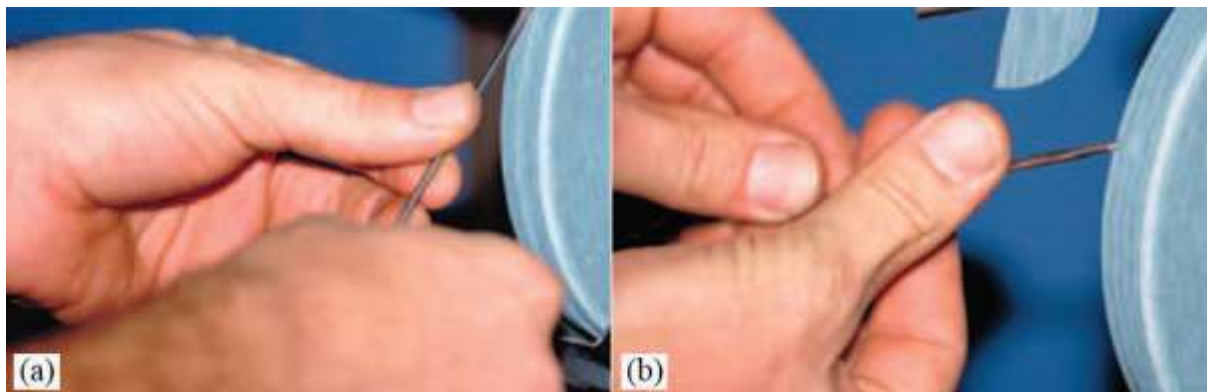
Figura 9: Equipamento de soldagem a arco elétrico com proteção gasosa e eletrodo de tungstênio (*GTAW*)



Fonte: adaptado de Trade Equipment (26).

A seleção do eletrodo não consumível deve ser feita baseada no metal de base, polaridade da máquina e corrente de soldagem. Os eletrodos são fabricados de tungstênio puro ou ligados e são padronizados pela *American Welding Society (AWS)* (27). A afiação do eletrodo também é de extrema importância durante a soldagem, quando feita de forma incorreta pode causar instabilidade no arco elétrico, devido à orientação das linhas formadas resultantes da abrasão no esmeril, Figura 10, formando uma solda com má qualidade.

Figura 10: Afiação do eletrodo não consumível (a) forma correta: eletrodo perpendicular ao centro de giro do rebolo, (b) forma incorreta: eletrodo paralelo ao centro de giro do rebolo.



Fonte: Jeffus, L. (24)

A proteção da poça de fusão é feita através da aplicação de um gás de proteção onde se destaca a utilização do argônio e do hélio. O argônio é o gás mais utilizado devido fatores econômicos. A vazão do gás deve ser ajustada o suficiente para evitar que os gases presentes na atmosfera interajam com a poça de fusão causando descontinuidades na solda.

A partir de seleção correta dos equipamentos e acessórios para a soldagem, o próximo passo será definir os parâmetros de soldagem.

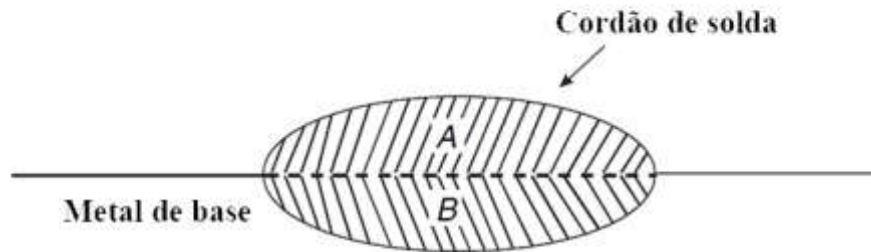
2.3 PARÂMETROS DE SOLDAGEM

Independente do processo utilizado na deposição da camada dura, os revestimentos devem possuir similaridade na geometria e metalurgia da solda aplicada. A solda deve apresentar condições toleráveis de descontinuidades para que não comprometa o desempenho da camada depositada. Os parâmetros de soldagem devem ser selecionados a promover melhores aspectos quanto ao acabamento, fusão do metal de adição e metal de base, reforço (A), penetração (B) e consequentemente a taxa de diluição (δ).

A taxa de diluição (δ) representa a proporção do metal de base que participa da poça de fusão (2,24,28). A taxa de diluição (δ) é um fator de extrema importância na soldagem de revestimentos duros e é calculada conforme a Equação (1) determinada a partir da área do reforço (A) e da penetração (B) da solda, Figura 11, que por sua vez é influenciada pelos parâmetros de soldagem que irão determinar a energia de soldagem (E), Equação (2).

$$\delta = \left(\frac{B}{A+B} \right) \cdot 100 \quad (1)$$

Figura 11: Cálculo da diluição da solda.



Fonte: Mellor B. G. (2006) (2)

$$E = \eta \left(\frac{V \times I}{v \times 1000} \right) \quad (2)$$

A energia de soldagem E (kJ/mm), é determinada pelos seguintes parâmetros: corrente de soldagem I (A), da tensão de soldagem V (V), velocidade de soldagem v (mm/min) e o rendimento (η) estabelecido de acordo com o processo de soldagem.

A corrente de soldagem (I) é um dos parâmetros mais importante na soldagem por se relacionar com a profundidade de penetração, velocidade de soldagem, taxa de deposição e assim a qualidade da solda. Correntes elevadas vão promover altas taxas de diluição na solda e consequentemente perdas das propriedades na soldagem de revestimentos resistentes ao desgaste. Para o processo *GTAW* três tipos de correntes podem ser selecionados:

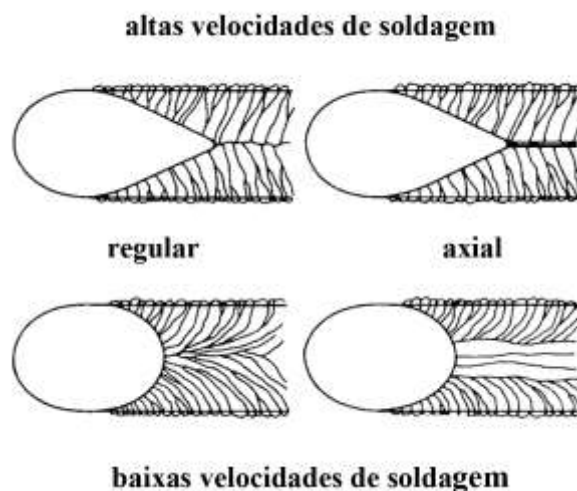
Corrente direta com eletrodo negativo (*direct current electrode negative, DCEN*); solda relativamente fina e com maiores penetrações;

Corrente direta com eletrodo positivo (*direct current electrode positive, DCEP*); cordões de solda mais largos e menores penetrações. Os eletrodos não consumíveis utilizados devem apresentar diâmetros maiores e pontos de fusão elevados.

Corrente alternada (*alternating current*), comum de ser aplicada na soldagem de ligas de alumínio.

A velocidade de soldagem (v) é o deslocamento do arco elétrico sobre o metal de base por unidade de tempo. Variações na velocidade soldagem irão afetar a taxa de resfriamento e a geometria da poça de fusão, podendo afetar a microestrutura da solda (29-31) e assim promovendo alterações na qualidade da solda. A Figura 12 representa as diferentes orientações granulares da microestrutura da solda formadas em baixas e altas velocidades de soldagem. A seleção da velocidade de soldagem deve ser feita de forma criteriosa levando em consideração a operação, o material do metal de base, metal de adição e o processo de soldagem.

Figura 12: Efeito da velocidade de soldagem na microestrutura



Fonte: Kou, Sindo (31)

2.4 CARACTERÍSTICAS DOS METAIS DE ADIÇÃO PARA A SOLDAGEM DE REVESTIMENTOS DUROS

Os metais de adição para a soldagem de revestimentos duros podem ser classificados de acordo com o processo de soldagem (arame tubular, eletrodo revestido, varetas, etc.), a composição química e a aplicação (mecanismo de desgaste atuante) e são comercializados conforme descrições de cada fabricante (24).

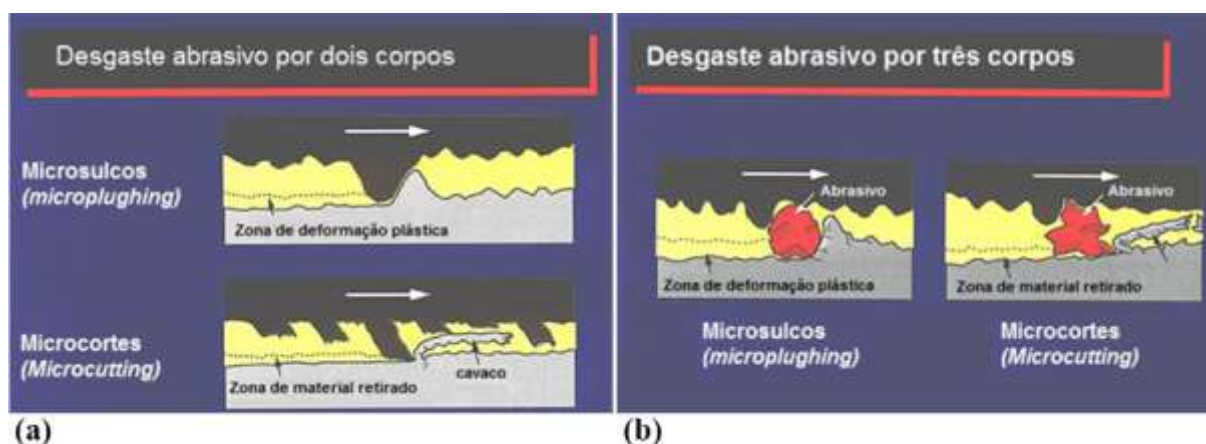
Independente do processo de deposição da solda, o fator comum na composição química entre os metais de adição é que a grande maioria contém elementos formadores de carbonetos. Os mais comuns comercialmente são à base de elementos formadores de carbonetos de cromo também conhecidos como Fe-Cr-C, com adição de outros elementos tais como titânio, vanádio, tungstênio, entre outros.

2.5 INTRODUÇÃO AOS MECANISMOS DE DESGASTE

O desgaste é a perda progressiva de massa e/ou deformação na superfície de corpos em contato. É um fenômeno que não pode ser evitado, porém poder ser controlado e amenizado através da aplicação de diversas técnicas de tratamento superficial. O desgaste não é uma propriedade específica de cada material, pois depende do sistema que o envolve, portanto para definir a técnica que melhor se aplica deve se levar em consideração o mecanismo de desgaste atuante. Para cada mecanismo existe uma determinada técnica que melhor se aplica. Na literatura existe certa controvérsia na definição dos mecanismos de desgaste que se justifica devido à similaridade entre alguns mecanismos e ainda o fato de que o desgaste é um fenômeno com maior complexidade do que se imagina (1,2,4,32). Os mecanismos de desgaste podem ser classificados em quatro grupos: adesivo, abrasivo, por fadiga e por reações triboquímicas (1). Apesar do fenômeno do desgaste ser classificado e analisado individualmente, na prática, as manifestações de tais mecanismos podem ocorrer em conjunto.

O mecanismo mais comum de desgaste é o abrasivo. Cerca de 50% das ocorrências de falhas por desgaste em equipamentos industriais são classificados por este mecanismo, como indicado na Figura 1. O desgaste abrasivo se manifesta em dois tipos: dois corpos, quando no contato entre duas superfícies ocorre a abertura de sulcos naquela que for mais mole e por três corpos, quando entre as superfícies ocorrer à ação de um corpo adicional (2), Figura 13. A partir do momento em que no desgaste abrasivo por dois corpos, as partículas são arrancadas, esse sistema se torna desgaste abrasivo por três corpos.

Figura 13: Desgaste abrasivo por: (a) dois corpos (b) três corpos.



Fonte: Adaptado de *Society of Tribologist and Lubrication Engineers* (33).

O desgaste abrasivo ainda pode ser dividido em três categorias (34):

Desgaste abrasivo à baixas tensões (lixamento), as partículas abrasivas incidem sobre a superfície metálica em baixíssimas pressões e as marcas devido o contato se assemelham ao lixamento, exemplos: pás carregadeiras, caçambas de caminhões basculantes, etc.

Desgaste abrasivo à altas tensões, o contato com a superfície metálica ocorre em determinadas pressões suficiente para fazer com que o abrasivo se fragmente, exemplos: correias transportadoras, moinhos de bolas, etc.

Goivagem (*gouging*), as superfícies metálicas incidem em elevadas pressões sobre as partículas abrasivas submetendo algumas regiões à deformação plástica e o arrancamento de grandes partículas de metais, exemplos: britadores de mandíbulas, moenda de cana, etc.

Para inibir os efeitos de desgaste abrasivo, a técnica de deposição de revestimentos duros por soldagem (*hardfacing*) tem sido uma das mais utilizadas, uma vez que o cordão de solda contém uma espessura relativamente grande quando comparada a outros tipos de tratamentos superficiais onde a espessura da camada de proteção está em escala micrométrica (2).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 PROCESSAMENTO DOS CAVACOS DE TITÂNIO

Neste trabalho foram utilizados cavacos gerados na fabricação de implantes odontológicos a partir da usinagem de ligas de titânio das classes ASTM F67 (grau 4, titânio puro) e F136 (Ti-6Al-4V). A Tabela 1 apresenta a composição química nominal dessas ligas (16,17). Os cavacos foram doados pela empresa *IMPLALIFE BIOTECNOLOGIA* situada na cidade de Jales, estado de São Paulo (35).

Todo o procedimento realizado é representado pelo fluxograma indicado na Figura 14.

Tabela 1: Composição química nominal das ligas de titânio

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

Fonte: Normas ASTM F67 e F136 (16) (17).

3.2 PROCESSO DE LIMPEZA

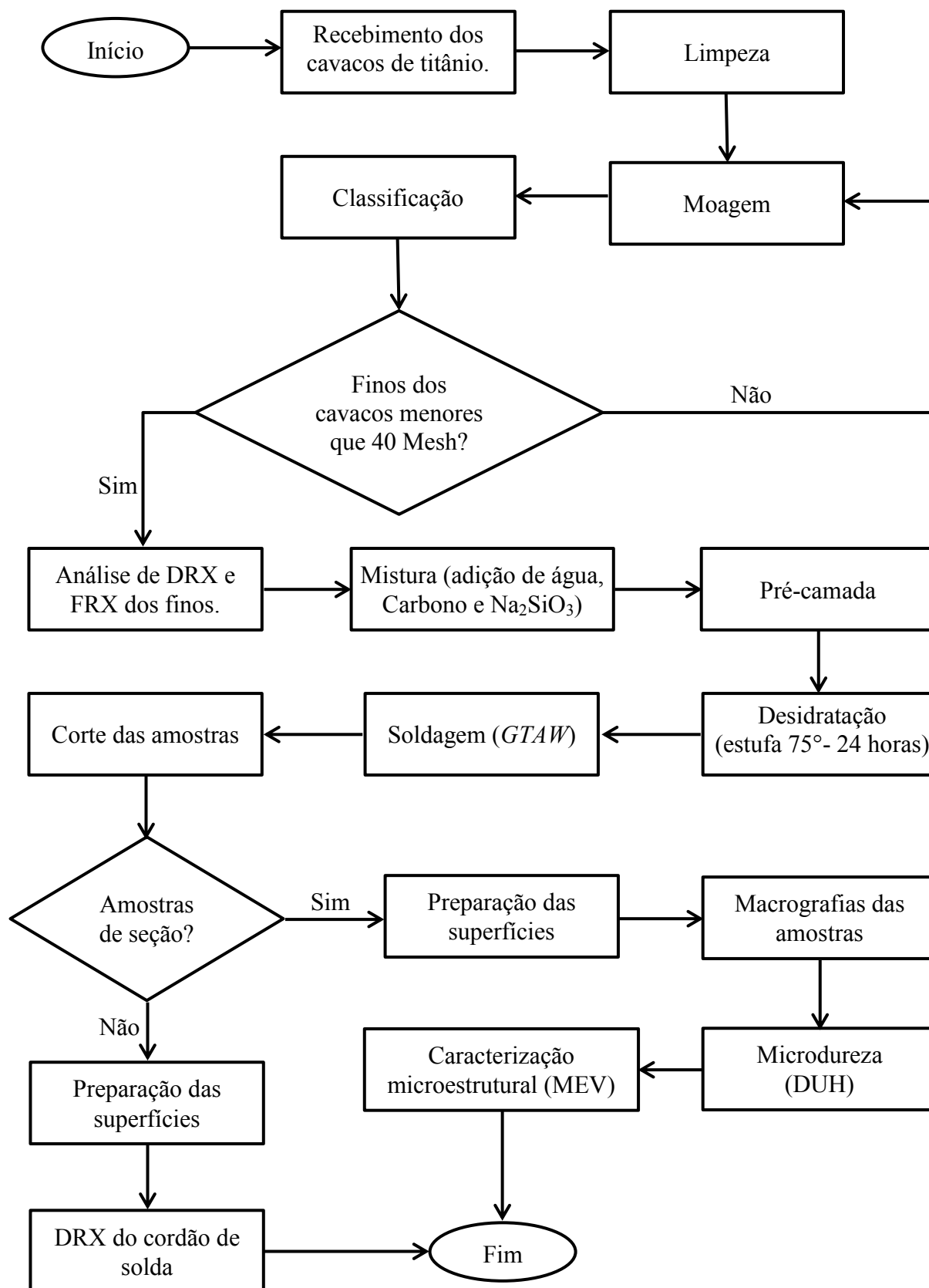
Os cavacos se encontravam contaminados com fluidos de corte oriundos dos processos de usinagem, tornando necessária a aplicação de diversas etapas de limpeza do material. A aplicação de soluções de detergente e água promoveu a remoção dos fluidos de corte. Banhos ultrassônicos também foram aplicados para melhorar a eficiência na remoção das impurezas. A sequência das etapas de limpeza assim como a proporção das soluções utilizadas está representada na Tabela 2.

Tabela 2: Procedimento de limpeza dos cavacos.

Etapas	Descrição	Cavacos [g]	Água [ml]	Detergente [ml]	Tempo
1	Limpeza grosseira	500	4000	200	6 h
2	Limpeza grosseira	500	4000	200	6 h
3	Banho ultrassônico	20	500	30	10 min
4	Banho ultrassônico	20	500	-	5 min

Fonte: Dados da pesquisa do autor

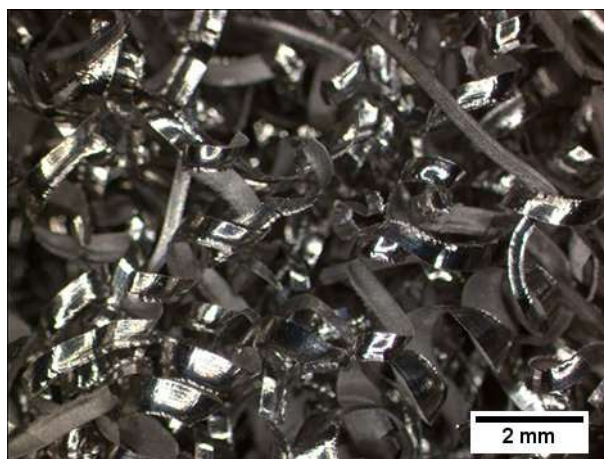
Figura 14: Fluxograma materiais e métodos



Fonte: Dados da pesquisa do autor

Após a limpeza os cavacos foram deixados por 24 horas, no mínimo, em estufa com a temperatura em torno de 75 °C para remoção de umidade antes da operação de moagem. O aspecto típico do material após a limpeza é mostrado na Figura 15.

Figura 15: Aspecto dos cavacos após a limpeza



Fonte: Acervo do autor

3.3 MOAGEM

As ligas de titânio normalmente apresentam baixa tendência ao encruamento, tornando difícil a moagem dos cavacos. Testes preliminares com a moagem dos cavacos em moinho de bolas não foram bem sucedidos. Os cavacos foram colocados dentro de um cilindro com esferas cerâmicas e posto a girar em um torno mecânico horizontal. Após um longo intervalo de tempo observou-se que não houve uma trituração significativa dos cavacos com este método.

Um segundo método para moagem foi desenvolvido para ser utilizado em uma furadeira de coluna. O dispositivo mostrado na Figura 16 era composto por duas peças metálicas, a haste para trituração fixada ao mandril e o porta cavacos fixado na mesa da furadeira. Pequenas quantidades de cavacos (cerca de 10 gramas) eram colocados no porta cavacos, comprimindo-se cuidadosamente a haste contra a carga, com a rotação de 100 RPM, promovendo o “quebramento” dos cavacos contínuos e gerando uma pequena quantidade de finos de titânio. Este método apresentou baixa eficiência de moagem e granulometria dos cavacos grosseira, tornando assim exaustiva a preparação dos consumíveis de soldagem que se baseava na fabricação de arames tubulares experimentais que se fazia a partir do enchimento de tubos de aço inoxidável com a mistura carbonetante (20).

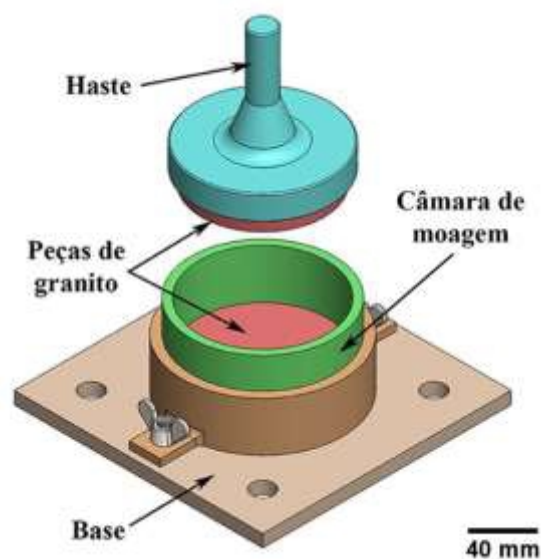
Figura 16: Dispositivo metálico para moagem de cavacos



Fonte: Acervo do autor

Baseado no funcionamento de um moinho para grãos, novos testes para moagem foram feitos usando duas peças de granito. Colocou-se uma pequena quantidade de cavacos entre as peças e “esfregou-se” uma contra a outra. Notou-se que rapidamente as fitas de cavacos foram reduzidas a tamanhos menores. Assim um novo dispositivo foi elaborado para instalação na furadeira de coluna, com a fixação de peças de granito na região de moagem dos cavacos, Figura 17.

Figura 17: Dispositivo com peças de granito



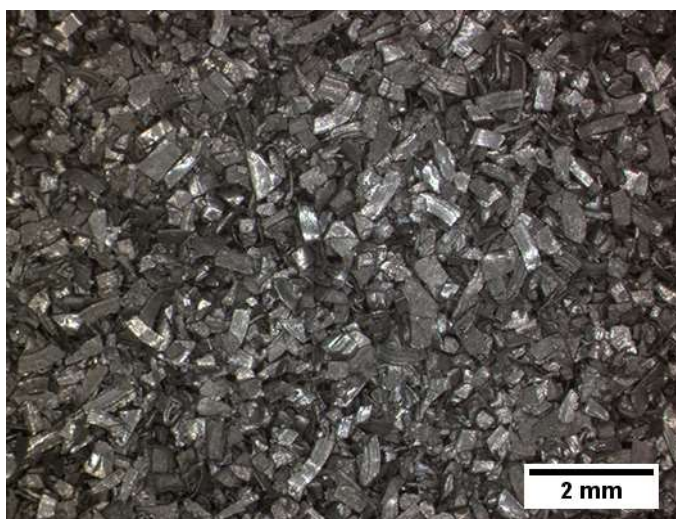
Fonte: Acervo do autor

Este dispositivo para moagem apresentou maior eficiência para a fragmentação dos cavacos de titânio, obtendo-se ao final do processo quantidades e granulometria satisfatórias para a preparação da mistura utilizada como insumo de soldagem.

3.4 CLASSIFICAÇÃO DOS CAVACOS MOÍDOS

A granulometria alcançada pela moagem dos cavacos possibilitou a classificação dos finos com peneira de 40 Mesh (0,42 mm). Os finos que apresentavam granulometria superior à peneira retornavam à moagem. A Figura 18 mostra o perfil dos cavacos ao longo da moagem e classificação. Os cavacos moídos e classificados tiveram a sua composição química determinada por fluorescência de raios-X (FRX) e a fase dos elementos foram identificadas por técnicas de difração de raios-X (DRX).

Figura 18: Aspecto dos cavacos de titânio após a moagem e classificação



Fonte: Acervo do autor

3.5 PREPARAÇÃO DOS CONSUMÍVEIS DE SOLDAGEM

3.5.1 Preparação da “Mistura Carbonetante”

As ligas de titânio ASTM F67 e ASTM F136 não contém carbono em teores significantes para a formação de carbonetos, forçando a necessidade de adicionar carbono aos cavacos. A mistura de grafite com os cavacos moídos e peneirados foi denominada "mistura carbonetante", termo que será empregado doravante neste texto. Como a concentração dos

elementos formadores de carbonetos nas ligas F67 (titânio puro) e F136 (Ti6Al4V) são diferentes fez-se necessário calcular a estequiometria do carbono para cada liga. Os cálculos estequiométricos foram elaborados com base na composição nominal das ligas de titânio, Tabela 1. Para base dos cálculos foram considerados 10 gramas de cada liga, e a partir de tal foi determinada a quantidade de átomos dos elementos formadores de carbonetos. O titânio e o vanádio (presente na liga F136) são formadores de carbonetos na forma MC, ou seja, um átomo de carbono para um átomo do metal (6). Desta forma calculou-se a massa dos átomos de carbono para promover a reação formando os carbonetos. Os resultados dos cálculos estequiométricos são indicados na Tabela 3.

Tabela 3: Resultados dos cálculos estequiométricos (g/g)

Liga	$m_{\text{cavacos de titânio}}/m_{\text{carbono}}$
F67	10 : 2,5
F136	10 : 2,3

Fonte: Dados da pesquisa do autor

Prevendo eventuais perdas de carbono durante a soldagem e visando maximizar a formação de carbonetos, foi acrescentado cerca de 10% de carbono acima dos resultados encontrados nos cálculos estequiométricos apresentados na Tabela 3. Desta forma é mais provável que todo o titânio presente na mistura não fique em solução sólida, mas sim na forma de carbonetos. Assim, a proporção em massa, $m_{\text{cavacos de titânio}}/m_{\text{grafite}}$ foi definida em 10:3. Houve a adição de 2% em massa de silicato de sódio (Na_2SiO_3) e pequenas dosagens de água destilada. O Na_2SiO_3 promove a vitrificação da mistura à medida que a desidratação ocorre, evitando assim que o fluxo do gás de proteção utilizado na soldagem expulse a mistura colocada sobre o metal de base. A concentração dos elementos presentes nas misturas carbonetantes foi determinada por uma balança eletrônica INSTRUTHERM, modelo BD 650, com precisão de 0,1 g.

3.5.2 Deposição da Mistura Carbonetante Sobre o Metal de Base

A mistura carbonetante foi utilizada para definir a camada depositada sobre a superfície do metal de base antes do processo de soldagem conforme técnica aplicada por demais autores (36-39).

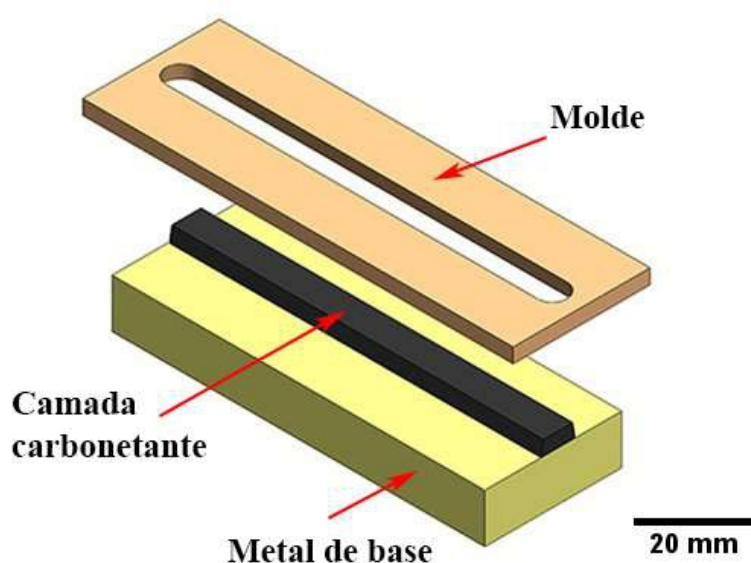
Como metal de base foram utilizadas barras de aço SAE 1020 nas medidas de 10 mm x 32 mm x 80 mm. As superfícies das peças foram esmerilhadas para retirada da camada de óxidos provenientes dos processos de fabricação e em seguida limpas em álcool etílico. Uma camada da mistura carbonetante foi depositada formando uma trilha sobre o metal de base com o auxílio de uma chapa com 3 mm de espessura com um canal de 6 mm x 80 mm que foi utilizada como molde, Figura 19. Após o preenchimento do canal, o molde era retirado e o metal de base com a camada da mistura carbonetante eram deixados em estufa com temperatura entre 50 a 75° C por pelos menos 24 horas antes da soldagem. A composição nominal da pré-camada é indicada na Tabela 4.

Tabela 4: Composição química nominal da mistura carbonetante.

Cavacos	Composição Química (% peso)					
	Ti	C	Al	V	Fe	Outros elementos
F136	63,0	22,6	1,8	2,3	6,0	4,3
F67	71,5	22,6	-	-	2,4	3,5

Fonte: Dados da pesquisa do autor

Figura 19: Esquema de preparação da camada com a mistura carbonetante.



Fonte: Acervo do autor

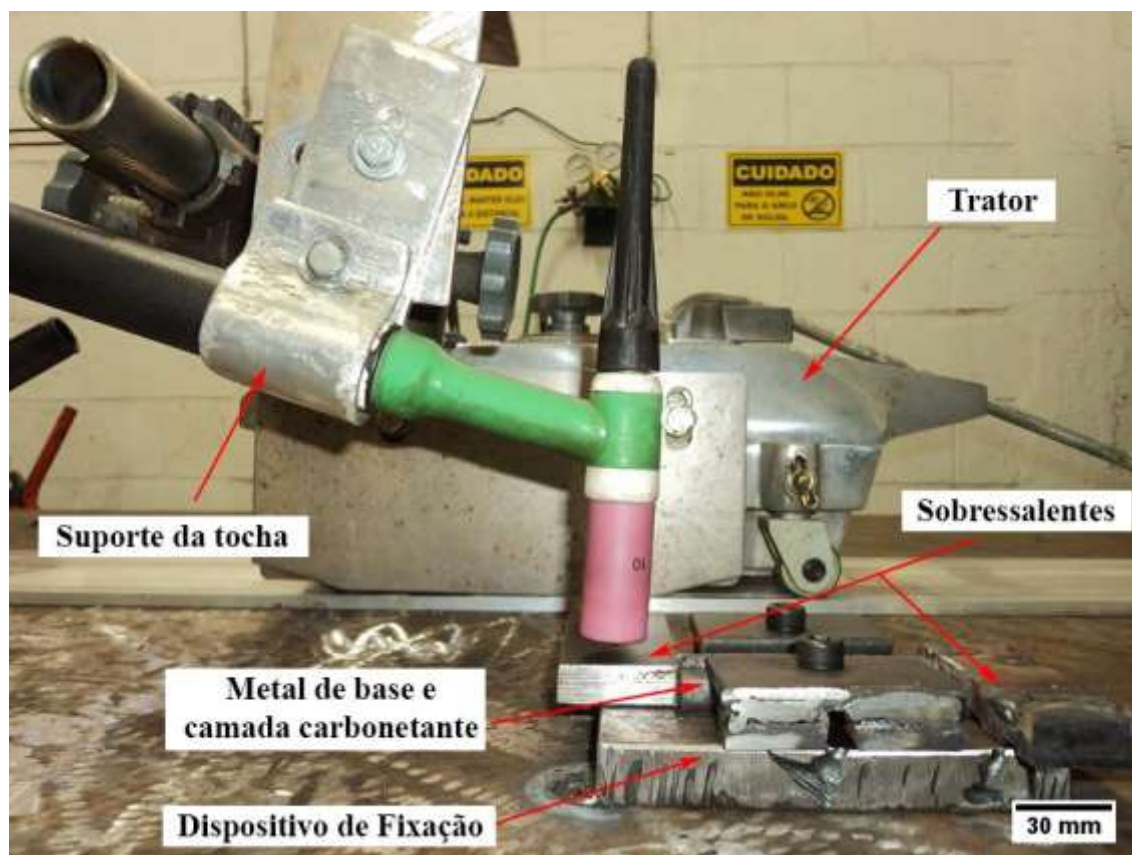
3.6 SOLDAGEM

3.6.1 Equipamento de Soldagem

Para a soldagem do revestimento utilizou-se uma fonte de energia da marca LINCOLN ELECTRIC modelo “PRECISION TIG” 225, com corrente máxima de 230 A. Foi utilizado eletrodo de tungstênio com 2% de tório, diâmetro de 3,25 mm e bocal de proteção nº 10. Foi feita uma adaptação em um trator de corte automático portátil da marca WHITE MARTINS, modelo MC 46, velocidade de 100 a 1000 mm/min, para fixação da tocha.

Durante o processo de soldagem duas chapas metálicas nas dimensões aproximadas de 12,7 mm x 80 mm x 30 mm foram utilizadas como peças sobressalentes para abertura e fechamento do arco elétrico fora da camada da mistura carbonetante com o intuito de evitar que transientes da soldagem afetem a qualidade do cordão de solda, Figura 20.

Figura 20: Processo de soldagem da pré-camada



Fonte: Acervo do autor

3.6.2 Parâmetros de Soldagem

Vários parâmetros de soldagem foram testados e avaliados com o objetivo de determinar aqueles que melhor se aplicaria ao processo de soldagem da pré-camada, assim chegou-se a conclusão que para obter cordões em condições satisfatórias para a preparação de amostras foram aqueles submetidos a máxima corrente de soldagem (I) de 230A. A tensão (V) atuante em corrente máxima é definida pelo fabricante. A vazão do argônio (Q) foi determinada também de acordo com as condições do equipamento. Assim foram estabelecidos diferentes níveis de energias de soldagens (E) aplicados na fusão da mistura carbonetante, que foram determinadas principalmente pela variação da velocidade de soldagem (v), Tabela 5.

Tabela 5: Parâmetros selecionados na soldagem da camada carbonetante.

	I [A]	V [V]	v [mm/min]	Q [l/min]	E [kJ/mm]
Baixo	230	29	175	12	1,8
Médio	230	29	125	12	2,5
Alto	230	29	100	12	3,2

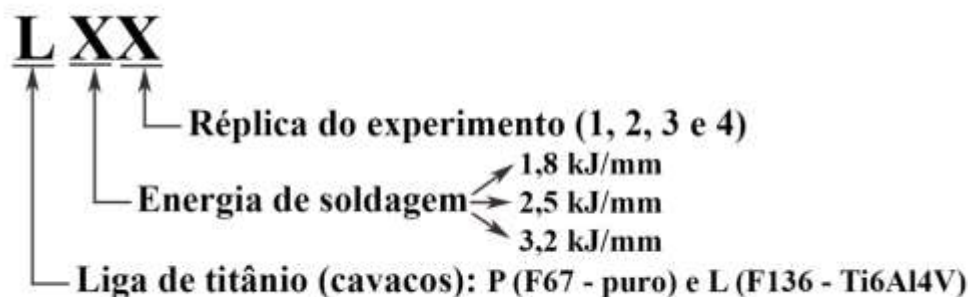
Fonte: Dados da pesquisa do autor

3.7 PREPARAÇÃO DE AMOSTRAS

3.7.1 Identificação das amostras

Inicialmente cada metal de base recebeu uma identificação para controle de diversas variáveis que antecedem a formação do cordão de solda tais como massa do metal de base e pré-camada, tipo da liga de titânio utilizada na mistura, parâmetros de soldagem, entre outras. Após o processo de soldagem, os cordões de solda formados foram avaliados e assim foram selecionados aqueles que melhor favoreciam a fabricação de amostras e por fim receberam uma nova identificação levando em consideração a liga de titânio, a energia de soldagem (E), a velocidade de soldagem (v) e a repetição dos parâmetros, Figura 21. Todos os cordões de solda e suas respectivas identificações estão apresentados na Tabela 6. Quando as amostras eram avaliadas levando em consideração todo o lote de amostras submetidas aos mesmos parâmetros de soldagem, o último símbolo de identificação foi representado pela letra X.

Figura 21: Identificação das amostras



Fonte: Dados da pesquisa do autor

Tabela 6: Identificação das amostras

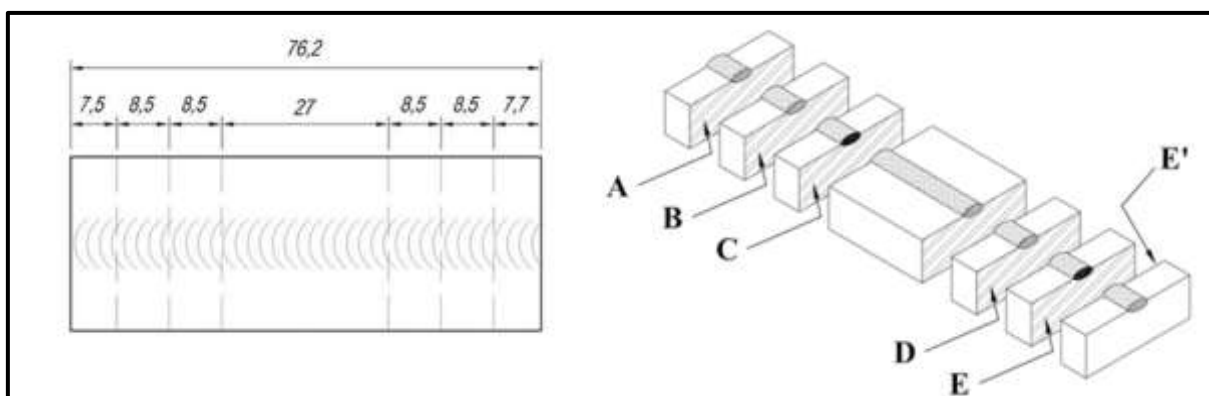
F67			F136		
Código	v [mm/s]	E [kJ/mm]	Código	V [mm/s]	E [kJ/mm]
P11	175	1,8	L11	175	1,8
P12	175	1,8	L12	175	1,8
P13	175	1,8	L13	175	1,8
P14	175	1,8	L14	175	1,8
P21	125	2,5	L21	125	2,5
P22	125	2,5	L22	125	2,5
P23	125	2,5	L23	125	2,5
P24	125	2,5	L24	125	2,5
P31	100	3,2	L31	100	3,2
P32	100	3,2	L32	100	3,2
P33	100	3,2	L33	100	3,2
P34	100	3,2	L34	100	3,2

Fonte: Dados da pesquisa do autor

3.7.2 Corte das Amostras

As amostras foram cortadas em uma policorte da marca PANTEC, modelo PANCUT 80, rotação de 3600 RPM. O cordão de solda foi dividido em diversas seções para análise conforme indicado na Figura 22. Após o corte, as extremidades foram descartadas (A e E') e as demais amostras foram identificadas com o código do cordão, Figura 21, com a adição das letras B, C, D e E conforme a seção indicada na Figura 22 e posteriormente foram embutidas em baquelite e encaminhadas para análises macrográficas, ensaios de microdurezas e caracterização microestrutural. As amostras centrais foram preparadas no sentido longitudinal do cordão e encaminhadas para análises de difração por raios-X (DRX).

Figura 22: Esquema de corte das amostras



Fonte: Dados da pesquisa do autor

3.7.3 Preparação das Superfícies

As amostras foram lixadas e preparadas por métodos convencionais, iniciando em lixa de grana 80 até 1200, e em seguida polidas em pasta de alumina nas granulometrias de 1 μm e finalizando em 0,3 μm (40). Banhos ultrassônicos foram aplicados às amostras após o polimento. O ataque foi feito em nital 2%. Após o ataque aplicou-se novamente banhos ultrassônico para promover a total remoção de resíduos químicos deixados sobre a superfície atacada.

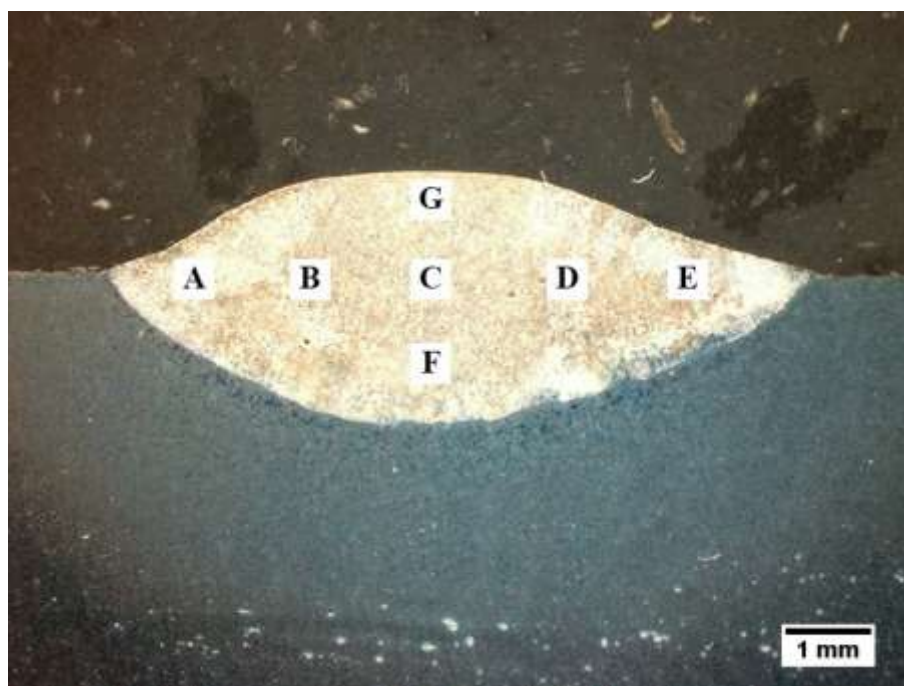
3.8 ANÁLISE ESTRUTURAL DAS AMOSTRAS

As imagens macrográficas utilizadas para a verificação da geometria do cordão de solda, presença de discontinuidades e a taxa de diluição foram feitas em um estereomicroscópio da marca ZEISS, modelo DISCOVERY V.8, acoplado a uma câmera AXIOCAM ERC5S. A taxa de diluição, δ , Figura 11, foi determinada a partir da Equação (1), citada no item 2.3 no capítulo de Revisão Bibliográfica a partir das imagens macrográficas.

As caracterizações microestrutural das amostras foram feitas por microscopia eletrônica de varredura (MEV), com um equipamento da marca ZEISS, modelo EVO LS15, através das técnicas de detecção da emissão de elétrons retroespalhados (BSE), a tonalidade da imagem é definida pela massa atômica do elemento, sendo tons escuros para elementos leves e tons claros para elementos pesados. As imagens foram feitas em diversos pontos distintos das amostras conforme orientação indicada pela Figura 23 com ampliações de 250, 500 e 1000 vezes. Outra técnica utilizada foi a de espectroscopia por dispersão de energia (EDS) para a caracterização composicional das amostras avaliando assim a composição química e

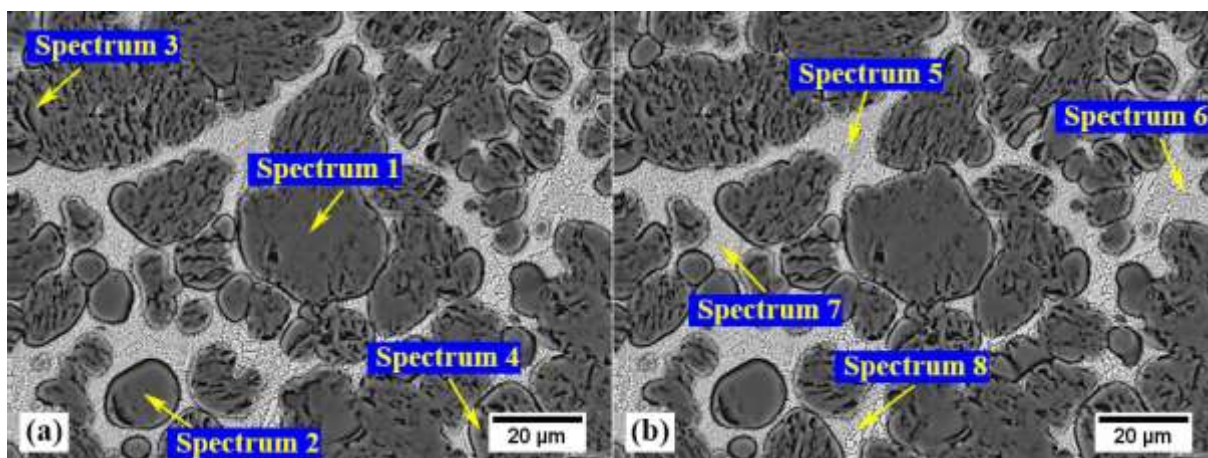
distribuição dos elementos presentes nas amostras. Por esta técnica foram utilizadas a análise puntual, em quatro pontos distintos localizados na matriz e em quatro pontos sobre os carbonetos conforme indicado pela Figura 24, e ainda a análise por linha, para analisar a distribuição dos elementos químicos na interface carbonetos de titânio e a matriz.

Figura 23: Regiões utilizadas de imagens no MEV



Fonte: Acervo do autor

Figura 24: Indicação da aquisição de imagens puntuais por EDS (MEV) (a) carbonetos de titânio (b) matriz



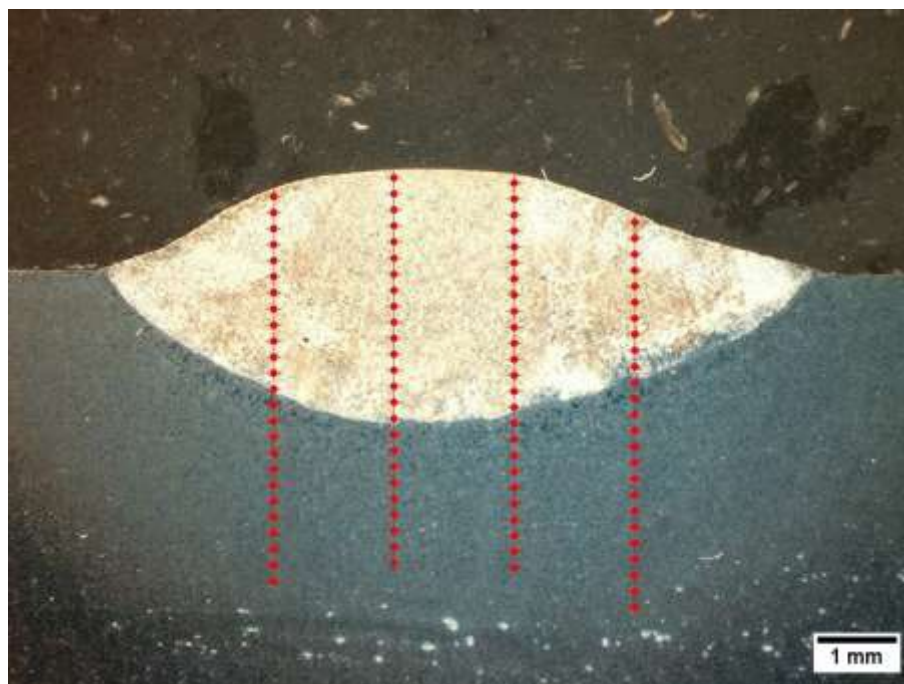
Fonte: Acervo do autor

A identificação das fases nos revestimentos foi realizada por difração de raios-X (DRX) usando um difratômetro SIEMENS DL-5005 equipado com tubo de cobre ($\text{Cu K}\alpha = 1,5405 \text{ \AA}$) e monocromador de grafite. A intensidade difratada pelas amostras foi registrada no intervalo entre 20 a 100° , varrida com velocidade de 2° por minuto. A identificação das fases foi baseada nas fichas cristalográficas CIF, as quais foram consultadas no banco de dados do *Inorganic Crystal Structure Database*, (ICSD) (41).

Por meio de um ultramicrodurômetro digital da marca SHIMADZU, modelo DUH 211S, foram determinadas medidas equivalentes de microdureza Vickers HV^* , conforme estabelecido na norma ISO 14577-1 (42). 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 1N ($\text{HV}0,1$), mantida durante cinco segundos. Para levantamento da variação de microdureza nos cordões de solda, as medidas foram feitas espaçamento de $0,2 \text{ mm}$, até atingirem o metal base, Figura 25. Para fins estatísticos foram feitas o cálculo da média baseado numa série de quatro medições em cada amostra.

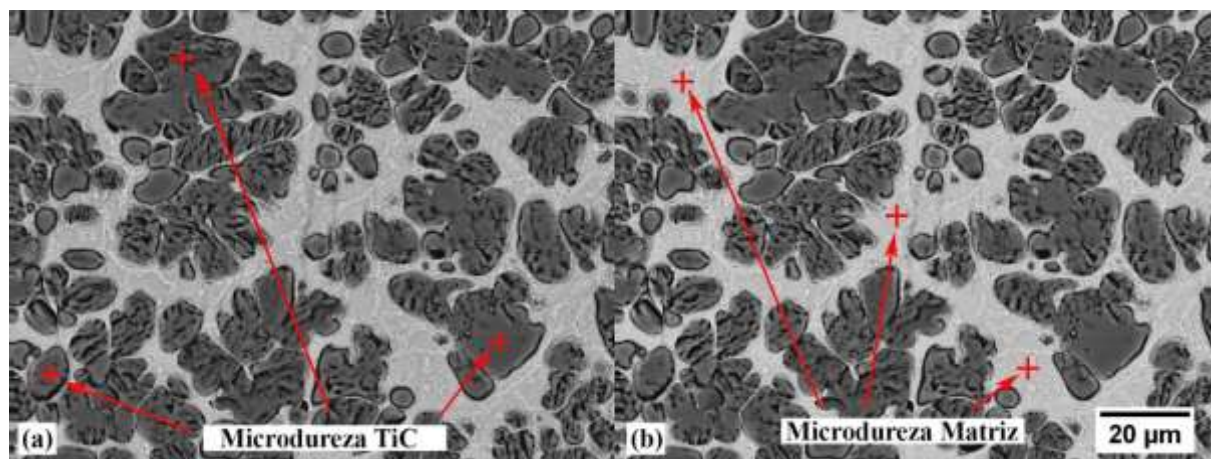
A microdureza dos carbonetos e da matriz da solda foram feitas com cargas de $0,1\text{N}$ ($\text{HV}0,01$) e com o indentador mantido durante cinco segundos sobre a amostra, Figura 26. Os carbonetos mais grosseiros foram selecionados na amostra para evitar a fratura ou movimentação de tais partículas na matriz.

Figura 25: Esquema de medição da dureza ao longo do cordão (L33B).



Fonte: Acervo do autor

Figura 26: Esquema de medição de microdureza nas fases presentes na solda. (a) Carbonetos de titânio (b) matriz



Fonte: Acervo do autor

3.9 PROCESSAMENTO DAS IMAGENS

A análise qualitativa e quantitativa das imagens geradas por MEV foram determinadas a partir dos recursos fornecidos pelo *ImageJ* (43). As imagens foram convertidas em tons de cinzas (*grayscale*) em seguida aplicou-se o recurso *watershed* que faz o “desmembramento” das partículas de carbonetos, Figura 27. O *software* faz a análise a partir da contagem e forma dos contornos ocupados pelos *pixels* em tons escuros na imagem e assim fornece os fatores de forma das partículas (*analyze particle*) nos quais se destacam:

Fração de área, *area fraction* (%Area): representa a proporção da área ocupada pelas partículas determinadas pelo *threshold*. No caso das macrografias, este recurso pode ser utilizado para determinar a fração volumétrica de determinadas fases. Neste trabalho foi utilizado para determinar os carbonetos de titânio.

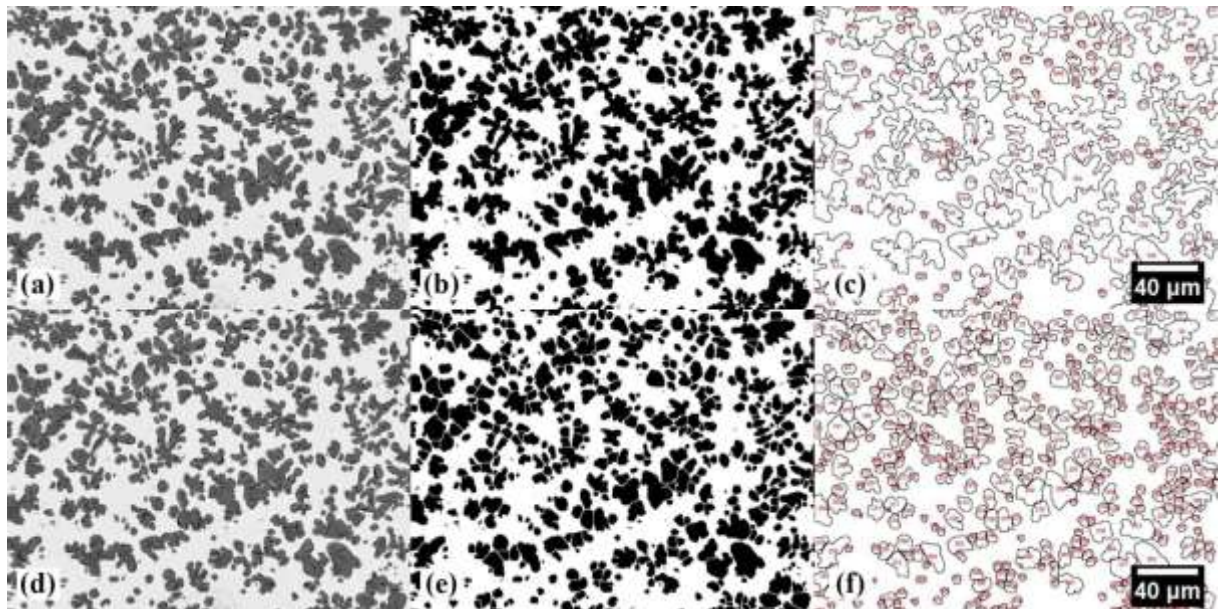
Diâmetro de Feret, *Feret's diameter* (Feret): é o diâmetro de uma circunferência que apresenta a mesma área da partícula em questão, Equação (3). A partir do diâmetro de Feret tem se uma estimativa do tamanho da partícula.

$$Feret = \sqrt{\frac{4\pi}{Área_{particula}}} \quad (3)$$

Circularidade, *circularity* (*Circ*): Indica a forma geométrica das partículas onde leva em consideração a comparação com uma circunferência onde o valor apresentado é 1. A Equação (4) calcula o valor da circularidade levando em consideração a área (A) e o perímetro (P) da partícula:

$$Circ = 4\pi \times \left(\frac{A}{P^2} \right) \quad (4)$$

Figura 27: Processamento de imagens no *ImageJ* com a aplicação do recurso *watershed* (a) imagem real. (b) aplicação de *threshold* (c) análise das partículas, presença de áreas maiores que o tamanho real (d) imagem real (e) aplicação de *threshold* e *watershed* (f) análise das partículas com maior precisão.



Fonte: Acervo do autor

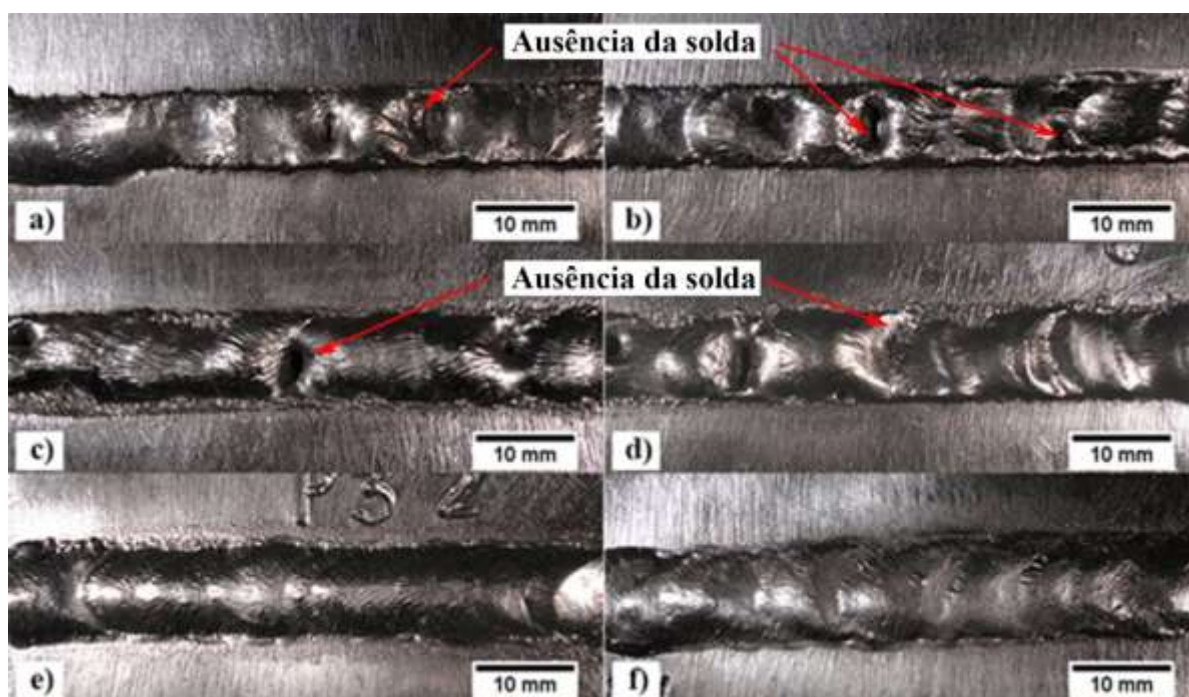
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 ANÁLISE MACROGRÁFICA

4.1.1 Cordões de Solda

Os cordões formados a partir da fusão da mistura com cavacos de titânio apresentaram aspectos típicos daqueles obtidos por soldagem *GTAW*. As variações na forma e geometria encontradas nos cordões de solda foram resultantes dos diferentes parâmetros de soldagem. A Figura 28 apresenta alguns exemplos dos cordões formados a partir dos cavacos das ligas ASTM F67 (titânio puro) e ASTM F136 (Ti6Al4V).

Figura 28: Cordões de solda formados a partir de diferentes energias de soldagem. (a) F67, $E=1,8$ kJ/mm (b) F136, $E=1,8$ kJ/mm (c) F67, $E=2,5$ kJ/mm (d) F136, $E=2,5$ kJ/mm (e) F67, $E=3,2$ kJ/mm (f) F136, $E=3,2$ kJ/mm.



Fonte: Acervo do autor

Conforme citado no item 2.3, o parâmetro de soldagem utilizado para o estudo do comportamento da solda foi a energia de soldagem (E), cuja variação se deu a partir da mudança na velocidade de soldagem (v). Pela Figura 28 também é possível observar que a qualidade do cordão é influenciada pela variação na energia de soldagem. Os cordões formados com energia de soldagem mais elevada (3,2 kJ/mm) apresentaram qualidade

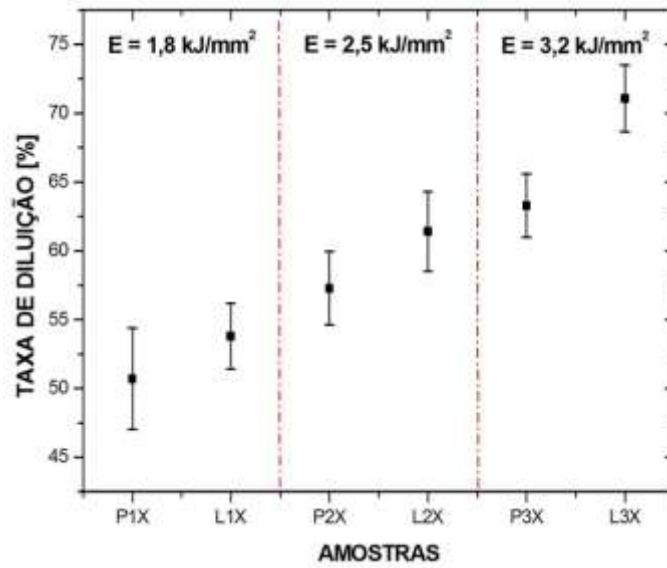
superior se comparado às demais amostras, mostrando estar livre de trincas, porosidades e vazios ao longo da solda. Também é possível notar um alongamento na largura do cordão com o aumento da energia de soldagem, consequência da poça de fusão que tende a apresentar um perfil arredondado e com aumento na largura, quando submetidas a baixas velocidades de soldagem (44).

4.1.2 Taxa de Diluição

A literatura recomenda que para revestimentos duros depositados por soldagem *GTAW*, a taxa de diluição apresente valores médios entre 10% a 20% (24,45). Quando a taxa de diluição apresenta valores elevados, a solda tende a manifestar menor influência do metal de adição (no caso, os elementos formadores de carbonetos de titânio), que é o responsável pela melhoria nas propriedades da superfície depositada e então o metal de base passa a ter maior participação na poça de fusão resultando em uma solda com qualidade inferior quando comparada à baixas taxas de diluição.

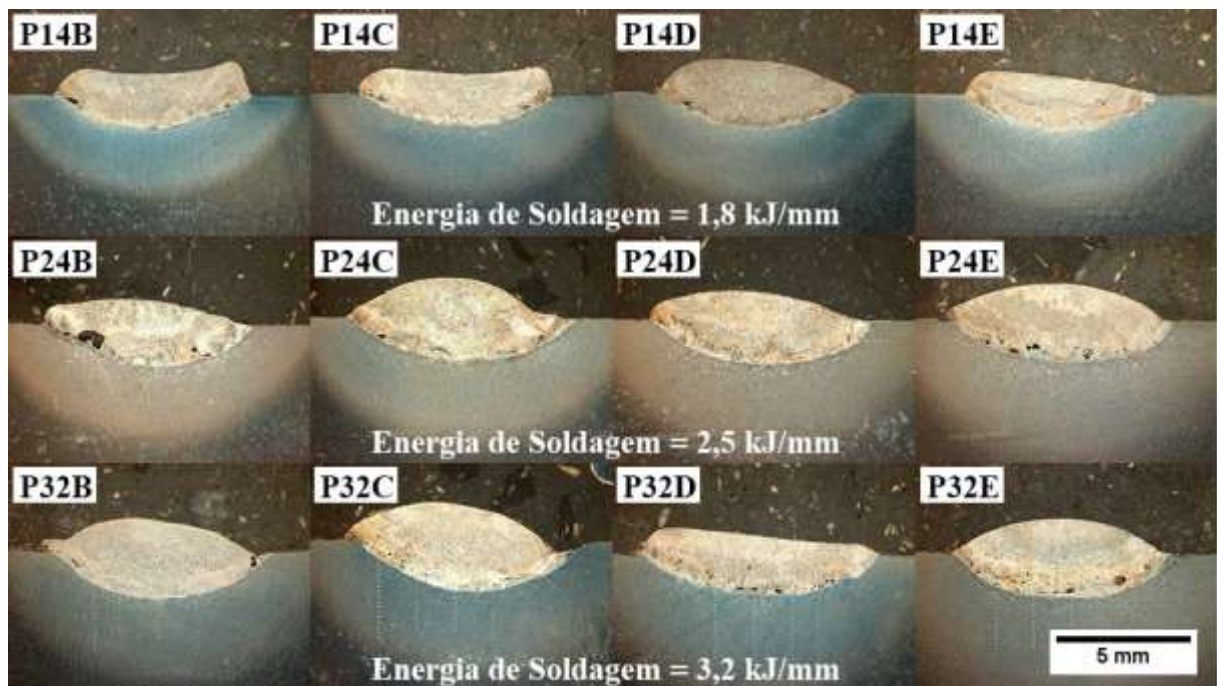
O gráfico representado pela Figura 29 apresenta a taxa de diluição das amostras formadas em diferentes energias de soldagem. Esses valores foram obtidos a partir da análise geométrica das macrografias conforme representada na Figura 30 e Figura 31. Altas energias de soldagem (3,2 kJ/mm) propiciaram elevadas taxas de diluição nos cordões de solda. Porém mesmo considerando as amostras submetidas a baixas energias (1,8 kJ/mm) nota-se que a taxa de diluição ficou acima dos índices recomendados, atingindo valores médios superiores à 50%. A elevada taxa de diluição pode ser justificada pelo fato da elevada corrente elétrica determinada para a soldagem. A corrente elétrica é um dos parâmetros de maior significância na soldagem afetando a geometria do cordão de solda, penetração e consequentemente a taxa de diluição (46). A análise de variância aplicada à taxa de diluição mostrou que pela comparação entre os valores dos cordões em relação à energia de soldagem, as diferenças foram significativas somente naqueles submetidos em alta energia, 3,2 kJ/mm, mostrando que nos demais níveis de energia de soldagem, independente da liga utilizada (F67 e F136), estatisticamente, a taxa de diluição tende a ser igual. Pela avaliação dos valores levando em consideração cada liga submetida às diferentes energias de soldagem, todas apresentaram diferenças significativas, ou seja, a mesma liga apresentou variações nas taxas de diluição pelas diferentes energias de soldagem.

Figura 29: Variação da taxa de diluição das amostras com a energia de soldagem



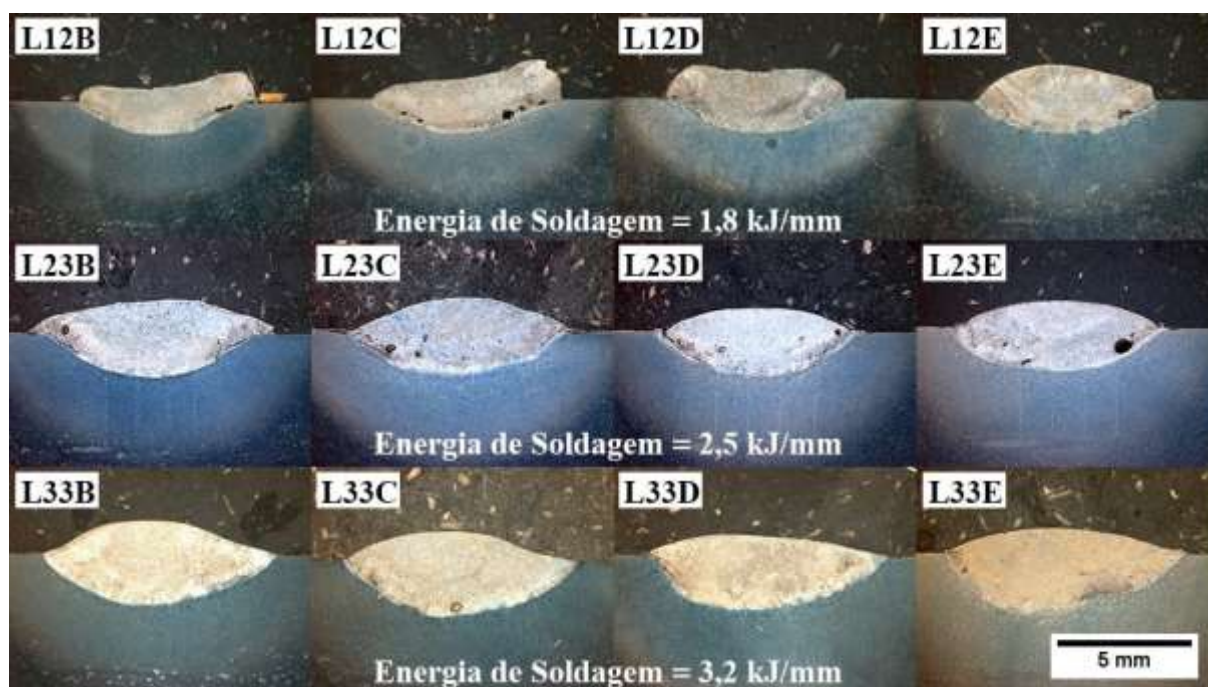
Fonte: Dados da pesquisa do autor.

Figura 30: Cordões de solda formados a partir de cavacos da liga F67



Fonte: Acervo do autor

Figura 31: Cordões de solda formados a partir de cavacos da liga F136



Fonte: Acervo do autor

A zona termicamente afetada (ZTA) apresentou comportamentos diferentes para cada velocidade de soldagem aplicada. Nos cordões em que a camada carbonetante foi fundida em altas velocidades de soldagem, nota-se visualmente que a região da ZTA se manteve praticamente constante e nas condições de baixas velocidades observa-se uma evolução da ZTA ao longo do cordão de solda. Em baixas velocidades de soldagem, o calor de formação da poça de fusão gerado pelo arco elétrico irá afetar um volume maior sendo transmitido lentamente sobre o metal de base reduzindo a taxa de resfriamento do metal fundido, aumentando a geometria da ZTA.

4.2 DIFRAÇÃO DE RAIOS-X

A termodinâmica do sistema Fe-C-Ti é apontada como um sistema muito ativo e complexo, principalmente pela presença do carbono, na qual facilmente migra do TiC para o Fe e vice e versa, dependendo das condições de reações, como a temperatura e a atividade de cada elemento. Os possíveis produtos podem ser TiC, Fe₃C, Fe₂Ti e FeTi que são formados pelas seguintes reações (38):





Os resultados das análises por difração de raios-X determinaram as fases presentes nos cordões de solda, com o auxílio das fichas CIF (41), conforme identificação apresentada na Tabela 7 mostra que o titânio (alfa, hexagonal) foi o elemento encontrado como fase predominante nos cavacos em ambas as ligas, ASTM F67 e ASTM F136, Figura 32. Os ensaios aplicados aos cordões de solda, Figura 33, determinaram que as fases principais são carbonetos de titânio (TiC), ferrita (Fe) e cementita (Fe₃C) residual (36,38,47). Nos cordões de solda, as fases do titânio puro não foram encontradas, indicando que a maior parte do titânio foi usada na formação dos carbonetos.

Os resultados dos ensaios de DRX confirmaram a presença dos carbonetos de titânio, mostrando assim que a formação de tais compostos pela deposição da mistura carbonetante a partir dos cavacos de ligas de titânio e posteriormente fundidas pela técnica de soldagem *GTAW* se mostrou eficiente para esta aplicação.

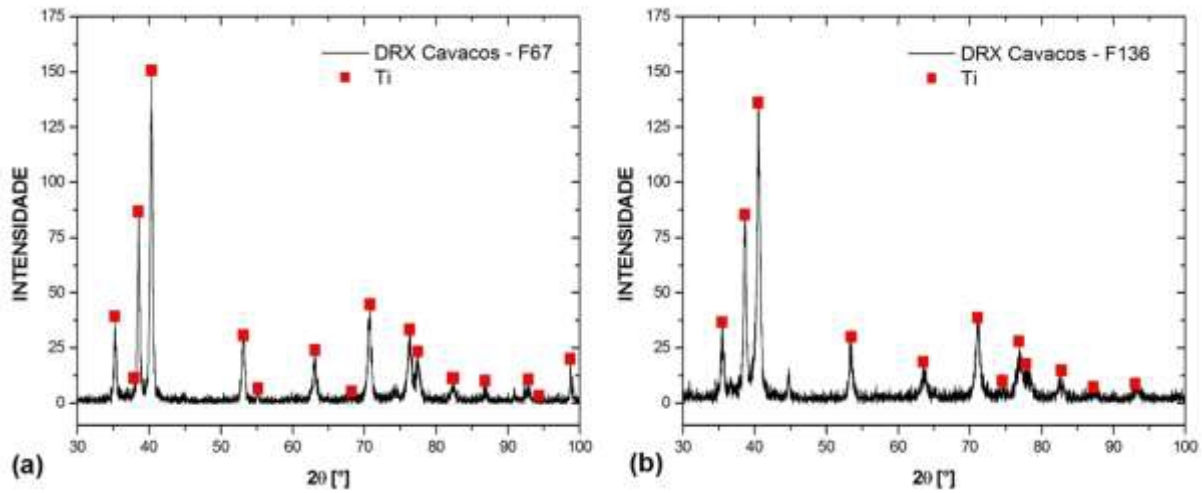
Tabela 7: Parâmetros cristalográficos das fases encontradas por difração de raios-X.

Fase	Ficha ICSD	Estrutura (S.G.*)	Parâmetro de rede [Å]		
			a	b	c
α-Ti	44390	HEX (194)	2,951	2,951	4,679
β-Ti	44391	CCC (229)	3,311	-	-
TiC	44494	CFC (225)	4,318	-	-
Ferrita	53451	CCC (229)	2,866	-	-
Fe ₃ C	38308	ORT (62)	5,092	6,741	4,527

* S.G. corresponde ao grupo espacial da fase ou microconstituente.

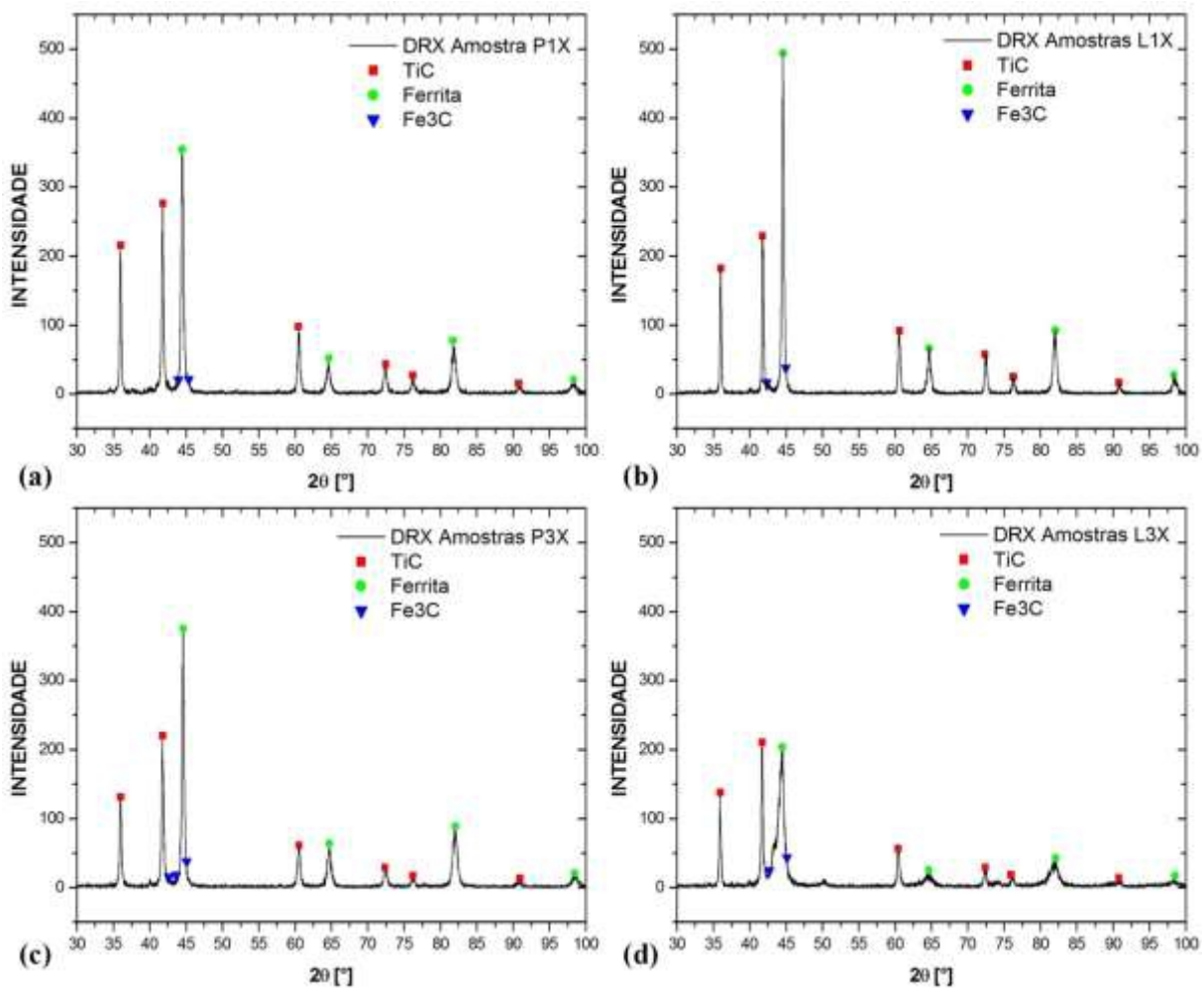
Fonte: Inorganic Crystal Structure Database (41).

Figura 32: Difratoograma dos cavacos de titânio (a) liga F67 (puro) (b) liga F136 (Ti6Al4V)



Fonte: Dados da pesquisa do autor.

Figura 33: Comparação dos resultados de DRX dos cordões solda em diferentes energias



Fonte: Dados da pesquisa do autor.

4.3 ENSAIOS DE MICRODUREZA INSTRUMENTADA

4.3.1 Microdureza dos Cordões de Solda

Os ensaios de medições realizados no DUH mostraram a elevação da microdureza do cordão de solda em relação ao metal de base, assim como a variação do comportamento ao longo da superfície da solda e metal de base quanto à dureza. A elevação na microdureza dentro do cordão de solda foi determinada pela presença dos carbonetos de titânios formados. A Figura 34 apresenta os resultados médios de microdureza das amostras conforme a liga dos cavacos e as energias de soldagem aplicadas.

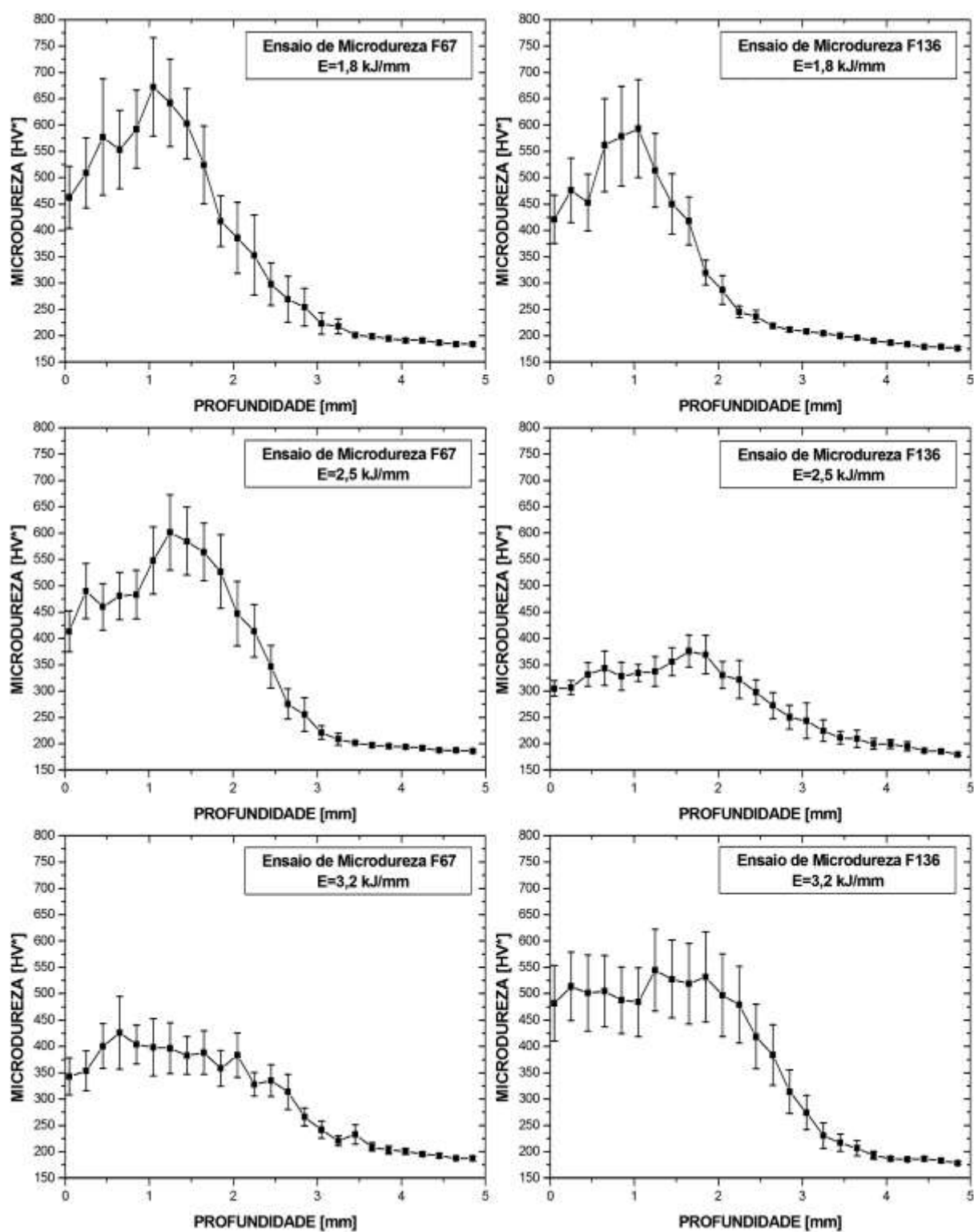
Os resultados experimentais indicaram que o comportamento da microdureza do cordão é influenciado pela fração volumétrica dos carbonetos de titânio, pelo tamanho das partículas duras e ainda pela concentração de carbonetos finos retidos na matriz. As amostras retiradas dos cordões de solda formados a partir de baixas energias de soldagem apresentaram microdurezas elevadas quando comparada as demais amostras.

Na solda, a dispersão apresentada pelos valores de microdureza em cada ponto, foi determinada pelo perfil da região de penetração do indentador Vickers, pelos seguintes fatores: em regiões com grandes densidades de carbonetos de titânios os valores de dureza foram superiores às regiões com baixas densidades, em alguns casos o indentador atingia carbonetos com tamanho elevado propiciando uma dureza superior aos casos em que somente a matriz da solda era atingida.

A profundidade da solda pode ser analisada através das medições de microdurezas. Ainda na Figura 34 é possível observar que as regiões dos gráficos que possuem grandes dispersões nos valores de microdureza apresentaram maior profundidade na medida em que aumenta a energia de soldagem.

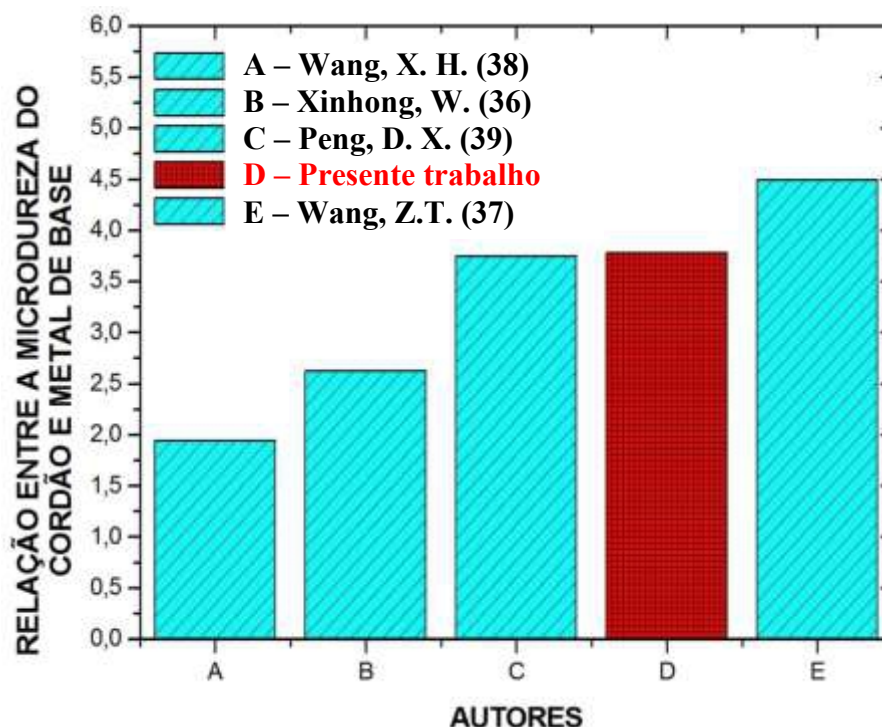
O comportamento da microdureza dos cordões de solda formados a partir da utilização de cavacos de titânio como insumos de soldagem apresentou resultados que podem ser comparados a trabalhos realizados por outros autores que aplicaram técnicas semelhantes a deposição da mistura contendo a camada carbonetante sobre o metal de base porém com a utilização de ligas de ferro-titânio comerciais nos experimentos (36-39). O confronto dos dados foi baseado levando em consideração a relação da microdureza do cordão de solda e o metal de base, conforme indicado pelo gráfico representado pela Figura 35

Figura 34: Comparação do microdureza das diferentes ligas com a variação da energia de soldagem.



Fonte: Dados da pesquisa do autor.

Figura 35: Comparação entre a relação da microdureza do cordão e o metal de base entre diversos trabalhos



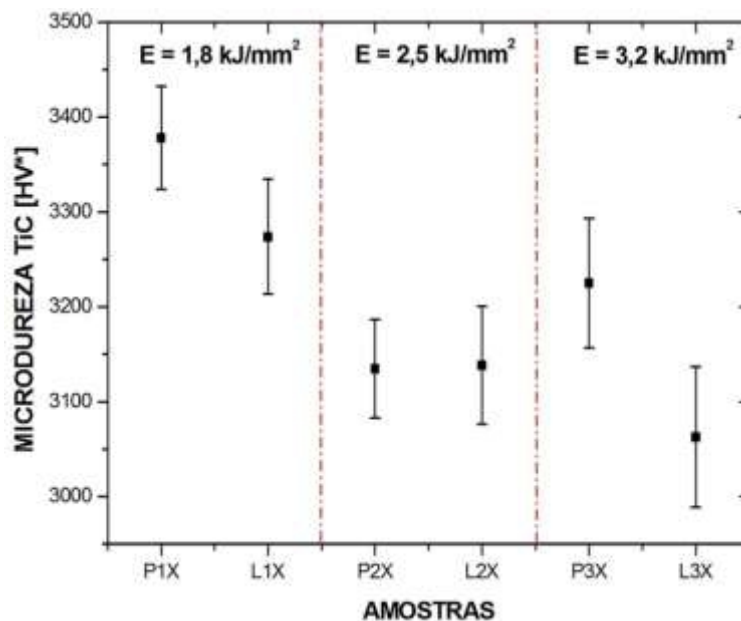
Fonte: Dados da pesquisa do autor.

4.3.2 Microdureza dos Carbonetos de Titânio

Medidas de microdurezas também foram feitas nas partículas de carbonetos de titânio (TiC). A Figura 36 apresenta os valores de microdureza dos carbonetos de titânio para os cordões formados a partir das energias de soldagem determinadas. Baixas energias propiciaram a formação de carbonetos que apresentaram dureza elevada. A posterior avaliação da morfologia dos carbonetos, através das imagens geradas no MEV, mostrou que em baixas energias, as partículas duras apresentaram tamanhos superiores aos demais cordões depositados em energias mais altas, assim atribui-se que a dureza dos carbonetos pode estar relacionada com o seu tamanho. A análise de variância aplicada aos valores de microdureza dos carbonetos baseando-se nas amostras com mesma intensidade de energia de soldagem com as diferentes ligas de titânio (F67 e F136), mostrou que somente os cordões submetidos à energia de soldagem de 2,5 kJ/mm não apresentaram diferenças significantes entre os valores médios.

Os valores médios de microdureza dos carbonetos ficaram entre 3063 HV* a 3378 HV*. A microdureza dos carbonetos de titânio apresentou valores semelhantes aos apresentados pela literatura onde estas partículas apresentam dureza com variações entre 2850 – 3390 HV (22,23).

Figura 36: Variação da microdureza dos carbonetos com a energia de soldagem

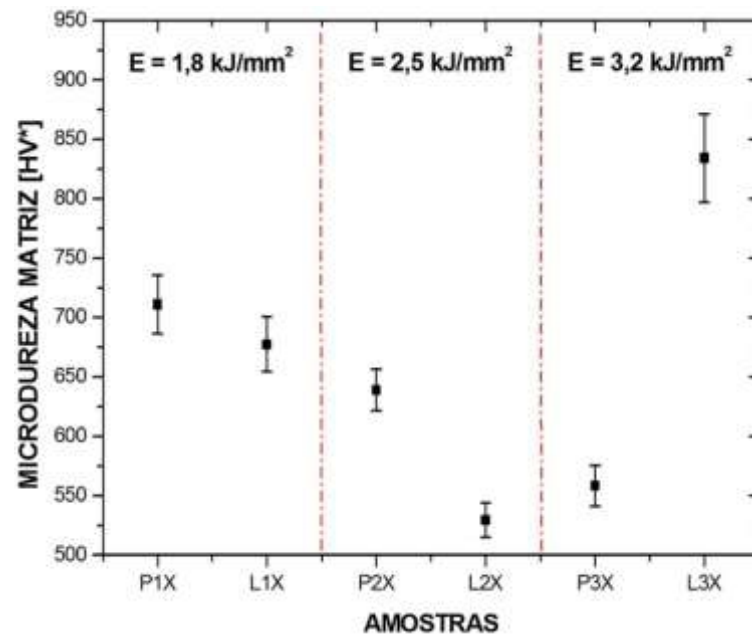


Fonte: Dados da pesquisa do autor.

4.3.3 Microdureza da Matriz do Cordão de Solda

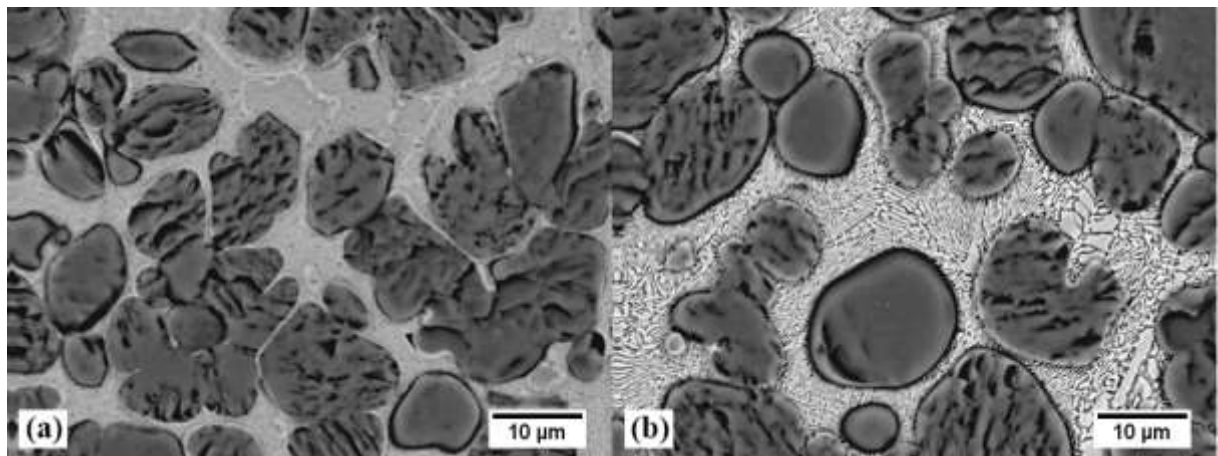
O comportamento da microestrutura da matriz da solda em relação à microdureza também apresentou comportamentos diferentes com a energia de soldagem. Pelo gráfico representado pela Figura 37, é possível observar que, a matriz tende a apresentar uma queda na microdureza de acordo com o aumento da energia de soldagem. As amostras do grupo identificadas como L3X apresentaram um comportamento diferente com valores de microdureza da matriz superior em relação às demais amostras. Pela caracterização microestrutural foi possível observar que a microestrutura de tais amostras também apresentaram fases diferentes às matrizes dos cordões com microdureza inferior, Figura 38. Esta diferença no comportamento da matriz quanto à microdureza e microestrutura para as amostras que apresentaram valores de dureza elevada podem ser justificadas pela provável presença de carbonetos de titânios finos, conforme já citado no item 4.3.1. De acordo com a análise de variância, somente as amostras submetidas a baixas energias (P1X e L1X) não apresentaram diferenças significantes nos valores médios de microdureza da matriz.

Figura 37: Variação da microdureza na matriz com a energia de soldagem.



Fonte: Dados da pesquisa do autor.

Figura 38: Formação de carbonetos finos nos bolsões interdendríticos pouco intensa (menor dureza) em (a) e muito intensa (maior dureza) em (b).



Fonte: Dados da pesquisa do autor.

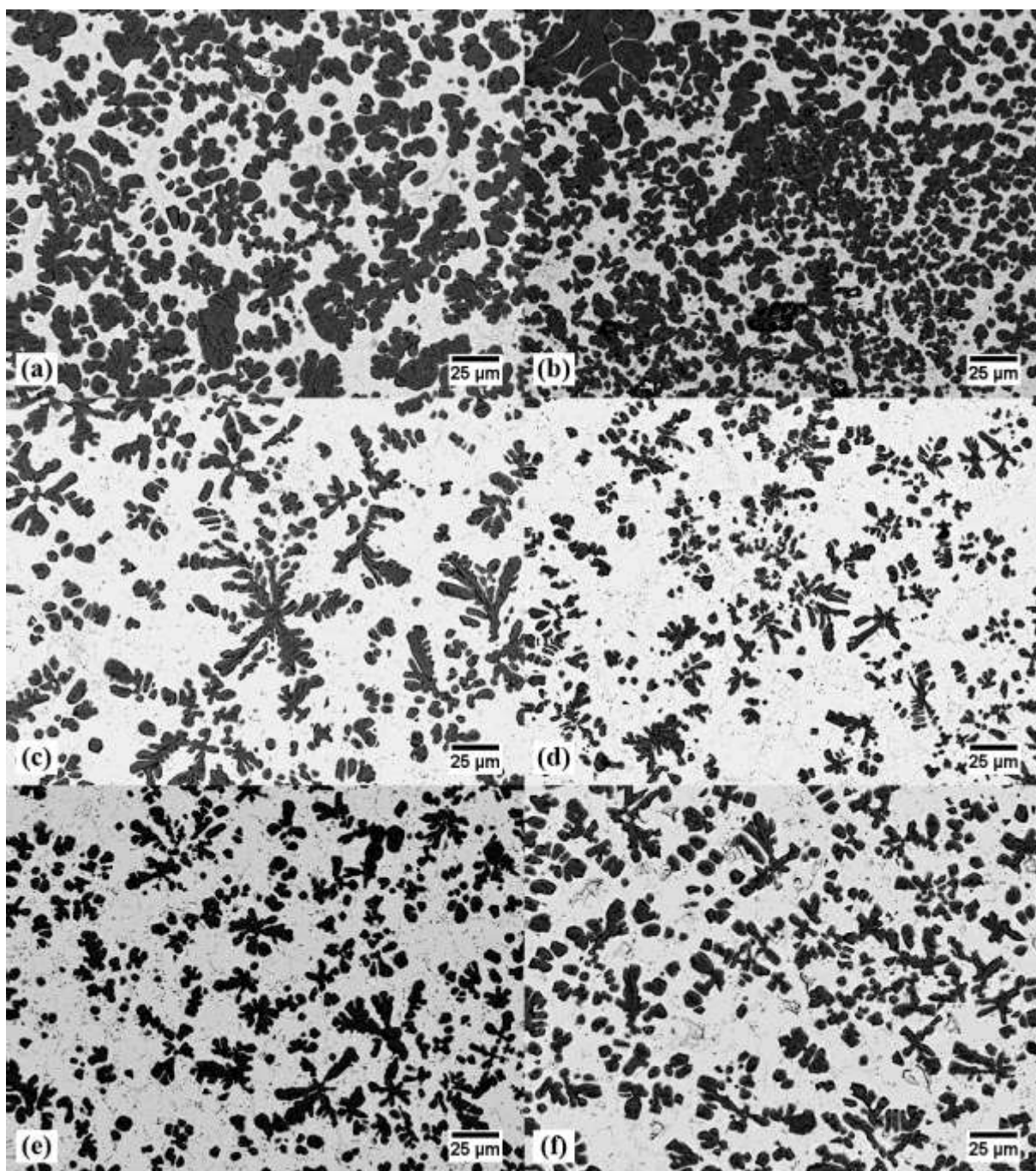
4.4 CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL

4.4.1 Análise por Elétrons Retroespalhados - MEV

As micrografias geradas em MEV por detector de elétrons retroespalhados (BSE) mostra a matriz ferrítica como fase predominante e os carbonetos de titânio, como segunda fase. Nota-

se que a distribuição dos carbonetos foi, em geral, uniforme na matriz, Figura 39 (Regiões conforme indicadas na Figura 23). Os ensaios de microdureza mostraram que a presença de tais partículas promoveu um aumento considerável na dureza superficial da solda. Os carbonetos de titânio apresentaram ramificações dendríticas que é típico de tais partículas.

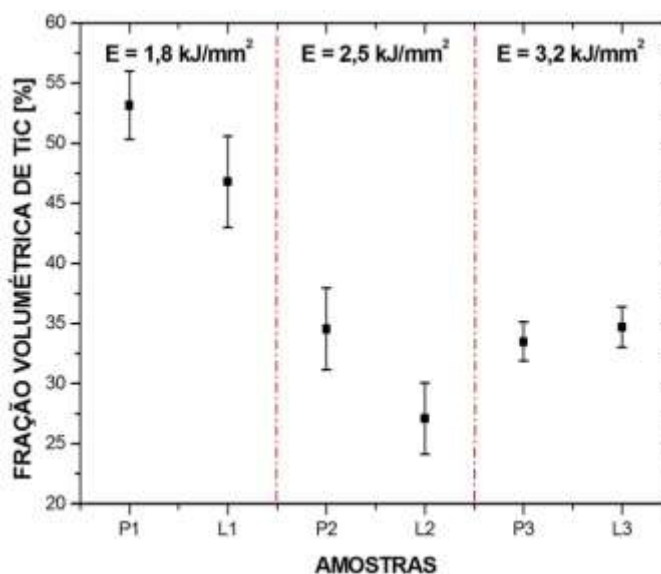
Figura 39: Micrografias das amostras geradas por MEV (BSE): (a) F67; E = 1,8kJ/mm – G (b) F136; E = 1,8kJ/mm – G (c) F67; E = 2,5kJ/mm – C (d) F136; E = 2,5kJ/mm – C (e) F67; E = 3,2kJ/mm – F (f) F136; E = 3,2kJ/mm – F



Fonte: Dados da pesquisa do autor.

A fração volumétrica representa a densidade dos carbonetos na matriz. Os resultados apresentados pela Figura 40 mostram que a energia de soldagem aplicada durante a deposição da solda mostrou ser uma variável que afeta a fração volumétrica de carbonetos de titânio nos cordões formados a partir de ambas as ligas, onde os valores encontrados estão na faixa entre 27,1% a 53,2%. Maiores frações volumétricas foram determinadas nas amostras submetidas a baixas energias de soldagem. Esse comportamento é atribuído à variação apresentada pela taxa de diluição. Conforme já mencionado no item 4.1.2, a taxa de diluição representa a proporção do metal de base que participa da solda, logo em elevadas taxas de diluição o volume da ferrita (estrutura majoritária do metal de base) que estará presente na solda será maior do que a o volume da fase que esta sendo adicionada (carbonetos), assim a fração volumétrica tende a se reduzir. Porém, mesmo taxa de diluição apresentando valores elevados (acima de 50%) a fração volumétrica dos carbonetos atingiu resultados consideráveis quando comparado ao trabalho reportado por Wang X. et. al. onde a taxa de diluição encontrada foi de 25,4% a 31,6% (36).

Figura 40: Variação da fração volumétrica dos TiC com a energia de soldagem

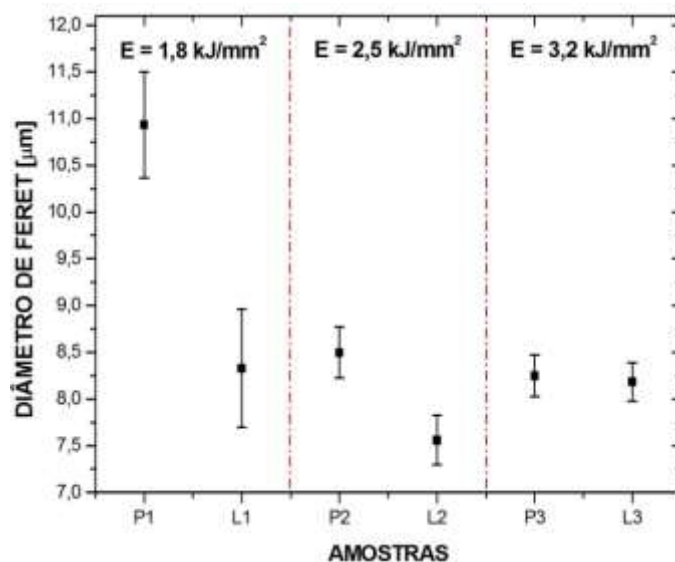


Fonte: Dados da pesquisa do autor.

Pela aplicação do software *ImageJ* (43), foi possível fazer a mensuração do tamanho dos carbonetos de titânio através do diâmetro de *Feret*. Conforme indicado pelo gráfico representado pela Figura 41, nota-se que com exceção dos cordões P1X, o tamanho dos carbonetos não apresentou dispersões significantes entre si. O tamanho dos carbonetos variou entre 7µm (L2) a 11 µm (P1). Comparando o tamanho médio dos carbonetos de titânio com trabalhos de demais autores, Figura 42, nota-se que os TiC são maiores do que aqueles

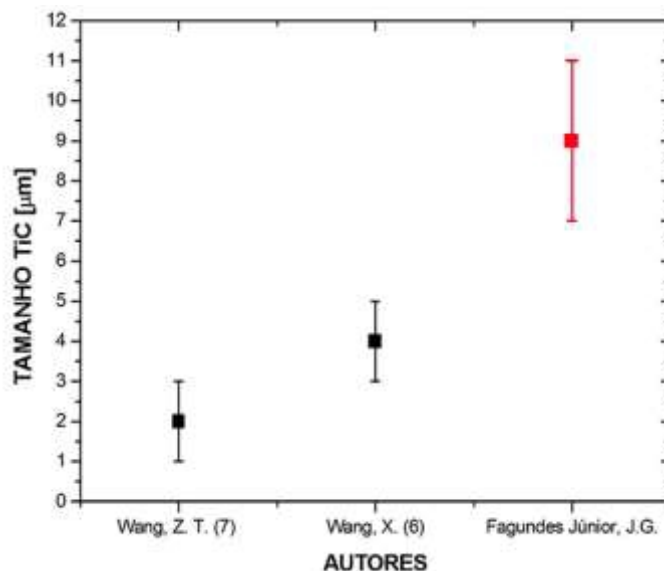
apresentados pelos respectivos trabalhos, onde os valores foram $1\mu\text{m}$ a $3\mu\text{m}$ e $3\mu\text{m}$ a $5\mu\text{m}$ (36,37).

Figura 41: Variação do tamanho dos TiC com a energia de soldagem



Fonte: Dados da pesquisa do autor.

Figura 42: Comparação entre o tamanho dos TiC com trabalho de outros autores

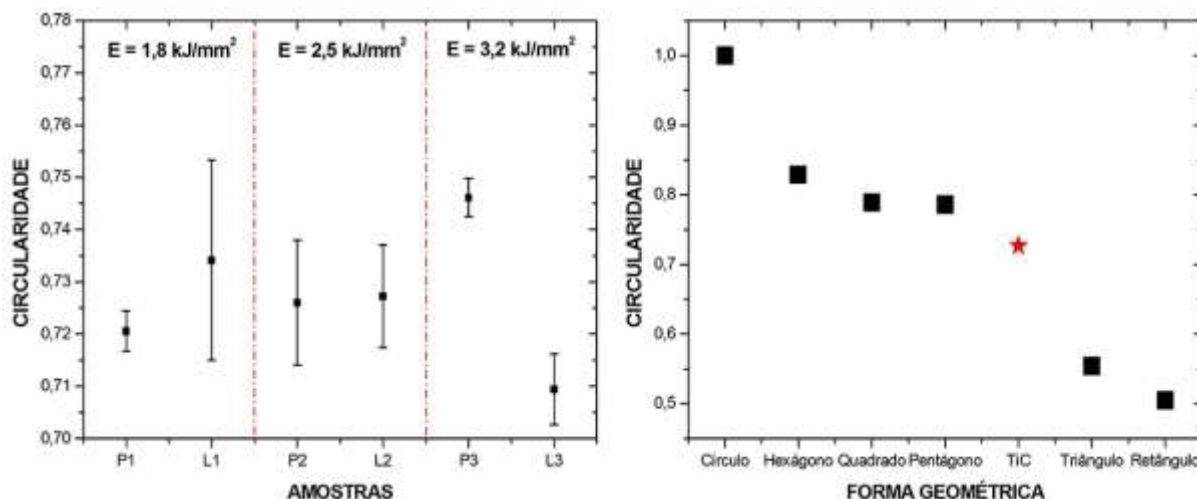


Fonte: Dados da pesquisa do autor.

A forma dos carbonetos é também uma propriedade importante para a aplicação de revestimentos duros. Quanto mais circular for o carboneto melhor é a sua resistência ao desgaste, pois não há concentração de tensões na interface da partícula com a matriz (48). O gráfico representado pela Figura 43(a) apresenta os valores de circularidade dos carbonetos de

titânio. Não é possível notar variações significativas na circularidade do carboneto em energias de soldagem diferentes, ou seja, a forma do carboneto não depende da energia aplicada durante a sua formação. Através da circularidade do carboneto é possível mensurar o quanto a sua forma se aproxima do formato circular (valores próximos a 1), Figura 43(b).

Figura 43: Variação da circularidade dos carbonetos de titânio à energia de soldagem (a) cordões de solda (b) comparação da circularidade com os TiC e formas geométricas



Fonte: Dados da pesquisa do autor

4.4.2 Caracterização Composicional MEV (EDS)

Técnicas de EDS (MEV) possibilitaram a análise da composição química dos cordões de solda, com ênfase nos carbonetos de titânio, na matriz e ainda a distribuição dos elementos químicos ao longo da interface matriz e carboneto.

A estequiometria dos carbonetos de titânio é de 1:1, ou seja, um átomo de titânio para um átomo de carbono, resultando numa proporção de 50% para cada elemento, porém na prática a estequiometria não apresenta esta proporção exata por causa de diversos fatores que ocorrem durante a solidificação da poça de fusão, entre os quais a literatura reporta: a falta do átomo de titânio na célula unitária, o fato do átomo de carbono não ocupar todos os espaços intersticiais ou ainda, a substituição do átomo titânio por outro elemento químico (vanádio) fazendo com que proporção de titânio e carbono não seja exata (6). Os valores da composição química (% atômica) dos carbonetos analisados são apresentados na Tabela 8 para os carbonetos formados em cordões de solda de cavacos da liga ASTM F67 e ASTM F136. A presença do ferro em ambas às ligas e do vanádio (ASTM F136) e o fato do titânio e o

carbono não ocuparem seus respectivos lugares na célula unitária resultou na variação da proporção atômica dos carbonetos de titânio (49).

A composição química da matriz (% atômica) é apresentada pela Tabela 9. O elevado teor do carbono na matriz ferrítica e a presença de titânio pode ser um indicio da presença de carbonetos finos nestas regiões.

Tabela 8: Composição química dos carbonetos de titânio (% atômica)

	P11D	P23C	P32B	L13D	L22D	L34D
C	47,1 ± 2,0	44,4 ± 1,5	47,8 ± 0,1	49,6 ± 0,9	44,6 ± 7,9	54,1 ± 5,3
Ti	52,5 ± 2,0	54,9 ± 1,4	51,7 ± 0,1	48,3 ± 0,8	53,9 ± 7,7	43,2 ± 7,1
V	-	-	-	1,5 ± 0,2	1,0 ± 0,1	0,7 ± 0,1
Fe	0,4 ± 0,1	0,7 ± 0,1	0,5 ± 0,1	0,6 ± 0,2	0,5 ± 0,1	2,0 ± 2,4

Fonte: Dados da pesquisa do autor

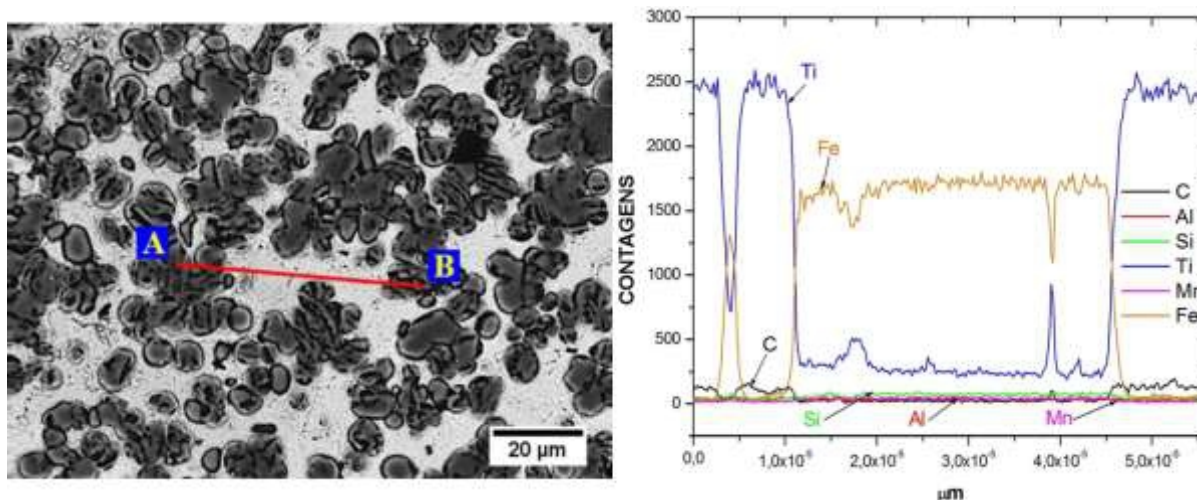
Tabela 9: Composição química da matriz (% atômica).

	P11D	P23C	P32B	L13D	L22D	L34D
C	12,0 ± 3,2	19,5 ± 5,4	11,4 ± 1,4	9,1 ± 1,2	12,7 ± 2,2	12,0 ± 0,5
Al	1,1 ± 0,2	0,6 ± 0,1	0,7 ± 0,1	4,2 ± 0,5	3,0 ± 0,7	2,0 ± 0,2
Si	4,7 ± 1,0	1,9 ± 0,2	1,5 ± 0,1	6,3 ± 0,7	2,3 ± 0,4	1,8 ± 0,3
Ti	13,8 ± 1,3	5,8 ± 0,3	5,9 ± 1,5	5,6 ± 0,9	9,3 ± 4,8	1,0 ± 0,3
V	-	-	-	1,7 ± 0,1	1,1 ± 0,1	0,4 ± 0,02
Mn	0,2 ± 0,01	0,40 ± 0,03	0,5 ± 0,04	0,5 ± 0,03	0,4 ± 0,04	0,6 ± 0,06
Fe	68,2 ± 4,6	71,9 ± 5,0	80,0 ± 1,0	72,6 ± 1,3	71,2 ± 6,4	82,2 ± 0,6

Fonte: Dados da pesquisa do autor

As análises de EDS por linha determinou a distribuição dos elementos dentro do cordão de solda na interface carboneto de titânio e matriz. Exemplos dos resultados da análise por linha são apresentados na Figura 44 para a liga ASTM F67 e Figura 45 para a liga ASTM F136. Nas regiões escuras, o titânio assume um teor elevado, e comportamento semelhante à curva de concentração do carbono reforçando a formação dos carbonetos de titânio. As regiões claras, o titânio apresenta baixo teor enquanto que o ferro é o elemento preponderante.

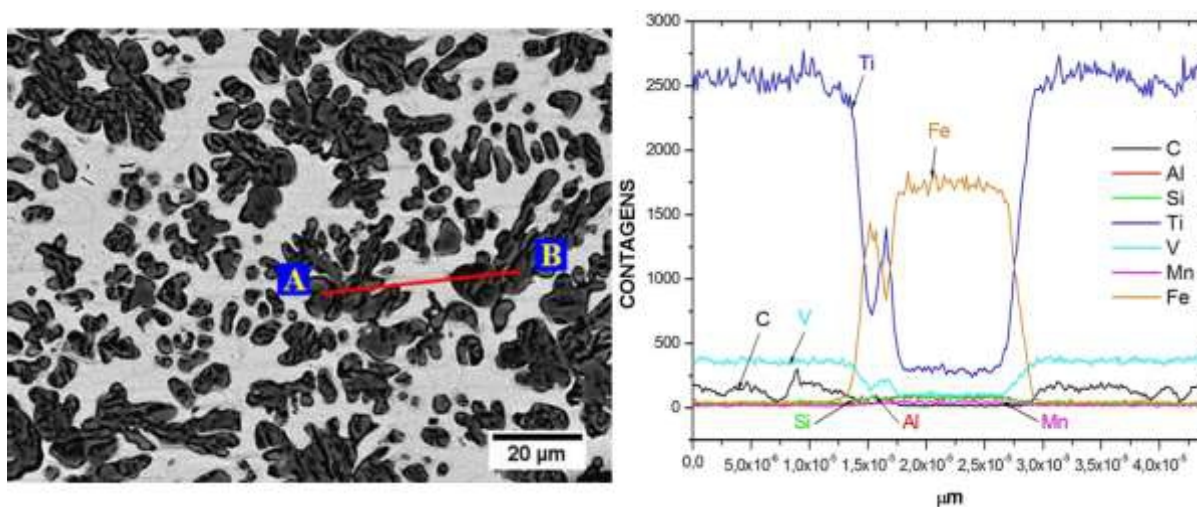
Figura 44: EDS (MEV), análise por linha – amostra P23C



Fonte: Dados da pesquisa do autor

Os resultados apresentados por EDS em ambos os cordões formados a partir das diferentes ligas (ASTM F67 e ASTM F136) apresentaram comportamentos semelhantes, indicando que independente dos elementos adicionais presentes (vanádio, alumínio, etc) a estequiometria do carboneto de titânio é a mesma. Entre os elementos químicos presentes, o carbono possui maior afinidade pelo titânio (6), a energia de formação dos carbonetos de titânio assume valores negativos indicando a forte espontaneidade da reação química entre estes elementos (22).

Figura 45: EDS (MEV), análise por linha – amostra L22D



Fonte: Dados da pesquisa do autor

4.4.3 Avaliação das propriedades do cordão de solda com a energia de soldagem

Após a investigação das propriedades do cordão de solda quanto à geometria do cordão, qualidade da solda e caracterização microestrutural, é possível fazer uma análise geral do comportamento de tais variáveis levando em consideração a variação da energia de soldagem aplicada, conforme indicada pela Figura 46.

Figura 46: Propriedades da solda relacionada à energia de soldagem

Avaliação das propriedades com a energia de soldagem	
Variável	Comportamento
Energia de soldagem (E)	
Qualidade da solda	
Dureza da solda (HV^*)	
Dureza TiC (HV^*)	
Dureza matriz da solda (HV^*)	
Taxa de diluição (δ)	
Fração volumétrica (%)	
Tamanho dos TiC (μm)	
Circularidade dos TiC	

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:

- Carbonetos de titânio a partir da utilização de cavacos foram formados com sucesso na solda em todas as condições do experimento.
- Os cordões submetidos a maiores energias de soldagem apresentaram melhores perfis de acabamento.
- A solda, mesmo apresentando taxas de diluições elevadas apresentaram durezas e frações volumétricas consideravelmente altas.
- Os cordões formados a partir da liga F67 (titânio puro) apresentaram dureza levemente superior à liga F136 (Ti6Al4V).
- A presença de trincas e altas taxas de diluições foram consequências da elevada corrente de soldagem.
- A dureza das partículas de TiC apresentaram valores semelhantes em todas as amostras, sendo que para a matriz da solda a diferença no aspecto da estrutura formada propiciou valores diferentes.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Deposição da solda com a utilização de equipamentos que possibilitem a seleção de parâmetros diferentes de soldagem (velocidades e correntes de soldagem com valores mais baixos).

Verificar a influência da vazão do gás e inclinação da tocha nas propriedades da solda.

Formação de diversos cordões de solda a partir da metodologia adotada com a deposição da camada carbonetante nos seguintes aspectos:

- Repetição da camada carbonetante sobre o cordão formado (cordões de solda sobrepostos).
- Deposição da camada carbonetante sobre a superfície do metal de base, propiciando a formação de um revestimento a base de TiC (cordões de solda paralelos).

Aplicação de estudos tribológicos (ensaios de desgaste) para verificar as propriedades da solda quanto ao fenômeno do desgaste.

Comparação das propriedades da solda formada a partir da utilização de cavacos de titânio com as ligas comerciais aplicadas como revestimento duro (Fe-Cr-C).

REFERÊNCIAS

- 1 GAHR, K.H. Z. **Microstrucuture and wear of materials**. New York: Elsevier, 1987. V. 10.
- 2 MELLOR, B. G. **Surface coatings for protection against wear**. Boca Raton: Woodhead Publishing Limited, 2006. 430 p.
- 3 BULLOCH, J. H.; HENDERSON, J. L. Some considerations of wear and hardfacing materials. **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, Cape Province, v. 46, n. 3, p. 251-267, 1990.
- 4 BAYER, R. G. **Mechanical wear: fundamentals and testing**. 3. ed. New York: Marcel Dekker Inc., 2004. 416 p.
- 5 HOLLECK, H. Material selection for hardfacing. **Journal of Vacuum Science & Technology**, Harlsruhe, v. ?, n.?, 2660-2669, 1986.
- 6 PIERSON, H. O. **Handbook of refractory carbides and nitrides**. New Jersey: Noyes Publications, 1996. 362 p.
- 7 LEITE, R. V. D. M. **Estudo comparativo entre ligas resistentes ao desgaste abrasivo, aplicadas por soldagem, em chapas metálicas para fabricação de placas antidesgaste**. 2008. 95 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.
- 8 ZIKIN, A. et al. Characterisation of TiC–NiMo reinforced Ni-based hardfacing. **Surface & Coatings Technology**, Lausanne, v. 236, p. 36-44, 2013.
- 9 GALLO, S. ; ALAM, N.; O'DONNELL, R. In-situ precipitation of TiC Upon PTA hardfacing with grey cast iron and titanium for enhanced wear resistance. **Surface & Coatings Technology**, Lausanne, v. 214, p. 63-68, 2013.
- 10 SVENSSON, L. E. et al. Fe-Cr-C hardfacing alloys for high-temperature applications. **Journal of Materials Science**, Cambridge, v. 21, 1015-1019, 1986.

- 11 ATAMERT, S.; BHADSHIA, H. K. D. H. Microstructure and stability of Fe-Cr-C Hardfacing Alloys. **Materials Science and Engineering, A**, Cambridge, v. 130, p. 101-111, 1990.

- 12 LU, L.; SODA, H.; MCLEAN, A. Microstructure and Mechanical Properties of Fe/Cr/C eutectic composites. **Materials Science and Engineering A**, Toronto, v. 347, p. 214-222, 2002.

- 13 CHANG, C. M.; CHUNCHEN, Y.; WEITEWU. Microstructural and abrasive characteristics of high carbon Fe-Cr-C hardfacing alloy. **Tribology International**, Taichung, v. 43, 929-934, 2010.

- 14 KENCHIREDDY, K. M.; JAYADEV, C. T. Study on abrasive wear characteristics of Fe-Cr-C hardfacing alloy and effect of welding parameters. **International Journal of Engineering Sciences & Research Technology**, Karnataka v. 3, n. 5, 6-13, 2014.

- 15 ZIKIN, A. et al. Advanced Chromium Carbide-based Hardfacings. **Surface & Coatings Technology**, Lausanne, v. 206, p. 4270-4278, 2012.

- 16 AMERICAN STANDART MATERIALS - ASTM INTERNATIONAL. F 67 - 06. **Standard specification forunalloyed titanium, for surgical implant applications (UNSR 50250, UNSR 50400, UNSR 50550, UNSR 50700)**, West Conshohocken, 1 Junho 2006. 1-5.

- 17 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, 10 Novembro 2002. 1-4.

- 18 OGLE, O. E. Implant surface material, design, and osseointegration. **Dental Clinics of North America**, Kingston, v. 59, n. 2, p. 505-520, 2015.

- 19 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13043**: soldagem. Rio de Janeiro, 1993. 8 p.
- 20 FAGUNDES JÚNIOR, J. G. et al. Aplicação de Cavacos de Titânio para Produção de Revestimentos Resistentes ao Desgaste. **Inspecção e soldagem**, São Paulo, v. 19, p. 264-270, 2014.
- 21 COTTON, F. A.; WILKINSON, G. **Advanced inorganic chemistry**. 3. ed. New York: Jonh Wiley & Sons, 1972.1145 p.
- 22 SHATYNSKI, S. R. The thermochemistry of transition metal carbides. **Oxidation of Metals**, Nova York, v. 13, n.2, p. 105-118, 1978.
- 23 SHACKELFORD, J. F.; ALEXANDER, W. **Materials science and engineering handbook**. 3. ed. Boca Raton: CRC Press, 2001. 1949 p.
- 24 JEFFUS, L. **Welding**: principles and aplications. 7. ed. New York: Delmar, 2012.972 p.
- 25 KEN-HICKEN, G. Gas-tungsten arc welding. In: AMERICAN STANDART METALS. **ASM handbook**. New York: ASM, 1993. p. 580-605.
- 26 WILKINSON, K. Tig welding equipment guide. **Trade equipment**, 2011.
Disponivel em: <<http://www.trade-equip.co.uk/blog/?p=482>>. Acesso em: 4 mar. 2015.
- 27 AMERICAN WELDING SOCIETY. **Specification for tungsten and oxide dipersed tungsten electrodes for arc welding and cutting**. 7. ed. Miami: Americam Welding Society, 2009.
- 28 CHEN, C. C.; POLLACK, A. Influence of welding on steel weldment properties. In: AMERICAN STANDART METALS. **ASM Handbook**. New York: ASM, 1993. p. 1085-1088.
- 29 SOLOMON, H. D. Fundamentals of Weld Solidification. In: AMERICAN STANDART METALS. **ASM Handbook**. New York: ASM, 1993. p. 110-137.

- 30 TSAI, C. L.; TSO, C. M. Heat flow in fusion welding. In: AMERICAN STANDART METALS. **ASM Handbook**. New York: ASM, 1993. p. 50-55.
- 31 KOU, S. **Welding metallurgy**. 2. ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2003. 461 p.
- 32 STACHOWIAK, G. W. **Wear: materials, mechanisms and practice**. West Sussex: Jonh Wiley & Sons, 2005. 480 p.
- 33 STLE. Mechanisms. **Society of tribologist and lubrication engineers**, 2008. Disponivel em: <<http://www.stle.org/resources/lubelearn/wear/#mechanisms>>. Acesso em: 25 fev. 2015.
- 34 MAGEE, J. H. Wear of stainless steels. AMERICAN STANDART METALS. **ASM Handbook**. New York: ASM, 1993. p. 1444-1479.
- 35 IMPLALIFE BIOTECNOLOGIA. **site da Implalife Biotecnologia**, 2014. Disponivel em: <<http://www.implalife.com.br/>>. Acesso em: 11 dez. 2014.
- 36 XINHONG, W. et al. Microstructure and wear properties of in situ TiC/FeCrBSi composite coating prepared by gas tungsten arc welding. **Wear**, Jinan, v. 260, n.1/2, 705-710, 2005.
- 37 WANG, Z. T.; ZHOU, X. H.; ZHAO, G. G. 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.
- 38 WANG, X. H. et al. Fabricating TiC particles reinforced Fe-based composite coatings produced by GTAW multi-layers melting process. **Materials Science and Engineering**, Jinan, v. 441, n.1/2, p. 60-67, 2006.
- 39 PENG, D. X. Wear behavior of ceramic powder cladded on carbon steel surface by gas tungsten arc welding. **Industrial Lubrication and Tribology**, Bingley, v. 65, n. 2, p. 129-134, 2013.

- 40 VANDER VOORT, G. F. **Metallography: principles and practice**. Lake Bluff: ASM International, 1999.
- 41 (ICSD), I. C. S. D. **Inorganic crystal structure database (ICSD)**., 2014. Disponível em: <<http://icsd.fiz-karlsruhe.de.w31001.dotlib.com.br/search/basic.xhtml>>. Acesso em: 23 fev. 2014.
- 42 STANDARDIZATION, I. -I. S. F. ISO 14577-1. Instrumentation indentation test for hardness and materials parameters - Part 1: Test method. **ISO 14577 Standards**, n. 1, p. 1-25, 2002.
- 43 HEALTH, N. I. O. ImageJ: image processing and analysis in Java. **ImageJ**, 2004. Disponível em: <<http://rsb.info.nih.gov/ij/index.html>>. Acesso em: 28 jan. 2015.
- 44 TSAI, C. L.; TSO, C. M. Heat flow in fusion welding. In; AMERICAN STANDART METALS. **ASM Handbook: welding, brazing and soldering**. New York: 1993. p. 45-54.
- 45 DAVIS, J. R. Hardfacing, weld cladding, and dissimilar metal joining. AMERICAN STANDART METALS. **Metals Handbook: welding, brazing and soldering**. New York: ASM, 1993. p. 1967-2000.
- 46 OGBORN, J. S. Submerged arc welding. In: AMERICAN STANDART METALS. **Metals Handbook: welding, brazing and soldering**. New York: ASM, 1993. p. 638-641.
- 47 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..
- 48 XINBA YAER, K. S. H. M. T. K. T. M. Erosive wear characteristics of spheroidal carbides cast iron. **Wear**, Osaka, v. 264, n.11/12, p. 947-957, 2007.
- 49 CHEN, J. et al. Effects of vanadium addition on microstructure and tribological performance of bainite hardfacing coatings. **Journal of Materials Engineering and Performance**, Qinhuangdao, v. 24, n. 3, p. 1157-1164, 2015.

APÊNDICE A – PUBLICAÇÕES REFERENTES A ESTE TRABALHO

FAGUNDES JÚNIOR, J. G., MANERA, R. S., TOKIMATSU, R. C., VENTRELLA, V. A., GALLEGU, J. Aplicação de Cavacos de Titânio para Produção de Revestimentos Resistentes ao Desgaste. **Soldagem e Inspeção**, São Paulo, v. 19, p. 264-270, jul/set 2014.

DOI: 10.1590/0104-9224/SI1903.09.

FAGUNDES JÚNIOR, J. G., MORAES, M., ROCHA, R. P., VENTRELLA, V. A., GALLEGU, J. Reciclagem de Cavacos de Titânio Para Soldagem de Revestimentos Duros In: **I CONGRESSO PANAMERICANO DE SOLDAGEM (XL CONSOLDA)**, 2014, São Paulo. XL Congresso Nacional de Soldagem. São Paulo: Associação Brasileira de Soldagem (ABS), 2014. v. CT10. p.1-10.

FAGUNDES JÚNIOR, J. G., ROCHA, R. P., MORAES, M., NASCIMENTO, L. H., VENTRELLA, V. A., GALLEGU, J. Microestrutura e Resistência ao Desgaste de Revestimentos Duros Experimentais (NbCr) Depositados por Soldagem GTAW In: **XXXIX CONSOLDA**, 2013, Curitiba. XXXIX Congresso Nacional de Soldagem. São Paulo: Associação Brasileira de Soldagem (ABS), 2013. v.CT54. p.1-10.

CAMESCHI, P. M., FAGUNDES JÚNIOR, J. G., MORAES, M., GALLEGU, J. Morfologia dos carbonetos de titânio formados no metal de solda resultante da reciclagem de cavacos In: CICUNESP, 2014, Ilha Solteira. **XXVI Congresso de Iniciação Científica da Unesp**. São Paulo: PróReitoria de Pesquisa (PROpe), 2014. p.1.

MORAES, M., FAGUNDES JÚNIOR, J. G., CAMESCHI, P. M., GALLEGU, J. Variação da Microdureza do Metal de Solda Produzido com Cavacos Reciclados das Ligas de Titânio ASTM F67 e ASTM F136 In: CICUNESP, 2014, Ilha Solteira. **XXVI Congresso de Iniciação Científica da Unesp**. São Paulo: PróReitoria de Pesquisa (PROpe), 2014. p.1.

NASCIMENTO, L. H., MORAES, M., ROCHA, R. P., FAGUNDES JÚNIOR, J. G., GALLEGU, J. Análise do desgaste de lâminas de corte usadas na colheita mecanizada da canadeaçúcar. In: CICUNESP, 2013, Ilha Solteira. **XXV Congresso de Iniciação Científica da UNESP**. São Paulo: PróReitoria de Pesquisa (PROpe), 2013. p.1.

ROCHA, R. P., FAGUNDES JÚNIOR, J. G., MORAES, M., NASCIMENTO, L. H., GALLEGU, J. Aplicação de Cavacos da Liga Ti6Al4V para Revestimentos Duros Resistentes à Abrasão In: CICUNESP, 2013, Ilha Solteira. **XXV Congresso de Iniciação Científica da UNESP**. São Paulo: PróReitoria de Pesquisa (PROpe), 2013. p.1.

MORAES, M., FAGUNDES JÚNIOR, J. G., NASCIMENTO, L. H., ROCHA, R. P., GALLEGU, J. Morfologia dos Carbonetos Formados em Revestimentos Resistentes ao Desgaste Abrasivo In: CICUNESP, 2013, Ilha Solteira. **XXV Congresso de Iniciação Científica da UNESP**. São Paulo: PróReitoria de Pesquisa (PROpe), 2013. p.1

Artigo aceito para publicação:

FAGUNDES JÚNIOR, J. G., VENTRELLA, V. A., GALLEGU, J. Reciclagem de Cavacos de Titânio para a Deposição de Revestimentos Duros por Soldagem. **Soldagem e Inspeção**, São Paulo, 2015. DOI: 10.1590/0104-9224/SI2001.12 (em implantação na presente data).

