



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO PIAUÍ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E INOVAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**EMPREGO DE FIOS DE TUNGSTÊNIO COMO REFORÇO DE CORDÃO DE SOLDA
EXECUTADO PELO PROCESSO GMAW**

SIDNEY TELES DA SILVA

Orientador: Prof. Dr. José Francisco dos Reis Sobrinho

TERESINA

2021

SIDNEY TELES DA SILVA

**EMPREGO DE FIOS DE TUNGSTÊNIO COMO REFORÇO DE CORDÃO DE SOLDA
EXECUTADO PELO PROCESSO GMAW**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais do Instituto Federal do Piauí, como parte integrante dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais.

Área de concentração: Caracterização e Processamento de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. José Francisco dos Reis Sobrinho

TERESINA

2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD

Silva, Sidney Teles da

S586e Emprego de fios de Tungstênio como reforço de cordão de solda executado pelo processo GMAW / Sidney Teles da Silva. - 2021.

80 f.: il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Instituto Federal do Piauí, Campus Teresina Central, 2021.

Orientador : Prof. Dr. José Francisco dos Reis Sobrinho.

1. Metal de Solda - Reforço. 2. Tungstênio. 3. Compósito de matriz metálica. I. Título.

CDD - 620.1

Elaborado por Sindya Santos Melo CRB 3/1085

SIDNEY TELES DA SILVA

EMPREGO DE FIOS DE TUNGSTÊNIO COMO REFORÇO DE CORDÃO DE SOLDA
EXECUTADO PELO PROCESSO GMAW

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais do Instituto Federal do Piauí, como parte integrante dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais.

Aprovada em: 08 / 07 / 2021

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. José Francisco dos Reis Sobrinho
Instituto Federal do Piauí (IFPI)

Prof. Dr. Ayrton de Sá Brandim
Instituto Federal do Piauí (IFPI)

Prof. Dr. Helder Pontes Gomes
Instituto Federal do Piauí (IFPI)

DEDICATÓRIA

Dedico esse singelo trabalho a meus amados pais que sempre me apoiaram e investiram ao máximo seus esforços na educação de seus filhos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, a todo instantes de minha vida.

Ao Professor Doutor José Francisco dos Reis Sobrinho, que orientou este trabalho, onde manifesto o meu sincero reconhecimento pelo apoio e disponibilidade durante sua realização.

A minha amada esposa Kellyany de Sousa Brito Teles por estar presente em cada momento me incentivando em todas as minhas empreitadas.

Aos meus filhos por serem fontes de inspiração em tudo aquilo que faço.

As instituições de ensino, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí – IFPI, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará – IFCE e Universidade Federal do Cariri – UFCA, que me deram total apoio e disponibilidade de uso de suas instalações para realização dessa pesquisa, e pela atenção, disposição e profissionalismo de todos os seus servidores públicos que nelas dedicam total empenho.

A todos os colegas e amigos que de alguma forma me ajudaram a concluir este trabalho, em especial ao meu amigo Janiel Fontineles Silva pelos valiosos momentos de discussão e apoio.

Ao Ensino Público Brasileiro, que me permitiu chegar gratuitamente até aqui.

“A ciência de hoje é a tecnologia de amanhã.”

Edward Teller

RESUMO

Dentre os vários processos de união permanentes, a soldagem vem ganhando cada vez mais espaço na indústria de transformação e na indústria da construção pela sua versatilidade, eficiência e pelo baixo custo e dessa forma estimulando o desenvolvimento de novos materiais de soldagem. Os materiais compósitos se apresentam como uma possibilidade concreta para inovações em materiais de solda, unindo características vantajosas de cada um dos seus constituintes a fim de apresentar-se como uma possibilidade de atendimento às mais variadas aplicações em uniões. Neste trabalho estudou-se as características morfológicas e comportamento mecânico de um compósito de matriz metálica (CMM) empregado como material de solda, onde investigou-se a influência do volume de fios contínuos em proporções de 10, 20 e 30%. Optou-se por utilizar o processo GMAW-MIG devido às suas características de produtividade elevada, porém a técnica foi incrementada utilizando fios de tungstênio de maneira a formar uma mistura heterogênea fibrosa compostas por estes fios como reforço ao metal de adição na poça de fusão. Os resultados indicam que a adição de fios de reforço contribuiu com uma sensível elevação na resistência a tração e no módulo de elasticidade, contudo percebeu-se também um ganho significativo de dureza quando comparada com o metal de adição convencional proveniente do arame eletrodo E70S-6.

Palavras-chave: Metal de Solda; Reforço; Tungstênio; Compósito de Matriz Metálica.

ABSTRACT

Among the various permanent joining processes, welding has been gaining more and more space in the manufacturing and construction industries due to its versatility, efficiency and low cost, thus stimulating the development of new welding materials. Composite materials are presented as a viable possibility for innovations in soldering materials, bringing together advantageous characteristics of each of their constituents in order to present themselves as a possibility to meet the most varied applications in joints. In this work, the morphological characteristics and mechanical behavior of a metallic matrix composite (CMM) used as a welding material were studied, where the influence of the volume of continuous wires in proportions of 10, 20 and 30% was investigated. We chose to use the GMAW-MIG process due to its high productivity characteristics, but the technique was improved using tungsten wires in order to form a heterogeneous fibrous mixture composed of these wires as reinforcement to the filler metal in the weld pool. The results indicate that the addition of reinforcement wires contributed to a significant increase in tensile strength and modulus of elasticity, however a significant gain in hardness was also observed when compared to conventional filler metal from the E70S-6 electrode wire.

Keywords: Weld Metal; Strengthening; Tungsten; Metal Matrix Composite.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Relação do tungstênio com outros elementos -----	18
Figura 2 -	Processo GMAW-----	24
Figura 03 -	Perfil de concentração para difusão	28
Figura 4 -	Fluxograma do procedimento experimental-----	30
Figura 5 -	Fio de tungstênio-----	32
Figura 6 -	Máquina de FRX, Modelo Epsilon3-XL/PANalytical-----	33
Figura 7 -	Monitoramento da temperatura de pré-aquecimento-----	34
Figura 8 -	Posicionamento e fixação dos fios de tungstênio sobre a barra de aço antes da soldagem de deposição-----	35
Figura 9 -	Relação tensão do arco e corrente de soldagem-----	37
Figura 10 -	Corpo de prova de ensaio de tração (AT10). Execução do primeiro passe de soldagem sobre o metal base e fios de reforço	38
Figura 11 -	Local e orientação de extração do corpo de prova para ensaio mecânico de tração -----	39
Figura 12 -	Seção longitudinal-----	40
Figura 13 -	Seção transversal-----	40
Figura 14 -	Politriz modelo PLF – Fortel-----	41
Figura 15 -	Prensa de embutimento EDF30 – Fortel-----	41
Figura 16 -	Ensaio de Tração. CP amostra de controle -----	42
Figura 17 -	Matriz de varredura de microdureza em uma região na superfície da amostra-----	41
Figura 18 -	Imagem MEV da amostra AMEV20T (148x) -----	45
Figura 19 -	Imagem MEV da amostra AMEV20T (714x) -----	46
Figura 20 -	Imagem MEV da amostra AMEV20T (714x) -----	47
Figura 21 -	Imagem MEV da amostra AMEV20L (120x) -----	47
Figura 22 -	MEV – SE, região de interface, AMEV20T (2300x) e (9000x). ----	48
Figura 23 -	MEV – SE, região de interface, AMEV20L (7700x)- -----	48
Figura 24 -	Rugosidade de superfície de interface, AMEV20T (9000x). -----	49

Figura 25 -	Rugosidade de superfície de interface, AMEV20T (9000x) -----	49
Figura 26 -	MEV-BSE, AMEV20T (360x). -----	50
Figura 27 -	Difusão do W na matriz, AMEV20T (1100x). -----	51
Figura 28 -	Indentação sobre o fio de W, AMD30T (400x). -----	52
Figura 29 -	Destaque das regiões de definição de dureza -----	53
Figura 30 -	Perfil de dureza média fio-matriz-fio-----	54
Figura 31 -	Microdureza Amostras AMD0-----	56
Figura 32 -	Microdureza Amostras AMD10-----	56
Figura 33 -	Microdureza Amostras AMD20-----	56
Figura 34 -	Microdureza Amostras AMD30-----	57
Figura 35 -	Valores médios de HV para as amostras-----	58
	Curvas típicas de ensaio de tração, carga vs. deformação: (a)	
Figura 36 -	metal de solda (matriz metálica), matriz reforçada com (b) 10%, (c) 20% e (d) 30% de fração de volume de fios de tungstênio-----	60
Figura 37 -	Valores de resistência a tração no regime elástico das amostras--	64
Figura 38 -	Valores dos módulos elásticos das amostras-----	64
Figura 39 -	Comparação curvas de tendência Amostras vs. Teórico de resistência à tração no regime elástico-----	66
Figura 40 -	Comparação curvas de tendência Amostras vs. Teórico do Módulo de elasticidade -----	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Composição química do aço ABNT 7007; MR-250.....	16
Tabela 2 -	Propriedades mecânicas do aço ABNT 7007; MR-250.....	16
Tabela 3 -	Composição química do aço ASTM A-36.....	16
Tabela 4 -	Propriedades mecânicas do aço AST A-36.....	16
Tabela 5 -	Propriedades físicas e mecânicas do tungstênio com grau de pureza acima de 99,95%.....	18
Tabela 6 -	Fios metálicos de reforço.....	20
Tabela 7 -	Faixa ótima de corrente de curto-circuito para vários diâmetros de arame.....	25
Tabela 8 -	Temperatura de pré-aquecimento recomendada x CE.....	27
Tabela 9 -	Composição química do metal de adição (% massa)	31
Tabela 10 -	Propriedades mecânicas do metal de adição.....	31
Tabela 11 -	Número de fios por fração volumétrica (ensaio de tração)	36
Tabela 12 -	Dureza média em HV para as diferentes regiões das amostras (Regiões de Definição de Dureza)	53
Tabela 13-	Valores médios de HV para as amostras	58
Tabela 14 -	Valores dos ensaios de tração nos fios de $\varnothing$ 0,18 mm de tungstênio.....	59
Tabela 15 -	Valores de tensão de resistência e módulo de elasticidade das amostras.....	63
Tabela 16-	Comparação dos valores encontrados vs valores teóricos.....	65

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

μm	Micrometro
ASTM	American Society for Testing and Materials
AWS	American Welding Society
C	Elemento químico Carbono
CC+	Corrente Contínua polo positivo
CMC	Copósito de Matriz Cerâmica
CMM	Compósito de Matriz Metálica
CMP	Compósito de Matriz Polimérica
CO ₂	Dióxido de Carbono
CP	Corpo de Prova
Cu	Elemento químico Cobre
d	Diâmetro das fibras
DRX	Difração de Raios – X
E	Módulo de Young
ε	Deformação
F _c	Carga total resistente no compósito
F _f	Carga resistente na fibra
F _m	Carga resistente da matriz
GMAW	Gas Metal Arc Welding
GPa	Giga Pascal
H ₂	Gás Hidrogênio
LABMAT	Laboratório de Materiais

Lb/in ²	Libra força por polegada quadrada
L _c	Comprimento crítico das fibras
LE	Limite de Escoamento
LR	Limete de Ruptura
MAG	Metal Active Gas
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
MIG	Metal Inert GAs
Mn	Elemento químico Manganês
MO	Microscópio Óptico
MPa	Mega Pascal
N _f	Número de Fios
P	Elemento químico Fósforo
PPgEM	Programa de Pós-graduação em Engenharia de Materias
S	Elemento químico Enxofre
S.I	Sistema Internacional de medidas
Si	Elemento químico Silício
SMAW	Shielding Metal Arc Welding
V _f	Fração volumétrica das fibras
V _m	Fração volumétrica da matriz
WO ₃	Trióxido de tungstênio
σ_f	Resistência mecânica final
τ_c	Limite de escoamento cisalhante da matriz

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO -----	15
1.1	OBJETIVO -----	16
1.1.1	Geral -----	16
1.1.2	Específico -----	16
1.2	JUSTIFICATIVA -----	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA -----	19
2.1	AÇOS -----	19
2.1.1	Aço carbono de uso estrutural -----	19
2.2	TUNGSTÊNIO -----	21
2.3	COMPÓSITOS -----	23
2.3.1	Compósitos de matriz metálica reforçados com fibras -----	23
2.3.2	Propriedades mecânicas dos compósitos de matriz metálicas reforçados por fibras -----	25
2.4	PROCESSO DE SOLDAGEM COM PROTEÇÃO GASOSA – GMAW --	27
2.4.1	Modo de transferência metálica -----	28
2.4.2	Influência da temperatura de pré-aquecimento -----	29
2.5	DIFUSÃO -----	31
3	MATERIAIS E MÉTODOS -----	34
3.1	MATERIAIS -----	35
3.1.1	Gás de proteção -----	35
3.1.2	Metal de adição -----	35
3.1.3	Metal base -----	36
3.1.4	Fios de reforço -----	36
3.2	MÉTODOS -----	36
3.2.1	Caracterização dos fios de reforço -----	37
3.2.2	Preparo do material base para soldagem -----	37
3.2.3	Formulação -----	39
3.2.3.1	Terminologia das amostras -----	40
3.2.4	Execução da soldagem -----	40
3.2.5	Confecção dos corpos de prova -----	42

3.2.5.1	Corpo de prova para ensaio de tração -----	42
3.2.5.2	Corpo de prova para ensaio de microdureza -----	44
3.2.5.3	Amostra para análise em Microscopia Eletrônica de Varredura -----	44
3.2.5.4	Preparo das amostras para ensaios de microdureza e microscopia eletrônica de varredura -----	45
3.2.6	Ensaio Mecânicos -----	46
3.2.6.1	Ensaio de Tração -----	46
3.2.6.2	Ensaio de microdureza -----	47
3.2.7	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) -----	47
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES -----	49
4.1	ANÁLISE DA MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)	49
4.2	ENSAIO DE MICRODUREZA -----	56
4.3	ENSAIOS DE TRAÇÃO -----	63
4.3.1	Ensaio de tração nos fios de tungstênio -----	63
4.3.2	Ensaio de tração dos CP's reforçados com fios -----	64
5	CONCLUSÕES -----	73
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS -----	75
	REFERÊNCIAS -----	76

1 INTRODUÇÃO

Das inúmeras possibilidades de união permanente de peças metálicas, os processos de soldagem destacam-se pela sua praticidade e relativa facilidade de execução quando comparados aos demais processos de uniões permanentes. Este método de união, considerado em conjunto com a brasagem, tem importante aplicação desde a indústria microeletrônica até a fabricação de navios e outras estruturas com centenas ou milhares de toneladas de peso (MARQUES, 2017).

A busca incessante pelo melhor desempenho da união soldada e consequente redução das dificuldades inerentes ao processo, promoveu o uso de diversos tipos de materiais que proporcionam o aumento da eficiência da ligação, dando origem a inúmeras ligas metálicas empregadas como metal de adição.

MODENESI et al. (2012) destaca duas maneiras de se enfrentar as dificuldades encontradas na soldagem. A primeira é desenvolver materiais que sejam menos sensíveis à soldagem, isto é, melhorar a "soldabilidade" dos materiais, a segunda é controlar a operação de soldagem (e, possivelmente, executar operações complementares) de modo a minimizar, ou remover, a degradação de propriedades da peça.

Combinando um adequado processo de soldagem ao uso de uma liga metálica com boas propriedades mecânicas, pode-se assegurar melhores resultados na ligação, garantia de qualidade das juntas soldadas e a integridade do sistema quando solicitado.

Dessa forma, procura-se cada vez mais um processo de soldagem que possibilite um resultado satisfatório quanto a qualidade e consequente aumento da resistência mecânica da junta soldada e apresente elevada produtividade. Neste trabalho, optou-se por utilizar o processo de soldagem ao arco elétrico de eletrodo consumível com proteção por gás inerte, classificado pela Sociedade Americana de Soldagem – AWS (*American Welding Society*) como processo GMAW – MIG. A característica mais atraente inerente ao processo GMAW é a produtividade que pode ser alcançada, advinda de seu cunho semi-automático e alta densidade de corrente, resultando em altas taxas de deposição e elevado fator de trabalho, flexibilidade e facilidade de automatização, mantendo-se a qualidade requerida em diversas aplicações (SILVA, 2005). O processo semiautomático permite maior precisão na

execução dos cordões de solda, minimizando defeitos oriundos da operacionalidade do processo. A técnica será incrementada utilizando fios de tungstênio em determinada proporção do volume do metal de adição de maneira a formar uma mistura heterogênea fibrosa composta por fios de tungstênio envoltos pelo metal na poça de fusão.

1.1. OBJETIVO

1.1.1. Geral

Determinar as propriedades mecânicas e características morfológicas do metal de solda reforçado com fios de tungstênio, variando as proporções dessa fase dispersa na matriz de aço carbono em três volumes relativos distintos, definindo então qual proporção fornece melhores resultados de resistências mecânicas.

1.1.2. Específicos

- Determinar as resistências mecânicas de tração e dureza dos materiais de solda na condição de compósito de matriz metálica – CMM;
- Comparar valores de desempenho da condição proposta com o metal de adição em execução convencional GMAW.
- Encontrar as proporções convenientes de volume relativo de fios de tungstênio como fase dispersa na matriz metálica de aço carbono que forma o cordão de solda;
- Observar a capacidade de molhamento dos fios de reforço pela matriz metálica e a condição de envelopamento.

1.2. JUSTIFICATIVA

Avanços tecnológicos se relacionam intimamente com o desenvolvimento de novos materiais. Por esse princípio, os materiais compósitos se apresentam como uma possibilidade concreta para inovações em materiais de solda, unindo características vantajosas de cada um dos seus constituintes a fim de apresentar-se como uma possibilidade de atendimento às mais variadas aplicações.

Na literatura atual, não é comum encontrar estudos de compósitos de matriz metálica com aplicação direta como material de solda. Portanto, é indispensável para utilização de uniões permanentes com emprego de CMM que requeiram um alto desempenho mecânico, seja em resistência a solicitações mecânicas, desgaste abrasivo, trabalho em condições extremas de temperatura, entre outras, que a metodologia de caracterização destes materiais deve ser amplamente estudada, visando determinar as condições de serviço seguras para um compósito como aplicação de material de solda.

Os compósitos reforçados por fibras apresentam-se como uma das configurações de reforço mais promissoras. Dessa forma este trabalho visa caracterizar mecanicamente em termos de suas tensões de fratura, dureza característica e módulos de elasticidade, materiais compósitos de matriz de metálica reforçados com fios de tungstênio unidirecionais, pois esta condição de distribuição dos fios apresenta maior contribuição quanto a resistência final do compósito. Este sendo produzido como resultado de processo de soldagem com proteção gasosa, além de suas características macroestruturais, propiciando informações para desenvolvimento de trabalhos nesse sentido e estimulando a proposta de um produto praticável.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. AÇOS

Dentre os diversos metais hoje em dia empregados nas mais variadas áreas, o aço recebe importante atenção devido as suas extraordinárias propriedades, por tamanha quantidade disponível das matérias-primas necessária à sua produção e pelo preço competitivo. Além disso, o aço pode ser produzido de maneira a atender as mais variadas exigências de mercado pela adição de uma infinidade de outros elementos formando ligas metálicas com propriedades específicas.

Os aços não têm uma definição muito simples, isso porque comercialmente não se trata de ligas binárias. Mesmo sendo que seus elementos mais importantes sejam o ferro e o carbono, sempre apresentam outros elementos de liga na sua composição, variando conforme a sua aplicação. Dessa forma, podemos definir o aço como sendo uma liga Ferro-Carbono, contendo geralmente de 0,008% até aproximadamente 2,11% de carbono, além de certos elementos secundários (como Silício, Manganês, Fósforo, Enxofre, etc.) (CHIAVERINI, 2002).

2.1.1. Aço carbono de uso estrutural

Os aços estruturais ou aços carbono estruturais são assim denominados por se enquadrarem em materiais de responsabilidade estrutural, pois possuem propriedades mecânicas bem delimitadas. Dependem do teor de carbono para desenvolver sua resistência, que estão compreendidas entre valores mínimos de 170 Mpa a 250 Mpa em seu limite de escoamento.

Os aços carbono de média resistência mecânica mais empregados no Brasil para fins estruturais são os aços ABNT NBR-7007 (Classe MR-250), e seu equivalente ASTM A-36, assim classificado pela norma estadunidense ASTM *American Society for Testing and Materials* (Sociedade Americana para Testes e Materiais), tendo suas composições químicas e valores de resistências mecânicas afim de atender exigências específicas a esta aplicação. São classificados como aços carbono de média resistência mecânica e com boa soldabilidade, pois apresentam pequenas quantidades de carbono em suas composições. A

soldabilidade desses aços depende de seus teores de C e Mn e dos níveis de impurezas. Para aços ao carbono onde o percentual de carbono está abaixo de 0,15% a soldabilidade é excelente, pois tais aços não são temperáveis. Aços onde o percentual de carbono está entre 0,15% e 0,30% são considerados de boa soldabilidade, mas existe a possibilidade de endurecimento e algumas precauções devem ser tomadas (MOREIRA, 2008). As tabelas a seguir apresentam as composições químicas e as propriedades mecânicas dos aços ABNT NBR-7007, classe MR-250 e ASTM A-36, respectivamente.

Tabela 01: Composição química do aço ABNT 7007; MR-250

COMPOSIÇÃO QUÍMICA (% em peso)					
C máximo	Mn	P máximo	S máximo	Si máximo	Cu máximo
0,23	-	0,04	0,05	0,4	0,35

Fonte: Do autor, adaptação na norma ABNT NBR-7007, 2011

Tabela 02: Propriedades mecânicas do aço ABNT 7007; MR-250

PROPRIEDADES MECÂNICAS	
Limite de Escoamento (LE)	250 MPa
Limite de Ruptura (LR)	400 -550 MPa
Alongamento após a ruptura	18% - 20%
Módulo de elasticidade	200 Gpa

Fonte: Do autor, adaptação na norma ABNT NBR-7007, 2011

Tabela 03: Composição química do aço ASTM A-36

COMPOSIÇÃO QUÍMICA (% em peso)					
C máximo	Mn	P máximo	S máximo	Si máximo	Cu mínimo
0,28	0,60 -0,90	0,04	0,05	0,4	0,2

Fonte: Próprio autor, adaptação na norma ASTM A-36 / 2014

Tabela 04: Propriedades mecânicas do aço AST A-36

PROPRIEDADES MECÂNICAS	
Limite de Escoamento (LE)	250 MPa
Limite de Ruptura (LR)	400 -550 MPa
Alongamento após a ruptura	23%
Módulo de elasticidade	200 Gpa

Fonte: Próprio autor, adaptação na norma ASTM A-36 / 2014

2.2. TUNGSTÊNIO

Inúmeros metais podem ser empregados como material aditivo ao aço com o intuito de agregar características específicas conforme a aplicação. Entre estes materiais o tungstênio destaca-se por suas propriedades como dureza, resistência ao desgaste e, por ser um metal refratário conserva sua resistência à tração em altas temperaturas acima de 2000 °C.

Possui alto ponto de fusão e densidade elevada, o que faz com que seja um elemento com características singulares, sendo o elemento com maior ponto de fusão da tabela periódica, 3422 °C e um dos mais densos 19,2 g/cm³. Além disso o tungstênio possui elevado módulo de elasticidade e resistência a tração.

A adição de tungstênio para fabricar o aço pode ser feita sob várias formas: ferro-tungstênio, sucata de alto teor em tungstênio e scheelita (CaWO₄) de alta pureza; também pode ser usado o pó metálico (COSTA, 2001).

No tocante ao tungstênio metálico, que é obtido por meio da redução de WO₃ (trióxido de tungstênio) sob fluxo de gás redutor (H₂) ou em presença de carbono a alta temperatura, o mesmo é aplicado na fabricação do material na forma de pó, filamentos ou barras maciças (PAULINO e AFONSO, 2013).

O tungstênio é utilizado em diversas ligas metálicas por possuir propriedades mecânicas interessantes, além de que, o tungstênio possui boa interação com os mais diversos elementos da tabela periódica, como mostrado na Figura 01. Nesse contexto, nos últimos anos vários estudos vêm sendo desenvolvidos acerca do tungstênio, seja ele juntamente com outros elementos formando ligas, seja ele sozinho para desenvolvimento de produtos que atendam necessidades específicas (MARANHÃO, 2019).

Propriedades	Valores mínimos (S.I.)	Valores máximos (S.I.)	Unidades (S.I.)
Limite Elástico	1350	3500	MPa
Dureza	4500	8500	MPa
Módulo de Ruptura	1350	3500	MPa
Módulo de Cisalhamento	130	160	GPa
Tensão de Tração	1670	3900	MPa
Módulo de Elasticidade	340	405	GPa
Ponto de Fusão	3410	3420	°C

Fonte: Próprio autor adaptado de Azom, 2001.

2.3. COMPÓSITOS

O termo compósito no contexto de materiais expressa que pelo menos dois materiais compartilham entre si, quando combinados a nível macroscópico, as suas propriedades, a fim de formarem um novo material com propriedades específicas, combinando as melhores características de cada um de seus constituintes.

De acordo com Callister (2002), um compósito é considerado como sendo qualquer material multifásico que exhibe uma significativa proporção de propriedades de ambas as fases constituintes de tal maneira que uma melhor combinação de propriedades é realizada.

Em termos gerais os compósitos são constituídos por uma fase de reforço como partículas, fibras curtas ou longas, estes com a finalidade de suportar as tensões que atuam no compósito, aumentar as propriedades mecânicas e outras da matriz. No que se refere a matriz, esta tem a função de manter o compósito solidário, repartir e transmitir esforços aos elementos de reforço.

No entanto, sendo a fase de reforço o elemento que induz a resistência no compósito, pois suportam os esforços principais, as características mecânicas destes materiais devem ser elevadas, em particular a resistência à ruptura e o módulo de Young (BAPTISTA e MAGALHÃES, 1988).

2.3.1. Compósitos de matriz metálica reforçados com fibras

Os compósitos são definidos inicialmente pelo tipo de matriz que se apresenta na sua constituição, estes são os Compósitos de Matriz Cerâmica – CMC, Compósitos de Matriz Polimérica - CMP e os Compósitos de Matriz Metálicas – CMM. Para este último caso, sendo metais em sua maioria dúcteis, eles podem ter emprego como matriz em compósitos reforçados por partículas, *Whiskers* ou com fibras, sendo estas contínuas ou descontínuas, alinhadas ou dispersas aleatoriamente.

Algumas ligas podem ter melhorias em suas propriedades de resistência à ruptura e de deformação à elevadas temperaturas quando apresentam reforço com fibras de metais refratários como o tungstênio por exemplo.

Segundo Kelly (1965), podem ser produzidos fios de metal por processo de extrusão com resistência disponível de até 600.000 lb/in² (~4137 Mpa). Pode-se destacar o fio de tungstênio com uma resistência de 420.000 lb/in² (~2895 Mpa) como mostrado na Tabela 06.

Tabela 06: Fios metálicos de reforço

Material*	Composição %	Tensão de Tração (σ_f) MPa	Módulo de Elasticidade (ϵ) GPa	Densidad.	Temp. de fusão
Aço	0,90 C	396	207	7,8	
Carbono					
e. Titânio	13 V-11 Cr-3 Al	2206	117	4,6	
Aço	302 (18 Cr-8 Ni)	2392	200	7,9	
inoxidável					
Rene 41	19 Cr-11 Co-10 Mo-3 Ti	2068	221	8,2	N.a
Molibdênio	99,9	2068	365	10,3	2610
Tungstênio	99,95	2896	345	19,3	3380
Alumínio	High-purity	165	69	2,8	660
Alumínio	96,5	289	69	2,8	660
Níquel	99,999	600	207	8,9	1453
Cobre	99,999	414	124	8,9	1083
Prata	99,999	207	76	10,5	960
Platina	99,999	393	152	21,4	1769

*All wires 0.006 in.in dia. (~0,150 mm)

Fonte: Próprio autor, adaptado de Kelly, 1965

Não é de muito tempo que se desenvolvem compósitos de fibra contínua nos quais ligas de alumínio, magnésio, cobre e titânio têm servido como a fase matriz, que pode ser reforçada com fibras de carbono, carbetos de silício, boro, "borsic", bem como fibras de metal (CALLISTER, 2002). Percebe-se também que as concentrações de fibra que atingem melhores resultados no que se refere a resistência à tração e módulo de elasticidade normalmente variam entre 20 e 50% volumétricos.

2.3.2. Propriedades mecânicas dos compósitos de matriz metálicas reforçados por fibras

A interação entre o reforço e a matriz é um dos aspectos preponderantes no desenvolvimento dos materiais compósitos. É importante uma adequada ligação entre as duas fases do compósito, para que as transmissões das solicitações sejam garantidas até sua resistência máxima.

As características mecânicas de um compósito reforçado com fibra dependem não apenas das propriedades da fibra, mas também do grau no qual uma carga aplicada é transmitida às fibras pela fase matriz (CALLISTER, 2002). No entanto, a transmitância da carga da matriz para as fibras de reforço está intimamente relacionada ao comprimento destas, isto é, fibras muito curtas apresentam uma ligação interfacial reduzida podendo comprometer a sua real finalidade.

A devida determinação de um comprimento mínimo para as fibras pode ser garantida pela expressão 2.1, onde L_c representa o comprimento crítico das fibras, sendo este dependente do diâmetro d e a sua resistência mecânica final σ_f e da resistência mecânica na interface matriz/fibra que coincide com o limite de escoamento cisalhante da matriz τ_c .

$$L_c = \sigma_f * d / \tau_c \quad (2.1)$$

Fibras para as quais seu comprimento é muito maior que o comprimento crítico L_c , estas são classificadas como fibras *contínuas*, esse comprimento está normalmente acima de $15 * L_c$, fibras *descontínuas* ou *curtas* apresentam comprimentos menores do que estes (CALLISTER, 2002).

Pode-se verificar também que as interações interfaciais das fases dos compósitos podem ser melhoradas com a utilização de fibras mais finas, já que para

uma mesma fração volumétrica das fibras em um compósito, a área de interação superficial fibra/matriz aumenta se diminui o diâmetro das fibras. É fácil abstrair que a área interfacial pode realmente tornar-se muito grande para reforços menores que 10 – 20 μm de diâmetro (CHAWLA N, 2013; CHAWLA KK, 2013).

A disposição ou orientação das fibras na matriz, bem como a concentração destas no compósito têm significativa importância nos resultados de resistência mecânica e outras propriedades. Ao que se refere à orientação das fibras, estas podem estar distribuídas randomicamente na matriz ou em alinhamento paralelo ao seu eixo longitudinal. Esta última condição apresenta melhores propriedades globais de compósitos obtidas quando a distribuição da fibra é uniforme (CALLISTER, 2002).

Em compósitos reforçados por fibras unidirecionais contínuas, a sua resistência à tração e módulo de elasticidade são diferentes conforme a direção do carregamento aplicado, variando de 0° a 90° em relação ao seu eixo longitudinal, isto é, estes compósitos são altamente anisotrópicos.

Considerando uma condição de isodeformação ($\epsilon_c = \epsilon_m = \epsilon_f$) nesse tipo de compósito no qual a tensão é aplicada longitudinalmente ao eixo das fibras, a carga total F_c suportada pelo compósito (eq. 2.2) é igual à soma das cargas conduzidas pela matriz e pelas fibras, representadas como F_m e F_f respectivamente (CALLISTER, 2002) e (CHUNG, 2010).

$$F_c = F_m + F_f \quad (2.2)$$

Ainda segundo Callister,(2002) e Chung (2010), os valores que exprimem a tensão resistente à tração σ_c e o módulo de Young E_c dos compósitos reforçados por fibras contínuas e alinhadas e submetidas a um carregamento paralelo ao eixo dessas fibras é obtido pelas expressões 2.3 e 2.4 respectivamente.

$$\sigma_c = \sigma_m * V_m + \sigma_f * V_f \quad (2.3)$$

$$E_c = E_m * V_m + E_f * V_f \quad (2.4)$$

Onde: V_m e V_f correspondem às frações volumétricas no compósito respectivamente.

Para este mesmo tipo de compósito, porém agora carregado perpendicularmente ao eixo longitudinal às fibras de reforço, isto é, a carga é

aplicada a 90° em relação ao alinhamento das fibras e ainda considerando a tensão a qual o compósito bem como as duas fases está exposto é a mesma, isto é, um estado de isotensão ($\sigma_c = \sigma_m = \sigma_f = \sigma$), a expressão 2.5 define o módulo de Young.

$$E_c = E_m \cdot E_f / (V_m \cdot E_f + V_f \cdot E_m) \quad (2.5)$$

2.4. PROCESSO DE SOLDAGEM COM PROTEÇÃO GASOSA – GMAW

Por volta da década de 1920 teve início o uso de gases na formação de uma atmosfera protetora da poça de fusão dos processos de soldagem, foi nesse período a criação do conceito *GMAW*, do inglês *Gas Metal Arc Welding*, porém este processo apenas veio se tornar comercial no período pós-guerra, por volta de 1948. Na época utilizava-se o processo em alta densidade de corrente e gás inerte para proteção de soldagem em alumínio, essa característica deu a designação de *MIG – Metal Inert Gas*.

Hoje o processo GMAW, padronizado pela Sociedade Americana de Soldagem – AWS é vastamente empregado nas indústrias das mais variadas atividades por ser um processo automático, semiautomático ou mecanizado, e possibilita a soldagem em todos os metais comercialmente importantes como aços carbono, aços de alta resistência e baixa liga (HSLA), aço inoxidável, alumínio, cobre, titânio e ligas de níquel podem ser soldados em todas as posições de soldagem através da escolha apropriada de gás de proteção, de eletrodos e das variáveis de soldagem (VILLANI e col. 2006).

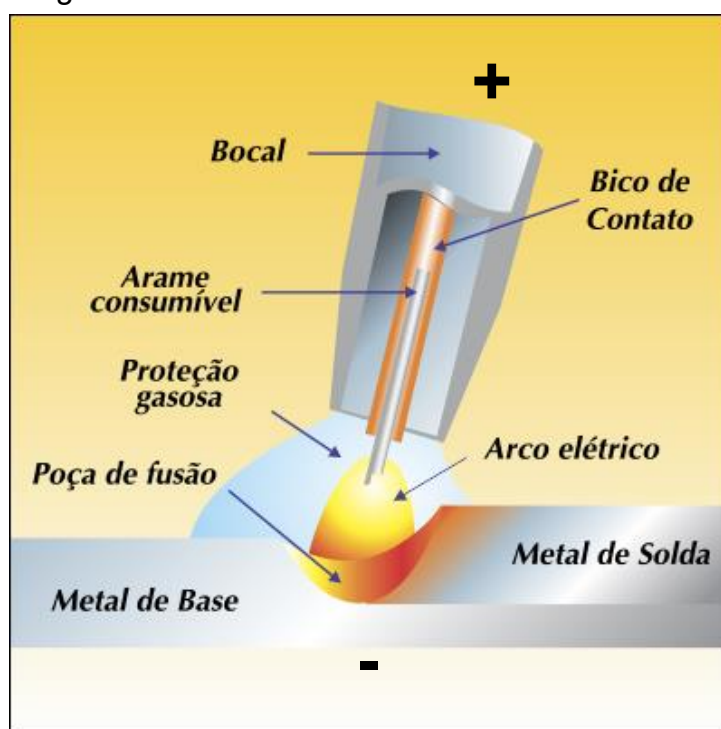
O processo GMAW apresenta outras particularidades além do emprego da atmosfera protetora formada por gases inerte ou ativo como é apresentado pelo “Welding Handbook” da American Welding Society (AWS, 1991), como um processo de soldagem a arco elétrico que usa um arco entre um arame-eletrodo de alimentação contínua e uma poça de fusão. Mesmo com essa definição aparentemente simples, existem outros fatores que influenciam na operacionalidade do processo como a composição química do arame eletrodo, os modos de transferência metálica adotados, etc (SOUZA e col. 2009).

A corrente empregada no processo é do tipo contínua onde convencionalmente é utilizada em CC+ (com o eletrodo ligado ao polo positivo e a peça ao polo negativo, também conhecido como polaridade inversa). Dessa forma

consegue-se uma maior penetração de soldagem, verifica-se menor presença de respingos, melhor estabilidade do arco, de acordo com a vasta literatura corrente, além da possibilidade de soldar com os diferentes modos de transferência metálica (curto-circuito, globular e as várias formas da transferência gotícula-“spray”).

A figura 02 ilustra o processo GMAW no local da execução da soldagem. Percebe-se a formação da poça de fusão envolta pela atmosfera gasosa protetora e nesta configuração ver-se também a indicação da ligação em polaridade inversa.

Figura 02: Processo GMAW



Fonte: Eutectic, 2017

2.4.1 Modo de transferência metálica

Na deposição do metal de adição sobre o metal base durante o processo de soldagem GMAW, inúmeros fatores influenciam no modo de transferência metálica para a peça de trabalho, são estes: a magnitude e tipo de corrente de soldagem, diâmetro do eletrodo, composição do eletrodo, extensão do eletrodo e proteção gasosa empregada, (BRACARENSE, 2003).

Os principais modos de transferência metálica são: Curto-circuito, globular, spray e arco pulsado.

Iremos aqui destacar somente o modo de transferência metálica por curto-circuito, pois este foi o modo definido para a realização da deposição do metal de

adição nesse estudo, já que este modo de transferência se apresenta como o mais empregado para chapas de menor espessura devido aos níveis relativamente baixos de corrente e tensão (QUITES, 2002 APUD BARBEDO, 2011).

Na transferência por curto-circuito, o material é depositado na poça de fusão somente quando o eletrodo entra em contato com esta, não ocorrendo transferência de material pelo arco elétrico. Dessa forma é obtida uma pequena poça de fusão de rápida solidificação. O arame entra em curto-circuito com a peça de 20 a 200 vezes por segundo (Esab, 2005). Quando o arame toca a poça de fusão a corrente aumenta para a corrente de curto-circuito, então o metal é transferido para a poça. O arco é reaberto reiniciando o ciclo. Como o arame está sendo alimentado mais rapidamente que o arco consegue fundi-lo, o arco será eventualmente extinguido por outro curto.

Vale ressaltar que são utilizadas fontes de energia de característica estática do tipo tensão constante e, em assim sendo, a variável regulada é a tensão de soldagem, bem como a velocidade de alimentação do arame. A intensidade da corrente de soldagem será, então, uma consequência da conjunção destas duas (SILVA, 2005).

Para garantir uma boa estabilidade do arco na técnica de curto-circuito devem ser empregadas correntes baixas. A Tabela 07 ilustra a faixa de corrente ótima para a transferência de metal por curto-circuito para vários diâmetros de arame. Essas faixas podem ser ampliadas dependendo do gás de proteção selecionado.

Tabela 07 – Faixa ótima de corrente de curto-circuito para vários diâmetros de arame

Diâmetro do arame		Corrente de soldagem (A)	
pol (")	mm	Mínima	Máxima
0,030	0,76	50	150
0,035	0,89	75	175
0,045	1,10	100	225

Fonte: ESAB, 2005

2.4.2 Influência da temperatura de pré-aquecimento

MARQUES (2017) destaca que a temperatura de pré-aquecimento é definida como a temperatura inicial na qual toda a peça ou somente a região a ser soldada é submetida antes da operação de soldagem proporcionando uma redução na velocidade de resfriamento e nos gradientes térmicos. Para uma dada composição do aço, existe uma taxa de resfriamento crítico, que quando essa taxa excede o valor crítico do metal de solda, estruturas duras de martensita podem se desenvolver e então existe um grande risco de fraturas e deformações sob a influência das tensões térmicas na presença de hidrogênio (TSAI, 1993 APUD PEREZ, 2007).

A martensita forma-se no momento do resfriamento da peça soldada, predominantemente entre a solda e a zona termicamente afetada (ZTA). A quantidade de martensita formada pode ser controlada pela redução de velocidade de resfriamento quando aplicado o pré-aquecimento, diminuindo a diferença de temperatura entre a solda e sua vizinhança. Em suma, o pré-aquecimento reduz o risco de trincas induzidas por hidrogênio e tensões de contrações que podem levar a deformações indesejadas na peça.

A composição química do metal de base deve ser conhecida para que seja possível se determinar a faixa de temperatura adequada para o pré-aquecimento, pois ela é determinada por dois fatores principais: o teor de carbono no aço e teor de elementos de ligas.

Um método simples para determinar a necessidade de pré-aquecimento do metal base é o do carbono equivalente (CE).

Para o cálculo do carbono equivalente, deve-se determinar o teor aproximado de outros elementos de liga que produzem a mesma dureza de 1% de carbono com emprego da seguinte expressão (PEREZ, 2007):

$$CE = \%C + [(\%Mn + \%Si)/6] + [(\%Cr + \%Mo)/5] + [(\%Ni + \%Cu)/15]$$

A expressão acima determina o cálculo do carbono equivalente, sendo largamente utilizada, é dada pelo IIV (*International Institute of Welding*).

A tabela 08 apresenta as faixas de temperaturas de pré-aquecimento para um dado valor de CE.

Tabela 08: Temperatura de pré-aquecimento recomendada x CE

Carbono equivalente Ceq [%]	Temperatura de pré-aquecimento recomendada
≤ 0,30	opcional
0,31 - 0,45	100°C - 200°C
0,45 - 0,60	200°C - 250°C
> 0,60	250°C - 300°C
Aços ferramenta, aços mola, aços de composição desconhecida	~ 300°C

Fonte: Fortes, 2004 apud Godoy, 2008

2.5 DIFUSÃO

Os materiais quando submetidos à elevadas de temperaturas, em destaque para os metais, estão sujeitos a fenômenos físico e químicos que podem interferir nas suas propriedades. Os fenômenos que ocorrem durante os tratamentos térmicos quase sempre envolvem difusão atômica.

Muitos desses fenômenos baseiam-se na transferência de massa, seja dentro de um sólido específico, um líquido, um gás, ou com outra fase sólida. Isto é necessariamente realizado por difusão, o fenômeno do transporte de material por movimento atômico (CALLISTER, 2002).

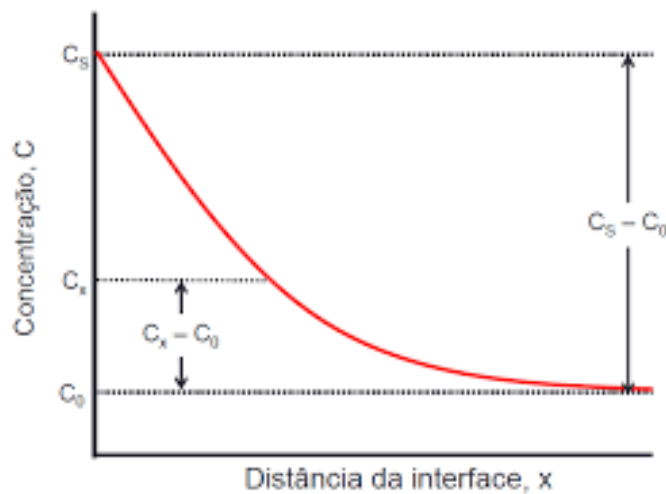
No caso dos metais, onde estes apresentam-se no estado sólido cristalino, a difusão dentro da rede cristalina ocorre tanto por mecanismos intersticiais como substitucionais e é tratado como difusão de retículo (HEITJANS, KARJER, 2005).

A difusão está necessariamente relacionada com o tempo em que os pares interagem entre si, sendo importante conhecer o quanto rapidamente a difusão ocorre, ou taxa de transferência de massa. Essa taxa é denominada como fluxo de difusão (J), definido como a massa M que se difundem perpendicularmente por unidade de área através de uma seção reta do sólido por unidade de tempo. (CALLISTER, 2002)

Se o fluxo de difusão não variar com o tempo, ela é entendida como difusão em estado estacionário, no entanto, a maioria das situações práticas relacionadas

com o fenômeno de difusão ocorre em condições de estado não-estacionária, Isto é, o fluxo de difusão e o gradiente de concentração em um ponto particular num sólido varia com o tempo, resultando um acúmulo líquido ou um decréscimo líquido (esgotamento) das espécies difusoras (CALLISTER, 2002). A figura 03 apresenta o perfil de concentração para difusão em estado não-estacionário.

Figura 03 – Perfil de concentração para difusão



Fonte: Callister, 2002

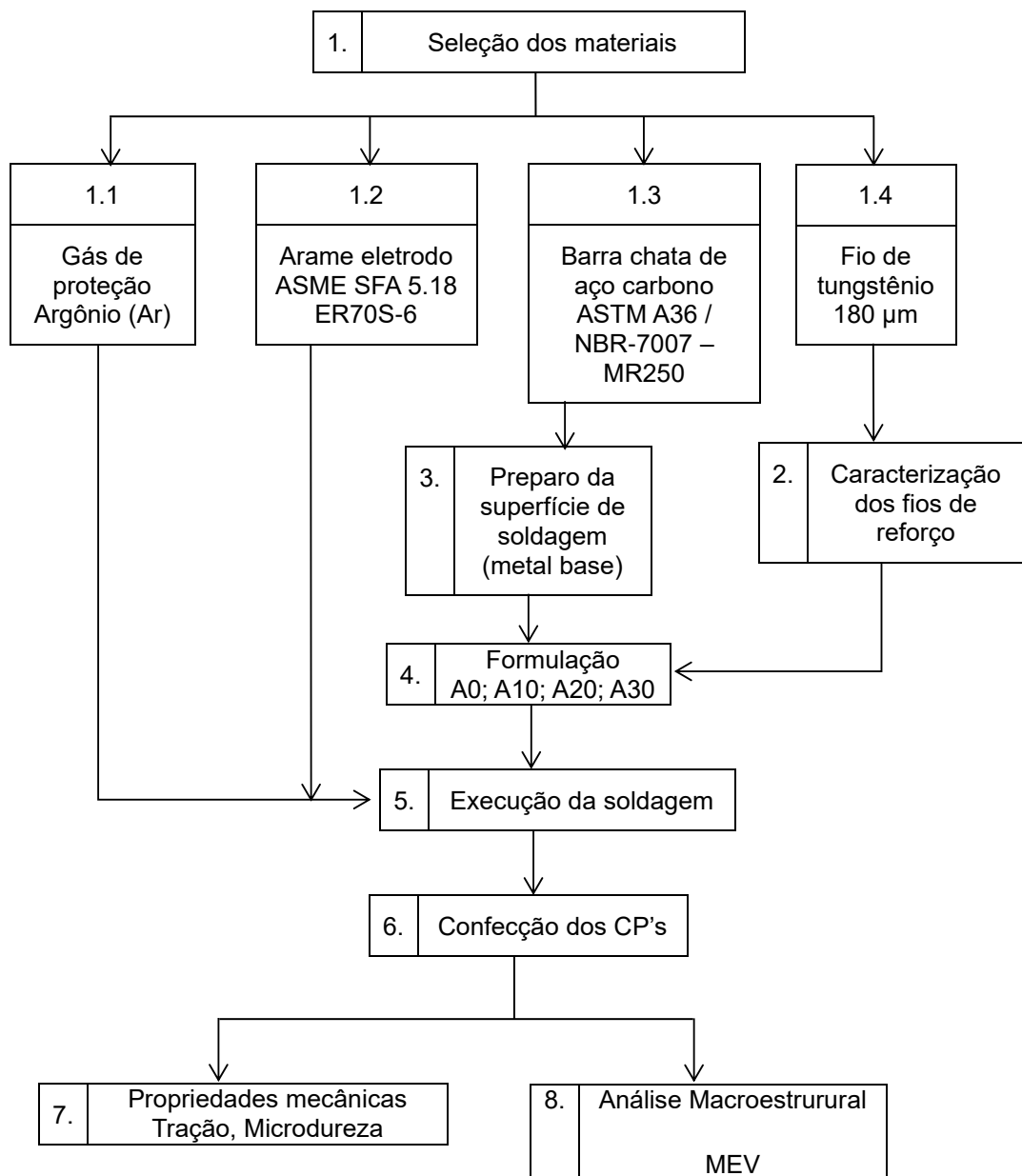
3 MATERIAIS E MÉTODOS

O procedimento experimental adotado (Figura 03) constou inicialmente da caracterização dos fios de tungstênio utilizados como reforço do metal de solda quanto a sua característica mecânica de resistência à tração e composição química. Após isso procedeu-se a disposição dos fios sobre uma barra chata de aço carbono de média resistência, sendo em seguida depositado sobre estes o metal de solda, de modo a cobrir os fios de tungstênio formando uma mistura heterogênea composta pelo metal de adição como matriz e os fios dispostos em proporções volumétricas de 10%, 20% e 30% como a fase dispersa, em seguida o material foi caracterizado mecanicamente e macroestruturalmente.

Os ensaios mencionados nesse trabalho, bem como o preparo das matérias-primas, preparação e execução dos corpos de prova, análises macroestruturais foram realizados nos laboratórios do Programa de Pós-graduação em Engenharia de Materiais (PPgEM) do Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Piauí, IFPI – Campus Central; laboratório de mecânica do Instituto de Educação, Ciências e Tecnologia do Ceará, IFCE – Campus Juazeiro do Norte e laboratórios do curso de Engenharia de Materiais da Universidade Federal do Cariri – UFCA.

O fluxo do processo executado na metodologia deste trabalho é apresentado esquematicamente na figura 04 a seguir:

Figura 04 – Fluxograma do procedimento experimental



Fonte: Próprio autor, 2021

3.1. MATERIAIS

3.1.1. Gás de proteção

Para a formação da atmosfera inerte foi utilizado o gás argônio sem mistura a 99,99% de pureza armazenado em cilindro de 8 m³.

3.1.2. Metal de adição

O metal de adição para o processo de soldagem que contribuiu como fase matriz do CMM estudado foi o arame sólido de aço ao carbono cobreado, manganês-silício de especificação ER70S-6 conforme a AWS A 5.18, com diâmetro nominal de 1 mm, da marca ESAB OK autrod 12.51, disponível em bobinas de 15 kg.

As especificações técnicas da composição química nominal e propriedades mecânicas típicas estão representadas a seguir:

Tabela 09: Composição química do metal de adição (% massa)

Arame sólido ER70S-6; AWS A 5.18			
Elemento	C	Mn	Si
Teor (%)	0,08	1,50	0,90

Fonte: Catálogo consumíveis ESAB/2021

Tabela 10: Propriedades mecânicas do metal de adição

Propriedades Típicas de Tensão				
Condição	Como Soldado	Como Soldado	Como Soldado	Alívio de Tensões
Gás de proteção	EN CO2	AWS CO ₂	EN 80Ar/20CO ₂	EN 80Ar/20CO ₂
Resistência à Tração	540 Mpa	530 MPa	560 MPa	495 MPa
Limite de Escoamento	440 Mpa	430 MPa	460 MPa	370 MPa
Alongamento	25 %	30 %	26 %	28 %
Tempo de Teste				15 horas
Temperatura de Teste				620 °C

Fonte: Catálogo consumíveis ESAB/2021

3.1.3. Metal base

Para posicionamento dos feixes de fios de tungstênio nas quantidades referentes às proporções de 10%, 20% e 30% de volume e posterior deposição do metal de adição de soldagem, foi utilizado para tal uma barra chata de aço carbono estrutural de média resistência mecânica, com dimensões de 25,4 mm x 100 mm e espessura de 6,0 mm, com características químicas e mecânicas regulamentadas pela norma técnica brasileira ABNT NBR-7007 classe MR-250 ou seu equivalente ASTM A-36.

Suas propriedades mecânicas e composição química estão apresentadas nas tabelas 1, 2, 3 e 4 na página 14.

3.1.4. Fios de reforço

Para formação da fase de reforço na matriz metálica composta pelo metal de solda do arame eletrodo foram utilizados fios contínuos de tungstênio com diâmetro de 0,18 mm, disponíveis em rolos de 500 m da marca *General Electric*, tipo 218C.

Ensaio de tração realizados em 30 amostras de fios únicos de tungstênio por Bomford e Kelly (1970), apresentaram resultado médio de resistência à tração de 2089 Mpa.

A figura 05 a seguir apresenta o material em rolos de fio de tungstênio utilizados neste estudo.

Figura 05: Fio de tungstênio



Fonte: Próprio autor, 2019

3.2. MÉTODOS

3.2.1. Caracterização dos fios de reforço

As análises da composição química dos fios de tungstênio tipo 218C da *General Eletric* foram realizadas na máquina de FRX, modelo Epsilon3-XL da marca PANalytical, do laboratório de materiais (Figura 06), LABMAT, do Programa de Pós-graduação em Engenharia dos Materiais – PPGEM, do IFPI – Campus Central. A análise indicou uma pureza de 99,66 % de tungstênio nos fios analisados.

Figura 06: Máquina de FRX, Modelo Epsilon3-XL/PANalytical



Fonte: Próprio autor, 2019

3.2.2. Preparo do material base para soldagem

Para deposição do metal de adição fundido proveniente da operação de soldagem, foi necessário fazer uma devida preparação do material de base. Uma barra chata de aço carbono estrutural de média resistência mecânica teve inicialmente suas superfícies limpas com auxílio de uma escova de aço para remoção de quaisquer vestígios de óxidos que estivesse presente.

Devido a necessidade de execução de soldagem em multipasses para

garantir uma total deposição de metal de solda sobre a superfície e, portanto, uma boa cobertura dos fios de tungstênio, foi importante verificar a necessidade de se fazer um pré-aquecimento do metal de base.

Para tal verificação foi usado método do carbono equivalente (CE) para aço carbono, definido pela expressão apresentada no item 2.4.2, página 24.

De posse dos valores percentuais da composição do aço carbono empregado nesse estudo, vistos nas tabelas 1 e 3, para aços de média resistência mecânica regulamentados pelas normas ABNT NBR-7007/classe MR250 e ASTM A-36, os valores de carbono equivalente são de 0,32 e 0,485 respectivamente.

Como os valores do CE de pelo menos uma das regulamentações do aço foi maior do que 0,4, decidiu-se executar o pré-aquecimento do metal de base na faixa de temperaturas entre 100 °C a 200°C.

O pré-aquecimento do metal base foi feito em forno de resistência elétrica e controlada sua temperatura de pré-aquecimento com termômetro digital infravermelho. O controle da temperatura foi mantido antes do primeiro passe de soldagem, bem como nos interpasses.

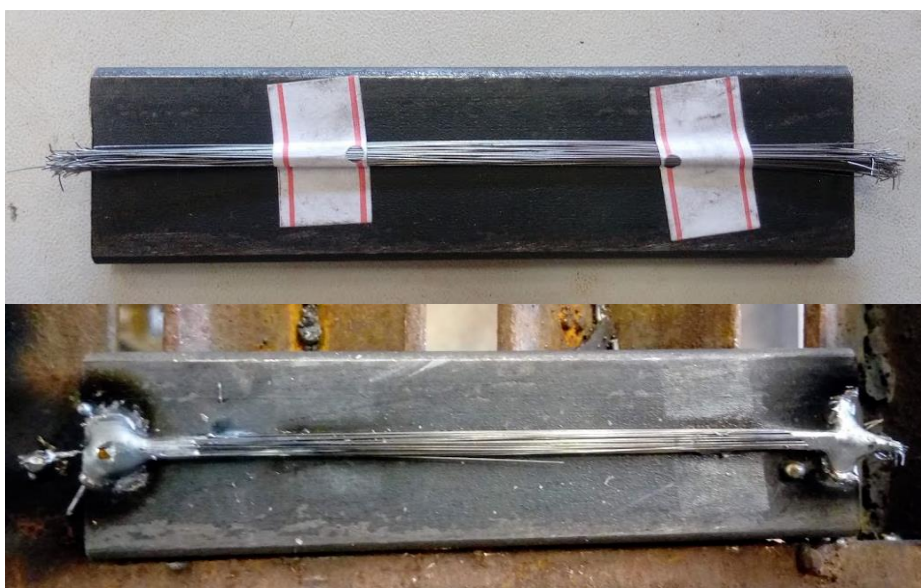
Figura 07: Monitoramento da temperatura de pré-aquecimento.



Fonte: Próprio autor, 2020

Os fios de tungstênio foram agrupados em feixes nas quantidades determinadas para cada proporção de volume para 10%, 20% e 30%, conforme visto no item 3.2.3 na tabela 11. Dessa forma foram fixados inicialmente por solda pontual em suas extremidades sobre a barra chata de aço conforme visto na figura 08.

Figura 08: Posicionamento e fixação dos fios de tungstênio sobre a barra de aço antes da soldagem de deposição.



Fonte: Próprio autor, 2021

3.2.3. Formulação

Para se verificar a real contribuição das fibras de reforço na matriz do metal de solda, foram estudadas 03 (três) amostras para cada percentual de volume relativo diferente.

As proporções de volume relativo serão de 0 % (zero), para a formação das amostras de controle, ou seja, será depositado sobre o metal base apenas o material de adição proveniente do arame eletrodo. As demais proporções serão de 10%, 20% e 30% do volume total do material.

As quantidades de fios para cada variação volumétrica estão apresentadas na tabela 06 para ensaios de tração. Estas quantidades foram obtidas pelo resultado do cálculo das áreas da seção transversal total desejada do corpo de prova e da seção transversal de um único fio de tungstênio. Donde foram deduzidas as seguintes expressões para determinação do número de fios para cada percentual

volumétrico para ensaio mecânicos de tração. (1.0):

$$N_f = (36 * V_f) / 0,0254 \quad (1.0)$$

Onde, N_f e V_f representam o número de fios dispostos na matriz e a fração volumétrica em questão, respectivamente. Caso o resultado do número de fios não seja um número inteiro, iremos admitir aqui o arredondamento para o inteiro mais próximo.

Tabela 11: Número de fios por fração volumétrica (ensaio de tração)

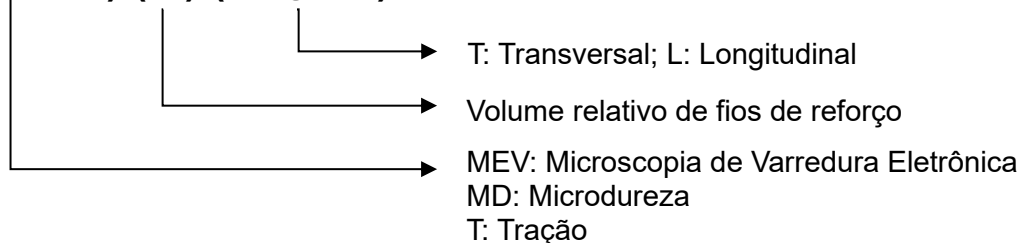
% Volumétrico	Nº de fios de tungstênio
0	-
10	142
20	283
30	425

Fonte: Próprio autor, 2021

3.2.3.1. Terminologia das amostras

As amostras foram identificadas conforme metodologia própria definida nesse trabalho como padrão. Todas as nomenclaturas para as amostras serão iniciadas pela letra A (maiúscula), seguida das orientações vistas a seguir:

A (ENSAIO) (%) (SEÇÃO)



3.2.4. Execução da soldagem

A soldagem foi realizada pelo processo ao arco elétrico com proteção gasosa e arame eletrodo contínuo de alimentação semiautomática, GMAW – MIG,

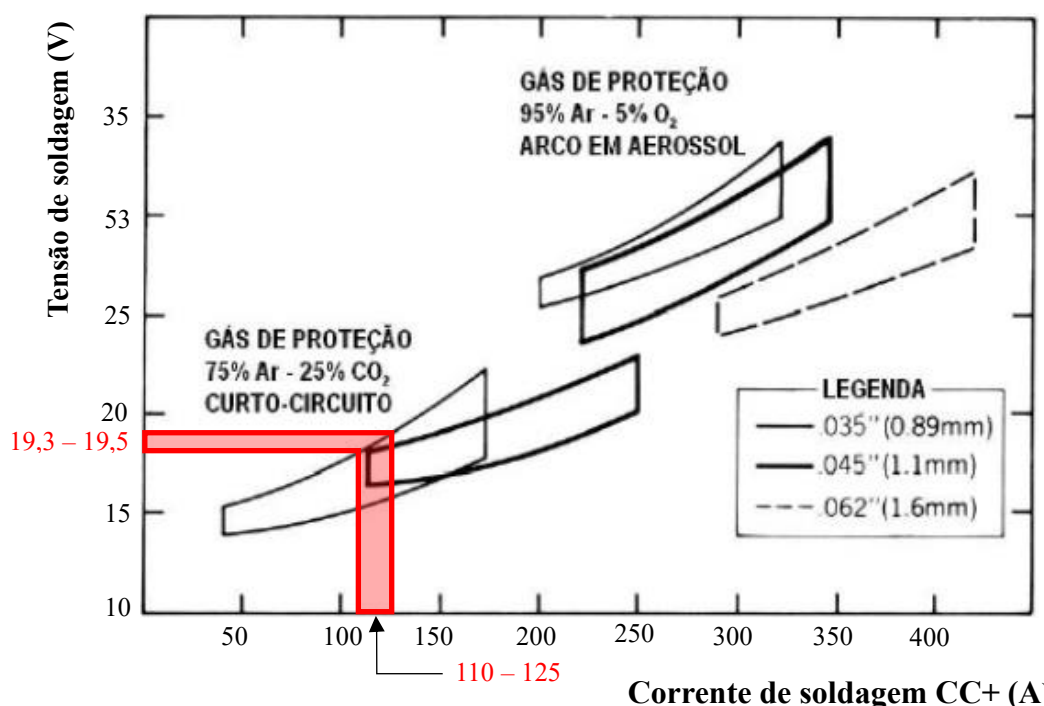
com equipamento MERKLE BALMER MB-355D, utilizando gás de proteção inerte argônio.

Como consumível de soldagem utilizou-se o arame AWS ER-70S-6 de 1,0 mm de diâmetro, cuja informações mais detalhadas podem ser vistas no item 3.1.2.

Para a deposição do metal de adição sobre o metal de base e os fios de reforço, optou-se pelo modo de transferência por curto-circuito (MIG-CC), com os parâmetros de soldagem mantendo-se inalterados para a execução de todos os corpos de prova desse estudo. Tais ajustes dos parâmetros de soldagem foram mantidos nos intervalos de valores de tensão de 19,3 – 19,5 V, corrente na faixa de 110 a 125 A, velocidade do arame eletrodo de 4 m/min e vazão do gás de proteção ajustado em 12 l/min.

Os valores de ajustes de tensão e corrente foram orientados com base no diagrama a seguir (Figura 09), que apresenta valores de relação tensão do arco e corrente de soldagem para seleção do modo de transferência desejado.

Figura 09: Relação tensão do arco e corrente de soldagem



Fonte: Próprio autor, 2021. Adaptado de ESAB, Manual de solda MIG/MAG, 2021

A deposição do metal de adição foi realizada manualmente mantendo a tocha de soldagem em uma inclinação aproximada de 15° (referência pela vertical) executando multipasses de soldagem no sentido à direita, ou seja, “puxando” o

cordão de solda. A figura a seguir apresenta o resultado da deposição do metal de adição sobre os fios de tungstênio e metal base depois do primeiro passe.

Figura 10: Corpo de prova de ensaio de tração (AT10). Execução do primeiro passe de soldagem sobre o metal base e fios de reforço.



Fonte: Próprio autor, 2020

3.2.5. Confecção dos corpos de prova

3.2.5.1. Corpo de prova para ensaio de tração

Os corpos de prova para os ensaios de tração foram extraídos a partir da chapa soldada apresentada no item 3.2.4 deste trabalho no sentido longitudinal ao cordão de solda executado. As suas dimensões foram alinhadas conforme a norma técnica de ensaios mecânicos de tração à temperatura ambiente segundo a NBR 6152/2002, tendo como dimensão inicial de referência a largura nominal de 6 mm. A partir desta, as demais dimensões são encontradas no item 6.1.2 e anexo C da referida norma.

As dimensões finais dos corpos de prova de tração foram de 100 mm de comprimento total, onde neste é marcado o seu comprimento inicial (L_0) de 35 mm na porção mediana e uma seção quadrada de 6 mm x 6 mm.

Para a operação de usinagem do corpo de prova, foi utilizada uma fresadora modelo Diplomat 3001 do laboratório de mecânica do IFCE – campus Juazeiro do Norte – CE. Nesse processo desejava-se a extração do corpo de prova formado predominantemente pelo metal de solda sem os fios de reforço para as amostras de controle e com os fios para aqueles que compunham as amostras com as dosagens

de fios de tungstênio previamente determinadas. Como resultado, conseguiu-se uma barra prismática com as dimensões informadas anteriormente, de tal maneira a localizar os fios de tungstênio no centro da seção transversal do mesmo.

As figuras 11 (a),(b),(c),(d),(e) em sequência ilustram o local e orientação de extração do corpo de prova para ensaio mecânico de tração. Onde é visto em (a) barra chata de aço carbono (metal base) de dimensões 100 x 25,4 x 6 mm, (b) alinhamento dos fios de reforço ao longo do comprimento do metal base, (c),(d) metal de adição depositado sobre os fios de reforço e o metal base, destacando a região correspondente ao corpo de prova resultante, e (e) corpo de prova em suas dimensões finais.

Figura 11a



Figura 11b



Figura 11c



Figura 11d



Figura 11e



Fonte: Próprio autor, 2021

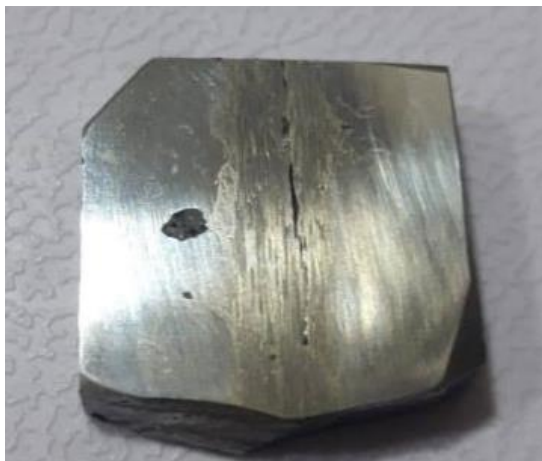
3.2.5.2. Corpo de prova para ensaio de microdureza

Seguindo a mesma metodologia de confecção dos corpos de prova para ensaios de tração, conforme visto no item 3.2.5.1, destinou-se um CP de cada formulação de volume de reforço, sendo estes de 0; 10%; 20% e 30% para serem cortados no sentido transversal. O corte foi efetuado por cortadora metalográfica com disco abrasivo modelo CM305 e emprego de fluido de corte.

3.2.5.3. Amostra para análise em Microscopia Eletrônica de Varredura

De posse de um corpo de prova escolhido aleatoriamente quanto a formulação de volume relativo de reforço de fios de tungstênio, foram executadas duas seções na amostra, orientadas transversalmente e longitudinalmente, de tal maneira a apresentar a região com os fios de tungstênio envoltos pela matriz metálica formada pelo metal de adição proveniente do arame eletrodo fundido, conforme vistos nas figuras apresentadas a seguir:

Figura 12: Seção longitudinal



Fonte: Próprio autor, 2021

Figura 13: Seção transversal



Fonte: Próprio autor, 2021

3.2.5.4. Preparo das amostras para ensaios de microdureza e microscopia eletrônica de varredura

Todas as etapas de preparo das amostras para microscopia eletrônica de varredura e microdureza foram realizadas no Laboratório de Materiais da UFCA – Campus Juazeiro do Norte. Após a confecção dos CP's e amostras, estas foram embutidas pelo método a quente em baquelite nº 03 em uma prensa de embutimento modelo EDF30 - Fortel para posterior lixamento e polimento das amostras.

Figura 14:
Politriz modelo PLF - Fortel



Fonte: Próprio autor, 2021

Figura 15:
Prensa de embutimento EDF30 - Fortel



Fonte: Próprio autor, 2021

As amostras foram lixadas e polidas na politriz modelo PLF - Fortel, seguindo a ordem de tratamento nas lixas de granulometria de 220, 320, 400, 600, 800 e 1200, respeitando a técnica de lixamento manual que consiste em se lixar a amostra sucessivamente com lixas de granulometria cada vez menor, mudando-se de direção (90°) em cada lixa subsequente até desaparecerem os traços da lixa anterior. Após a etapa de lixamento, as amostras foram polidas com pasta de alumina e reservadas em estufa a vácuo até a realização dos ensaios.

3.2.6 Ensaios Mecânicos

Os ensaios mecânicos foram realizados no Laboratório de Materiais (LABMAT), do campus central do IFPI em Teresina – PI e no Laboratório de Materiais da UFCA, Campus Juazeiro do Norte-CE.

Todos os ensaios mecânicos foram inicialmente realizados em amostras de controle, estas com fração volumétrica de 0%, afim de estabelecer parâmetros de referência das resistências mecânicas analisadas nos ensaios. Para cada um dos ensaios mecânicos foram testados 03 (três) amostras de cada fração volumétrica relativa de fios reforço, sendo de 10%, 20% e 30%, assim também para as amostras de controle.

3.2.6.1 Ensaio de Tração

Para os ensaios de tração foi utilizado o equipamento universal de ensaios, modelo WDW-300E da marca TIME SHIJIN, do laboratório de materiais da UFCA, com capacidade de carga de 300 kN. A velocidade de deslocamento dos cabeçotes foi de 0,5 mm/min com carga inicial de 0,05 kN. Este ensaio foi referenciado pela norma técnica NBR 6152 para ensaios mecânicos de tração à temperatura ambiente.

Figura 16: Ensaio de Tração. CP amostra de controle.

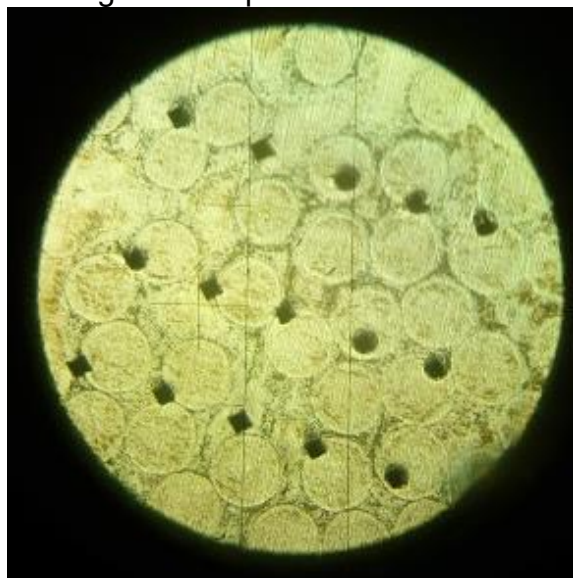


Fonte: Próprio autor, 2021.

3.2.6.2 Ensaio de Microdureza

Foram realizados ensaios de dureza Vickers, à temperatura ambiente, com carga de 1,0 kgf (9,8 N) e tempo de carregamento de 10 segundos, em corpos de prova retirados transversalmente ao eixo longitudinal do cordão de solda. Os pontos de teste foram tomados ao longo de linhas e colunas formando uma malha em duas regiões delimitadas na face da amostra com um espaçamento de 0,2 mm entre colunas e 0,3 mm entre linhas, conforme mostra a Figura 17. Na execução destes ensaios foi utilizado um durômetro modelo DHTMV-1000.

Figura 17: Matriz de varredura de microdureza em uma região na superfície da amostra



Fonte: Próprio autor, 2021

3.2.7. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Através da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), foi possível realizar a análise da morfologia, dispersão e condição de envelopamento dos fios de reforço da matriz metálica reforçada com frações volumétricas de fios de tungstênio.

As análises de MEV foram realizadas em um Microscópio Eletrônico de Varredura da marca TESCAN, modelo Vegas 3 SBU, do laboratório de matérias da UFCA, Campus Juazeiro do Norte, operando em uma voltagem de 10 kV para o feixe de elétrons. Para a formação de imagens foram empregados os sistemas secundários (SE) e retroespalhados (BSE).

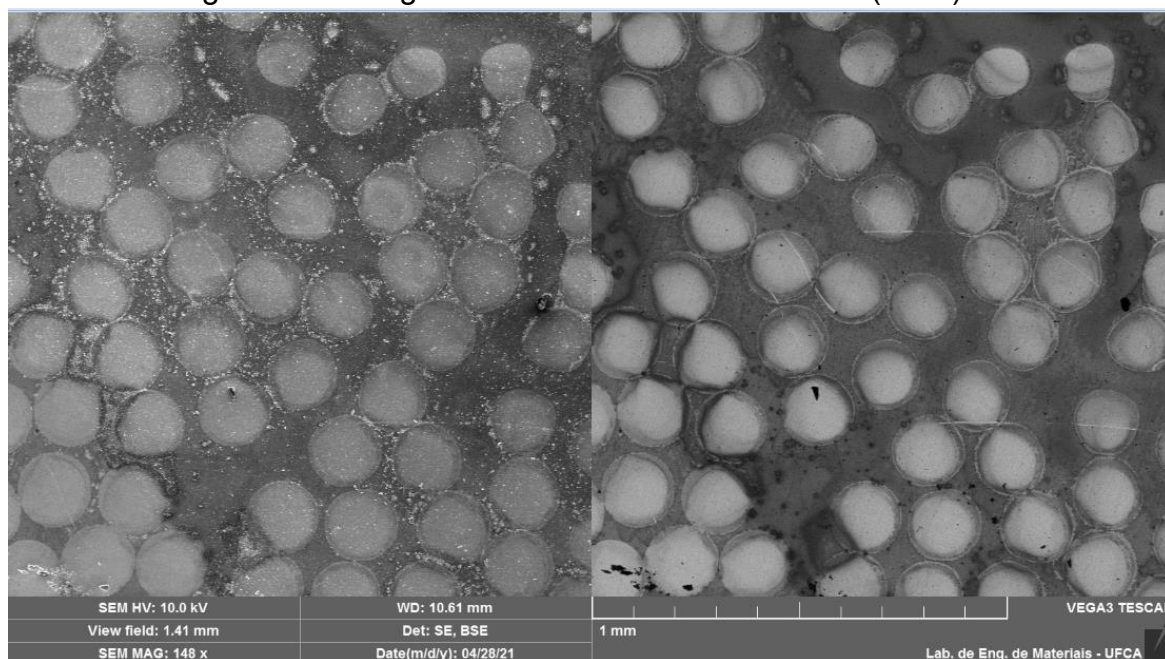
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados dos ensaios realizados para a análise do material de solda na condição de compósito de matriz metálica (CMM) no tocante as propriedades mecânicas e condição morfológica resultante do método empregado neste estudo.

4.1 ANÁLISE DA MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

Com os resultados da microscopia eletrônica de varredura, foram inicialmente verificadas as condições da morfologia do material a fim de constatar o nível de envelopamento dos fios pela matriz metálica e qual grau de molhamento apresentado. Foram tomadas como referência as imagens de MEV de duas amostras com formulação de volume relativo de reforço de 20%, executadas exclusivamente para essa análise, denominadas aqui como AMEV20T e AMEV20L, estas tendo corte transversal e longitudinal respectivamente. Vale ressaltar que a metodologia e parâmetros empregados para a execução das amostras foram mantidos para todas amostras dos demais ensaios.

Figura 18 – Imagem MEV da amostra AMEV20T (148x)

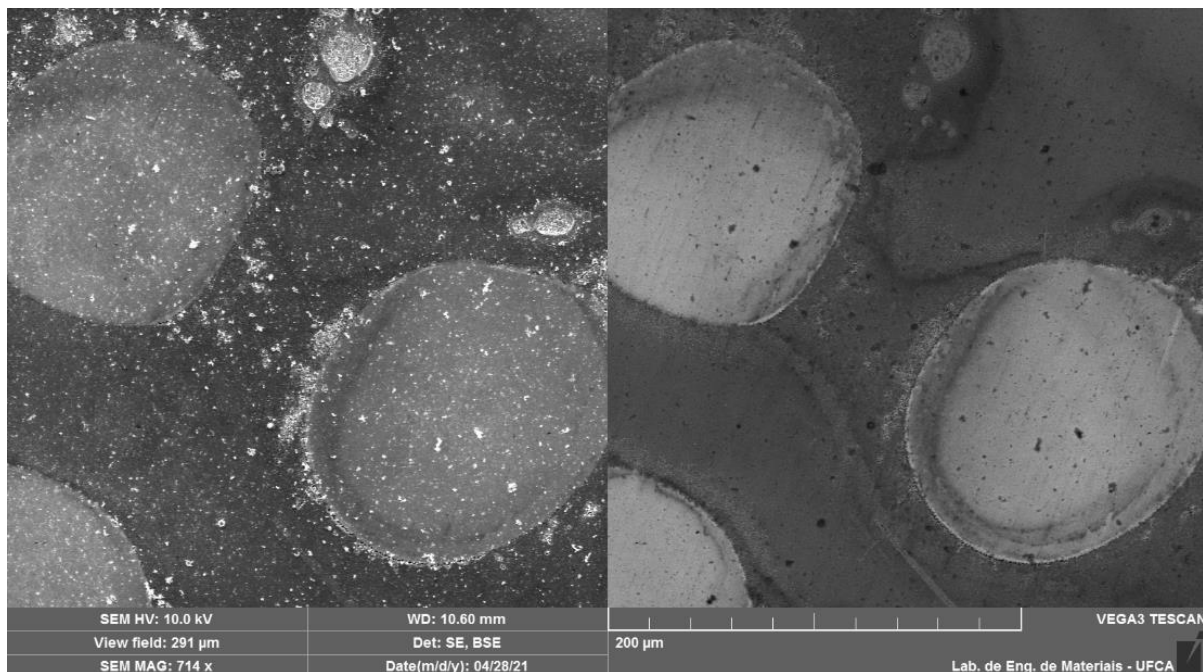


Fonte: Próprio autor, 2021

Pode-se constatar na figura 18 que os fios de tungstênio se apresentam dispersos na matriz metálica de aço carbono e estes não indicando nenhum sinal de fusão, dessa maneira dando uma heterogeneidade entre a matriz e os fios de reforço, caracterizando de fato um compósito de matriz metálica como esperado, já que o ponto de fusão do tungstênio apresenta-se muito acima da temperatura necessária para fusão da matriz de aço carbono.

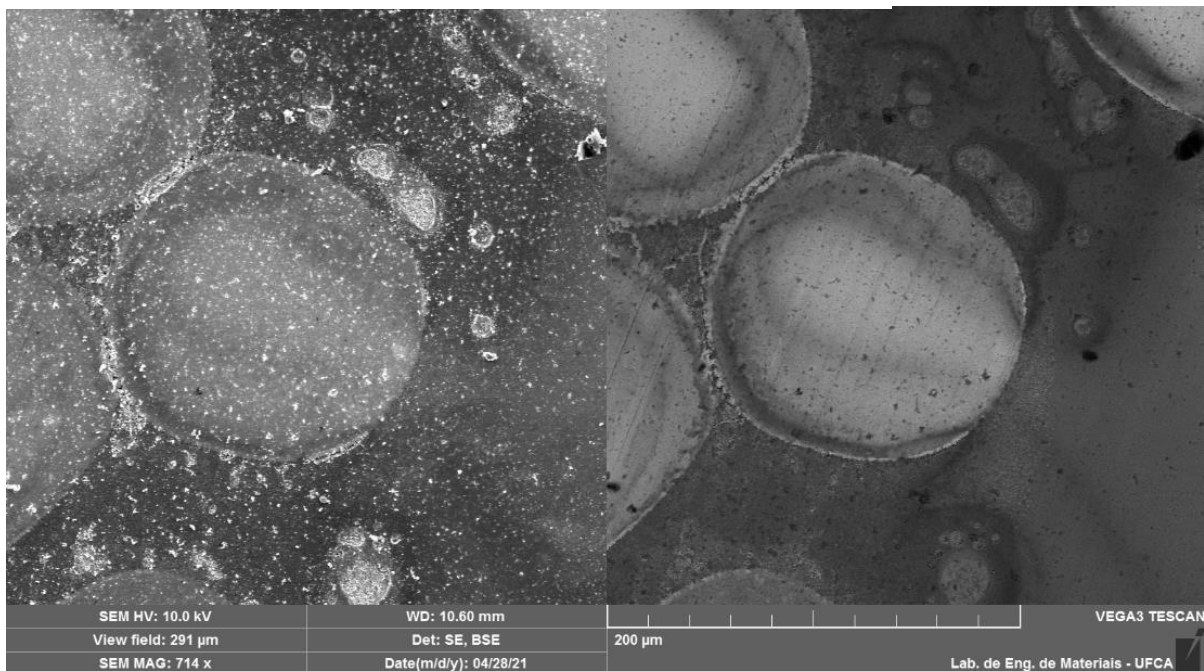
Observando as imagens (Figuras 19, 20 e 21), de diversos pontos das amostras AMEV20T e AMEV20L, também se pode constatar que o envelopamento ocorreu satisfatoriamente, resultando em um excelente grau de molhamento dos fios pela matriz independentemente das distâncias entre estes, apresentando pouco ou mesmo nenhum indício de vazios nas regiões analisadas além de apresentar regiões de interface bem definidas, como podem ser vistas em detalhes também nas imagens (Figuras 22, 23 e 24).

Figura 19 – Imagem MEV da amostra AMEV20T (714x)



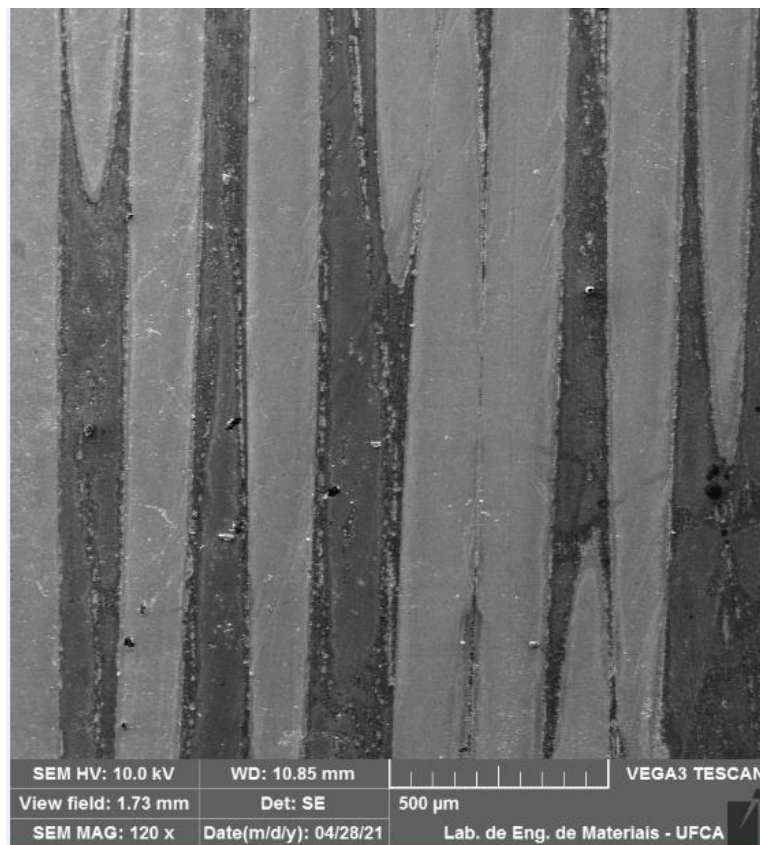
Fonte: Próprio autor, 2021

Figura 20 – Imagem MEV da amostra AMEV20T (714x)



Fonte: Próprio autor, 2021

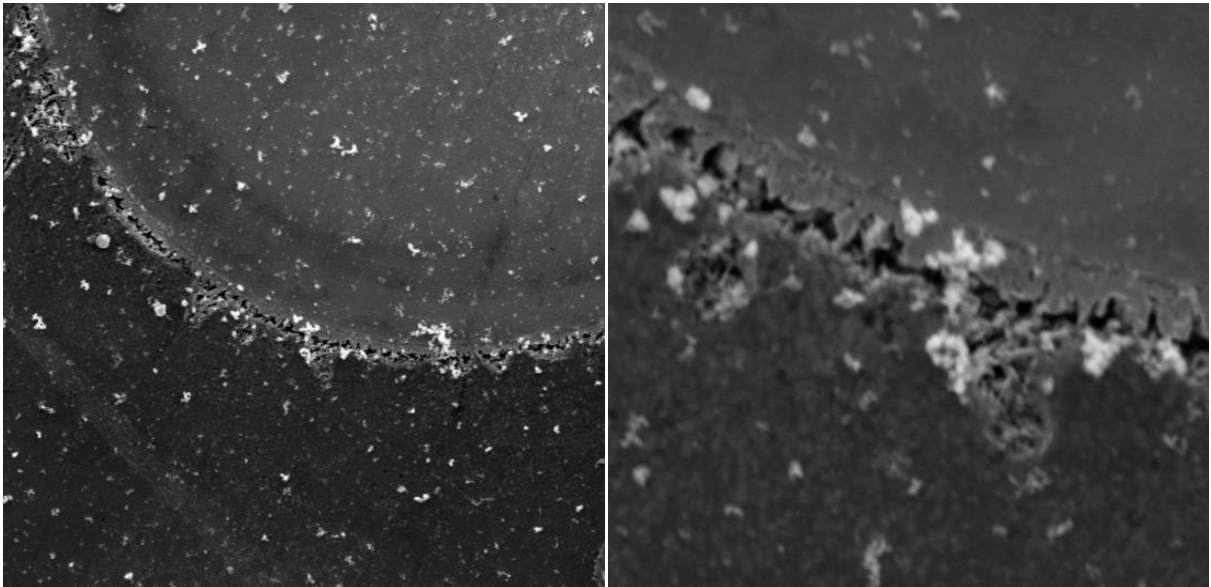
Figura 21 – Imagem MEV da amostra AMEV20L (120x)



Fonte: Próprio autor, 2021

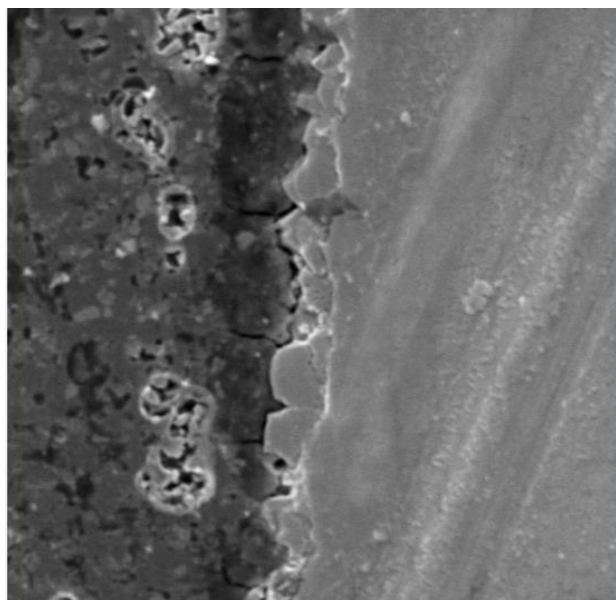
Percebe-se ainda em imagens de grande ampliação como nas figuras (23), (25) e (25), que nos contornos dos fios de tungstênio, logo na região de interface com a matriz, formação de superfícies irregulares com dimensões variando em torno de 1,2 μm a 2,2 μm que contribuem de forma a incrementar o mecanismo de interação fibra-matriz, já que a aderência mecânica dessas duas fases está relacionada com o grau de rugosidade ou geometria variável das fibras de reforço e é utilizada para incrementar a resistência ao arrancamento destas, conforme sugere LIMA, 2004.

Figura 22 – MEV – SE, região de interface, AMEV20T (2.300x) e (9.000x).



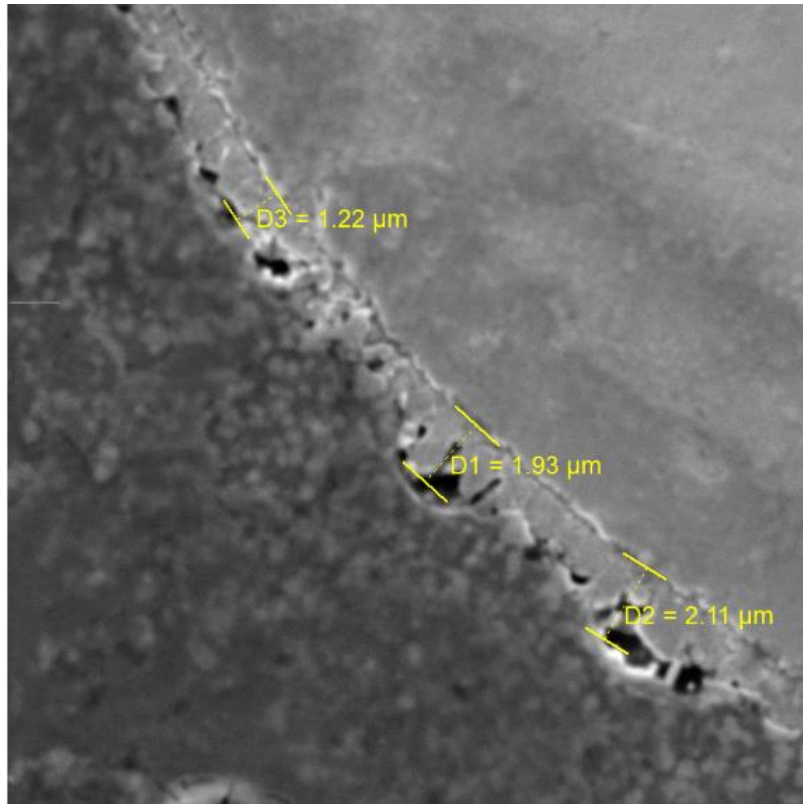
Fonte: Próprio autor, 2021

Figura 23 – MEV – SE, região de interface, AMEV20L (7.700x).



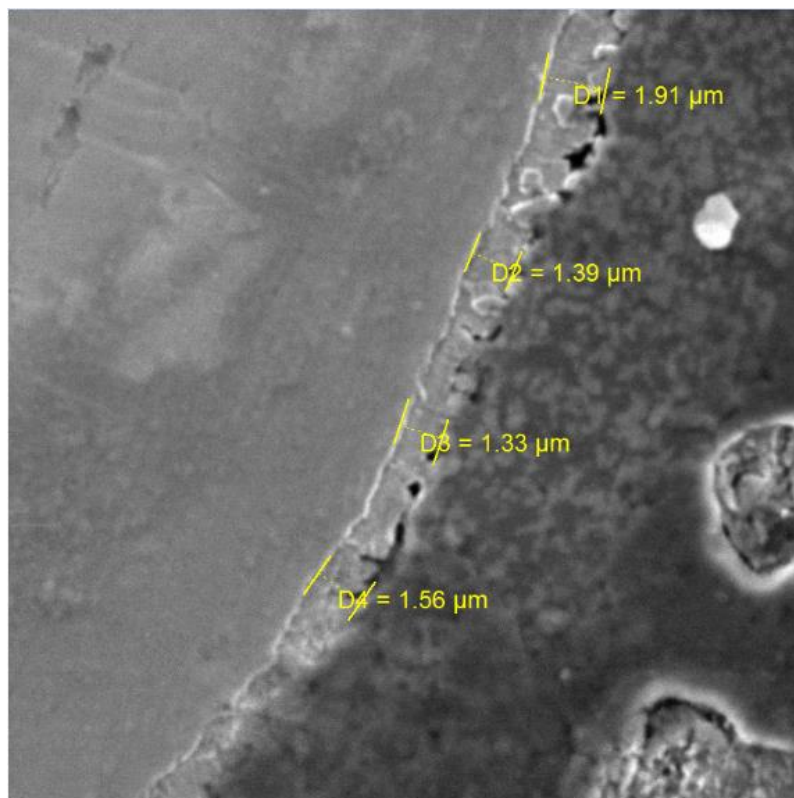
Fonte: Próprio autor, 2021

Figura 24 – Rugosidade de superfície de interface, AMEV20T (9.000x).



Fonte: Próprio autor, 2021

Figura 25 – Rugosidade de superfície de interface, AMEV20T (9000x).



Fonte: Próprio autor, 2021

Nas imagens de MEV-BSE em ampliações maiores que 300x, foi possível notar indícios de fenômeno de difusão do tungstênio na matriz de aço nas regiões próximas aos fios de reforço. Estas regiões exibem aparência microestrutural diferente de outras regiões da matriz distante dos fios de tungstênio, onde pode ser visualizado na região em destaque nas figuras (26a) que não apresenta indícios marcantes de difusão do tungstênio, diferentemente da região na figura (26b), onde fica evidente a ocorrência de difusão.

Figura 26 – MEV-BSE, AMEV20T (360x).

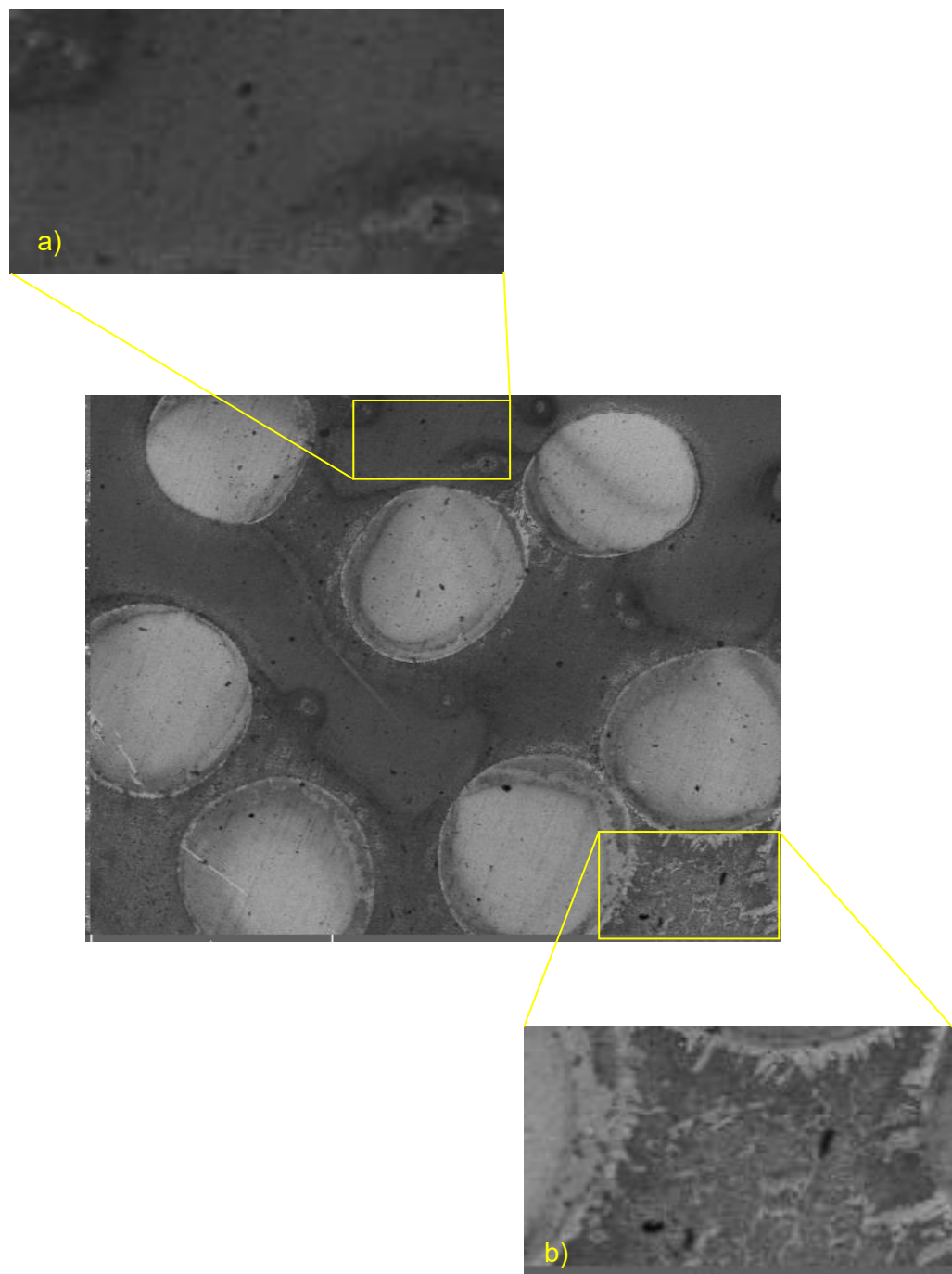
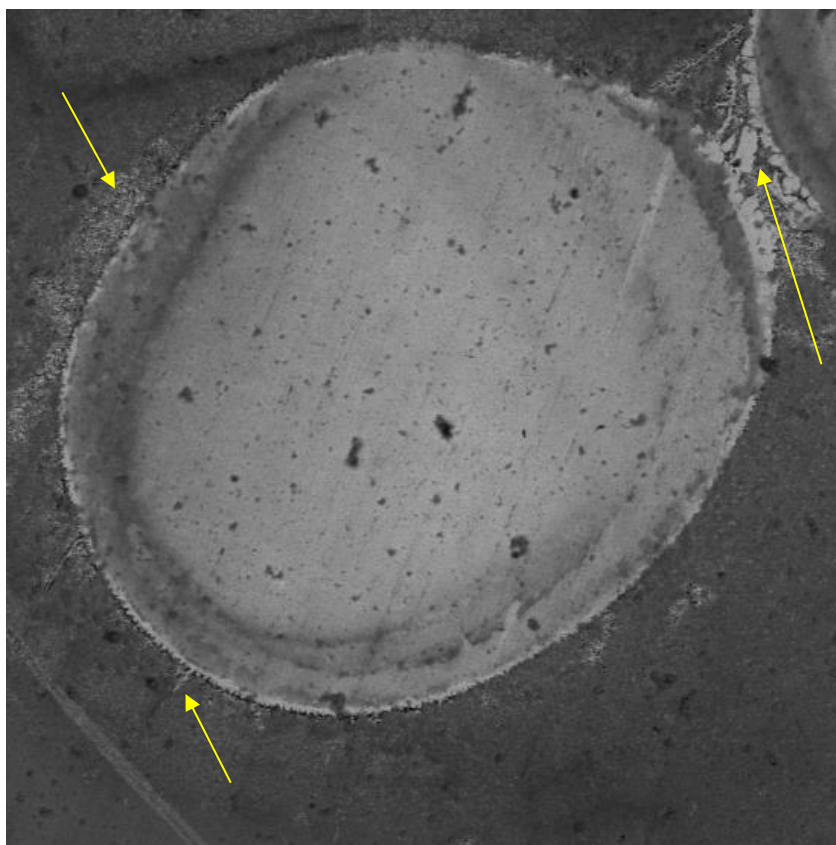


Figura 27– Difusão do W na matriz, AMEV20T (1100x).



Fonte: Próprio autor, 2021

As imagens de MEV geradas pelo sistema de Elétrons Retroespalhados, BSE (Backscattered Electrons) como visto na figura (27), apontam concentrações de regiões com maior número atômico na matriz localizada entre fios e nas proximidades destes, o que não ocorre em outras regiões da matriz, isso pode ser afirmado pois a intensidade do espalhamento de elétrons está relacionada ao número atômico (Z) do átomo, ou seja, quanto maior o número atômico, maior será o retroespalhamento e mais clara será a imagem formada naquela região. Como o tungstênio apresenta maior número atômico ($Z=74$) do que os demais constituintes presentes no metal de solda, onde o manganês e ferro com seus respectivos números atômicos $Z=25$ e $Z=26$, seriam os mais altos depois do tungstênio, pode-se afirmar que tais regiões contêm este material.

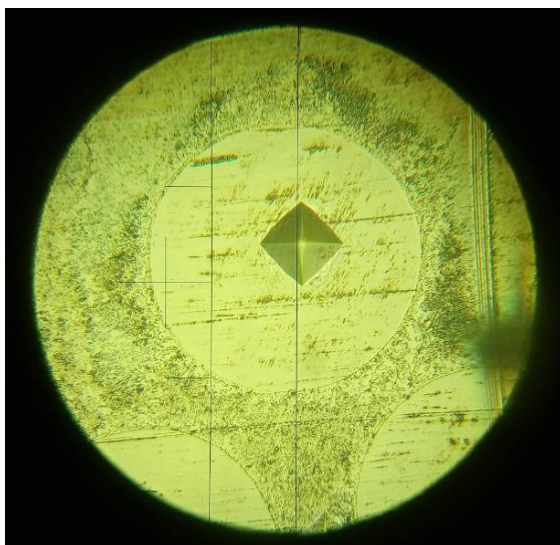
A principal diferença no grau de difusão de tungstênio presente na matriz se deu pelo nível de proximidade entre os fios, assim, as regiões que apresentaram fios mais próximos entre si, indicaram um maior grau de difusão desse metal na matriz, enquanto que em regiões com fios mais dispersos ficou evidente nas imagens uma menor manifestação desse fenômeno.

4.2 ENSAIO DE MICRODUREZA

Os resultados dos ensaios de microdureza que foram extraídos a partir de um arranjo em forma de matriz conforme mencionado no item 3.2.6.3, são apresentados nas figuras (31, 32, 33 e 34) para cada uma das condições de volume relativo de fios de reforço.

Com exceção das amostras de controle, sendo compostas somente pelo metal proveniente do arame eletrodo, todas as demais amostras que tinham fios de tungstênio como reforço apresentaram picos dureza, já que ocasionalmente a indentação coincidia sobre a face dos fios de tungstênio, conforme é percebido nas figuras (17) e (28). Porém, nas regiões fora dos fios, cada grupo de amostras apresentou-se diferente quanto a dureza, resultando uma tendência crescente diretamente proporcional ao volume relativo de fios.

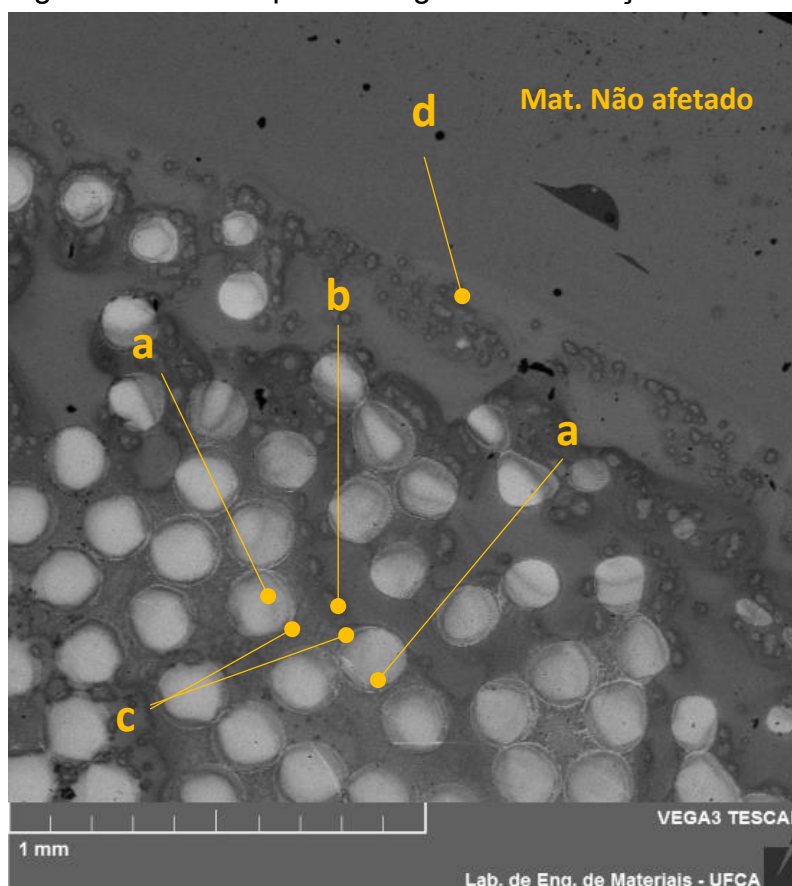
Figura 28 – Indentação sobre o fio de tungstênio, AMD30T (400x).



Fonte: Próprio autor, 2021

A tabela 12 apresenta os valores médios de dureza para as amostras com os fios de tungstênio, estas verificadas em pontos escolhidos aleatoriamente em cada região de definição de dureza, quais sejam: (a) nos fios de tungstênio, (b) na matriz entre fios, (c) na matriz junto aos fios e (d) na região da matriz distante da região de reforço. A figura (29) esquematiza as referidas regiões destacando-as em cores distintas.

Figura 29 – Destaque das regiões de definição de dureza



Fonte: Próprio autor, 2021

Tabela 12 – Dureza média em HV para as diferentes regiões das amostras (Regiões de Definição de Dureza)

Regiões	Valores médios de HV		
	AMD10	AMD20	AMD30
(a) Nos Fios de tungstênio	594	573	585
(b) Entre fios	391	442	430
(c) Junto aos fios	450	492	497
(d) Distante dos reforços	285	289	366

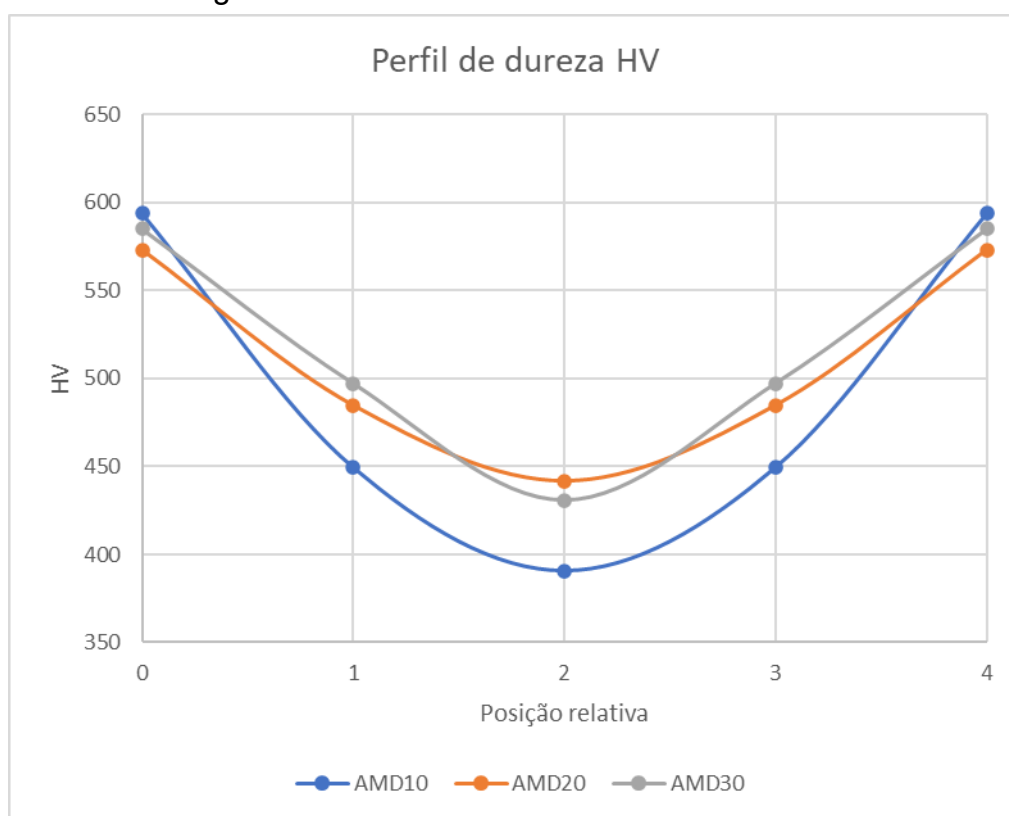
Fonte: Próprio autor, 2021

Ao analisarmos isoladamente as diversas regiões das amostras, percebe-se que a dureza vickers nessas regiões de definição de dureza mostra-se crescente quando se aumenta o volume relativo de fios de reforço, em destaque para as regiões entre fios (b) e nas regiões junto aos fios (c). Essa variação crescente de dureza nessas regiões pode estar relacionada com os indícios de transporte sólido-sólido por difusão do tungstênio registrado na análise de MEV.

Nas regiões distantes das regiões de reforço (d) nota-se que a dureza não apresentou variação significativa para as amostras com volume relativo de reforço de 10%, 20% e 30%, porém esta região das amostras registra valores muito superiores quando se compara com o metal de adição mais distante da zona de reforço, identificado na figura 29 como metal de adição não afetado, que indicou valores compatíveis com o encontrado para as amostras de controle.

Uma vez organizado os valores das regiões de definição de dureza do material em uma linha que represente uma região entre reforços, ou seja, iniciando em um fio, passando pela matriz e finalizando no fio imediatamente vizinho, (fio-matriz-fio), foi possível desenhar o perfil de dureza característico para os três tipos de amostras conforme visto na figura 30. Vale ressaltar no gráfico que as posições relativas 0 e 4 correspondem aos fios de tungstênio.

Figura 30 – Perfil de dureza média fio-matriz-fio



Fonte: Próprio autor, 2021

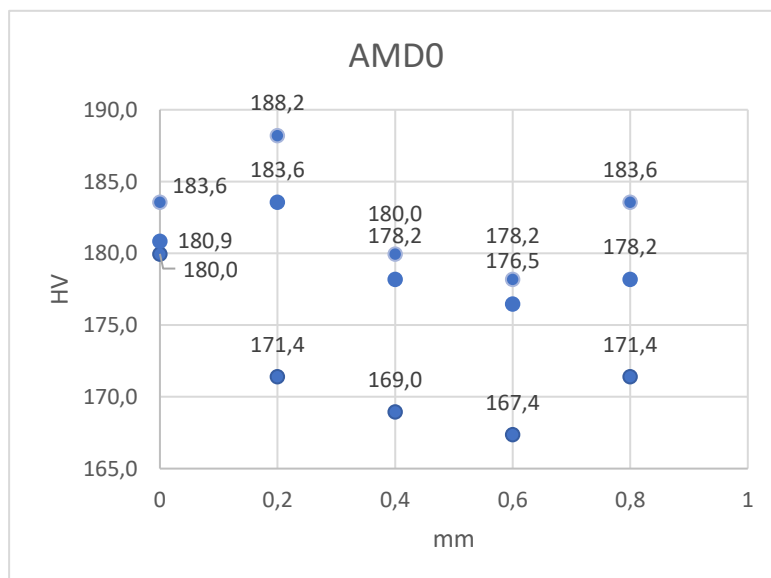
Os perfis de dureza gerados sugerem uma semelhança com o perfil de concentração resultante da ocorrência do fenômeno de difusão como pode ser visto na figura 03, página 28, ocorrência esta argumentada nas análises de MEV e de Microdureza nesse estudo. Dessa forma pode-se fazer uma leitura paralela das

curvas de dureza e de concentração onde claramente os valores de HV e C, nos respectivos gráficos decaem conforme se distancia da região de interface, ambos assumindo o mesmo comportamento.

Observando a curva da amostra AMD10, verifica-se que na posição central da matriz ocorreu menor ganho de dureza média, atingindo 391 HV, já que os fios de tungstênio estavam mais dispersos e em menor quantidade relativa em comparação com as outras duas amostras, dessa forma existiu menor migração de tungstênio para essa região e como consequência um menor ganho de dureza. O mesmo não pode ser dito para as amostras AMD20 e AMD30, que registraram 442 HV e 431 HV respectivamente, já que estas concentrações de fios de reforço deixara-os mais próximos uns dos outros, facilitando assim uma melhor dissolução do tungstênio nessa região. Porém, a amostra AMD10 nas regiões adjacentes aos fios, registra uma dureza mais aproximada daquelas encontradas em AMD20 e AMD30.

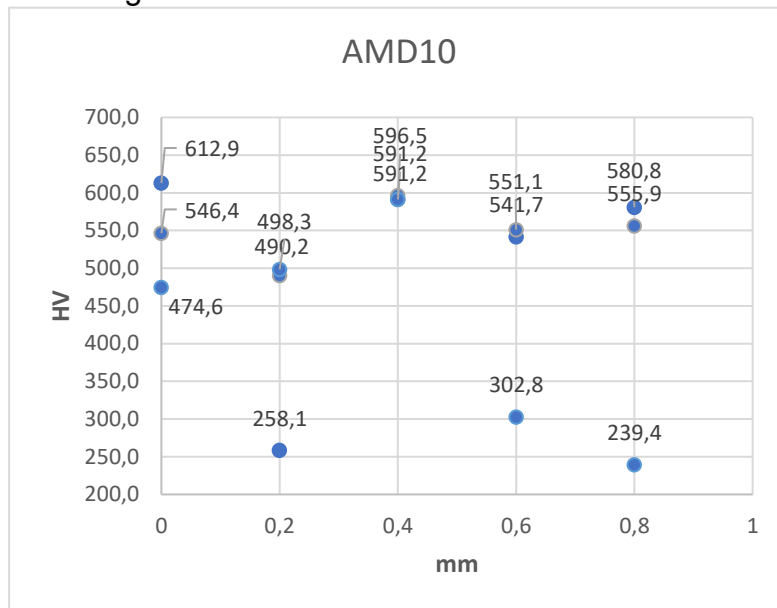
Quando medimos a dureza geral das amostras considerando o plano de indentação previsto no método adotado nesse trabalho, constatamos os valores de dureza média nas amostras AMD0, AMD10, AMD20 e AMD30, que são vistos nos gráficos a seguir:

Figura 31 – Microdureza Amostras AMD0



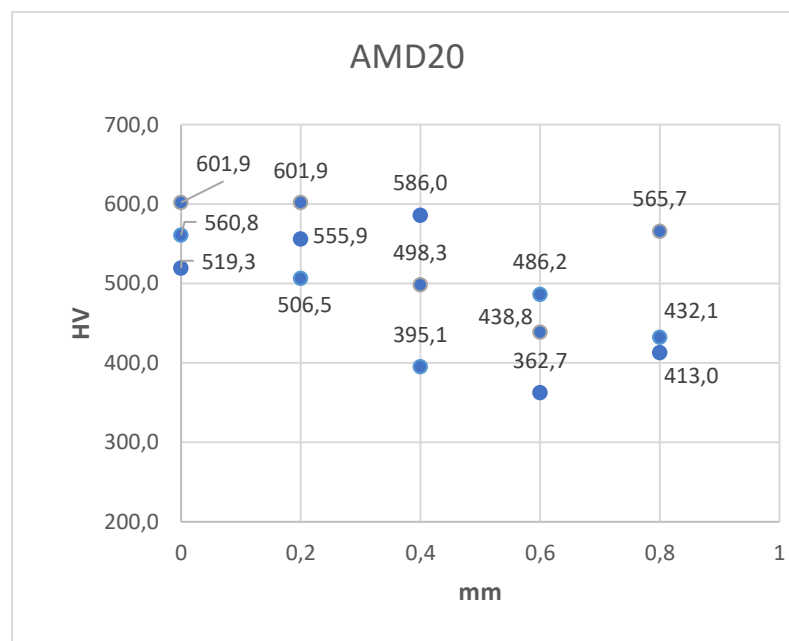
Fonte: Próprio autor, 2021

Figura 32 – Microdureza Amostras AMD10



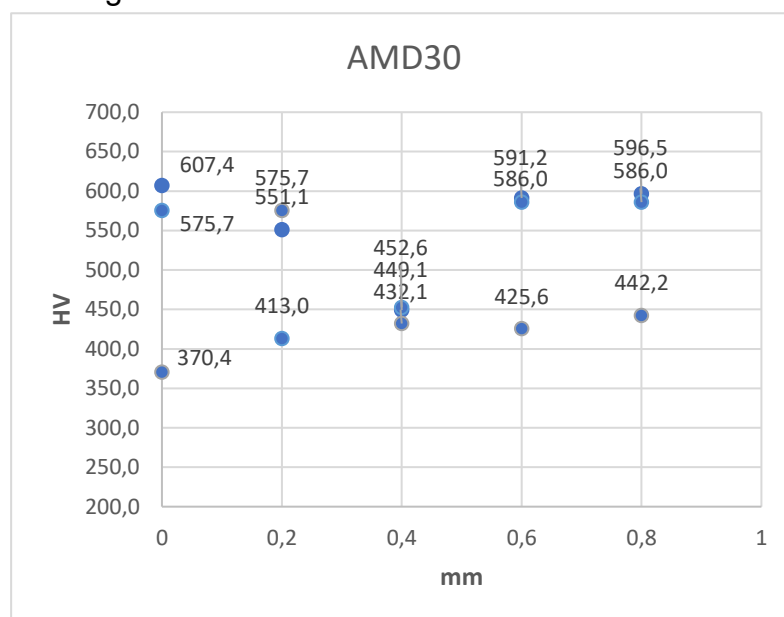
Fonte: Próprio autor, 2021

Figura 33 – Microdureza Amostras AMD20



Fonte: Próprio autor, 2021

Figura 34 – Microdureza Amostras AMD30



Fonte: Próprio autor, 2021

Na amostra AMD0 os valores pontuais de dureza mostram-se dispersos no gráfico, indicando uma homogeneidade do material de solda quanto a dureza vickers, onde se notou o ponto de dureza mais baixo de 167,4 HV e o ponto mais alto de 188,2 HV. Pode-se ratificar essa condição observando os valores do desvio-padrão, que para esta amostra foi de 6 HV, como pode ser visto na tabela 13.

Já na amostra AMD10 os valores apontam um salto de dureza e se dispersam em posição mais altos no gráfico, registrando o menor valor de 239,4 HV e o maior valor de 612,9 HV, com um desvio-padrão de 125,5 HV, evidenciando maior disparidade entre os valores extremos de dureza observado na amostra, condição esperada já que se apresenta como CMM, onde este tipo de material exibe heterogeneidade em suas características. Essa diferença entre os valores mínimos e máximos de dureza é devido a existência de fios de tungstênio que são mais duros do que a matriz de aço que os envolvem.

As mesmas condições citadas para a amostra AMD10, pode explicar os efeitos vistos nas amostras AMD20 e AMD30. Porém, estas duas últimas apresentaram valores mínimos e máximos de 362,7 HV / 601,9 HV e 370,4 HV / 607,4 HV e desvios-padrão de 78,2 HV e 84,1 HV respectivamente.

A perceptível redução nos valores de desvio-padrão registrados para as amostras AMD20 e AMD30 comparadas a AMD10, pode ser explicada pelo fato de

que as matrizes dessas duas amostras elevaram suas durezas médias, tornando-as menos distantes dos valores de dureza dos fios de reforço. Atribui-se a esse ganho de dureza nas matrizes dessas duas amostras a uma maior proximidade entre os fios de tungstênio o que favorece o fenômeno de difusão no sólido.

Tabela 13 – Valores médios de HV para as amostras

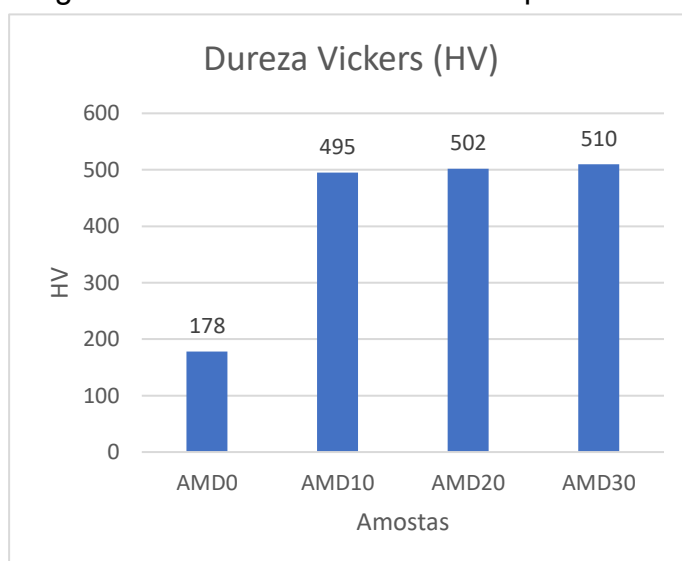
Amostras	Dureza Vickers (HV)	Desvio-padrão (HV)
AMD0	178	6
AMD10	495	125,5
AMD20	502	78,2
AMD30	510	84,1

Fonte: Próprio autor, 2021

A partir da coleta dos valores de dureza média em pontos distintos, pode-se constatar que a dureza no material das amostras de controle AMD0 apresentou notória variação quando comparada com as amostras reforçadas com fios de tungstênio, AMD10, AMD20 e AMD30.

A amostra AMD0 apresentou uma dureza média de 178 HV, resultado próximo dos apresentados nos estudos de Santos e Santiago (2017) e Nascimento (2016), com 182 HV e 193 HV respectivamente, para o metal de solda oriundo essencialmente do eletrodo ER70S-6, valor significativamente distante dos 495HV, 502 HV e 510 HV para as amostras AMD10, AMD20 e AMD30 nessa ordem, como pode observado na figura 35 apresentado a seguir.

Figura 35 – Valores médios de HV para as amostras



Fonte: Próprio autor. 2021

Nota-se ainda que entre as amostras reforçadas com os fios de tungstênio, a variação de dureza (HV) apresenta-se mais discreta, porém ainda em comportamento ascendente.

4.3 ENSAIOS DE TRAÇÃO

Através do ensaio de tração uniaxial realizado, foram obtidos os limites de resistência para os fios de tungstênio, matriz de aço carbono, (metal de solda) e corpo de prova em seu respectivo volume relativo de fios de reforço. Posteriormente foi calculado o valor médio do limite de resistência a tração, bem como a observação do comportamento do material quando submetido a esta solicitação.

4.3.1 Ensaio de tração nos fios de tungstênio

A tabela 14 apresenta os resultados dos ensaios de tração nos fios com 0,18 mm de diâmetro. Verificou-se seu limite de carregamento até a ruptura, resultando os seguintes valores de tensão (MPa):

Tabela 14: Valores dos ensaios de tração nos fios de $\varnothing$ 0,18 mm de tungstênio

Amostra nº	Força (N)	Tensão de tração (MPa)
F-01	50,38	1983,5
F-02	50,49	1987,8
F-03	50,33	1981,5
F-04	54,22	2134,6
F-05	49,13	1934,3
F-06	50,38	1983,5
Média	50,82	2000,9

Fonte: Próprio autor, 2021

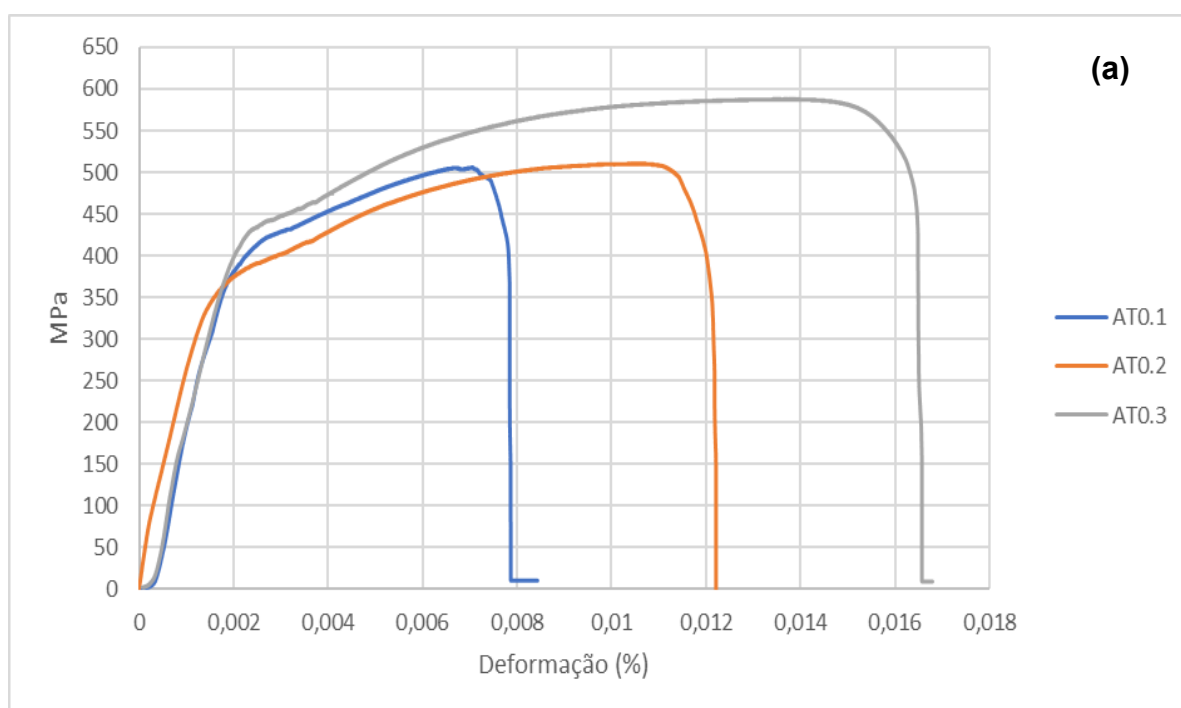
Para as amostras ensaiadas verificou-se valores de resistência a tração variando de 1981,5 MPa a 2134,6 MPa, indicando uma média de 2000,9 MPa, valor este muito próximo dos encontrados para o mesmo tipo de fio de tungstênio por Bomford e Kelly (1970).

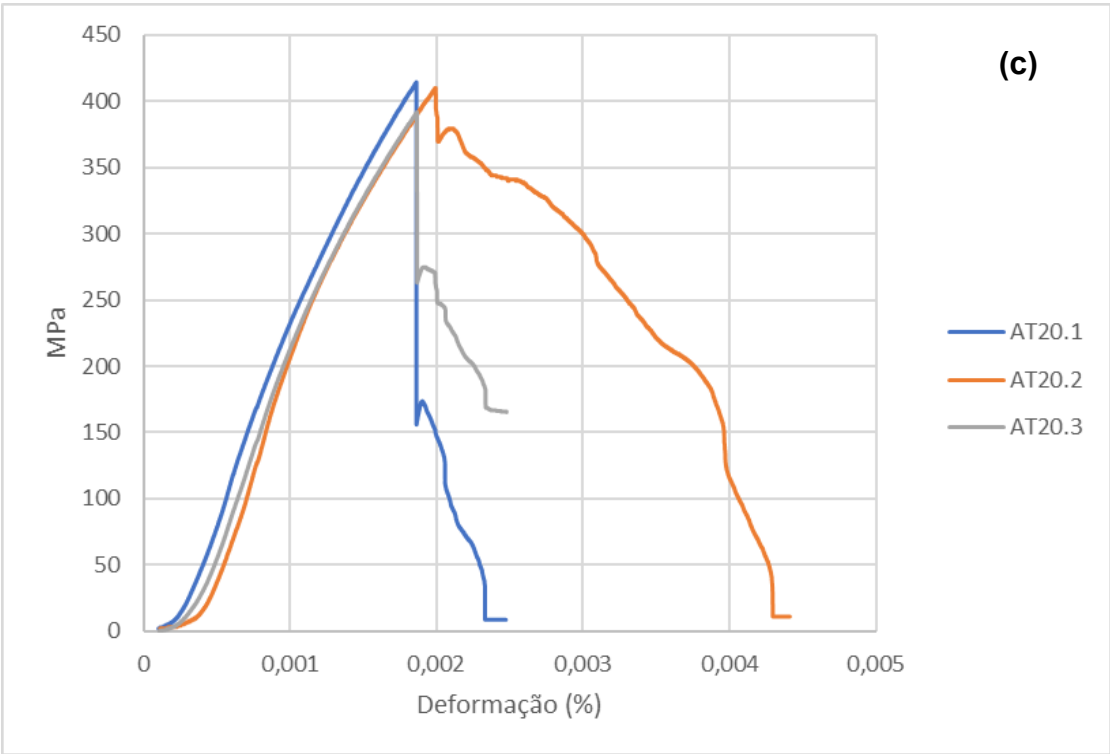
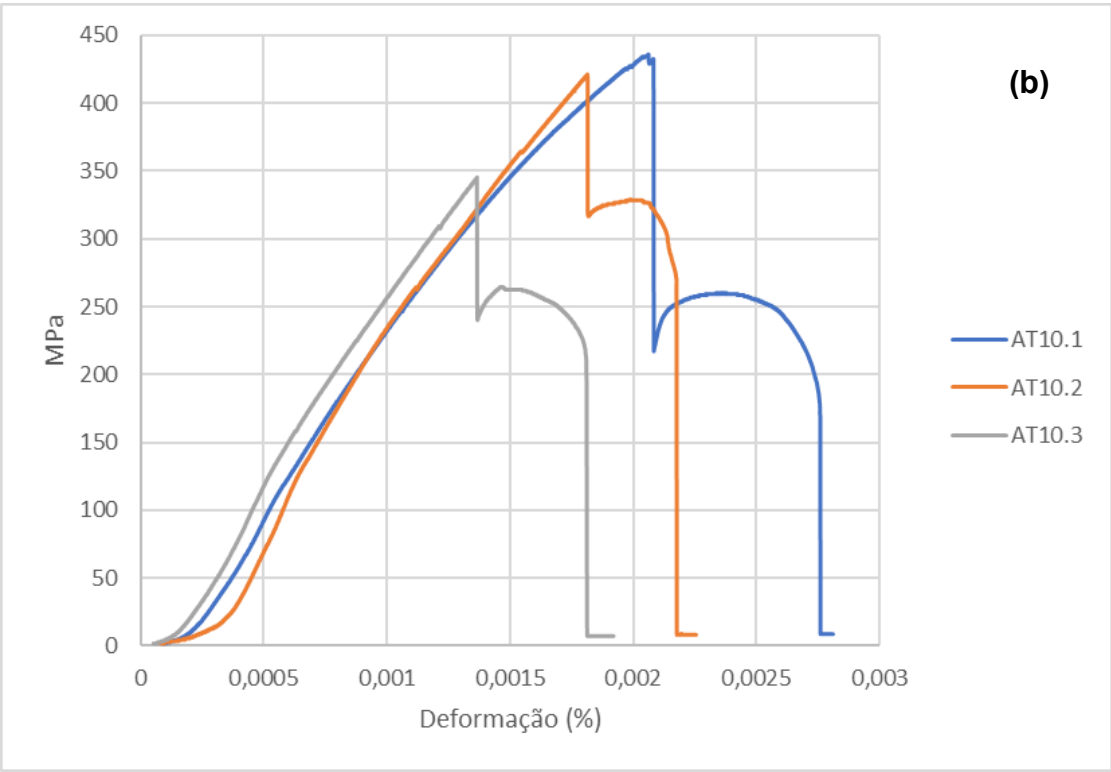
4.3.2 Ensaio de tração dos CP's reforçados com fios

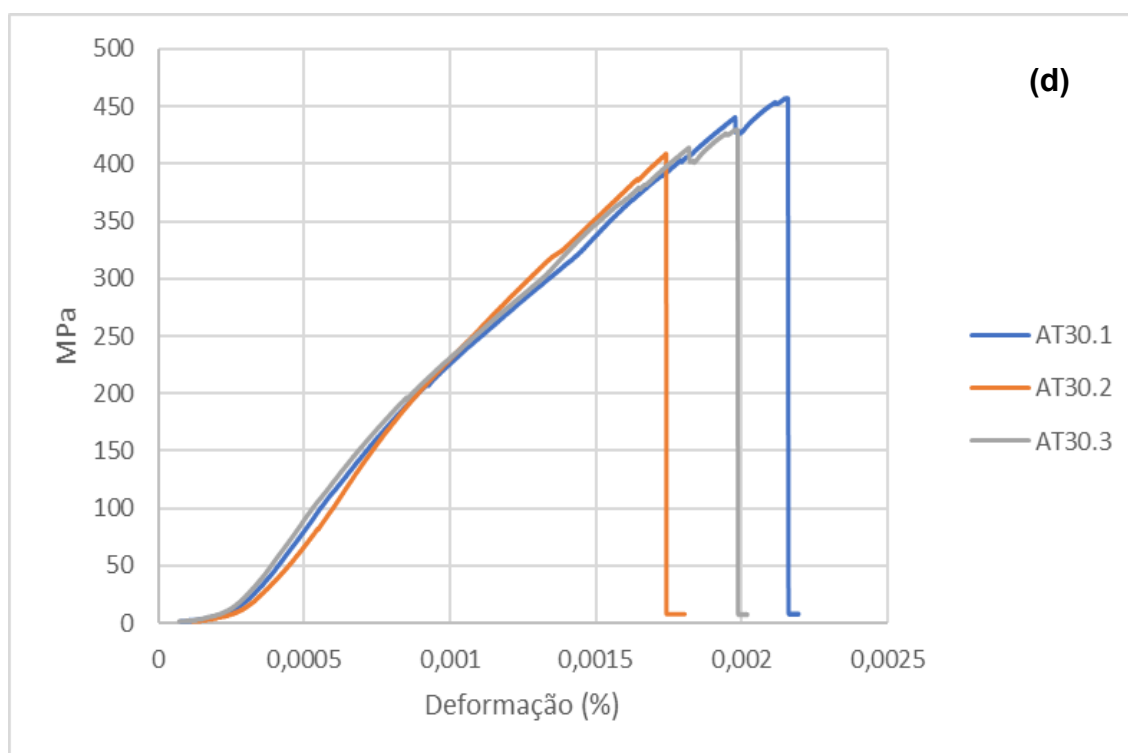
A Figura 36 mostra os gráficos tensão - deformação obtidos através do ensaio de tração realizado no metal de solda proveniente somente do eletrodo ER70S-6, (matriz metálica) e em compósitos, metal de solda reforçados com fios de tungstênio, nas proporções de 10, 20 e 30 % em volume de fibras. Estes gráficos apresentam o aspecto visual de cada corpo de prova após o ensaio e detalhe de sua fratura. A curvatura inicial de quase todos os gráficos é consequência do ajuste da amostra com as garras da máquina de ensaio de tração, no início do regime elástico linear.

Para fins de comparação, as amostras de controle foram submetidas ao mesmo tipo de ensaio mecânico e os resultados das 03 (três) amostras estão apresentadas no gráfico (a). Nota-se nesse gráfico que o comportamento da matriz metálica de aço carbono (metal de solda) apresenta o perfil típico para materiais mais dúcteis, com as zonas elásticas e plásticas bem definidas. É possível destacar os valores de tensões características para cada região de deformação da matriz, sendo para os corpos de prova AT0.1, AT0.2 e AT0.3 os valores de 375 MPa; 502 MPa, 356 MPa; 509MPa, 423 MPa; 587 MPa que são os limites de escoamento e limites de resistência, respectivamente.

Figura 36 – Curvas típicas de ensaio de tração, carga vs. deformação: (a) metal de solda (matriz metálica), matriz reforçada com (b) 10%, (c) 20% e (d) 30% de fração de volume de fios de tungstênio.







Fonte: Próprio autor, 2021

Para as amostras de 10% de fios de reforço visto no gráfico (b), nota-se que a região de plasticidade do material apresentou notória redução, antecedida por uma queda repentina nos valores de tensão ao atingir o limite de elasticidade, sugerindo que ocorreu ruptura total nos fios de reforço. Logo, reagindo em valores mais baixos de tensão apenas na matriz metálica e descrevendo uma pequena região de plasticidade até a ruptura total. Dessa forma considerou-se como tensão limite de resistência, aquela que ocorreu no instante máximo de elasticidade. Esse comportamento apresentou-se comum às três amostras onde foram registradas 436 MPa, 421 MPa e 345 MPa para as amostras AT10.1, AT10.2 e AT10.3 respectivamente.

Comportamento semelhante é percebido nas amostras AT20.1, AT20.2 e AT20.3 no gráfico (c), porém a curva característica de deformação plástica teria sido substituída por um comportamento que indica deslizamentos sucessivos dos fios na matriz logo após suas rupturas, descrevendo um perfil em patamares de deslizamento, sendo mais marcante na amostra AT20.2. Na região de deformação elástica, o material nas três amostras demonstrou comportamento idêntico até o primeiro sinal de fratura nas fibras. Nesse instante registra-se os seus valores máximos de resistência que foram de 415 MPa, 421 MPa e 392 MPa em AT20.1,

AT20.2 e AT20.3 nessa ordem.

O término abrupto no estágio de deformação linear, em função da fratura do material, indica que estas amostras apresentaram comportamento de materiais frágeis, ficando mais evidente nas amostras com volume relativo de reforço de 30%, conforme nota-se no gráfico (d). Porém, as amostras AT30.1, AT30.2 e AT30.3 indicaram valores mais elevados de resistência final, sendo registradas 457 MPa, 409 e 430 MPa.

Ainda de acordo com a análise da figura 36, é possível constatar que todas os grupos de amostras indicaram algum ganho em suas resistências mecânicas de tração no regime elástico de deformação. A tabela 15 apresenta os valores de resistência a tração das amostras analisadas e suas respectivas médias de grupo.

Tabela 15 – Valores de tensão de resistência e módulo de elasticidade das amostras

volume relativo (%)	Amostras	*MPa (σ)	GPa (E)	*MPa Médio (σ)	GPa Médio (E)
0	AT0.1	375	186	385	190
	AT0.2	356	199		
	AT0.3	423	187		
10	AT10.1	436	212	401	231
	AT10.2	421	229		
	AT10.3	345	254		
20	AT20.1	415	223	406	221
	AT20.2	410	219		
	AT20.3	392	220		
30	AT30.1	457	227	432	232
	AT30.2	409	237		
	AT30.3	430	232		

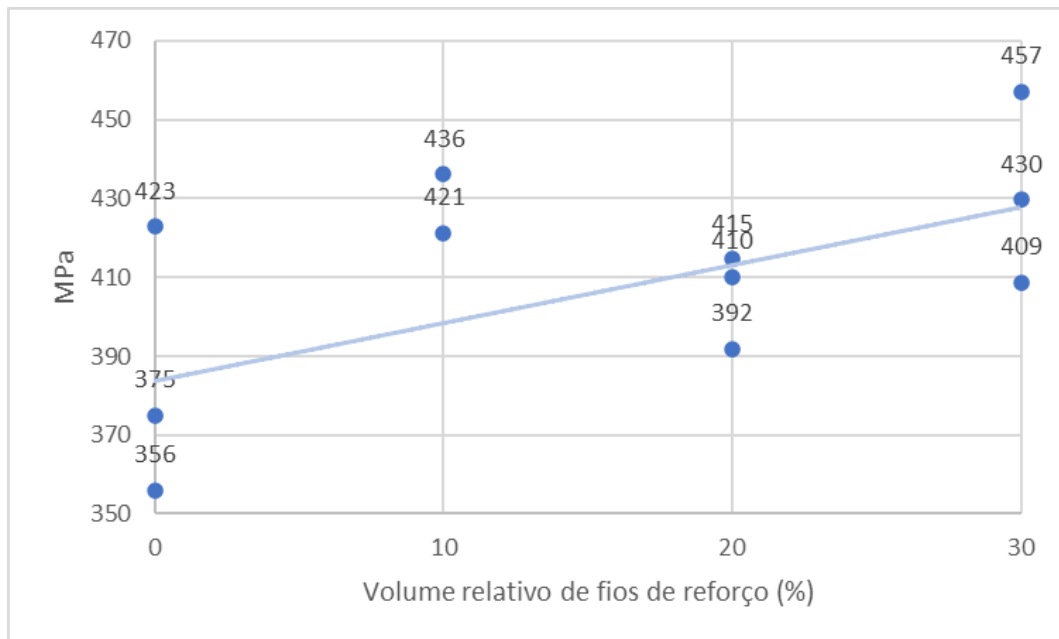
*Tensão máxima no regime elástico

Fonte: Próprio autor, 2021

Constatou-se nos ensaios que a interação fio-matriz se apresentou muito boa, pois não há indícios nos gráficos de que qualquer amostra tenha apresentado deslizamento relativo das fases no regime elástico de deformação, conduzindo a uma situação de isodeformação. A partir dessa condição, os compósitos reforçados por fibras contínuas alinhadas no sentido do carregamento apresentam melhor desempenho trabalhando no regime elástico, conforme argumentado por Callister (2002). Dessa forma, as análises de resistência a tração serão agora feitas nesse

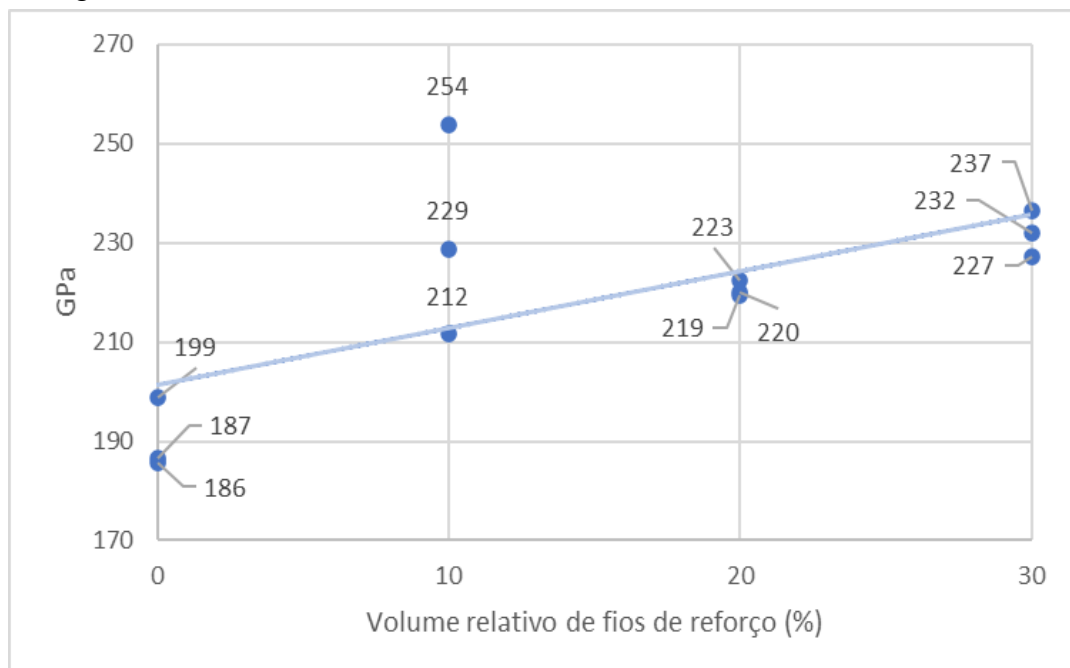
regime de deformação. As figuras 37 e 38 apresentam os valores de tensão máxima no limite do regime elástico e dos módulos de elasticidade das amostras e aplicando regressão linear dos pontos, podemos traçar as retas de tendências de crescimento dessas propriedades quando se aumenta o volume relativo de fios de reforço na matriz.

Figura 37 – Valores de resistência a tração no regime elástico das amostras



Fonte: Próprio autor, 2021

Figura 38 – Valores dos módulos elásticos das amostras



Fonte: Próprio autor, 2021

Assim como o limite de resistência a tração, o módulo elástico do material estudado também apresentou relativo ganho quando comparado com os valores encontrados nas amostras de controle, conforme visto na tabela 15. O aumento nos valores do módulo de elasticidade nesse material compósito está relacionado à contribuição dos valores característicos dos fios de reforço que, para o tungstênio encontra-se entre 340 a 405 GPa. Dessa forma, o módulo de elasticidade do compósito, bem como da resistência a tração no regime elástico é igual a média ponderada da fração volumétrica e dos valores dos módulos de elasticidade e resistências a tração das fases matriz e fios, para cada determinação, conforme apresentado por Callister (2002).

Os valores encontrados nas amostras analisadas foram confrontados com os valores teóricos das aplicações das expressões propostas por Bomford e Kelly (1970) e Callister (2002), apresentadas neste trabalho no item 2.3.2. Para tanto, foram considerados como valores característicos do metal de solda, (fase matriz) aqueles encontrados neste trabalho, de 385 MPa e 190 GPa, resistência elástica de tração e módulo de elasticidade respectivamente, não adotando os valores informados pelos fabricantes do arame eletrodo, pois os parâmetros de soldagem, modo de transferência, posição de soldagem, gás de proteção utilizado, influenciam no resultado dos valores de propriedades mecânicas do metal de solda. Para os valores das características mecânicas dos fios de tungstênio, foram usados os valores médios informados nas tabelas encontradas nas literaturas e confrontadas com os determinados nesse estudo para constatar qualquer disparidade entre os valores. A tabela 16 apresenta o resumo das propriedades encontradas, tomadas apenas para os três volumes relativos estudados.

Tabela 16 – Comparação dos valores encontrados vs valores teóricos

volume relativo (%)	Resultado do mat. estudado		Valores teóricos	
	MPa Médio (σ)	GPa Médio (E)	MPa (σ)	GPa (E)
10	401	231	547	209
20	406	221	708	227
30	432	232	877	245

Fonte: Próprio autor, 2021

As médias dos valores de resistência a tração das amostras estudadas

indicaram uma discreta variação quando comparados com os valores teóricos definidos pela expressão (2.3).

$$\sigma_c = \sigma_m * V_m + \sigma_f * V_f \quad (2.3)$$

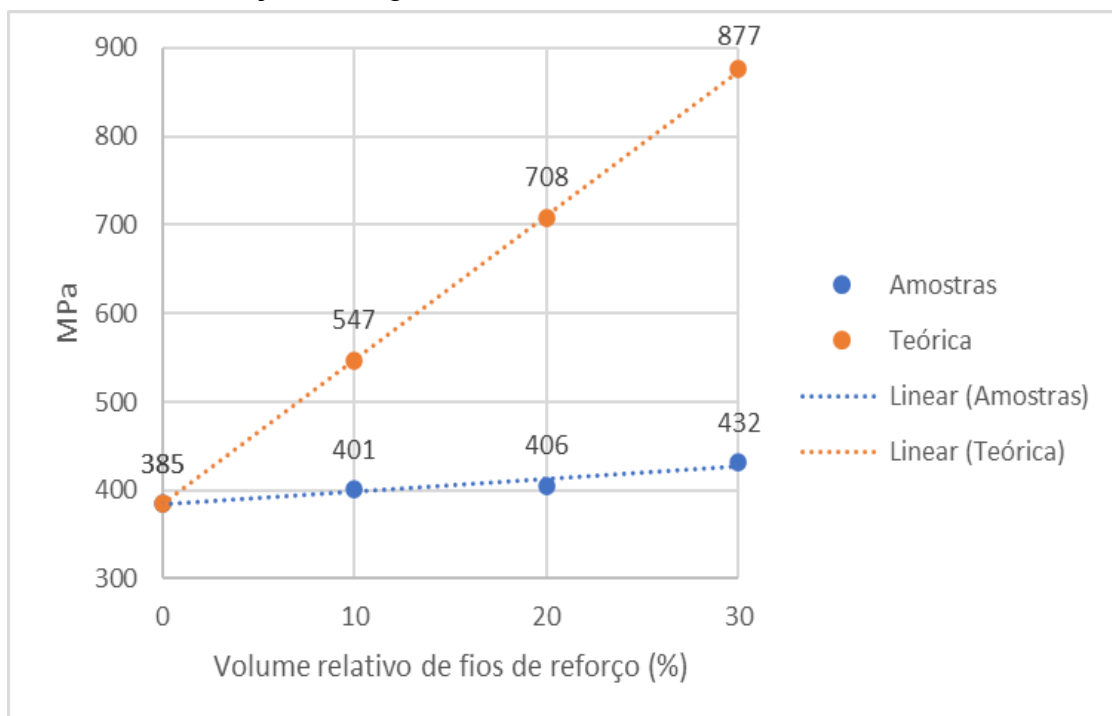
Elas indicam um ganho de resistência mecânica a tração no regime elástico diretamente proporcional ao aumento de volume relativo de fios de reforço, porém esse ganho de resistência descreve uma curva de crescimento menos acentuada do que a indicada pelos resultados teóricos.

Quanto aos resultados das médias do Módulo Elástico do material estudado, estes apresentaram-se mais próximos dos valores teóricos provenientes da expressão (2.4), onde seu comportamento gráfico indica também um crescimento proporcional às variações de volume relativo de fios de reforço expondo uma curva muito próxima daquela descrita pela equação correspondente.

$$E_c = E_m * V_m + E_f * V_f \quad (2.4)$$

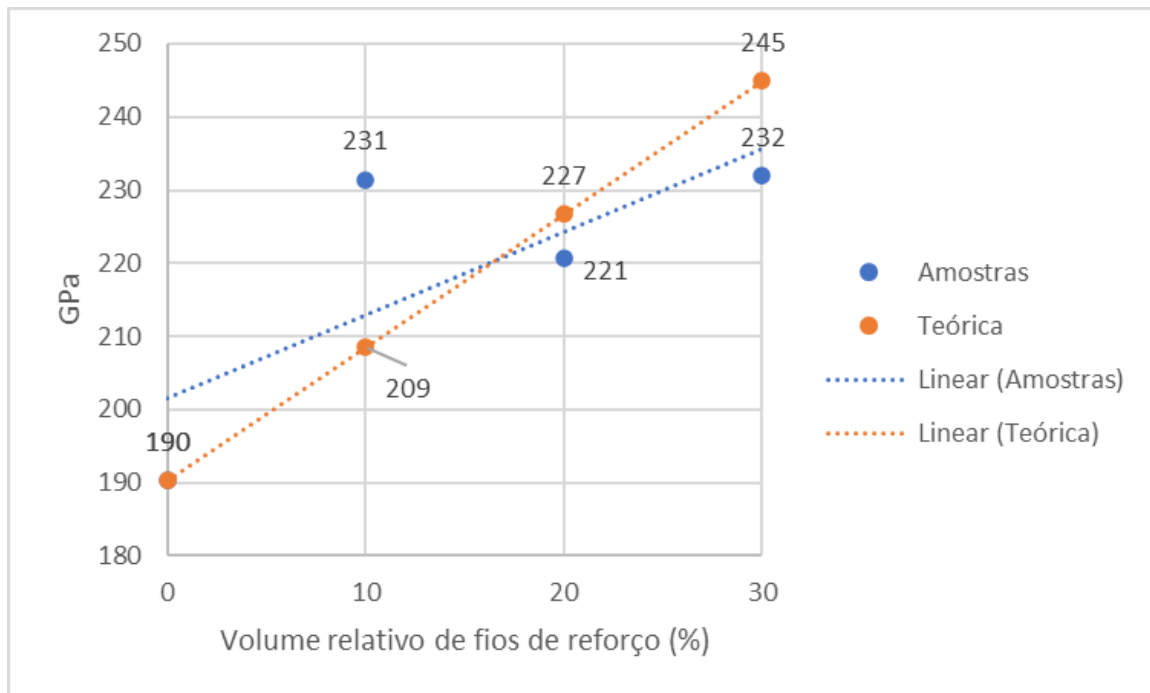
As figuras 39 e 40 apresentam o comportamento do crescimento de resistência elástica de tração e módulo elástico em paralelo com os comportamentos de crescimento teórico das respectivas propriedades mecânicas.

Figura 39 – Comparação curvas de tendência Amostras vs. Teórico de resistência à tração no regime elástico



Fonte: Próprio autor, 2021

Figura 40 – Comparação curvas de tendência Amostras vs. Teórico do Módulo de elasticidade



Fonte: Próprio autor, 2021

5 CONCLUSÕES

A deposição de metal de solda proveniente do arame eletrodo ER70S-6 sobre fios contínuos de tungstênio apresentou uma macroestrutura típica de compósitos de matrizes metálicas reforçadas com fios, indicando um satisfatório grau de molhamento ocorrido entre fases matriz e reforço, isso significa que o modo de transferência metálica por curto circuito apresentou uma fluidez da poça de fusão que permitiu uma boa permeabilidade desta por entre os fios de tungstênio. Dessa forma, podemos afirmar que esta condição garantiu um bom envelopamento, portanto uma excelente aderência da fase dispersa na matriz metálica de aço carbono e ainda assim resultando em interfaces bem definidas, conforme foi percebido nas imagens de MEV.

A formação da superfície erodida dos fios de tungstênio é resultado da migração de parte desse material para a matriz de aço carbono, fazendo com que o mecanismo de interação das fases fosse fortalecido e que sem esta ocorrência não poderíamos garantir o não desprendimento dos fios quando solicitados à tração.

As ocorrências de difusões do tungstênio para a matriz de aço carbono, conforme podemos afirmar pelas imagens de MEV geradas pelo sistema de retroespalhamento de elétrons - BSE, de forma geral, em se tratando de compósitos, tiveram relevante contribuição na excelente interação entre as fases, sendo que este fenômeno em uma intensidade menor de ocorrência, poderia não garantir tal mecanismo de influência mútua entre fases. Por outro lado, a ocorrência dessa difusão em intensidade maior, levou ao incremento de grau de dureza da fase matriz. Esta condição veio a influenciar diretamente na ductilidade desta fase, podendo significar redução de tenacidade do material. Porém, é precoce tomar quaisquer conclusões pertinentes quanto a influências de aplicabilidades.

As amostras analisadas neste estudo indicaram ganho considerável de dureza média quando comparadas com o metal de solda sem reforço. Esses valores de dureza são variados e crescentes juntos ao aumento de volume relativo de reforço nas amostras. Nota-se ainda que uma maior proximidade entre fios de reforço tende a conduzir uma matriz com maior dureza média, isso decorrente de uma facilitação de difusão do tungstênio nessa região. Dessa forma, é pertinente concluir que para teores de fios de tungstênio maiores que 30% e menores que 10% venham a apresentar comportamentos análogos.

Conclui-se para os ensaios de tração que o ganho de dureza levou a uma

tendência ao comportamento de fratura frágil, evoluindo de uma significativa redução da zona plástica até uma total subtração desse comportamento, isso visto quando se aumenta os teores de volumes relativos de reforço. Contudo, registra-se um ganho de resistência mecânica a tração no regime elástico, diretamente proporcional ao aumento de volume relativo de fios na matriz metálica, porém em uma tendência de crescimento menos expressiva quando verificada pela expressão teórica que determina tal resistência para compósitos reforçados por fios contínuos.

Já o módulo elástico do material estudado, descreve um comportamento mais próximo dos valores teóricos oriundos da expressão específica, onde estes indicam também uma tendência crescente junto com a variação de volume relativo de fios de reforço, resultado este que está condizente com as expectativas, já que os fios de tungstênio contiveram a deformação da matriz, além de que esta também apresentou ganho de dureza devido à migração de tungstênio para seu interior.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O trabalho experimental desenvolvido e principalmente, os resultados obtidos indicam o potencial da extensão desse tema para futuras pesquisas, afim de preencher as lacunas que ainda existem acerca deste tema, seguem algumas sugestões para trabalhos futuros:

- Expandir o espectro amostral da pesquisa, incluindo faixas mais amplas de fração volumétrica de fios de reforço;
- Verificar o comportamento mecânico do material estudado em altas temperaturas de trabalho;
- Considerar para fase de reforço o emprego de fios curtos descontínuos e em disposição não orientada;
- Variar os parâmetros de soldagem como corrente, tensão, modo de transferência metálica;
- Estudar a formação de microestruturas resultantes no material.

REFERÊNCIAS

ABNT NBR 6152. **Materiais metálicos – Ensaio de tração em temperatura ambiente.** Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2002.

ABNT NBR 7007. **Aço carbono e microligados para barras e perfis laminados a quente para uso estrutural.** Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2011.

A. KELLY and G. J. DAVIES, **The principles of the fibre reinforcement of metals**, University of Cambridge, Cambridge – Great Britain, 1965.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM E8/E8M – 13a: **Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials.** 2013. 28p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM A370/ASME SA370: **Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products.** 2016. 48p.

AMERICAN WELDING SOCIETY. **Specification for Carbon Steel Filler Metals for Gas Shielded arc Welding.** Miami, Florida, 1979. 19 p. (AWS A 5.18)

ASTM A36 / A36M-14, **Standard Specification for Carbon Structural Steel**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014.

AWS Welding Handbook: **welding processes.** 8^a. ed. Miami: AWS – American Welding Society, January, 1991. v. 2, 955 p.

BAPTISTA, A. P. Monteiro; MAGALHÃES, A. Barbedo de. **Influence of Reinforcement of the Tribological Behaviours of an Aluminium Alloy**, World Materials Congress in Cast Reinforced Metal Composites, Chicago, Sep., 1988.

BARBEDO, Nancy Del Ducca, **Avaliação comparativa dos processos de soldagem GMAW e FCAW utilizando aço A-36 para verificar a soldabilidade, propriedades metalúrgicas e geométricas e resistência mecânica.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá –

MG, 2011.

BOMFORD, M. J.; KELLY, A. **The Tensile Strenght of Copper/Tungsten Fibre-Reinforced Composites**. University of Cambridge, Cambridge – Great Britain, 1970.

BRACARENSE, Alexandre Queiroz.. Gas Metal Arc Welding. **Infosolda**, Belo Horizonte – MG, Vol. 18, p. (1 – 27), março, 2003. Disponível em: <http://www.infosolda.com.br/artigos/Prosol18.pdf>.

CALLISTER, W. D., **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. John Wiley & Sons, Inc., 2002.

CHAWLA, N.; CHAWLA, K.K. **Metal Matrix Composites**, ed.2, Spring Science & Business media, 2013.

CHIAVERINI, V. **Aços e Ferros Fundidos**. 7ª. ed. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais – ABM, p. 22 (2002).

CHUNG, D.D.L. **Composites Materials – Science and Applications**, ed.2, Spring Science & Business media, 2010.

COSTA, Jorge Luiz da. **Tungstênio**. Balanço Mineral Brasileiro, Brasília: DNPM, 2001.

ESAB. **Catálogo de consumíveis - 2021**. Disponível em: <https://www.esab.com.br/br/pt/products/filler-metals/mig-mag-wires-gmaw/mild-steel-wires/ok-autrod-12-51.cfm>. Acessado em maio de 2021.

GODOY, Wagner Lopes de. **Efeito da temperatura de pré-aquecimento e características do pulso na microestrutura de aço estrutural de alta resistência e baixa liga soldado com arco elétrico e proteção gasosa**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Paulista, Baurú – SP, 2008.

HEITJANS P., KARGER J. **Diffusion in condensed matter: Methods, Materials,**

Models, 2nd edition, Birkhauser, 2005, pp. 1-965.

LIMA, Paulo Roberto Lopes. **Análise teórica e experimental de compósitos reforçados com fibras de sisal**. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro – RJ, 2004.

MARANHÃO, Diego carvalho. **Caracterização microestrutural e mecânica de ligas diluídas de alumínio-tungstênio, produzido por solidificação unidirecional ascendente em regime transiente de calor**. Dissertação (Mestrado em Ciências Mecânicas) – Universidade de Brasília, Brasília – DF, 2019.

MARQUES, Paulo Villani, **Soldagem: Fundamentos e tecnologia**, Paulo José Modenesi, Alexandre Queiroz Bracarense. – [4.ed]- Rio de Janeiro: Elsevier, 2017.

MODENESI, Paulo J., **Introdução a Metalurgia da Soldagem**, Paulo V. Marques, Dagoberto B. Santos, -Belo Horizonte: UFMG, 2012.

MOREIRA, A. F. **Influência da atmosfera protetora no cordão de solda obtido através dos processos de soldagem GMAW e FCAW**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira – SP, 2008.

PEREZ, Fabiano Ricardo da Costa. **A influência de temperatura de pré-aquecimento e tecimento na microestrutura e propriedades mecânicas na soldagem MIG/MAG robotizada de aço SAE 8620 com ABNT LN28**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual Paulista, Baurú – SP, 2007.

NASCIMENTO, Lucas Alves do. Avaliação do processo GMAW por curto-circuito controlado (SST) aplicado na soldagem circunferencial mecanizada. **Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas – ABECM**, Agosto, 2016. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/313838226>.

PAULINO, J.F.; AFONSO, J.C. **Tungstênio**. Química Nova Escola, vol.35, n.2, p-

141-142, 2013.

PROCESSO de Soldagem MIG/MAG. Eutectic, 2017. Disponível em: <http://www.eutectic.com.br/equipamentos-soldagem-mig-mag.html#>. Acesso em: 15 jun. 2021.

SANTOS, Hortencia Noronha dos; SANTIAGO, Gustavo Fuhr. Avaliação de junta soldada pelo processo GMAW. **Salão Internacional de Ensino, Pesquisa e Extensão – SIEPE**, Ed. 9, p. (1 – 7), novembro, 2017. Disponível em: <https://periodicos.unipampa.edu.br/article/view>.

SILVA, R.H.G. **Soldagem MIG/MAG em transferência metálica por curto-circuito controlado aplicada ao passe de raiz**. Dissertação (mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis – SC, 2005.

SOUZA, D; RESENDE, A; SCOTTI, Américo. **Soldagem & Inspeção**, Vol.14, Nº 3, P. 192 – 198, 2009.

TUNGSTÊN. Azom, 2001. Disponível em: <http://www.azom.com/article.aspx?article>. Acesso em: 07 mai 2021.

VILLANI, P.; MODONESI, P. BRACARENSE, A. Q. **Fundamentos da soldagem**. Belo Horizonte: Ed. UFMG, 2006.