

**FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE MESTRADO PROFISSIONAL EM MATERIAIS**

AMANDA THAIS LOUREIRO

**DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE COMPÓSITOS DE
PEAD REFORÇADOS POR RESÍDUOS DE ELETRODOS
REVESTIDOS**

**VOLTA REDONDA
2017**

**FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE MESTRADO PROFISSIONAL EM MATERIAIS**

**DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE COMPÓSITOS DE
PEAD REFORÇADOS COM RESÍDUOS DE ELETRODOS
REVESTIDOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Mestrado Profissional em Materiais do Centro Universitário de Volta Redonda – UniFOA, como requisito obrigatório para obtenção do título de Mestre em Materiais, sob a orientação do Prof. Dr. Bruno Chaboli Gambarato, na área de concentração de Processamentos e Caracterização de Materiais reciclados e linha de pesquisa Materiais Compósitos.

Aluna:

Amanda Thais Loureiro

Orientador:

Prof. Dr. Bruno Chaboli Gambarato

VOLTA REDONDA

2017

FICHA CATALOGRÁFICA

Bibliotecária: Alice Tacão Wagner - CRB 7/RJ 4316

L892d Loureiro, Amanda Thais.

Desenvolvimento e caracterização de compósitos de PEAD reforçados por resíduos de eletrodos revestidos. / Amanda Thais Loureiro. - Volta Redonda: UniFOA, 2017.

83 p. II

Orientador(a): Bruno Chaboli Gambarato

Dissertação (Mestrado) – UniFOA / Mestrado Profissional em Materiais, 2017

1. Materiais - dissertação. 2. Eletrodo revestido - resíduos. 3. Compósito. I. Gambarato, Bruno Chaboli. II. Centro Universitário de Volta Redonda. III. Título.

CDD – 620.1

FOLHA DE APROVAÇÃO

Aluno: Amanda Thais Loureiro

DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE COMPÓSITOS DE PEAD REFORÇADOS POR RESÍDUOS DE ELETRODOS REVESTIDOS

Orientador:

Prof. Dr. Bruno Chaboli Gambarato

Coorientador

Prof. Roberto de Oliveira Magnago

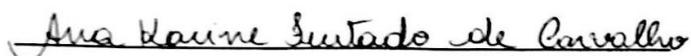
Banca Examinadora



Prof. Dr. Bruno Chaboli Gambarato



Prof. Dr. Ricardo de Freitas Cabral



Profa. Dra. Ana Karine Furtado de Carvalho

“Tudo posso naquele que me fortalece”

Filipenses 4, 13

DEDICATÓRIA

Dedico aos meus filhos amados Vitor e Sofia e em especial ao meu marido Carlos Augusto pelo amor, companheirismo e apoio em todos os momentos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a DEUS, pai e criador e ao Mestre Jesus pelo intermédio de todas as orações.

Agradeço a todas as pessoas que contribuíram para a realização deste projeto, em especial aos orientadores Prof. Dr. Bruno Chaboli Gambarato e Prof. Dr. Roberto de Oliveira Magnago pela paciência, dedicação e profissionalismo.

Gostaria também de agradecer e ressaltar o excelente trabalho da secretária Ana Maria Oliveira Carvalho, de todos os professores e colaboradores do Centro Universitário de Volta Redonda – UniFOA, que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

RESUMO

Neste trabalho foi desenvolvido um compósito com objetivo do aproveitamento de resíduos dos revestimentos de eletrodos utilizados no processo de soldagem a arco elétrico cujo interesse científico e comercial vem da utilização crescente de resíduos pelas organizações que buscam sustentabilidade e eficiência na utilização de seus recursos. Os resíduos utilizados para a obtenção da mistura foram classificados dentre os eletrodos revestidos AWS E 6013 e AWS E 7018 em diferentes proporções, sendo distribuídos de forma homogênea na matriz de polietileno de alta densidade (PEAD). As amostras dos compósitos foram confeccionadas, e assim como a matéria prima, foram caracterizadas por ensaios mecânicos verificando as suas características. Os resultados obtidos revelaram que as propriedades mecânicas dos compósitos são influenciadas pela adição dos resíduos em que o mais afetado é sua rigidez, no qual o módulo de elasticidade em flexão foi incrementada, aumentando a média dos valores de aproximadamente 600 MPa dos corpos de prova sem adição de reforço para 950 MPa dos corpos de prova com 10% de reforço e aproximadamente 1000 MPa dos corpos de prova com 20% de reforço. Também houve alterações mais sutis na resistência a tração e dureza Shore D, sendo estas reduzidas com o aumento percentual de resíduo. No caso da resistência a tração, a média dos valores reduziu de aproximadamente 19,5 MPa dos corpos de prova sem adição de reforço para 17,5 MPa dos corpos de prova com 20% de adição de reforço, não sendo observadas alterações nos demais resultados. Para a dureza Shore D, a média dos valores dos corpos de prova sem adição de reforço foi de aproximadamente 62,5 HD e os outros corpos de prova com adição de reforço, apresentaram uma média de aproximadamente 58 MPa, independentemente do percentual do resíduo.

Palavras-chave: compósito, PEAD, eletrodo revestido, materiais

ABSTRACT

This work was developed with composite aiming to recover residues of electrode coatings used no arc welding process the scientific and commercial interest comes from the increasing operation of waste for companies that seek sustainability and efficiency in the use of their resources. The residues used to obtain the coated elements are the following: AWS E 6013 and AWS E 7018 in different proportions, being homogeneously distributed in the high density polyethylene (HDPE) matrix. As samples of the composites were made, and as a raw material were characterized by mechanical tests verifying as their characteristics. The obtained results showed that the mechanical properties of the composites are influenced by the addition of the residues in which the most affected is their stiffness, where the Modulus of Elasticity in Flexion was increased, increasing the average of the values of 600 Mpa of the specimens without addition of Strengthening to 950 MPa of 10% reinforcing specimens and approximately 1000 MPa of specimens with 20% reinforcement. There is also more information about the tensile strength and Shore D hardness, which are reduced with the percentage increase of residue. In the case of tensile strength, the mean values reduced from approximately 19.5 MPa of the specimens without addition of reinforcement to 17.5 MPa of the specimens with 20% reinforcement addition, not observing the results. For Shore D hardness, a mean of the values of the non-rectifying specimens was approximately 62.5% of the total reinforced specimens, presented a mean of approximately 58 MPa, regardless of the residues percentage.

Keywords: Composite, HDPE, coated electrode, materials

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	18
2. OBJETIVOS.....	19
2.1 Objetivos Específicos	19
2.2 Justificativa	19
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
3.1 Compósitos Poliméricos Reforçados.....	20
3.2 Soldagem a Arco Elétrico com Eletrodos Revestidos (SMAW)	22
3.3 Tipos de Revestimento dos Eletrodos Revestidos	24
3.4 Especificação AWS para Eletrodo Revestido aplicado a Aços ao Carbono	29
3.5 Aplicação típica dos eletrodos com as classificações E6013 e E7018	32
3.5.1 Eletrodo E6013.....	33
3.5.2 Eletrodo E7018.....	33
3.6 Disponibilidade da Matéria Prima: Resíduos do revestimento de eletrodos	34
3.7 Utilização da matriz polimérica de PEAD	38
3.8 Processo para a confecção do compósito.....	40
3.9 Caracterização dos compósitos	41
3.9.1 Comportamento mecânico dos compósitos	41
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	52
4.1 Materiais.....	52
4.1.1 PEAD	52
4.1.2 Eletrodos	53
4.2 Métodos.....	54

4.2.1	Rendimento dos Eletrodos	55
4.3	Processamento dos Compósitos	56
4.3.1	Obtenção do Reforço	56
4.3.2	Mistura da Carga.....	57
4.3.3	Granulação da Carga	58
4.3.4	Obtenção do Compósito.....	58
4.4	Caracterização do PEAD e Compósito.....	59
4.4.1	Comportamento mecânico	59
4.4.2	Comportamento morfológico	62
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	63
5.1	Considerações Gerais.....	63
5.2	Avaliação das propriedades mecânicas	63
5.2.1	Ensaio de Tração	63
5.2.2	Ensaio de Flexão.....	68
5.2.3	Ensaio de Dureza Shore D.....	75
5.3	Microscopias	77
6	CONCLUSÕES	79
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	80
8	REFERÊNCIAS	81

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Segmentação do mercado brasileiro na utilização de compósitos em 2014	20
Figura 2 - Soldagem a arco elétrico com eletrodo revestido	23
Figura 3 - Descrição dos componentes do eletrodo revestido.....	25
Figura 4 - Especificação AWS5.1-91: Eletrodos de aço ao carbono para a soldagem manual a arco com eletrodo revestido	30
Figura 5 - Efeito da concentricidade do revestimento	36
Figura 6 - Principais tipos de defeitos nos eletrodos revestidos.....	37
Figura 7- Representação esquemática da estrutura do PEAD.....	39
Figura 8 - Representação esquemática de uma extrusora.....	41
Figura 9 - Dimensionamento do corpo de prova conforme ASTM D638	42
Figura 10 - Definição de tensões.....	43
Figura 11– Diagrama esquemático tensão-deformação mostrando a deformação elástica para ciclos de carga e descarga – (a) Deformação elástica linear; (b) Metodologia para determinação do módulo tangente e secante em comportamento elástico não linear	45
Figura 12 – Esquema de aplicação do ensaio de flexão. (a) Raio mínimo do suporte = 3,2mm. (b) Raio máximo do suporte fixo = 1,6 vezes a espessura da amostra; Raio máximo do suporte móvel = 4 vezes a espessura da amostra.....	46
Figura 13 – Determinação da Resistência à Flexão	47
Figura 14– Curvas típicas de tensão x deformação para ensaios de flexão. Curva a: Espécime que quebra antes do limite de deformação. Curva b: Espécime que cede e	

depois quebra antes do limite de deformação de 5%. Curva c: Espécime que não cede nem quebra antes do limite de deformação de 5%	48
Figura 15 – Determinação do módulo de elasticidade secante	49
Figura 16 – Esquema para demonstração da aplicação da metodologia da dureza Shore.....	50
Figura 17– Identador para ensaio de dureza Shore B e D	51
Figura 18 – Demonstração dos eletrodos aplicados no experimento.....	53
Figura 19 – Tambor de descarte de resíduos de soldagem no Senai/VR	54
Figura 20 – Fluxograma das etapas da metodologia empregada no trabalho	54
Figura 21 – Corpo de prova com duas juntas soldadas idênticas. Parte superior representa o restante do eletrodo E7018 após a soldagem e a junta soldada por este eletrodo. Parte inferior representa a solda realizado com o eletrodo E6013 e o restante do eletrodo após a soldagem	55
Figura 22 - Moinho de Bolas Pulverisette localizado no UniFOA.....	56
Figura 23 – Mistura seca na confecção dos corpos de prova por batelada	57
Figura 24 – Homogeneizador do laboratório do UniFOA	57
Figura 25 – Moinho de facas do laboratório do UniFOA	58
Figura 26 – (a) Injetora (b) Moldes para corpos de prova nos ensaios de flexão e tração	59
Figura 27 - Máquina Universal de Ensaio Mecânico usada para os Ensaio de Tração e Flexão no UniFOA.....	60
Figura 28 – Durômetro para indicação da Dureza Shore D no UniFOA.....	62
Figura 29 – Microscópio Eletrônico de Varredura do laboratório do UniFOA.....	62
Figura 30 – Curvas Tensão (MPa) x Deformação(%) para o PEAD e os compósitos CP0A10B, CP10A0B e CP10A10B	64

Figura 31 – Tensão de Escoamento (MPa) para o PEAD e os compósitos CP5A5B e CP10A10B.....	65
Figura 32 – Resistência à Tração para proporções de resíduo de revestimento de eletrodo de 0%, 10% e 20%.....	65
Figura 33 – Módulo de Elasticidade à tração para proporções de resíduo de revestimento de eletrodo de 0%, 10% e 20%.....	66
Figura 34 – Identificação de correlação por regressão quadrática entre a resistência a tração e proporções de resíduo de revestimento de eletrodo de 0%, 10% e 20% .	67
Figura 35 – Identificação de correlação por regressão quadrática entre o módulo de elasticidade e proporções de resíduo de revestimento de eletrodo de 0%, 10% e 20%	67
Figura 36 – Resultado da comparação do comportamento dos eletrodos na resistência à tração para as proporções de resíduos de revestimento de eletrodos de 0% e 10%.....	68
Figura 37 – Curvas Tensão (MPa) x Deformação(%) para o PEAD e os compósitos CP0A10B, CP10A0B e CP10A10B	69
Figura 38 – Resistência à flexão para proporções de resíduo de revestimento de eletrodo de 0%, 10% e 20%.....	70
Figura 39 – Módulo de elasticidade à flexão para proporções de resíduo de revestimento de eletrodo de 0%, 10% e 20%.....	70
Figura 40 – Identificação de correlação por regressão quadrática entre a resistência à flexão e proporções de resíduo de revestimento de eletrodo de 0%, 10% e 20% .	71
Figura 41 – Identificação de correlação por regressão quadrática entre o módulo de elasticidade à flexão e proporções de resíduo de revestimento de eletrodo de 0%, 10% e 20%.....	71
Figura 42 – Representação em histograma demonstrando o deslocamento dos dados com o aumento do Módulo de Elasticidade a Flexão com o aumento do % de resíduos de revestimento de eletrodos	73

Figura 43 – Resultado da comparação do comportamento dos eletrodos no módulo de elasticidade à flexão para as proporções de resíduos de revestimento de eletrodos de 0% e 10%	74
Figura 44 – Comportamento médio para dureza Shore D ilustrado no gráfico de intervalos.....	75
Figura 45 – Pontos individuais de medição Dureza Shore D por % de resíduo de revestimento de eletrodo	76
Figura 46 – Regressão quadrática para avaliação da tendência da dureza Shore e o % de resíduo de revestimento de eletrodos	76
Figura 47 – MEV dos compósitos ampliados 25X com os seguintes percentuais de resíduos (a) 5%; (b) 10% e (c) CB20%	77
Figura 48 – MEV dos compósitos com os seguintes percentuais de resíduos e ampliações respectivamente (a) 5% - 500X; (b) 10% - 1000X e (c) 20% - 500X	78

LISTA DE TABELAS

Tabela 1– Familiarização com a especificação AWS de consumíveis	30
Tabela 2 – Exemplos na representação do segundo dígito na codificação para classificação AWS.....	31
Tabela 3 – Significado do terceiro dígito na codificação para classificação AWS	31
Tabela 4 – Significado da combinação dos terceiros e quartos dígitos na codificação para classificação AWS.....	32
Tabela 5 – Desempenho de alguns eletrodos em diferentes aplicações	33
Tabela 6 – Eficiência de deposição de eletrodos revestidos para aços ao carbono .	35
Tabela 7 – Perda da ponta dos eletrodos	35
Tabela 8 – Propriedades térmicas, físicas, elétricas e mecânicas do PEAD	39
Tabela 9 - Configuração da matéria prima utilizada nos ensaios	52
Tabela 10 - Ficha técnica PEAD	53
Tabela 11 – Dados dos eltrodos E7018 e E6013 antes e após a realização de mesma quantidade de passes de solda em mesmo tipo de junta	55

LISTA DE SIGLAS

ABMACO	Associação Brasileira de Materiais Compósitos
ALMACO	Associação Latino-Americana de Materiais Compósitos
ANSI	American National Standards Institute
ASTM	American Society for Testing and Materials
AWS	American Welding Society
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
DOE	Design of Experiments – Projeção de Experimentos
ESAB	Elektriska Svetsnings Aktie Bolaget
FBTS	Fundação Brasileira de Tecnologia da Soldagem
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
SMAW	Shielded Metal Arc Welding - Soldagem a arco elétrico com eletrodos revestidos
PP	Polipropileno
PVC	Policloreto de Vinila
HIPS	Poliestireno de Alto Impacto

1. INTRODUÇÃO

A preocupação com o meio ambiente é visada pelos processos industriais atuais de forma a buscarem cada vez mais o conceito da sustentabilidade operacional e reutilização de subprodutos nas cadeias de fabricação com o desenvolvimento de tecnologias em materiais.

O crescimento de rejeitos industriais obrigou a tomada de iniciativas sendo dada maior importância ao tema. Assim, a utilização de compósitos poliméricos se enquadra neste conceito em que são desenvolvidos diferenciados materiais com propriedades mecânicas distintas de acordo com as exigências estruturais de peças aliado ao custo benefício operacional.

Os rejeitos aproveitados neste estudo são oriundos do processo de soldagem a arco elétrico que exige a proteção do arco contra agentes atmosféricos sendo desenvolvido, com significativo avanço pelo revestimento do eletrodo, que vai se decompondo pela aplicação de calor formando uma proteção gasosa. Porém, no final do processamento restam as pontas ou refugo por falta de qualidade ou mau uso destes eletrodos que são descartados durante o processamento. Atualmente, graças a versatilidade de aplicação e baixo custo de operação, este processo de soldagem é muito empregado na montagem e manutenções em geral.

Para a produção deste trabalho, optou-se por desenvolver um compósito utilizando uma matriz de PEAD que é um polímero da classe das poliolefinas e figura entre os mais utilizados no mundo por ser um material bastante versátil, com boas propriedades físicas, mecânicas e térmicas e o resíduo do revestimento de eletrodos revestidos. Dessa forma, o material final obtido neste trabalho, contém menor quantidade de derivados de petróleo, bem como reaproveita um importante resíduo da indústria.

2. OBJETIVOS

O propósito do trabalho buscou atender à disposição de resíduos sólidos no processo de soldagem a arco elétrico por eletrodos revestidos agregando valor, desenvolvendo e aperfeiçoando o aproveitamento em compósitos poliméricos a partir de uma matriz de PEAD.

Desta forma, o presente estudo objetivou a validação do uso de resíduos dos revestimentos dos eletrodos como carga de reforço no desenvolvimento de compósitos poliméricos caracterizando este material através da proposta dos objetivos específicos:

2.1 Objetivos Específicos

- a) Preparação de diferentes formulações de compósitos promovidas pela utilização da matriz de PEAD com reforço de resíduos de revestimento de eletrodos classificados como E6013 e E7018;
- b) Identificação das propriedades mecânicas através da realização de ensaios de tração, flexão e dureza Shore D em amostras do compósito;
- c) Realização da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) dos materiais obtidos, com o intuito de analisar a interação entre a matriz polimérica e o reforço inorgânico.

2.2 Justificativa

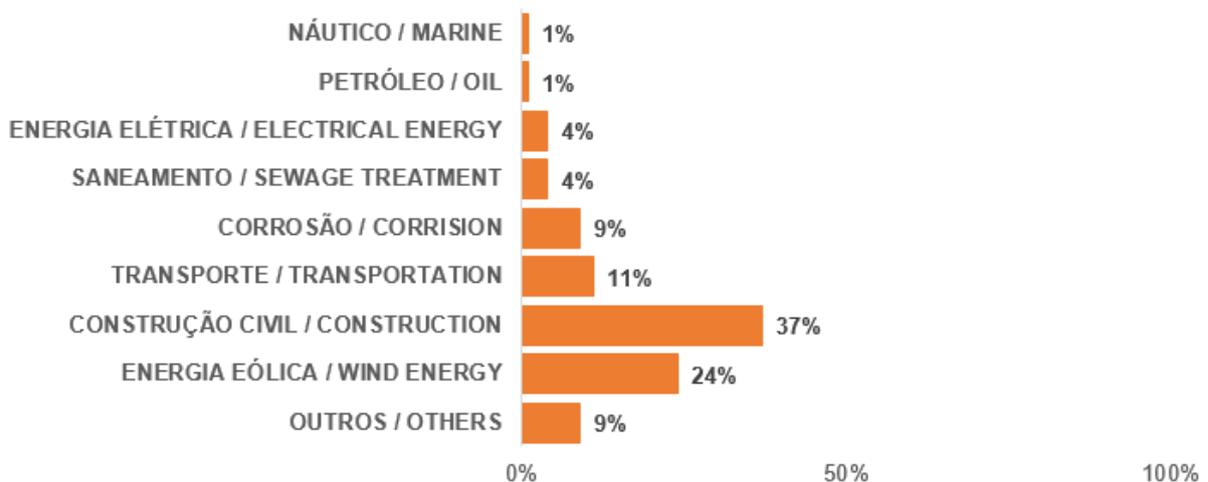
O presente estudo justificou-se pela necessidade atual da reutilização de resíduos industriais e redução no consumo de derivados do petróleo, contribuindo para os aspectos econômicos e ambientais das organizações.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Compósitos Poliméricos Reforçados

Milhares de materiais são originados da concepção de compósitos e segundo CAMATTA (2015) existem 50.000 aplicações catalográficas no planeta descritos pelo levantamento da empresa francesa organizadora da maior feira mundial do setor, JEC COMPOSITES, atingindo 1,00 kg/ano no consumo de materiais per capita em 2012 no Brasil. A segmentação do mercado conforme MAXIQUIM (2014) é verificada na Figura 1 conforme abaixo:

Figura 1 – Segmentação do mercado brasileiro na utilização de compósitos em 2014



Fonte: CAMATTA, 2015 (apud MaxiQuim)

Segundo CALLISTER (2012), 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.

As principais características consideradas no desempenho do compósito vêm da distinção da composição química, estrutura cristalina, cor e propriedade ópticas, clivagem e dureza e propriedades físico químicas de superfície. Neste caso a melhoria do comportamento mecânico é dependente da ligação na interface matriz-

partícula pela restrição da deformação plástica e aumento da resistência ao escoamento, resistência à tração e dureza (CALLISTER, 2012).

Vantagens e desvantagens são descritas para idealizar o uso de particulados como reforço a matriz polimérica, sendo:

Vantagens:

- Redução da contração e reações exotérmicas durante a polimerização (cura)
- Aumento do módulo de elasticidade
- Melhora da resistência a abrasão
- Aumento do módulo de flexão

#Desvantagens:

- Redução do alongamento à ruptura
 - Aumento da viscosidade da matriz polimérica
 - Redução da translucidez da matriz polimérica
 - Aumento da ocorrência de bolhas de ar
- (ZURSTRASSEN, 2008)

As propriedades esperadas são funções das propriedades das fases constituintes, das relativas quantidades aplicadas e da geometria da fase dispersa considerando o tamanho, forma, distribuição e orientação. CALLISTER (2012) aborda a significância da forma da geometria das partículas sabendo-se que quanto menor o tamanho da partícula, maior será a área de superfície e de interação entre o particulado e a matriz polimérica.

Com uma visão de processamento dos materiais, deve-se atentar para o tamanho das partículas visto que: partículas muito pequenas têm significativa influência na viscosidade, enquanto partículas grandes exibem tendência acentuada a separação da matriz necessitando de frequente mistura para não acumular no fundo do equipamento de moldagem durante o processamento (ZURSTRASSEN, 2008).

CAMATTA (2008) afirma que com o aumento das forças e van der Waals, maior a dificuldade de dispersão e adesão das partículas dentro da massa do polímero, exemplificando os principais minerais utilizados como reforços em

polímeros como: talco, pirofilita, calcita, dolomita e quartzo. Ainda salienta que durante o processo de mistura, as partículas podem tender a formação de aglomerados devido a força de adesão entre as partículas e a tensão interfacial entre as partículas e o polímero.

A tendência à agregação das partículas ao polímero cresce com o decréscimo de seu tamanho (apud SUETSUGU, 2005) sendo importante observar que partículas agregadas agem como iniciadores de rupturas localizadas quando o compósito sofre impacto (apud SVEHLOVA; POLOUCEK, 1987).

Os polímeros termoplásticos apresentam típico comportamento quando expostos a temperatura, se tornando fluidos quando aquecidos. Assim sendo, possibilitam desta forma a moldagem por várias vezes, mantendo características dimensionais com o decréscimo de temperatura ao retornarem após a solidificação. Dentre as características mais visadas nos compósitos termoplásticos está a produção a baixo custo aliada as referidas propriedades mecânicas, ainda tendo como contribuição o fácil controle de qualidade e reciclagem dos materiais colaborando com aspectos ambientais nas indústrias (MULINARI, 2009).

Em acordo com esses conceitos, o estudo foi direcionado na observação da aplicabilidade distinta de cada um dos componentes para melhor entendimento de suas funções quando combinados posteriormente.

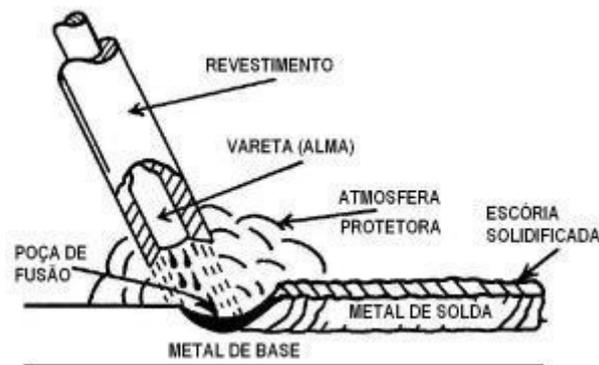
3.2 Soldagem a Arco Elétrico com Eletrodos Revestidos (SMAW)

Descrito pela AWS (American Welding Society), soldagem é o processo de união de materiais aplicado para obter a limitada coalescência em metais ou não metais, promovida por aquecimento até uma apropriada temperatura, com ou sem a adição de material e utilização de pressão (JENNEY; O'BRIEN, 2001).

A soldagem a arco elétrico com eletrodo revestido é denominada pela AWS como SMAW - *Shielded Metal Arc Welding* – sendo amplamente empregada dentre os processos de soldagem atuais principalmente em chapas com espessura de 3 a 40mm. No procedimento para a realização deste tipo de soldagem, é necessário que o calor de um arco elétrico seja gerado e mantido entre a extremidade de um eletrodo metálico revestido e a peça de trabalho, ocorrendo a fusão do metal de base e do eletrodo com seu revestimento. Pelo meio da decomposição do

revestimento do eletrodo acontece a formação de gases para a proteção da atmosfera em torno da poça de fusão, em que a escória líquida flutua ao encontro da superfície restringindo o contato com ar atmosférico durante a solidificação (FORTES, 2005). O esquema da Figura 2 exemplifica o processo.

Figura 2 - Soldagem a arco elétrico com eletrodo revestido



Fonte: FORTES, 2005

O calor necessário para a ocorrência da soldagem é decorrente da liberação de energia do arco elétrico formado entre a peça a ser soldada e o eletrodo. Não existe a ocorrência de pressão neste processo e a geração de gases protetores ocorre como consequência a decomposição do revestimento do eletrodo havendo, na poça de solda, adição de elementos de liga ao metal base. Segundo NERIS (2012), a fusão do eletrodo transfere glóbulos de metal fundido à poça de solda a cada 0,001 até 0,01 segundos elevando a temperatura do processo atingindo no ponto máximo 6000°C, ocorrendo a expansão dos gases de combustão. A ideologia deste processo prevê que não haja absorção de Oxigênio (O_2) e nitrogênio (N_2) na poça de solda evitando desta maneira efeitos adversos nas propriedades mecânicas durante a aplicação da peça.

Os eletrodos revestidos utilizados na soldagem de aço ao carbono são constituídos da alma metálica conhecido como vareta, e de revestimento ao longo de seu comprimento. Estas denominações podem ser observadas na Figura 2.

A matéria prima da alma é normalmente em aço ao carbono fabricada pelo processo de trefilação de fio máquina até atingir o diâmetro necessário para a aplicação no eletrodo. Esta alma detém como função principal a condução da

corrente elétrica e adição de elementos de liga para favorecer as propriedades mecânicas à área soldada (FORTES, 2005).

A composição do revestimento é dependente do tipo de material a ser soldado e a mistura úmida compactada no cilindro da prensa de extrusão é aplicada sobre as varetas metálicas. Ocorre a remoção do revestimento nas extremidades do eletrodo formando a ponta de pega para a garantia do contato elétrico e abertura fácil do arco. É aplicada então a marca comercial de identificação do fabricante e o eletrodo é levado ao forno de secagem assegurando o grau de umidade antes da embalagem (FORTES, 2005).

No Brasil, este processo de soldagem é considerado como principal entre os demais devido a sua versatilidade nas atividades de montagem de diferentes estruturas e equipamentos encontrados diretamente em campo ou em oficinas. Normalmente aplicada de forma manual, opera de forma mecanizada apenas em estaleiros em um tipo específico de soldagem denominada solda em filete. Desta forma o custo benefício é atrativo em relação aos demais processos, considerando o fato da simplicidade da aplicação manual ou do equipamento em questão, assim como a operacionalidade de abrangentes condições de trabalho em difícil acesso e áreas abertas, não podendo esquecer a condição da aplicabilidade em diversos materiais (FORTES, 2005).

A AWS apresenta a especificação para este processo em diferentes materiais citando aços ao carbono, aços ligados, aços inoxidáveis, ferros fundidos, cobre, níquel e suas ligas. Dentre a incrível abrangência deste processo, este trabalho se limitou ao estudo da aplicação de resíduos de dois tipos de eletrodos, E6013 e E7018, geralmente aplicados em aços ao carbono (FBTS, 2014).

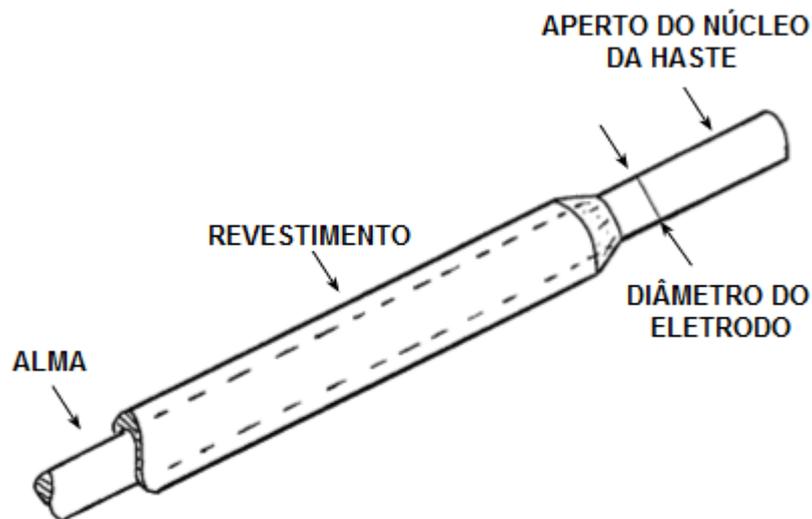
Apesar dos atrativos, este tipo de soldagem apresenta baixa produtividade devido a taxa de deposição reduzida, necessidade de mão de obra especializada e experiente e atenção ao volume de fumos prejudiciais a saúde humana (NERIS, 2012).

3.3 Tipos de Revestimento dos Eletrodos Revestidos

O eletrodo revestido é um consumível cuja vareta metálica varia no diâmetro de 1,5 a 8mm, comprimento entre 23 e 45mm nas suas formas comerciais, e apresenta composição característica aos elementos de liga aos quais quer-se aplicar

a solda. A cobertura com revestimento apresenta composições determinantes nas características operacionais, mecânicas e metalúrgicas durante a aplicação do eletrodo e influencia diretamente a composição química e propriedades mecânicas da área soldada (FORTES, 2005). Na Figura 3 pode-se observar os componentes principais dos eletrodos que são encontrados no mercado.

Figura 3 - Descrição dos componentes do eletrodo revestido



Fonte: Adaptado de UNITOR SHIPS SERVICE, 1968

Para demonstrar a importância da aplicação correta do tipo de eletrodo ao processo, a Fundação Brasileira de Tecnologia da Soldagem (FBTS) divide em três as funções do fluxo do revestimento, sendo:

- a) Função elétrica: é utilizado silicato de sódio e potássio para atingir o estado da ação ionizante da atmosfera na abertura e estabilidade do arco elétrico tanto em corrente contínua como principalmente na corrente alternada. Como característica do revestimento, sendo mau condutor elétrico, orientando o arco para o local de interesse (ELBRAS ELETRODOS DO BRASIL, 2016).
- b) Função física: Os fumos formados devem ser mais densos que o ar protegendo da contaminação pelo hidrogênio (H_2), nitrogênio (N_2) e

oxigênio (O_2) encontrados no ar atmosférico, tanto no metal em transferência como no banho de metal fundido pela ação da escória FORTES (2005).

- c) Função metalúrgica: a formação de escória assegura o refino do material depositado e dos óxidos formados durante o procedimento de soldagem pela escorificação de impurezas e desoxidação. Também pode-se notar a garantia da composição química e propriedades permitindo o balanceamento dos elementos de liga pela perda esperada de elementos da alma do eletrodo devido a volatilização e reações químicas. São adicionados ao metal de solda os elementos como cromo, níquel, molibdênio, vanádio e manganês (SENAI, 1998).

Para que determinadas funções sejam atendidas, o revestimento recebe elementos em sua estrutura física com diferentes classificações, como o rutilo (TiO_2), o quartzo e a mica que são materiais cristalinos; a celulose como material fibroso e a sílica amorfa. FORTES (2005) descreve seis grupos para classificação dos tipos de materiais encontrados nos revestimentos dos eletrodos, sendo estes:

- Elementos de liga – para assegurar as propriedades mecânicas específicas à aplicação da peça, podem ser adicionados Fe-Ni, Fe-Mn, Fe-Cr, dentre outros.
- Aglomerantes – necessários para garantia do processo de extrusão e secagem, os silicatos de sódio e potássio e argila auxiliam para que não haja fragmentação ou trinca no revestimento evitando a decomposição prematura.
- Formadores de gases – desprendem CO_2 , CO e vapor de água a altas temperaturas produzidas pelo arco elétrico.
- Estabilizadores do arco elétrico – proporcionar a condução da corrente elétrica, principalmente a corrente alternada, pela aplicação de

compostos de titânio como TiO_2 , pó de ferro, ilmenita, silicatos de potássio e sódio.

- Formadores de fluxo e escória – atribuem propriedades a escória como viscosidade, tensão superficial e ponto de fusão através do emprego da sílica, fluoreto de cálcio, magnetita, argila, talco, feldspato, TiO_2 , Fe-Mn, Fe-Si e FeO.
- Plasticizantes – para melhorar o fluxo de material granulado sob pressão durante a ação de extrusão do revestimento na vareta são usados os carbonatos de cálcio e sódio.

As normas internacionais aplicam a classificação de acordo com a composição química prevendo o caráter da escória e diferenciando os tipos dos eletrodos revestidos através do elemento com maior teor no revestimento (ELBRAS ELETRODOS DO BRASIL, 2016). Desta maneira, os tipos de revestimentos encontrados são:

1) Revestimento Ácido:

É composto de grande quantidade de óxido de ferro (Fe_2O_3) com ou sem óxido de manganês adicionados a elementos escorificantes a base de sílica (SiO_2) na forma de caulim, feldspato e quartzo, produzindo volume abundante de escória oxidante, porosa e de fácil destacabilidade. Como característica do metal a ser depositado, possui baixos teores de carbono e manganês sendo pouco aplicada atualmente pela baixa penetração e baixa propriedade mecânica sendo suscetível a formação de trinca e substituído pelos eletrodos rútilicos. A aparência do cordão de solda é boa e pode ser usado com corrente contínua (CC) e corrente alternada (CA) (LEITE, 2013).

2) Revestimento Rútilico:

Contém apreciável quantidade de dióxido de titânio conhecido como rutilo (TiO_2) chegando a atingir o teor de 50% deste composto. Tem como

principal função facilitar e manter o arco elétrico durante a transferência metálica. Produz abundante escória densa, de rápida solidificação e de fácil remoção promovendo conseqüentemente grande versatilidade na sua aplicação em uso geral na soldagem em todas as posições com média penetração e baixa resistência a fissuração a quente. É necessário ressecagem do eletrodo reduzindo o efeito do hidrogênio que pode atingir até 30ml/100g produzindo porosidade grosseira na solda. Com os devidos cuidados, a aparência do cordão de solda é ótima sendo usado para acabamento podendo ser aplicado para CC e CA com fácil aplicação do eletrodo (FORTES, 2005).

3) Revestimento Básico:

Contém significativa quantidade de carbonato de cálcio (CaCO_3) e fluorita (CaF_2) atingindo até 80% em peso do revestimento, além de desoxidantes e dessulfurantes como Fe-Mn e Fe-Si. Apresenta como característica a formação de escória básica pouco abundante e de rápida solidificação com função metalúrgica de dessulfurar a solda minimizando o risco de formação de trincas de solidificação e melhor resistência a fissuração, tendo como distinção os baixos teores de enxofre, hidrogênio e inclusões de sulfetos e fosfetos. Com média penetração e boas propriedades mecânicas, dentre elas a tenacidade no cordão de solda, é indicada para grandes espessuras da junta a ser soldada e alta rigidez. Necessário ressecagem devido a característica de revestimento higroscópico, absorvendo umidade. O cordão de solda apresenta-se mais irregular pela menor estabilidade do arco elétrico não operando bem em CA (LEITE, 2013).

4) Revestimento Celulósico:

Apresenta-se com elevada quantidade de material orgânico combustível – celulose ($\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5$) – gerando grandes quantidades de gases protetores promovendo atmosfera redutora pela ação de CO_2 , CO, H_2 e vapor de água, não devendo ser ressecados. O arco elétrico é violento demonstrando elevada quantidade de respingos e proporcionando alta penetração com aspecto do cordão de solda irregular com escamas. A

quantidade de escória de fácil remoção é pequena em relação a aplicação. São usados nas posições não planas como a soldagem de tubulações de oleodutos e gasodutos restritos a materiais não sujeitos a trincas pelo hidrogênio (FORTES, 2005).

5) Revestimento com adição de Pó de Ferro:

Para aumentar o rendimento dos eletrodos rutilicos e básicos em relação ao tempo de operação, pode-se adicionar pó de ferro ao revestimento atingindo melhora em suas características como o aumento da taxa de deposição, melhor fluidez da escória pela formação de óxido de ferro, e operação com menor penetração devido a melhor estabilidade do arco elétrico. Como consequência são notados a redução da tenacidade nos materiais, e usual aplicação na soldagem plana por permitir o arraste por gravidade (LEITE, 2013).

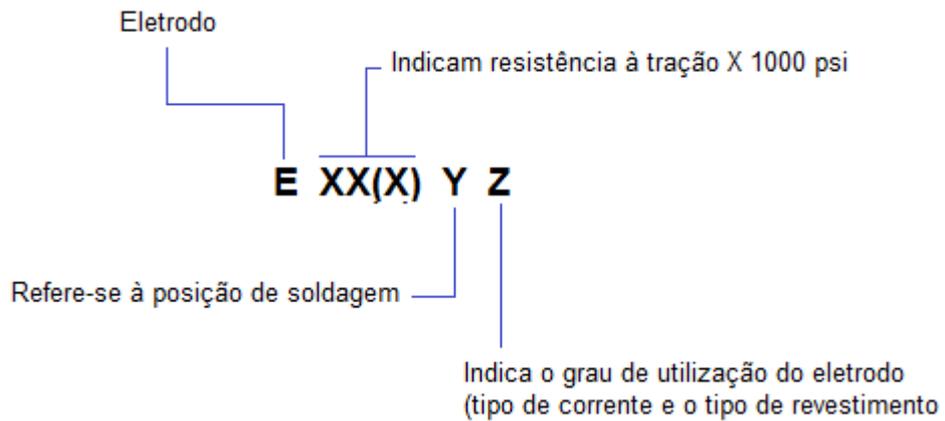
3.4 Especificação AWS para Eletrodo Revestido aplicado a Aços ao Carbono

As especificações de soldagem mais usadas no Brasil são propostas das normas internacionais da AWS sob a autoridade da American National Standards Institute (ANSI).

O processo de consenso na elaboração e revisão das normas criou um padrão de identificação para eletrodos revestidos, conhecido em todo mundo e utilizado para classificação neste trabalho.

Com base nas propriedades mecânicas do metal de solda, o tipo de revestimento, as posições de soldagem e o tipo de corrente a ser aplicada; os fabricantes de consumíveis classificam os eletrodos de aço ao carbono mantendo a conformidade com as especificações das normas AWS conforme a designação demonstrada na Figura 4.

Figura 4 - Especificação AWS5.1-91: Eletrodos de aço ao carbono para a soldagem manual a arco com eletrodo revestido



Fonte: Adaptado de FORTES, 2005

O prefixo institui o tipo de soldagem a ser utilizado para a aplicação do consumível conforme o conjunto de letras apresentada no início da especificação pela familiarização, desta forma se apresentam da seguinte maneira na Tabela 1:

Tabela 1– Familiarização com a especificação AWS de consumíveis

LETRA	TIPO DE PROCESSO DE SOLDAGEM
E	Eletrodo para soldagem a arco elétrico;
R	Vareta para soldagem a gás;
B	Metal de adição e brasagem;
F	Fluxo para arco submerso;
ER	Permite a aplicação com eletrodo nu (arame) ou vareta

Fonte: FBTS, 2014

No segundo conjunto demonstrado na designação são encontrados em dois ou três numerais a indicação do limite de resistência à tração mínimo do metal de solda em ksi, sendo 1ksi = 1000psi. Para exemplificar, a Tabela 2 demonstra o limite de resistência para algumas classificações.

Tabela 2 – Exemplos na representação do segundo dígito na codificação para classificação AWS

ELETRODO REVESTIDO	LIMITE DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO MÍNIMO	
	lb/pol ²	Mpa
E 60 XX	60.000	414
E 70 XX	70.000	482
E 80 XX	80.000	550
E 90 XX	90.000	620
E 100 XX	100.000	690
E 110 XX	110.000	780
E 120 XX	120.000	830

Fonte: FBTS, 2014

O terceiro dígito identifica a posição de soldagem na qual o eletrodo revestido pode ser utilizado com resultados satisfatórios. Sendo assim, a Tabela 3 permite a visualização de alguns exemplos.

Tabela 3 – Significado do terceiro dígito na codificação para classificação AWS

ELETRODO	POSIÇÃO DE SOLDAGEM
EXX 1 X	Todas as posições
EXX 2 X	Plana e Horizontal (especialmente solda em ângulo horizontal)
EXX 4 X	Todas as posições (especialmente a vertical descendente para os eletrodos de baixo hidrogênio)

Fonte: FBTS, 2014

O quarto dígito designa o tipo de corrente com o qual o eletrodo pode ser aplicado e o tipo de revestimento, podendo variar entre 0 e 9. Podemos verificar aplicações conforme a Tabela 4.

Tabela 4 – Significado da combinação dos terceiros e quartos dígitos na codificação para classificação AWS

3° e 4° DÍGITOS	10	13	18	24	27	48
TIPO DE CORRENTE	CC+	CA CC+/-	CA CC+	CA CC+/-	CA CC+/-	CA CC+
TIPO DE ARCO E TRANSFERÊNCIA	Forte com salpicos, spray	Forte sem salpicos, spray	Média, poucos salpicos, globular	Suave sem salpicos, spray	Suave sem salpicos, spray	Média, pouco salpicos, globular
PENETRAÇÃO	Profunda	Pouca	Média	Média	Alta	Média
TIPO DE REVESTIMENTO	Celulósico com silicato de Na	Rutílico com silicato de K	Básico com silicato de K e 25-40% de pó de ferro	Rutílico com silicato de K e 50% de pó de ferro	Ácido com silicato de K e 50% de pó de ferro	Básico com silicato de K e 25-40% de pó de ferro
TEOR DE HIDROGÊNIO	Alto 20ml/100g	Médio 15ml/100g	Baixo 2ml/100g	Médio 15ml/100g	Médio 15ml/100g	Baixo 2ml/100g

Fonte: Adaptado de FBTS, 2014

3.5 Aplicação típica dos eletrodos com as classificações E6013 e E7018

Neste trabalho, foram utilizados como reforço os revestimentos dos resíduos de eletrodos mais usuais em oficinas e na indústria por possuírem boas propriedades mecânicas e facilidade de utilização. São eles os eletrodos E6013 e E7018.

A Tabela 5 apresenta algumas das aplicações usuais com referidos desempenhos para comparação entre os eletrodos, sendo o valor 10 para aplicação fortemente indicada, o valor 1 para aplicação não recomendada, e NA como não aplicável.

Tabela 5 – Desempenho de alguns eletrodos em diferentes aplicações

APLICAÇÕES	6010	6011	6013	6016	7018	7024
Aço com Enxofre alto ou sem análise química	NA	NA	3	10	9	5
Alta ductilidade	6	7	5	10	10	5
Alta penetração	10	9	5	7	7	4
Alta resistência ao impacto	8	8	5	10	10	9
Alta taxa de deposição	4	4	5	4	6	10
Espessura fina, probabilidade de distorções	5	7	9	2	2	7
Espessura grossa, alta restrição	8	8	8	10	9	7
Facilidade remoção de escória	9	8	8	4	7	9
Filete 1G/2G alta produtividade	2	3	7	5	9	10
Filete todas as posições	10	9	7	8	6	NA
Pouca perda por respingos	1	2	7	6	8	9
Topo posição plana e<6,0mm	4	5	8	7	9	9
Topo todas pos. e<6,0mm	10	9	8	7	6	NA

Fonte: ELBRAS ELETRODOS DO BRASIL, 2016

3.5.1 Eletrodo E6013

Possui revestimento rutilico contendo grande percentual de dióxido de titânio (TiO_2). O uso deste eletrodo originalmente obtém arco de baixa penetração durante a soldagem sendo aplicados a metais de baixa espessura, evitando o dano como furar a peça principalmente na posição plana, sendo aplicados a chapas finas com poucos respingos e uniformidade do cordão de solda na superfície (FORTES, 2005).

Dentre os demais componentes que fazem parte do revestimento, temos: celulose, ferro-manganês, e silicato de potássio aplicado como aglutinante. Os compostos de potássio estabilizam o arco elétrico para aplicação da corrente alternada (CA) operando com baixa intensidade de corrente e baixa tensão de arco aberto. Ainda podem operar com corrente contínua (CC) com polaridade direta ou inversa (LEITE, 2013).

Produzem escória ácida, densa e viscosa com predominância do dióxido de silício (SiO_2) não tendo como efeito o refino do metal de solda.

3.5.2 Eletrodo E7018

Versão mais moderna de eletrodos básicos de baixo hidrogênio contendo consideráveis quantidades de pó de ferro para obtenção de arco elétrico mais suave

e estável além da redução de respingos sendo facilmente manuseado em todas as posições (LEITE, 2013).

A adição de pó de ferro resulta em maiores taxas de deposição podendo abranger 30% da composição do revestimento, permitindo a utilização sob correntes de soldagens maiores e arco mais brando facilitando a sua aplicação principalmente em aços baixo carbono (FORTES, 2005).

Dentre os demais componentes do revestimento, encontramos o carbonato de cálcio (CaCO_3), a fluorita (CaF_2), ferro-manganês, e o silicato de potássio como aglomerante (FBTS, 2014).

Apresenta como desvantagem a necessidade de ser mantido seco não podendo ficar expostos a atmosfera ou outras fontes de umidade sendo indispensáveis cuidados especiais durante o manuseio e ressecagem. Como efeito da umidade são notadas porosidades no cordão de solda. O teor de umidade se encontra em torno de 0,1% na composição do revestimento proporcionando ao metal de solda baixo teor de hidrogênio (FORTES, 2005).

A escória formada é constituída de cal e fluorita apresentando desta forma característica de comportamento básico promovendo o refino do metal de solda com a redução de inclusões não metálicas (BRAGA, 2007).

3.6 Disponibilidade da Matéria Prima: Resíduos do revestimento de eletrodos

Considerando o desempenho esperado na utilização dos eletrodos revestidos, parte da massa do eletrodo é perdida como escória, respingos, fumos e gases promovendo a eficiência de deposição. A eficiência de deposição aliado ao descarte das pontas expõem o rendimento real do uso dos eletrodos na indústria. A Tabela 6 demonstra a eficiência de deposição aplicada a diversos eletrodos no comprimento da ponta de 50mm, enquanto a Tabela 7 representa a redução do rendimento devido a perda durante o descarte das pontas aplicado ao eletrodo E6010 (FORTES, 2005).

Tabela 6 – Eficiência de deposição de eletrodos revestidos para aços ao carbono

CLASSE	EFICIÊNCIA DE DEPOSIÇÃO MÉDIA (%)
E 6010	63,8
E 6011	68,5
E 6012	66,9
E 6013	66,8
E 6014	64,6
E 6016	62,8
E 6018	69,5
E 6020	65,2
E 7024	66,8
E 7027	68,6

Nota: inclui perda de ponta de 50mm

Fonte: FORTES, 2005

Tabela 7 – Perda da ponta dos eletrodos

COMPRIMENTO DA PONTA (mm)	METAL DEPOSITADO E6010	PERDA DO ELETRODO DE COMPRIMENTO 350mm
50	63,8	36,2
75	58,5	41,5
100	53,2	46,8
125	47,9	52,1
150	42,6	57,4

O eletrodo E6010 tem eficiência de deposição de 71,6%. Perdas devido à escória, respingos e fumos.

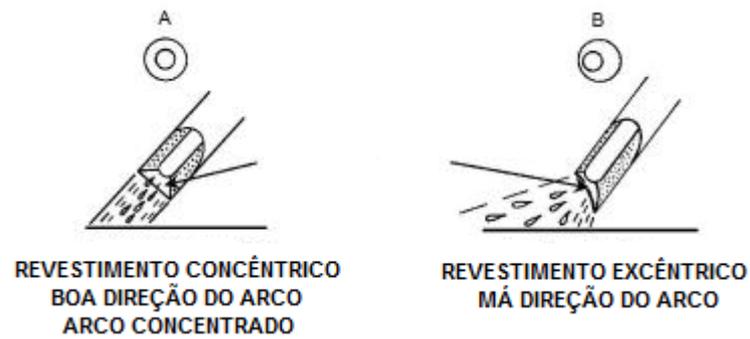
Fonte: FORTES, 2005

Aliado ao baixo rendimento no descarte de longas pontas por decisão do soldador, os eletrodos revestidos podem ser descartados por terem sido danificados durante seu armazenamento ou manuseio carecendo desta forma de necessidades especiais. Assim, quando ocorre a exposição da alma do eletrodo, estes não devem mais ser aplicados em peças com mínimo de responsabilidades estruturais. Conforme LEITE (2013), as perdas em eletrodos chegam a atingir de 30 a 35% por mau uso em suas aplicações. BARBACOV *et al* (2010) descrevem condições usuais que podem causar danos durante a utilização de eletrodos revestidos na indústria. As principais são: desleixo, transporte e estocagem inadequados e manuseio.

Uma condição que deve ser garantida, e neste caso pelos fornecedores, é a uniformidade da espessura do revestimento e concentricidade da alma do eletrodo. FORTES (2005) descreve que a verificação da espessura deve ser realizada durante o processo de fabricação, e antes da soldagem a validação da concentricidade da alma pelo soldador também deve ser realizada. A Figura 5 demonstra formação da taça na ponta do revestimento com o papel de direcionar o

fluxo do arco elétrico, em que para revestimento não concêntrico com a alma metálica forma um cordão de solda inconsistente, com proteção deficiente e falta de penetração, devido a queima irregular do eletrodo e má orientação do arco.

Figura 5 - Efeito da concentricidade do revestimento



Fonte: Fortes, 2005

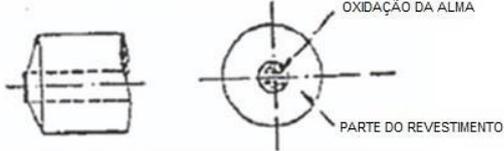
A FBTS (2014) representa os defeitos nos eletrodos por meio das ilustrações demonstradas nos esquemas da Figura 6.

Figura 6 - Principais tipos de defeitos nos eletrodos revestidos

OXIDAÇÃO DA PONTA DE PEGA



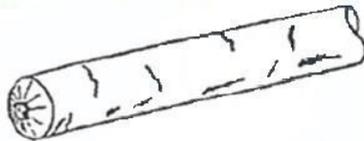
OXIDAÇÃO DA ALMA



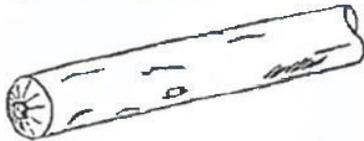
REDUÇÃO LOCALIZADA



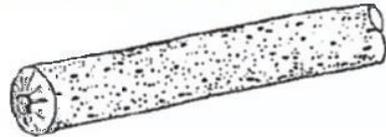
TRINCAS TRANSVERSAIS



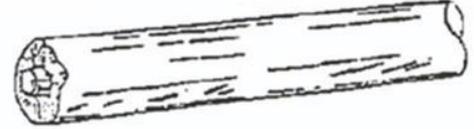
TRINCAS LONGITUDINAIS



ENVELHECIMENTO (CRISTALIZAÇÃO DE SILICATO)



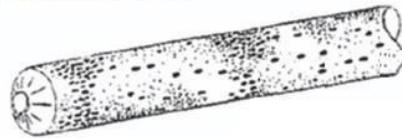
DANOS NA PONTA DO ARCO



AUSÊNCIA DE CONICIDADE NA PONTA DE ARCO



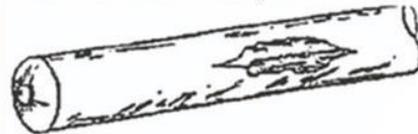
FALTA DE COMPACIDADE



FALTA DE ADERÊNCIA



DESTACAMENTO COM EXPOSIÇÃO DA ALMA



Fonte: FBTS, 2014

Como intenção deste trabalho, a proposta é a utilização do revestimento das pontas dos eletrodos após a soldagem e eletrodos inutilizados devido a qualquer defeito mencionado acima.

3.7 Utilização da matriz polimérica de PEAD

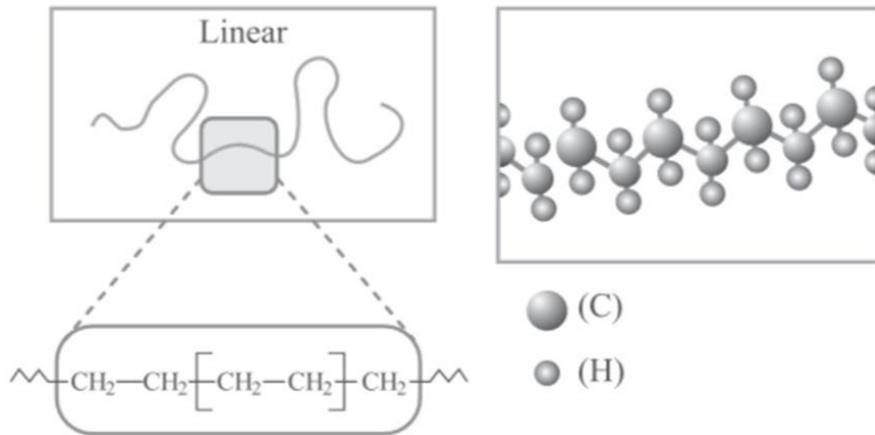
Dentre a classificação de polímeros, PEAD é um termoplástico olefínico denominado polietileno de alta densidade. Como principal característica está o fato de poderem ser amolecidos a partir do aumento da temperatura e pressão, assim como serem resfriados retornando a sua rigidez inicial (MOREIRA, 2008).

Os processos industriais utilizados em produções de larga escala são os processos de injeção e extrusão com aplicação de conformação por temperatura como moldagem a sopro ou vácuo formagem, entre outros. Esse polímero é considerado um importante termoplástico de engenharia, vastamente aplicado na indústria devido suas atrativas características tornando-se viável para utilização como matriz de compósitos poliméricos, encontrando dentre elas: baixo custo, resistência química, facilidade de processamento, reciclagem e boa resistência ao impacto (MOREIRA, 2008).

O PEAD é caracterizado por ligações químicas fracas entre as cadeias denominadas van der Waals rompendo com facilidade a partir da introdução de energia (CALLISTER, 2012). Como aspecto relevante ao seu comportamento, esses polímeros podem ser reciclados diretamente a partir de rejeitos e refugos sendo facilmente remodelados. Apresentam certa cristalinidade e são flexíveis com influência direta da quantidade amorfa e cristalina em suas propriedades, sendo translúcidos (COUTINHO; MELLO; SANTA MARIA, 2003).

A Figura 7 representa a estrutura do material, como uma estrutura cristalina lamelar com cadeias dobradas contendo cerca de 100 átomos de carbono enquanto as propriedades esperadas podem ser verificadas na Tabela 8 sendo dependente do teor de ramificações pela conseqüente redução da cristalinidade e expressivas alterações nas propriedades mecânicas.

Figura 7- Representação esquemática da estrutura do PEAD



Fonte: COUTINHO; MELLO; SANTA MARIA, 2003

Tabela 8 – Propriedades térmicas, físicas, elétricas e mecânicas do PEAD

PROPRIEDADE	ALTAMENTE LINEAR	BAIXO GRAU DE RAMIFICAÇÃO
Densidade, g/cm ³	0,962 - 0,968	0,950 - 0,960
Índice de refração	1,54	1,53
Temperatura de fusão, °C	128 - 135	125 - 132
Temperatura de fragilidade, °C	-140 - -70	-140 - -70
Condutividade térmica, W/(mK)	0,46 - 0,52	0,42 - 0,44
Calor de combustão, kJ/g	46,0	46,0
Constante dielétrica à 1MHz	2,3 - 2,4	2,2 - 2,4
Resistividade superficial, Ω	10 ¹⁵	10 ¹⁵
Resistividade volumétrica, Ω.m	1017 - 1018	1017 - 1018
Resistência dielétrica, kV/mm	45 - 55	45 - 55
Ponto de escoamento, MPa	28 - 40	25 - 35
Módulo de tração, MPa	900 - 1200	800- 900
Resistência a tração, MPa	25 - 45	20 - 40
Alongamento, %		
no ponto de escoamento	5 - 8	10 - 12
no ponto de ruptura	50 - 900	50 - 1200
Dureza		
Brinell, MPa	60- 70	50 - 60
Rockwell	R55, D60 - D70	
Resistência ao cisalhamento, MPa	20 - 38	20 - 36

Fonte: COUTINHO; MELLO; SANTA MARIA, 2003 (apud DOAK, 1986)

3.8 Processo para a confecção do compósito

A matriz polimérica de PEAD flui com facilidade na forma solicitada pela aplicação de esforços durante a moldagem das peças industriais sem a aplicação de elevadas temperaturas (CAMATTA, 2008).

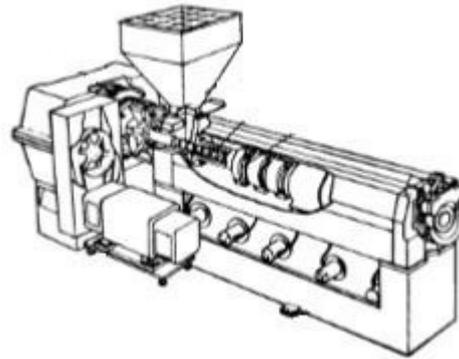
No caso dos compósitos, é necessário manter uma dispersão homogênea das partículas na matriz, garantindo maior interação entre as fases e para isso a morfologia e densidade destas partículas devem ser avaliadas. Segundo CAMATTA (2008), quanto menores e mais leves forem estas partículas, maior a homogeneidade do sistema, porém, a redução do tamanho das partículas pode provocar o aumento da viscosidade, que é desfavorável aos processos de injeção e roletagem do laminado.

Outro parâmetro importante e desejável é a aderência das partículas na matriz, visto que a falta de interação interfacial entre a matriz e a carga pode ocasionar lacunas que fragilizam o material.

Os processos e transformação para polímeros vêm sendo aplicados para a produção de compósitos poliméricos destacando a extrusão e injeção. Como exemplo, podem-se apontar as extrusoras como equipamentos mais empregados na transformação de polímeros. Nos processos de extrusoras de duplas roscas, utilizados industrialmente, o movimento giratório das roscas empurra o material entre os filetes e canal das roscas permitindo sua mistura. A utilização de dosagens diferenciadas nos alimentadores incorporam além de cargas de reforço, aditivos e pigmentos ao compósito. Outro equipamento utilizado é o misturador termocinético de alta intensidade com rotação de palhetas ocorrendo o atrito do material junto as paredes do sistema (HILLING, 2006).

A Figura 8 demonstra o esquema do equipamento de extrusão com seu funcionamento pela aplicação de tratamento térmico, pressão e cisalhamento da mistura, controle de umidade e velocidade de processamento, influenciando diretamente no compósito extrudado (ARAÚJO, 2009).

Figura 8 - Representação esquemática de uma extrusora



Fonte: ARAÚJO, 2009

Posteriormente, pela aplicação do processo de injeção, o compósito recebe a forma pela moldagem das dimensões. Desta forma é aplicado o esforço por um êmbolo forçando a mistura aquecida homogênea em direção ao molde com as cavidades e extensões da peça desejada. Dentre os parâmetros de processo, observa-se a velocidade de injeção e tempo de dosagem, temperatura, pressão de fechamento do molde e tempo de resfriamento do sistema molde-peça (ARAÚJO, 2009).

3.9 Caracterização dos compósitos

3.9.1 Comportamento mecânico dos compósitos

Para a aplicação dos materiais deve ser garantido o serviço e segurança quando estes estão sujeitos a forças e cargas nas situações propostas de emprego refletindo a relação deformação e carga aplicada, sendo as principais: resistência, ductilidade, rigidez e dureza (MULINARI, 2009).

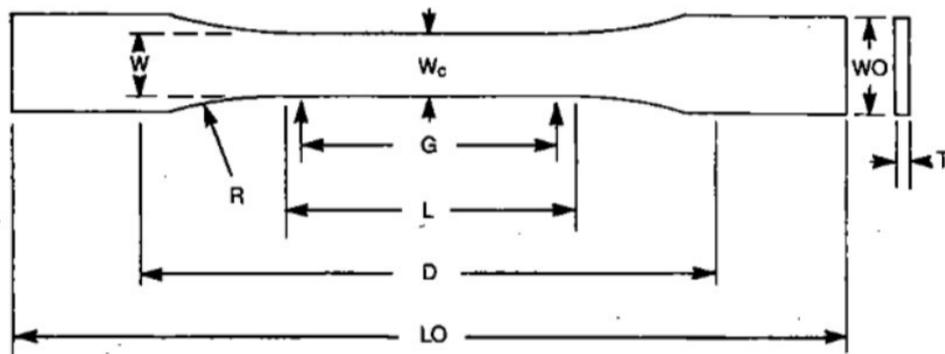
Para determinação das propriedades mecânicas do compósito é necessário primeiramente a preparação de amostras e identificação dos corpos de prova padronizados utilizados nos testes físicos-mecânicos. Esta preparação normalmente em laboratório é realizada sobre molde metálico por injeção em prensa ou na forma de laminados da mistura matriz e reforço (MOREIRA, 2008).

3.9.1.1 Propriedades mecânicas à tração

Conforme procedimento, inicialmente os corpos de prova devem ser obtidos com a dimensão conforme Figura 9 para serem aplicados diretamente nas garras da máquina de ensaios e deformados através da ação de força axial em relação ao seu comprimento. O método aplicado conforme a norma ASTM D638 caracteriza quantitativamente a tensão máxima sob tração, a tensão de escoamento e o módulo de elasticidade, podendo desta forma compará-las aos demais materiais.

A preparação do corpo de prova deve atender a condições específicas desta norma que abrange o ensaio em materiais compósitos para as amostras de dimensionamento Tipo I prevendo a ruptura do mesmo na seção útil. As demais dimensões são passíveis de aplicação em condições específicas e não serão abordados neste trabalho.

Figura 9 - Dimensionamento do corpo de prova conforme ASTM D638



Dimensões	Classificação: Tipo I (mm)
W - Largura da seção estreita	13
L - Comprimento da seção estreita	57
Wo - Largura total, min	19
Wc - Largura da área útil	...
Lo - Comprimento total, min	165
G - Comprimento da área útil	50
D - Distância entre apertos	115
R - Raio de filé	76
T - Espessura	3,2

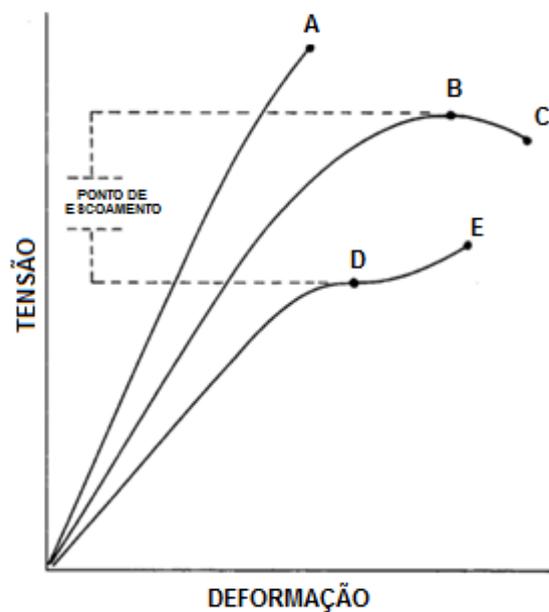
Fonte: Adaptado de ASTM D638, 2003

A máquina universal de tração propicia uma taxa de movimentação constante entre as garras de fixação da amostra e controle de velocidade em relação a garra

fixa sendo para o corpo de prova Tipo I de 5mm/min. Através de software específico são traçados em gráficos o acompanhamento da evolução da tensão suportada pelo material, enquanto o extensômetro garante a indicação dos dados da inclinação da curva tensão-deformação para determinação do módulo de elasticidade (CALLISTER, 2012).

Em acordo com as definições de termos relativos ao teste de tensão são exploradas as propriedades dos materiais pela Figura 10.

Figura 10 - Definição de tensões



Fonte: ASTM D638, 2003

Onde os pontos A, E e C representam a resistência à tração na ruptura, ou alongação na ruptura e os pontos B e D indicam a resistência à tração no escoamento, ou alongação no escoamento.

Para o cálculo da tensão máxima de tração utiliza-se a carga máxima dividida pela área da seção transversal original da amostra. Assim, a tensão de engenharia é expressa através da relação de carga instantânea na direção perpendicular à seção reta da amostra na região plástica (CALLISTER, 2012). Sob o esforço de tração, esta é a tensão máxima que uma estrutura pode sustentar conforme a equação 1.

$$\sigma = F / A_0 \quad (1)$$

Onde:

σ = tensão de engenharia

F = carga máxima

A_0 = área da seção reta inicial

Conforme CALLISTER (2012), o módulo de elasticidade é a constante de proporcionalidade entre a deformação do corpo dependendo da magnitude da tensão imposta ao mesmo para uma deformação elástica. O módulo de elasticidade (E) é descrito através da inclinação da reta pertencente a curva tensão-deformação considerado como a rigidez do material à deformação elástica, sendo que: quanto maior for esse módulo, menor será a deformação elástica resultante, indicando maior rigidez do material, conforme a equação 2.

$$\sigma = E \varepsilon \quad (2)$$

Onde:

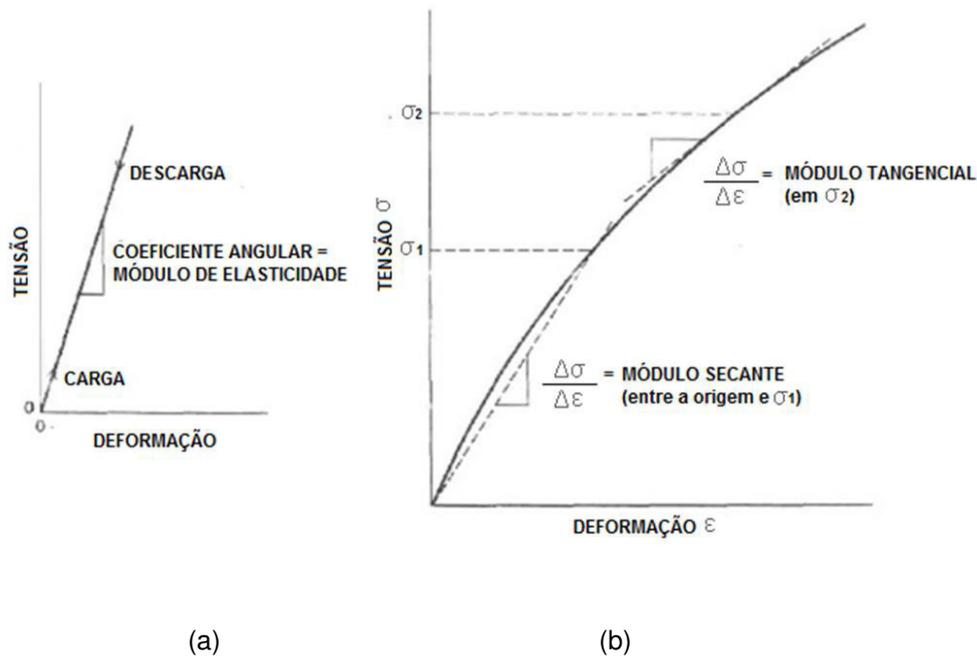
σ = tensão de engenharia

E = módulo de elasticidade

ε = deformação de engenharia

A Figura 11 representa dois diagramas esquemáticos de tensão-deformação para os comportamentos de linearidade e não linearidade da deformação elástica.

Figura 11– Diagrama esquemático tensão-deformação mostrando a deformação elástica para ciclos de carga e descarga – (a) Deformação elástica linear; (b) Metodologia para determinação do módulo tangente e secante em comportamento elástico não linear



Fonte: Adaptado de CALLISTER, 2012

No caso de polímeros, a parte elástica da curva tensão-deformação não é linear, sendo necessária a aplicação do método para módulo tangente ou o módulo secante conforme a Figura 11 (b) na designação da tensão a ser utilizada para o cálculo.

Estruturalmente, é seguro que somente a deformação elástica seja resultado da tensão aplicada. Assim, a tensão limite de escoamento é extremamente importante identificando o início da deformação plástica do material. Em polímeros, é usual a determinação da tensão para produzir a quantidade de deformação de 0,002 a 0,005 (CALLISTER, 2012).

3.9.1.2 Propriedades mecânicas sob flexão

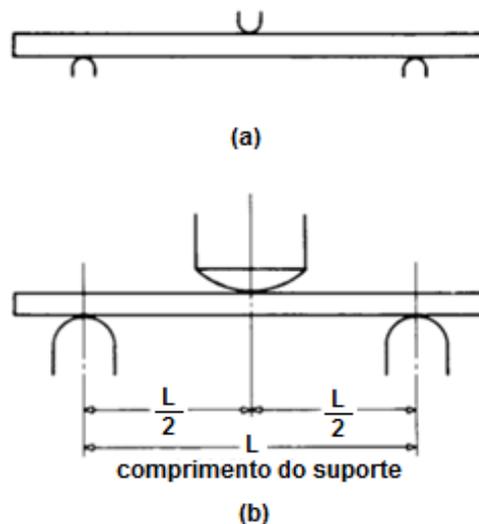
O ensaio de flexão simula o comportamento do material quando escurado como uma viga, consistindo no apoio do corpo de prova em pontos pré-estabelecidos a uma distância conhecida, sendo aplicada uma carga vertical no

ponto médio desta distância através da máquina universal de ensaios (BAPTISTA, 2012).

Conforme ASTM D790, o corpo de prova de seção transversal retangular pode ser moldado ou cortado de chapas e, deve atender para aplicação em termoplásticos as dimensões de 3,2mm de espessura e 12,7mm de largura. Entretanto, ainda descreve que para esta geometria o raio para os suportes cilíndricos fixos na aplicação do esforço de flexão deve apresentar-se até 1,6 vezes a espessura da amostra e o suporte cilíndrico móvel até 4 vezes a espessura da amostra, evitando marcas de indentação ou pontos de concentração de tensão.

O método de teste possui duas variações prevendo que os corpos de prova se quebrem, e no caso que não haja ruptura a deflexão deve atingir uma deformação máxima de 5,0%. Desta forma, o ensaio é esquematizado pela Figura 12, demonstrando o carregamento aplicado em três pontos sobre a barra de seção retangular. Esta barra repousa sobre os suportes fixos até que o suporte móvel no centro de extensão venha aplicar o esforço de deflexão a uma taxa de deformação operando a velocidade constante (BAPTISTA, 2012).

Figura 12 – Esquema de aplicação do ensaio de flexão. (a) Raio mínimo do suporte = 3,2mm. (b) Raio máximo do suporte fixo = 1,6 vezes a espessura da amostra; Raio máximo do suporte móvel = 4 vezes a espessura da amostra.



Fonte: ASTM D790, 2003

Como resposta ao ensaio, a tensão de flexão é determinada através da relação do momento fletor e o momento de inércia relacionada a linha neutra do corpo de prova como representado na Figura 13 (BAPTISTA, 2012). Assim, a tensão máxima na superfície externa da amostra admitindo a ruptura das fibras da barra ocorre no ponto médio de seu comprimento considerando-a um material elástico homogêneo, sendo compreendida pela equação 3:

$$\sigma_f = 3PL / 4bh^2 \quad (3)$$

Onde:

σ_f = tensão de flexão

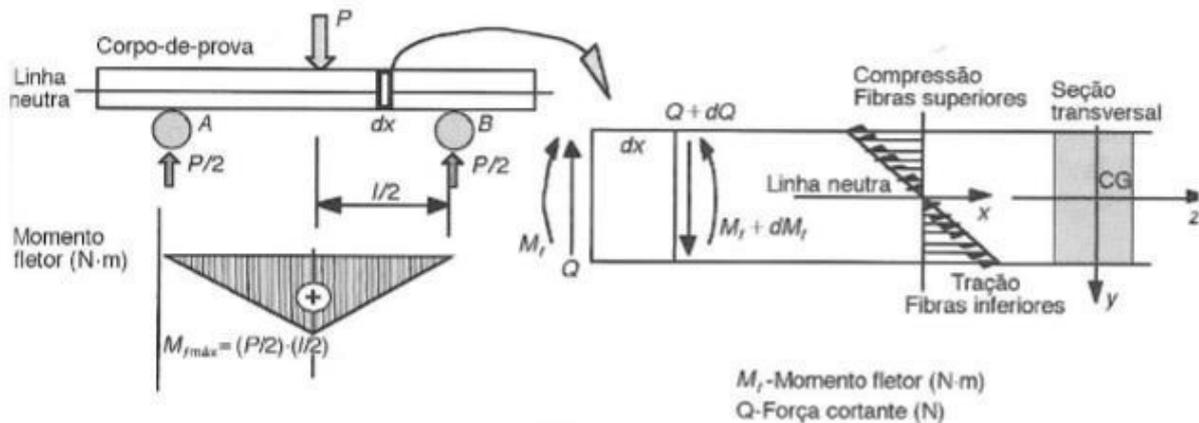
P = carga de deflexão

L = distância entre suportes fixos

b = largura do CP (base da seção transversal)

h = espessura do CP (altura da seção transversal)

Figura 13 – Determinação da Resistência à Flexão

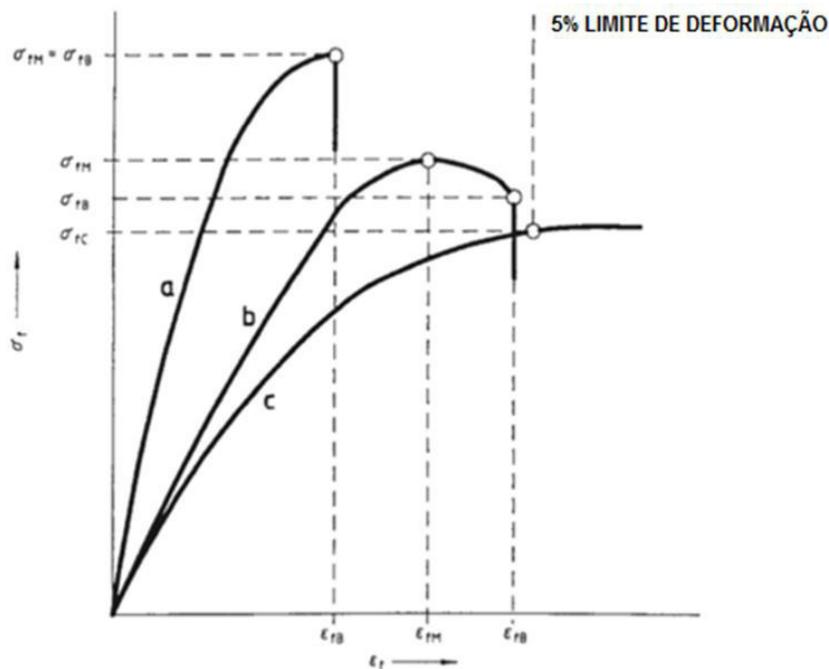


Fonte: BAPTISTA, 2012

Os dados obtidos por esta equação são válidos para materiais que apresentem a tensão linearmente proporcional à deformação. No caso de polímeros este comportamento torna-se não linear, sendo necessária a aplicação de uma correção da resistência à flexão com o traçado da tangente ao segmento de reta inicial da curva tensão-deformação (BAPTISTA, 2012). A Figura 14 demonstra

características no traçado de curvas tensão–deformação identificando a tensão máxima à flexão (σ_{FM}). Nota-se que esta tensão máxima de flexão é determinada diferentemente de acordo com o comportamento destas curvas, em que: para a curva “a”, a tensão máxima à flexão coincide com a tensão de ruptura do material caracterizando um limite elástico muito próximo à ruptura com deformação plástica mínima; na curva “b” é observada que a tensão não aumenta com o aumento da deformação demonstrando a tensão máxima à flexão no cume da curva; na curva “c” verifica-se que o corpo de prova não rompeu no ensaio atingindo o limite de 5% da deformação, sendo considerado ao final do ensaio o valor como a tensão máxima à flexão (BAPTISTA, 2012).

Figura 14– Curvas típicas de tensão x deformação para ensaios de flexão. Curva a: Espécime que quebra antes do limite de deformação. Curva b: Espécime que cede e depois quebra antes do limite de deformação de 5%. Curva c: Espécime que não cede nem quebra antes do limite de deformação de 5%



Fonte: ASTM 790, 2003

O traçado da tangente orienta a determinação do módulo de elasticidade do material nos comportamentos não lineares de tensão para deformação correspondente dentro do limite elástico e conforme MULINARI (2009) são representados pela equação 4 considerando a seção transversal retangular.

$$E = 0,17L^3 m / bh^3 \quad (4)$$

Onde:

E = módulo de elasticidade à flexão

L = distância entre suportes fixos

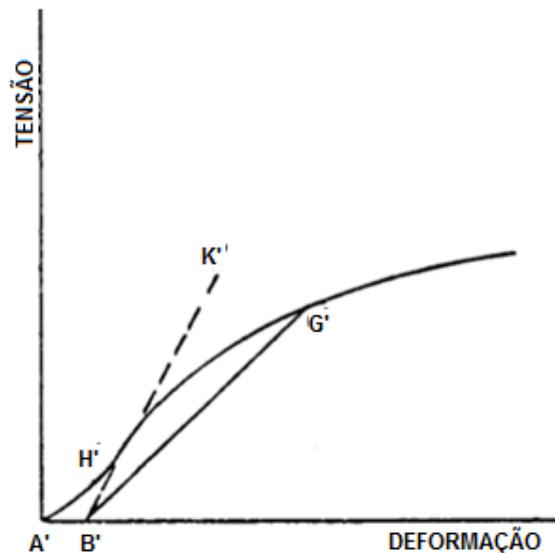
m = inclinação da secante do segmento de reta da curva tensão – deformação

b = largura do CP (base da seção transversal)

h = espessura do CP (altura da seção transversal)

A norma ASTM D790 descreve a determinação do método para o traçado da secante demonstrada na Figura 15, reduzindo a possibilidade de ocorrência de erro no módulo de elasticidade. O procedimento requer a visualização da tangente na parte não linear da curva tensão–deformação no ponto de inflexão H' e sua extensão ao eixo da deformação no ponto B'. Deve ser considerado um ponto G', e assim o segmento B'G' demonstram a secante para a determinação do módulo de elasticidade à flexão. COSSOLINO e PEREIRA (2010) consideram G' como 25% do limite de resistência à ruptura para determinação de módulos elásticos para materiais isotrópicos.

Figura 15 – Determinação do módulo de elasticidade secante

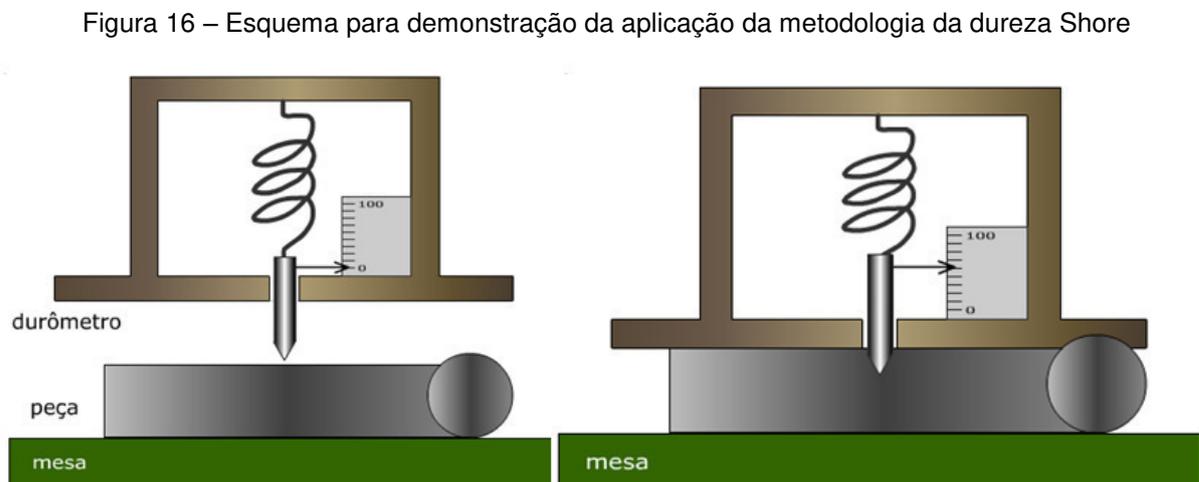


Fonte: ASTM D790, 2003

3.9.1.3 Dureza Shore D

A metodologia de aplicação da dureza Shore é compreendida por um sistema de medição da penetração na impressão deixada no corpo de prova pelo identador quando este é forçado sobre a amostra. São compreendidos 12 tipos dentre os durômetros: A, B, C, D, DO, E, M, O, OO, OOO, OOO-S e R em que a norma ASTM D2240-02 os relaciona ao emprego de típicos materiais, sendo os mais comuns: dureza Shore A aplicadas em borracha vulcanizada macia, borracha natural, nitrilos, elastômeros termoplásticos, plásticos flexíveis e termofixos, cera, feltro e couros; e dureza Shore D aplicada em borracha dura, elastômeros termoplásticos, plásticos de média dureza e termoplásticos.

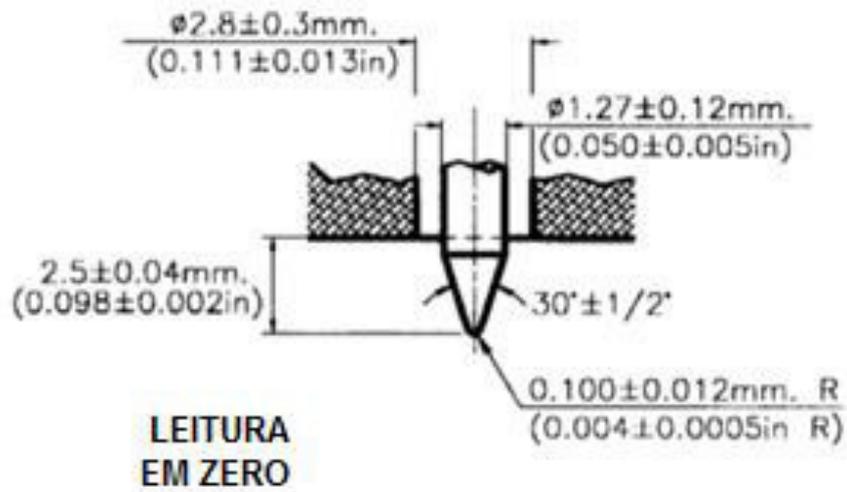
O identador é posicionado lateralmente a uma superfície que fica paralela a amostra, e o equipamento é dotado de um sistema de mola. A mola quando pressionada sobre o corpo de prova permite a impressão do identador conforme Figura 16.



Fonte: CIMM, 2013

No caso da dureza Shore D, categoria utilizada neste trabalho, o identador possui o formato cônico conforme a Figura 17.

Figura 17– Identador para ensaio de dureza Shore B e D



Fonte: ASTM D2240, 2003

O equipamento de medição demonstra diretamente o resultado do ensaio em uma escala de 0 a 100 HD, em que 100HD corresponde a força de 44,45N (ASTM D2240, 2003).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Materiais

As matérias primas utilizadas na construção das amostras para os ensaios empregados no decorrer deste trabalho foram obtidas seguindo as proporções da Tabela 9, objetivando diferenciação entre o teor de resíduos de revestimento dos eletrodos nos corpos de prova e a aplicação de dois tipos de resíduos dentre os mais empregados comercialmente.

Tabela 9 - Configuração da matéria prima utilizada nos ensaios

CORPO DE PROVA	PEAD		A (E7018)		B (E6013)	
	%	g	%	g	%	g
CP0	100	150	0	0	0	0
CP5A0B	95	142,5	5	7,5	0	0
CP10A0B	90	135	10	15	0	0
CP0A5B	95	142,5	0	0	5	7,5
CP0A10B	90	135	0	0	10	15
CP5A5B	90	135	5	7,5	5	7,5
CP10A10B	80	120	10	15	10	15

Fonte: A autora, 2017

4.1.1 PEAD

O fornecimento do PEAD utilizado neste trabalho foi realizado por Braskem localizada em São Paulo, indicado pela descrição HC7260-LS na embalagem de 25 kg. Este material é aplicado no processamento de moldagem por injeção em caixas industriais, capacetes, assentos sanitários, utilidades domésticas, brinquedos, tampas e paletes. Possui propriedades conforme Tabela 10.

Tabela 10 - Ficha técnica PEAD

PROPRIEDADES DE CONTROLE:	Método ASTM	Unidade	Valor
Índice de Fluidez (190/2,16)	D1238	g/10 min	0,34
Índice de Fluidez (190/2,16)	D1238	g/10 min	28
Densidade	D792	g/cm ³	0,956
PROPRIEDADES TÍPICAS:	Método ASTM	Unidade	Valor
Propriedades de referência da placa			
Tensão no ponto de fluência	D638	MPa	30
Tensão no ponto de ruptura	D638	MPa	30
Módulo de flexão, secante a 1%	D790	MPa	1350
Dureza Shore D	D2240	-	63
Resistência ao impacto Izod	D256	J/m	150
Resistência a fissuração ambiental b	D1693	h/F50	40
Resistência a fissuração ambiental c	D1693	h/F50	70
Temperatura de deflexão térmica a 0,455 Mpa	D648	°C	70
Temperatura de amolecimento Vicat a 10N	D1525	°C	127

Fonte: BRASKEM, 2017

4.1.2 Eletrodos

Os eletrodos necessários para a confecção do compósito, ambos do fabricante MAGMA ilustrados na Figura 19, foram doados pela unidade do Senai/VR. Cabe salientar que somente esta unidade descarta mensalmente o volume aproximado de 300 litros de pontas de eletrodos, que compreende não só o revestimento, mas também a alma metálica que não foi utilizada neste trabalho. Para o trabalho, os revestimentos foram quebrados, separados e identificados com as seguintes classificações: eletrodo básico E7018 e eletrodo rutílico E6013.

Figura 18 – Demonstração dos eletrodos aplicados no experimento



Fonte: A autora, 2017

A Figura 20 representa a vista superior de um tambor de descarte da oficina de solda do Senai/VR, com as pontas dos eletrodos antes da retirada do revestimento.

Figura 19 – Tambor de descarte de resíduos de soldagem no Senai/VR

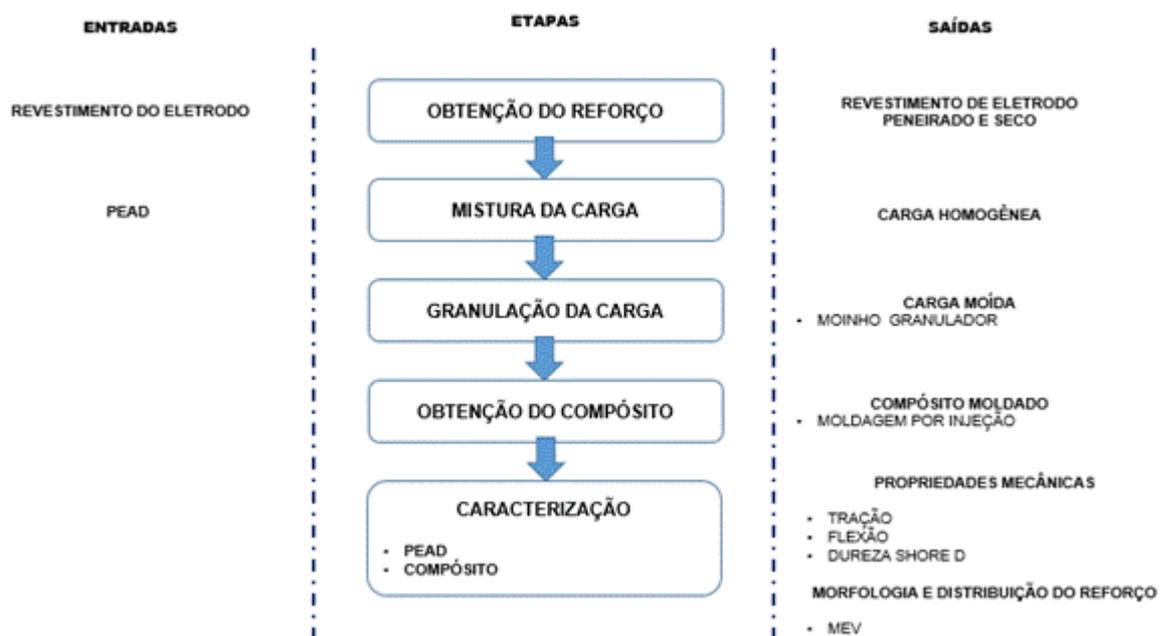


Fonte: A autora, 2017

4.2 Métodos

O método empregado neste trabalho é demonstrado através do fluxograma da Figura 18 no qual estão as etapas de confecção, as matérias primas necessárias e as saídas correspondentes. Os procedimentos adotados foram realizados nos laboratórios do UniFOA no Campus Três Poços.

Figura 20 – Fluxograma das etapas da metodologia empregada no trabalho



Fonte: A autora, 2017

4.2.1 Rendimento dos Eletrodos

Para confirmar a maior produtividade do eletrodo básico E7018, comparado ao eletrodo rútilico E6013, foi realizado um experimento em que duas juntas de topo idênticas foram soldadas com a mesma quantidade de passes, utilizando os dois diferentes eletrodos. A Tabela 11 mostra os pesos dos eletrodos antes e após a soldagem.

Tabela 11 – Dados dos eltrodos E7018 e E6013 antes e após a realização de mesma quantidade de passes de solda em mesmo tipo de junta

ELETRODOS	A (E7018)		B (E6013)	
	Massa (g)	(%)	Massa (g)	(%)
Antes da Solda	23	100	29	100
Após a Solda	12	52,17	7	24,13
Consumido	11	47,83	22	75,86

Fonte: A autora, 2017

Observa-se que o eletrodo básico E7018 apresentou um rendimento 28% superior do que o eletrodo rútilico E6013.

A Figura 21, na parte superior, mostra o que restou do eletrodo básico após a soldagem de uma junta e o corpo de prova soldado por este eletrodo. Na parte inferior, mostra a soldagem do mesmo corpo de prova realizada com o eletrodo rútilico e a sobra deste eletrodo. Torna-se evidente, pela diferença do comprimento final, a maior produtividade do eletrodo E7018.

Figura 21 – Corpo de prova com duas juntas soldadas idênticas. Parte superior representa o restante do eletrodo E7018 após a soldagem e a junta soldada por este eletrodo. Parte inferior representa a solda realizado com o eletrodo E6013 e o restane do eletrodo após a soldagem



Fonte: A autora, 2017

4.3 Processamento dos Compósitos

4.3.1 Obtenção do Reforço

A obtenção do reforço compreendeu a utilização do revestimento de eletrodos em que os mesmos foram retirados da alma de arame ao serem quebrados. Posteriormente ambas as classificações de revestimentos foram trituradas separadamente com rotação de 120 rpm durante 3 minutos em moinho de bolas Pulverisette modelo 5, fabricante Fritsch, disponível no laboratório de ensaios do Centro Universitário de Volta Redonda (UniFOA). Este equipamento pode ser observado através da Figura 22.

Figura 22 - Moinho de Bolas Pulverisette localizado no UniFOA



Fonte: A autora, 2017

Para assegurar o tamanho da partícula do reforço, após serem triturados, estes passaram através do conjunto de quatro peneiras SOLOTEST, modelo Tyler 28, fabricante Solotest, até atingir a granulometria de 50 mesh uniformizando a aplicação do material.

Para retirada de umidade, os reforços foram mantidos na estufa pré-aquecida QUIMIS por 1 hora a 100°C no laboratório do Centro Universitário de Volta Redonda (UniFOA) antes da mistura com a matriz de PEAD.

4.3.2 Mistura da Carga

Os dois tipos de reforços do revestimento de eletrodos e o PEAD foram dosados por meio da pesagem em balança de precisão MARTE, modelo AY220, do Centro Universitário de Volta Redonda (UniFOA), com especificações de capacidade máxima 220g e mínima 0,01g; $d=0,0001g$ e $e=0,001g$; nas proporções conforme apresentado anteriormente na Tabela 9.

Posteriormente, os revestimentos foram abastecidos no homogeneizador plástico, DRYSER, modelo MH-50H da MH Equipamentos no Centro Universitário de Volta Redonda (UniFOA) e depositados em bateladas por tipo de corpo de prova conforme demonstrados na Figura 23, respeitando o uso máximo de reforço de 20%. Em seguida o material fundido atravessou os rolos da calandra seguindo para o resfriamento ao ar. A foto do equipamento pode ser vista através da Figura 24.

Figura 23 – Mistura seca na confecção dos corpos de prova por batelada



Fonte: A autora, 2017

Figura 24 – Homogeneizador do laboratório do UniFOA



Fonte: A autora, 2017

4.3.3 Granulação da Carga

Para facilitar o abastecimento em proporções adequadas para a cobertura do molde de injeção, as placas de material resfriado após a mistura foram submetidas ao moinho de facas PLASTIMIX, conforme a Figura 25, no laboratório do Centro Universitário de Volta Redonda (UniFOA), adequando o tamanho para fusão e preenchimento uniforme.

Figura 25 – Moinho de facas do laboratório do UniFOA



Fonte: A autora, 2017

4.3.4 Obtenção do Compósito

O desenvolvimento do compósito foi realizado através do processo de moldagem por injeção em cavidades de dimensionamento permitido para a realização dos ensaios mecânicos usando a Injetora RAY RAN modelo RR/TSMP/162, disponível no laboratório do Centro Universitário de Volta Redonda (UniFOA), com temperatura de saída do corpo de prova a 60°C. O equipamento pode ser observado na Figura 26 (a) e os moldes de tração e flexão na Figura 26 (b).

Figura 26 – (a) Injetora (b) Moldes para corpos de prova nos ensaios de flexão e tração



(a)

(b)

Fonte: A autora, 2017

4.4 Caracterização do PEAD e Compósito

4.4.1 Comportamento mecânico

4.4.1.1 Ensaio de Tração

Os corpos de prova foram avaliados com geometrias permitidas pela norma ASTM D638-03 possuindo o dimensionamento de 13mm de largura, 3,2mm de espessura e 165mm de comprimento, sendo 3 amostras para cada configuração diferenciada. A máquina universal de ensaio servo hidráulica compreendida para a realização dos testes de tração foi a EMIC DL-10000, com uso de célula de carga de 5kN, a velocidade de 5mm/min e a temperatura ambiente no laboratório de ensaios do Centro Universitário de Volta Redonda (UniFOA), conforme a Figura 27, com a geração de dados pelo Software TESC VERSÃO 3.4.

Durante o ensaio de tração, o equipamento gerou a curva tensão-deformação, podendo verificar o resultado para cada amostra ensaiada. Para identificar o comportamento para cada grupo de corpos de prova, foi utilizada a média entre os três ensaios nas propriedades: resistência máxima à tração, resistência ao escoamento a 0,2% de deformação total e módulo de elasticidade em tração.

Figura 27 - Máquina Universal de Ensaio Mecânico usada para os Ensaio de Tração e Flexão no UniFOA



Fonte: A autora, 2017

4.4.1.2 Ensaio de Flexão

O ensaio de flexão foi realizado através da máquina universal de ensaios servo hidráulica EMIC DL-10000 e célula de carga de 100kN a velocidade de 5mm/min em temperatura ambiente com a geração de dados pelo Software TESC VERSÃO 3.4, demonstrada pela Figura 27. O procedimento adotado foi o carregamento em três pontos, onde a distância entre os suportes fixos foi mantida a 80mm para aplicação da carga central às fibras externas da amostra sujeita ao limite máximo de dobramento de 5,0% da deformação máxima.

Assim como no ensaio de tração, o equipamento gerou a curva tensão-deformação podendo verificar o resultado para cada amostra ensaiada. Para

identificar o comportamento para cada grupo de corpos de prova foi utilizada a média entre os três ensaios nas propriedades: resistência máxima à flexão e módulo de elasticidade à flexão.

Os corpos de prova foram avaliados com geometrias permitidas pela norma ASTM D790-03.

4.4.1.3 Ensaio da Dureza Shore D

Durante o ensaio de dureza Shore D, o equipamento gera diretamente o resultado digital para cada amostra ensaiada. Para identificar o comportamento para cada grupo de corpos de prova foi utilizada a média entre as cinco medições sendo apresentadas as informações separadamente para o PEAD (CP0) e compósitos gerados. As amostras utilizadas foram tomadas nas dimensões como no ensaio de flexão e procedimento adotado conforme ASTM D2240-02.

O ensaio de dureza foi realizado utilizando um durômetro portátil digital DIGIMESS com capacidade de 0 a 100 Shore D; resolução de 0,1 Shore D; e exatidão de +/- 1 Shore D no laboratório de ensaios do Centro Universitário de Volta Redonda (UniFOA) conforme Figura 28. O procedimento adotado foi a penetração de agulha de aço em ângulo de 90° junto ao corpo de prova com leitura direta realizada pelo cálculo do equipamento em cinco pontos equidistantes. A equação 5 demonstra o cálculo da dureza Shore D.

$$HD = 100 - L / 0,25 \quad (5)$$

Onde:

HD – indica a Dureza Shore D

L – indica o comprimento do penetrador na superfície da amostra

Figura 28 – Durômetro para indicação da Dureza Shore D no UniFOA



Fonte: A autora, 2017

4.4.2 Comportamento morfológico

A fim de analisar a distribuição e as dimensões do reforço na matriz, bem como a aderência desses resíduos na superfície fraturada, utilizou-se a técnica de microscopia eletrônica de varredura (MEV) utilizando o microscópio eletrônico da marca HITACHI modelo TM3000, conforme Figura 29 disponível no laboratório do Centro Universitário de Volta Redonda (UniFOA).

Figura 29 – Microscópio Eletrônico de Varredura do laboratório do UniFOA



Fonte: A autora, 2017

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Considerações Gerais

Os resíduos do revestimento dos eletrodos consolidam um reforço quando são embutidos dentro do material polimérico PEAD projetando a combinação das melhores características, assim como propriedades e suas faixas de trabalho, de cada um destes componentes. Desta forma, o PEAD é dúctil no compósito bifásico, enquanto o revestimento dos eletrodos é duro e frágil. A expectativa é que a vizinhança de cada partícula restrinja o movimento da fase matriz transferindo parte da tensão, proporcionando o suporte de uma fração da carga a cada uma das partículas.

As curvas tensão-deformação foram plotadas para identificação e comparação dos comportamentos mecânicos dos corpos de prova com percentuais diferentes dos revestimentos.

Os dados pontuais obtidos nas análises foram processados estatisticamente, considerando a média de resultados das amostras ensaiadas para cada situação proposta, bem como a simulação de tendência pelas distribuições observadas pelo software Minitab 14, considerando um intervalo de confiança de 95%.

Para verificar a influência da formulação do compósito nas propriedades avaliadas, foram realizadas regressões quadráticas para a previsão de tendência, utilizando o software estatístico Minitab 14, cuja validação ocorre pelo valor de qui-quadrado. Ainda foram traçados histogramas para completar a análise dos dados.

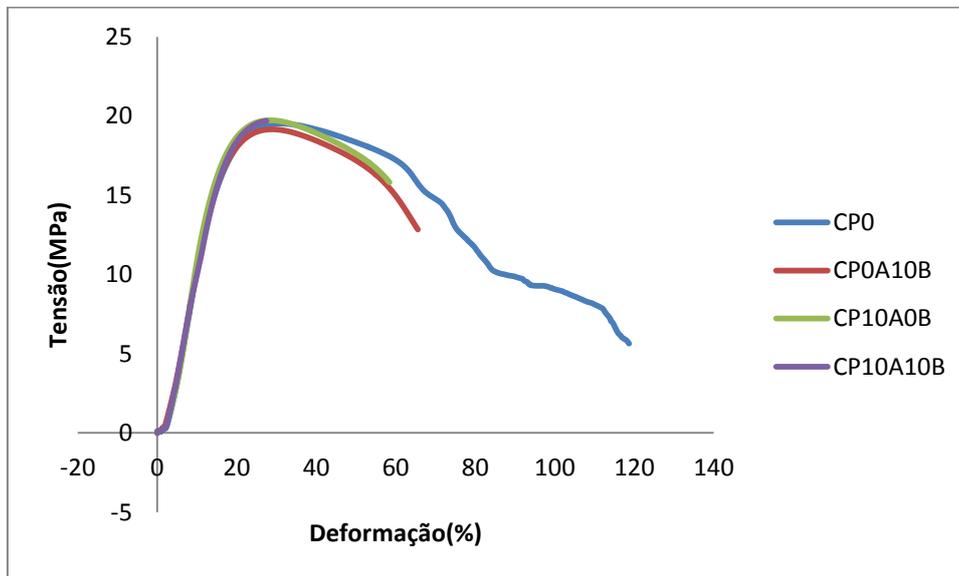
5.2 Avaliação das propriedades mecânicas

5.2.1 Ensaio de Tração

A Figura 30 demonstra as curvas tensão-deformação com valores médios dos três corpos de prova de PEAD (CP0), dos corpos de prova de compósito com revestimento unicamente básicos (CP10A0B) e unicamente rútilicos (CP0A10B) em

seus percentuais máximos e dos CP's com ambos tipos de revestimentos em seus teores máximos (CP10A10B).

Figura 30 – Curvas Tensão (MPa) x Deformação(%) para o PEAD e os compósitos CP0A10B, CP10A0B e CP10A10B

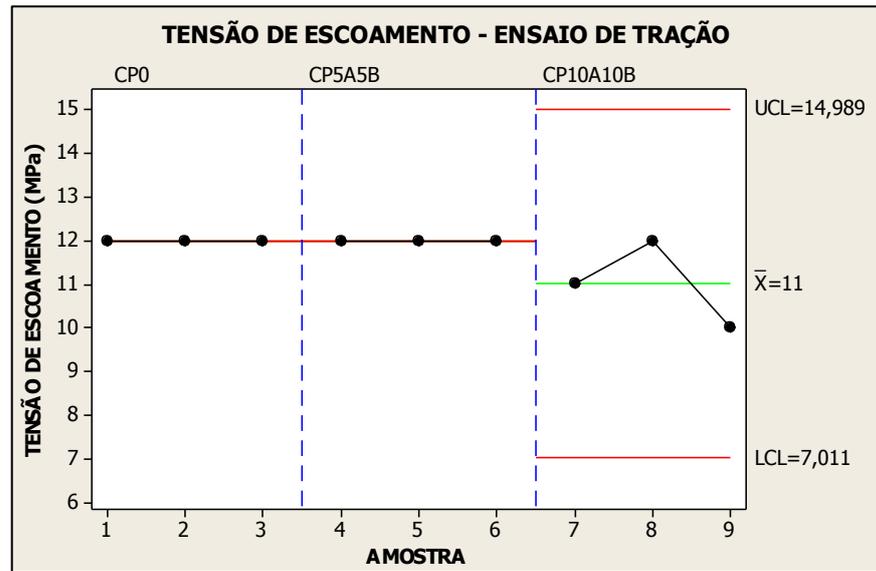


Fonte: A autora, 2017

Observando o gráfico, percebe-se que não houve alterações significativas no regime elástico dos compósitos e do PEAD, já no regime plástico, os compósitos apresentaram redução na taxa de deformação permanente se comparados com o PEAD. Essa redução é mais evidente para os corpos de prova de compósito com maior percentual de resíduo de revestimento em sua composição (CP10A10B), seguido dos compósitos com revestimento básico (CP10A0B) e finalmente dos compósitos com revestimento rútilico (CP0A10B).

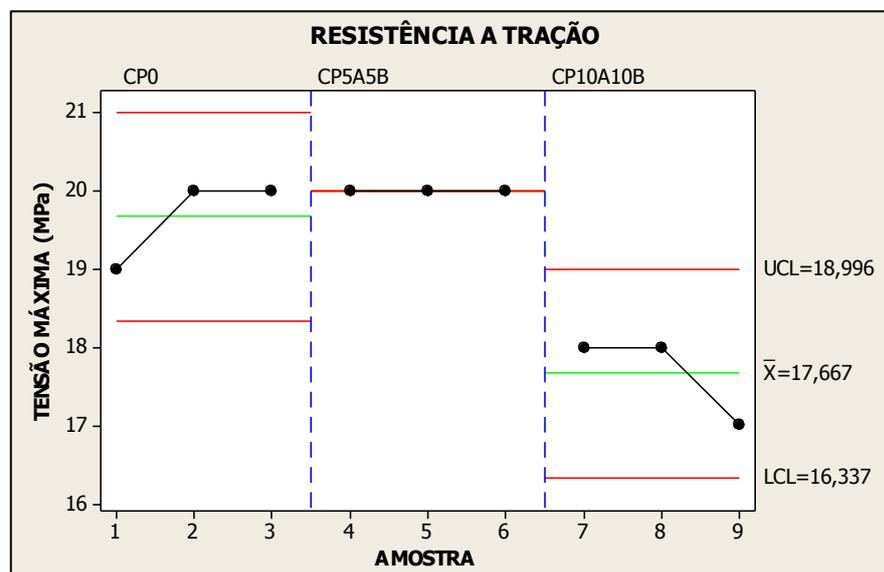
As Figuras 31, 32 e 33 apresentam os valores das propriedades mecânicas: tensão de escoamento, resistência à tração e módulo de elasticidade do PEAD e compósitos, independentemente do tipo do revestimento.

Figura 31 – Tensão de Escoamento (MPa) para o PEAD e os compósitos CP5A5B e CP10A10B



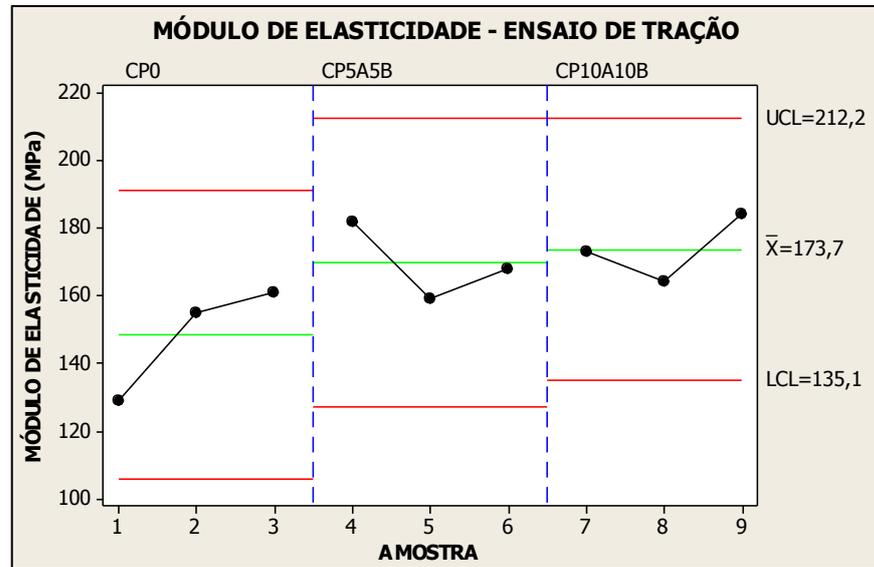
Fonte: A autora, 2017

Figura 32 – Resistência à Tração para proporções de resíduo de revestimento de eletrodo de 0%, 10% e 20%



Fonte: A autora, 2017

Figura 33 – Módulo de Elasticidade à tração para proporções de resíduo de revestimento de eletrodo de 0%, 10% e 20%

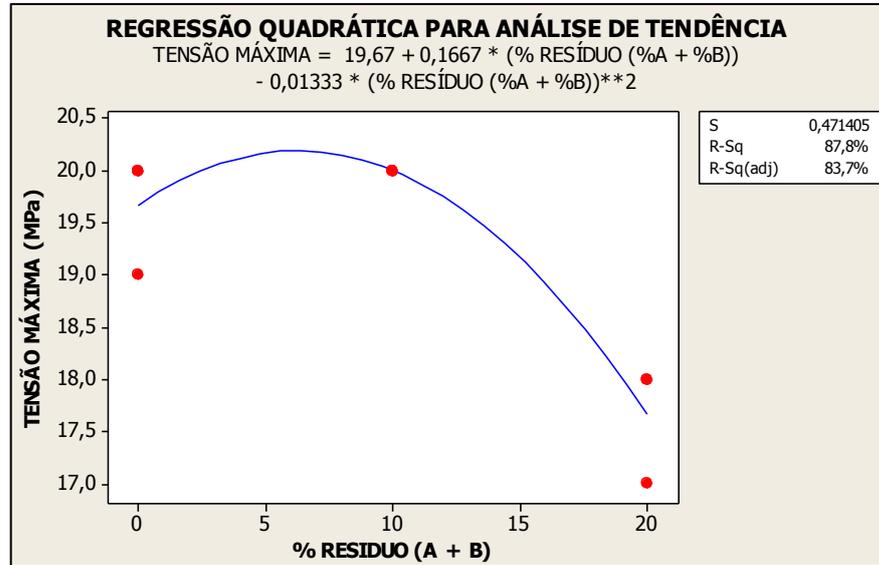


Fonte: A autora, 2017

O gráfico da Figura 31 não demonstrou alterações significativas para a tensão de escoamento com o aumento no percentual de revestimento. A Figura 32 demonstra redução dos valores de resistência máxima à tração somente para os compósitos com teores máximos de revestimentos em sua composição (CP10A10B) e a Figura 33 mostra um acréscimo sutil e gradativo no módulo de elasticidade com aumento no percentual de revestimentos.

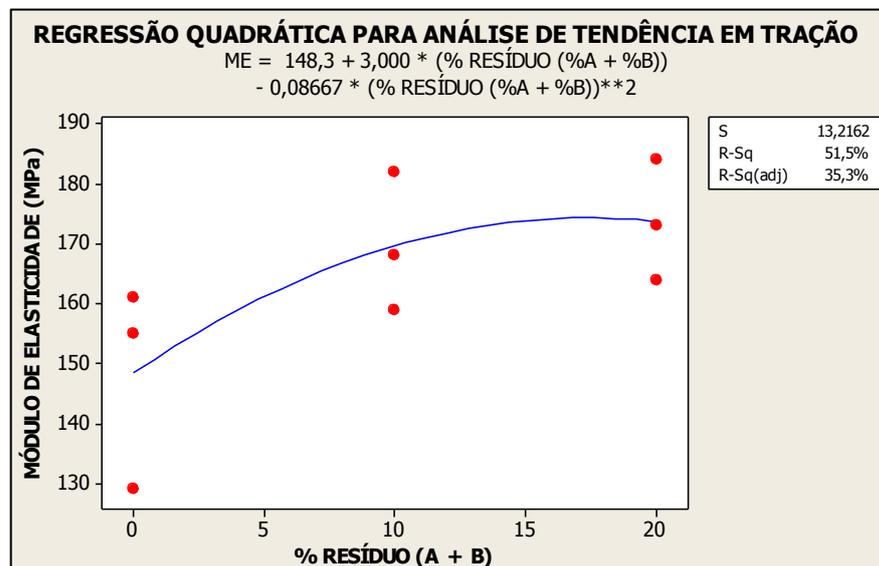
Assim, foram gerados os gráficos de regressão na tentativa de comprovar uma correlação entre a resistência máxima e o módulo de elasticidade com o teor de resíduo aplicado ao compósito. Pela Figura 34 foi comprovado que a resistência à tração é reduzida com o aumento da porção de resíduo de revestimento de eletrodo empregado admitindo a curva de regressão com valor qui-quadrado de 83,7%. Esse efeito é menor para o módulo de elasticidade com valor qui-quadrado de 35,3%, não podendo prever o comportamento através da curva da Figura 35.

Figura 34 – Identificação de correlação por regressão quadrática entre a resistência a tração e proporções de resíduo de revestimento de eletrodo de 0%, 10% e 20%



Fonte: A autora, 2017

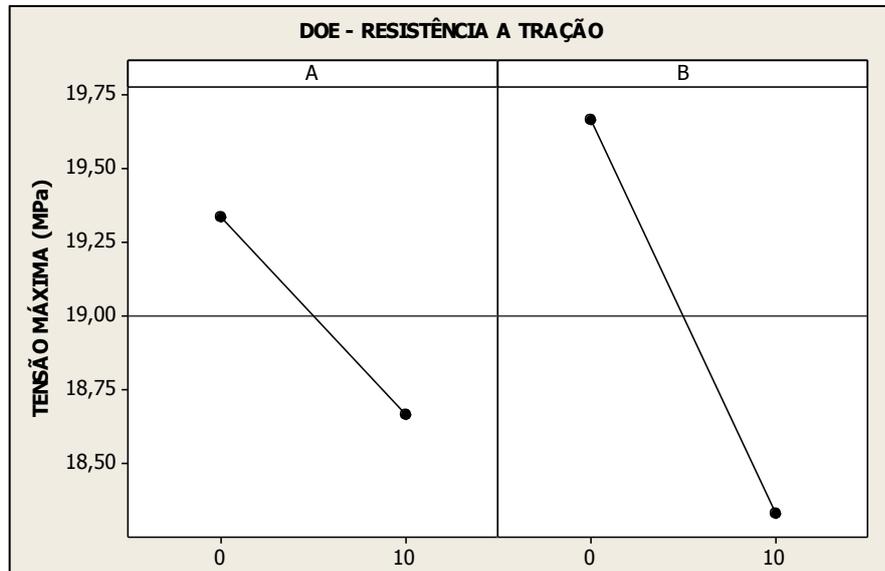
Figura 35 – Identificação de correlação por regressão quadrática entre o módulo de elasticidade e proporções de resíduo de revestimento de eletrodo de 0%, 10% e 20%



Fonte: A autora, 2017

Com interesse em identificar o tipo de eletrodo que interferiu com maior significância nos resultados da redução da resistência à tração, foi plotado um gráfico utilizando as proporções de resíduos de revestimento de eletrodos de 0% e 10% para os corpos de prova CP0, CP10A0B, CP0A10B e CP10A10B conforme demonstrado na Figura 36.

Figura 36 – Resultado da comparação do comportamento dos eletrodos na resistência à tração para as proporções de resíduos de revestimento de eletrodos de 0% e 10%



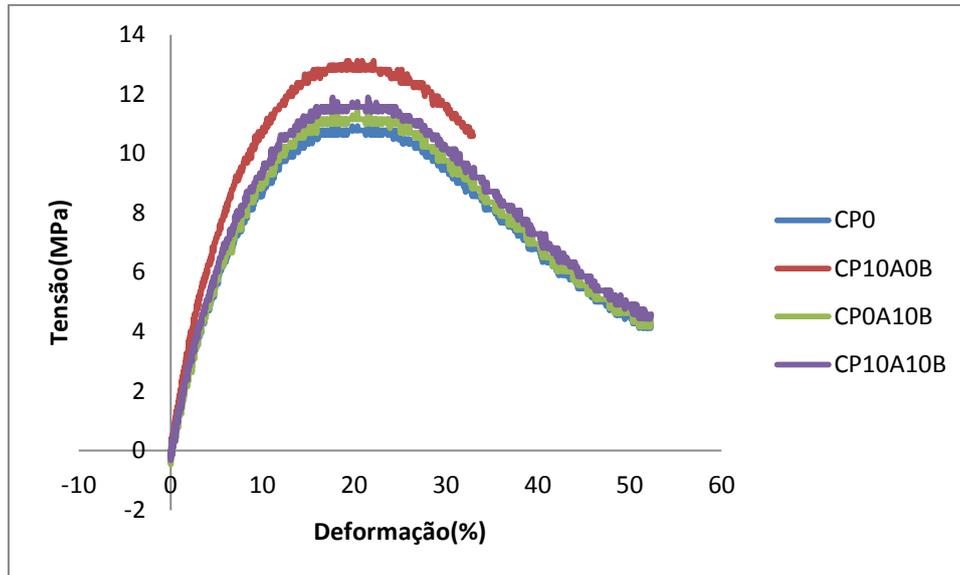
Fonte: A autora, 2017

Nota-se que ambos os revestimentos apresentam consideráveis inclinações na curva, sendo mais evidente para o eletrodo B, do tipo rútilico, demonstrando maior influência na redução a resistência máxima à tração com o aumento da quantidade deste resíduo.

5.2.2 Ensaio de Flexão

A Figura 37 mostra o gráfico tensão-deformação referente ao ensaio de flexão com valores médios dos três corpos de prova de PEAD (CP0), dos corpos de prova de compósito com revestimento unicamente básicos (CP10A0B) e unicamente rútilicos (CP0A10B) em seus percentuais máximos, e dos CP's com ambos tipos de revestimentos em seus teores máximos (CP10A10B).

Figura 37 – Curvas Tensão (MPa) x Deformação(%) para o PEAD e os compósitos CP0A10B, CP10A0B e CP10A10B

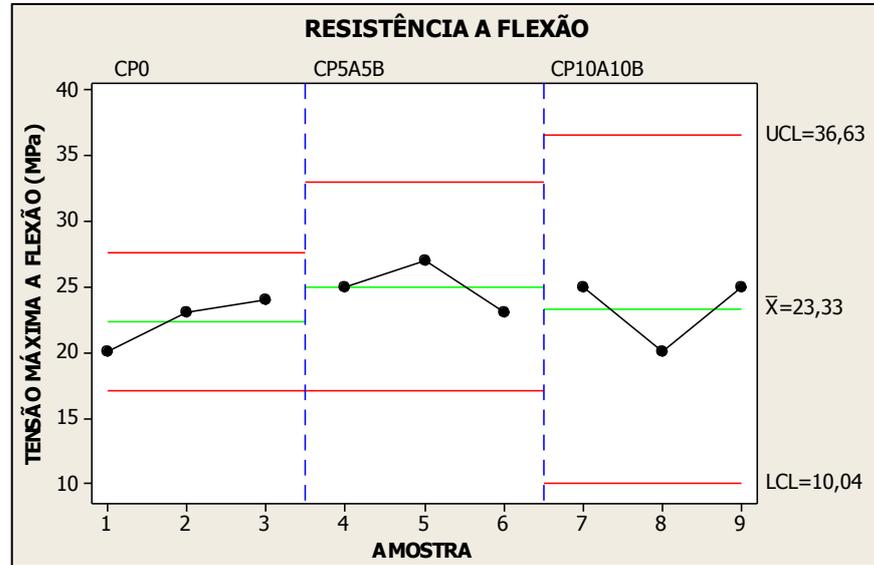


Fonte: A autora, 2017

Analisando o gráfico da Figura 37, observa-se que os compósitos com revestimento unicamente básicos apresentam maiores valores de resistência máxima a flexão e menores taxas de deformação se comparados aos demais compósitos e ao PEAD.

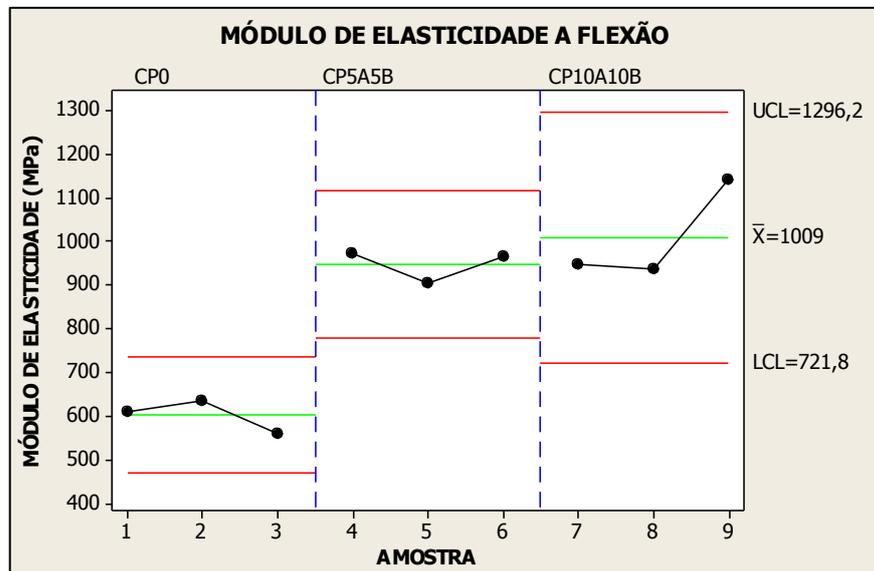
Para analisar o comportamento em flexão utilizando percentuais iguais de cada tipo de revestimento e o PEAD, foram gerados gráficos com as seguintes proporções de revestimento: 0%, 10% e 20%, nos corpos de prova CP0, CP5A5B e CP10A10B. Desta forma, as Figuras 38 e 39 apresentam os valores de resistência à flexão e módulo de elasticidade à flexão.

Figura 38 – Resistência à flexão para proporções de resíduo de revestimento de eletrodo de 0%, 10% e 20%



Fonte: A autora, 2017

Figura 39 – Módulo de elasticidade à flexão para proporções de resíduo de revestimento de eletrodo de 0%, 10% e 20%

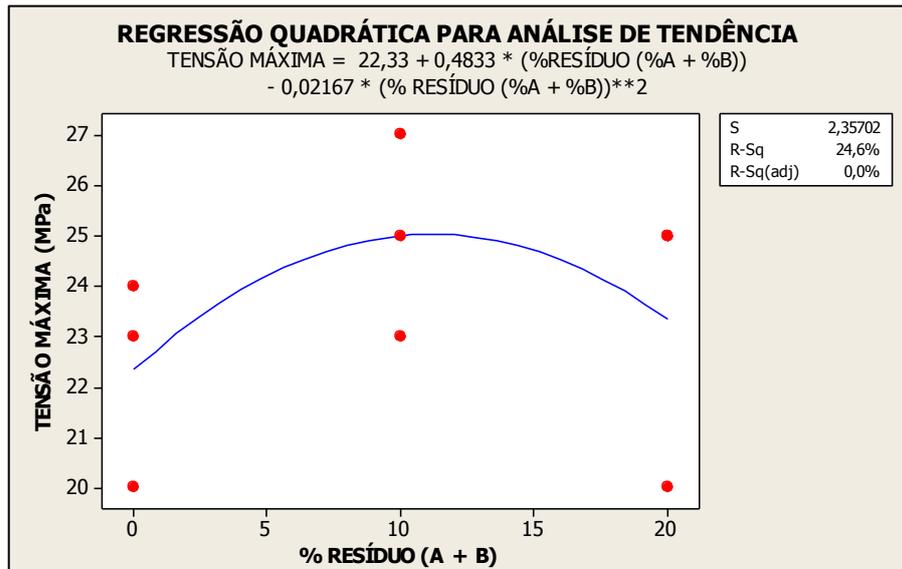


Fonte: A autora, 2017

Pela análise do gráfico da Figura 38, não houve alteração evidente na resistência máxima à flexão com aumento no teor do revestimento. O gráfico da Figura 39 demonstra aumento gradativo no módulo de elasticidade à flexão com aumento no teor do revestimento.

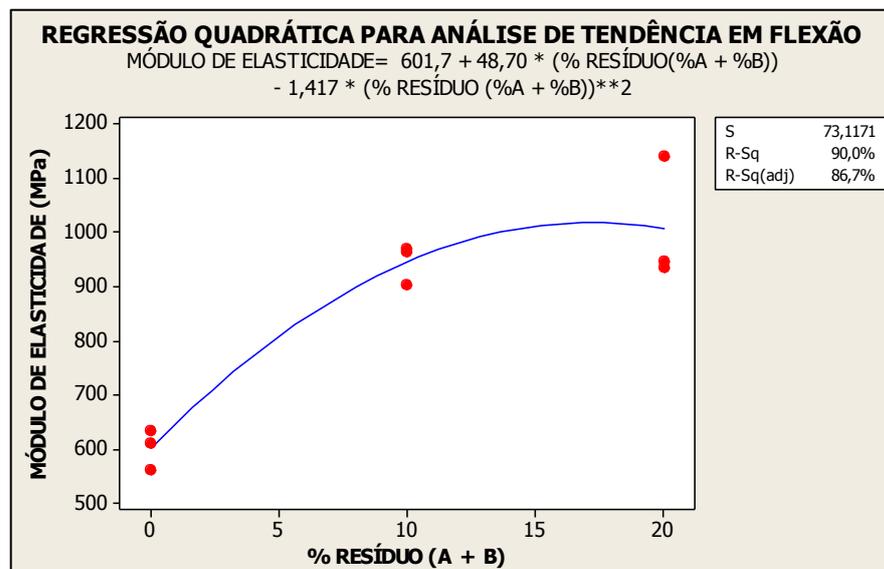
Com o intuito de comprovar a correlação entre a resistência máxima a flexão e o módulo de elasticidade à flexão com o teor de revestimento, foram plotados os gráficos de regressão quadrática, conforme mostrado nas Figuras 40 e 41.

Figura 40 – Identificação de correlação por regressão quadrática entre a resistência à flexão e proporções de resíduo de revestimento de eletrodo de 0%, 10% e 20%



Fonte: A autora, 2017

Figura 41 – Identificação de correlação por regressão quadrática entre o módulo de elasticidade à flexão e proporções de resíduo de revestimento de eletrodo de 0%, 10% e 20%

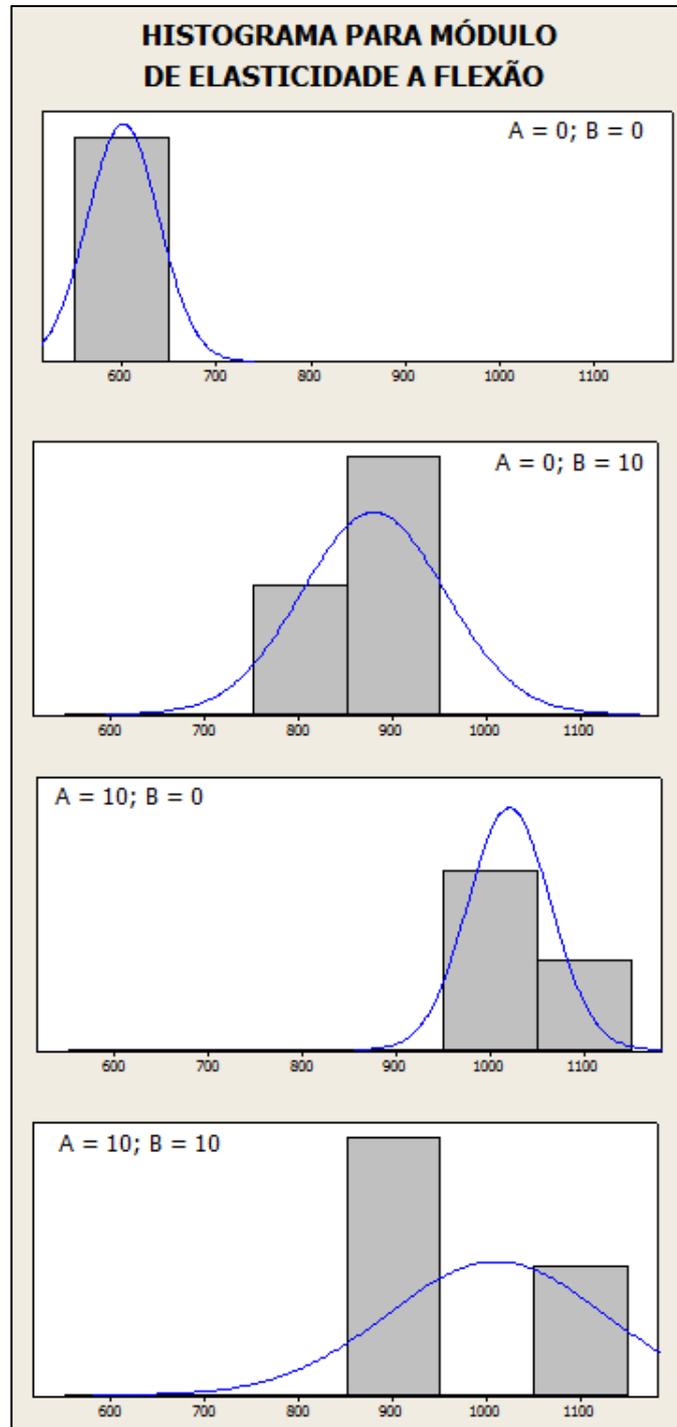


Fonte: A autora, 2017

Pela análise dos gráficos é possível comprovar pelo valor do qui-quadrado de 85,7% a tendência ao aumento no módulo de elasticidade à flexão com o aumento no percentual de resíduo. A tensão máxima a flexão não demonstra correlação com o percentual do resíduo dos compósitos.

A tendência ao aumento do módulo de elasticidade de acordo com o tipo de resíduo utilizado pode ser melhor avaliada com o auxílio da representação gráfica do histograma da Figura 42. Também podem ser avaliadas a variabilidade e a distribuição da frequência dos dados.

Figura 42 – Representação em histograma demonstrando o deslocamento dos dados com o aumento do Módulo de Elasticidade a Flexão com o aumento do % de resíduos de revestimento de eletrodos



Fonte: A autora, 2017

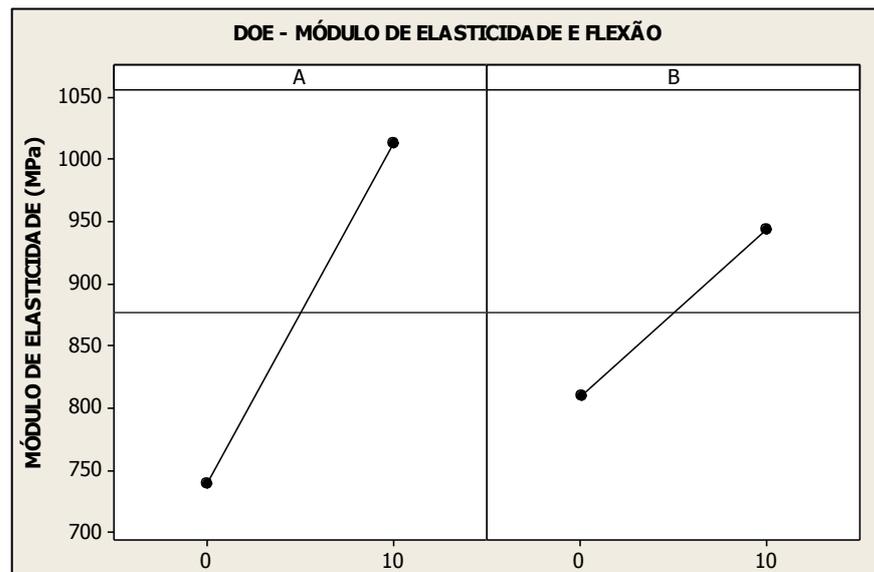
Pela análise do histograma, percebe-se claramente a movimentação na distribuição dos dados para a direita, ou seja, no sentido do aumento nos valores do módulo de elasticidade à flexão. O aumento deste valor é mais evidente na

utilização do eletrodo do tipo básico e a variabilidade da distribuição destes dados é menor do que para os dados referentes ao eletrodo rutilico.

Para os compósitos com percentuais máximos e iguais dos dois tipos de eletrodos, percebe-se valores do módulo de elasticidade próximos aos valores dos compósitos com 10% do resíduo A, porém houve aumento significativo na variabilidade dos dados.

Para identificar o tipo de eletrodo que interferiu com maior significância nos resultados do aumento do módulo de elasticidade a flexão, foi plotado um gráfico utilizando as proporções de resíduos de revestimento de eletrodos de 0% e 10% para os corpos de prova CP0, CP10A0B, CP0A10B e CP10A10B, conforme demonstrado na Figura 43.

Figura 43 – Resultado da comparação do comportamento dos eletrodos no módulo de elasticidade à flexão para as proporções de resíduos de revestimento de eletrodos de 0% e 10%



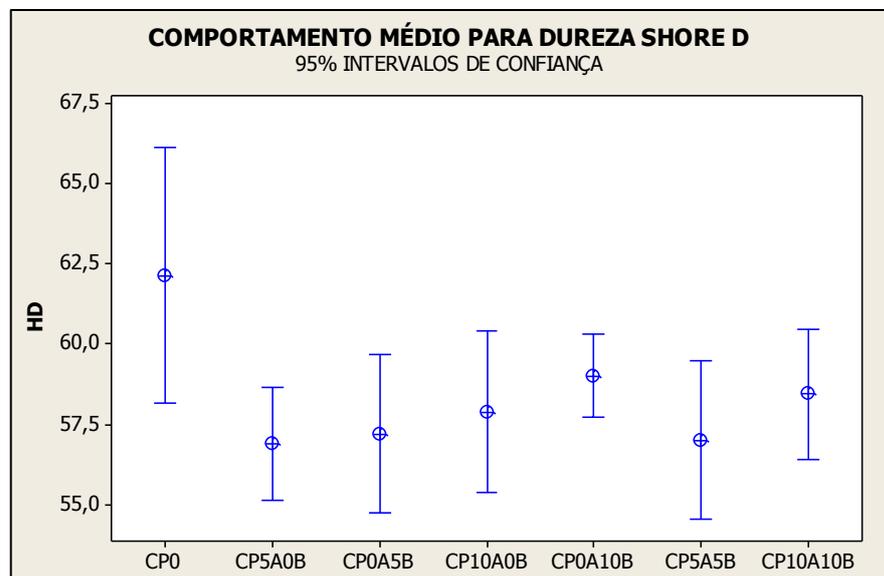
Fonte: A autora, 2017

Analisando a Figura 43, nota-se que ambos os eletrodos apresentam consideráveis inclinações nas retas para percentuais de 10% de cada resíduo. Este fato é mais evidente para o compósito com resíduo do tipo A, ou seja, este tipo de resíduo apresenta maior influência no incremento no módulo de elasticidade à flexão do que o compósito com resíduo do tipo B.

5.2.3 Ensaio de Dureza Shore D

A Figura 44 compreende o gráfico de intervalos ilustrando a tendência central média e a variabilidade dos dados para o intervalo de confiança de 95%, assumindo distribuição normal dos dados. Nota-se que a média do CP0, compreendendo apenas o resultado para o PEAD, é superior a todos os valores registrados para os corpos de prova dos compósitos.

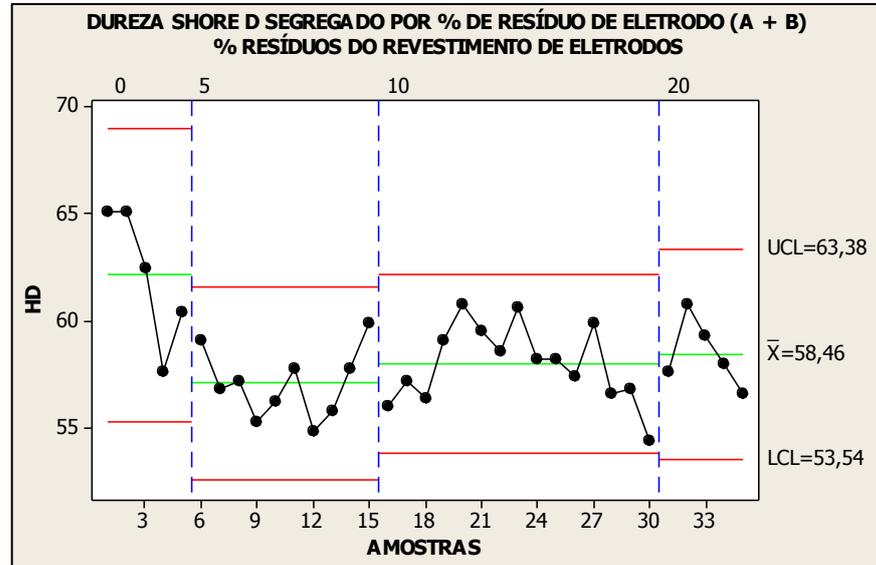
Figura 44 – Comportamento médio para dureza Shore D ilustrado no gráfico de intervalos



Fonte: A autora, 2017

Na Figura 45 pode-se verificar que os valores individuais dos corpos de prova contendo resíduos de revestimento de eletrodos ficaram, em geral, limitados entre a média e o limite inferior de controle das amostras de PEAD restringindo a variabilidade dos dados.

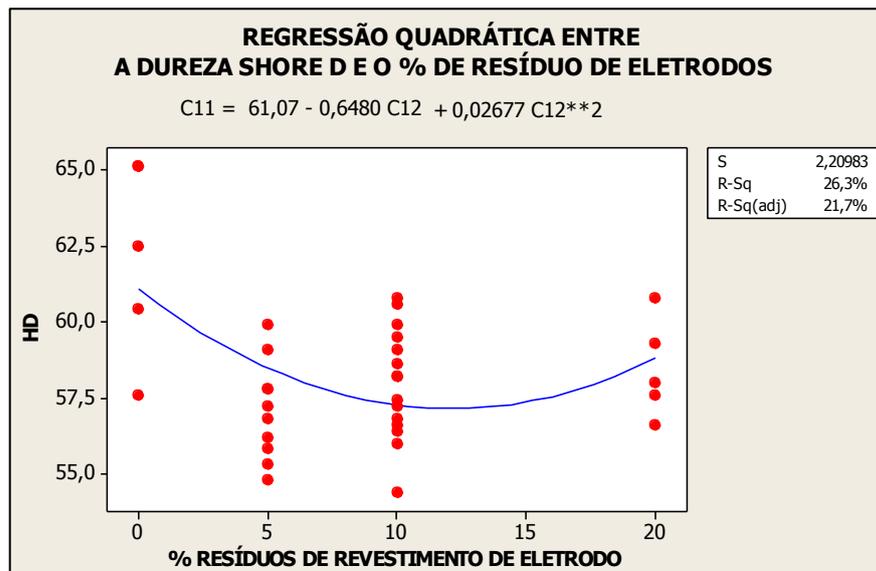
Figura 45 – Pontos individuais de medição Dureza Shore D por % de resíduo de revestimento de eletrodo



Fonte: A autora, 2017

A Figura 46 demonstra que apenas 21,7% dos dados se encaixam na curva, não sendo significativa a aplicação da mesma para análise da tendência.

Figura 46 – Regressão quadrática para avaliação da tendência da dureza Shore e o % de resíduo de revestimento de eletrodos

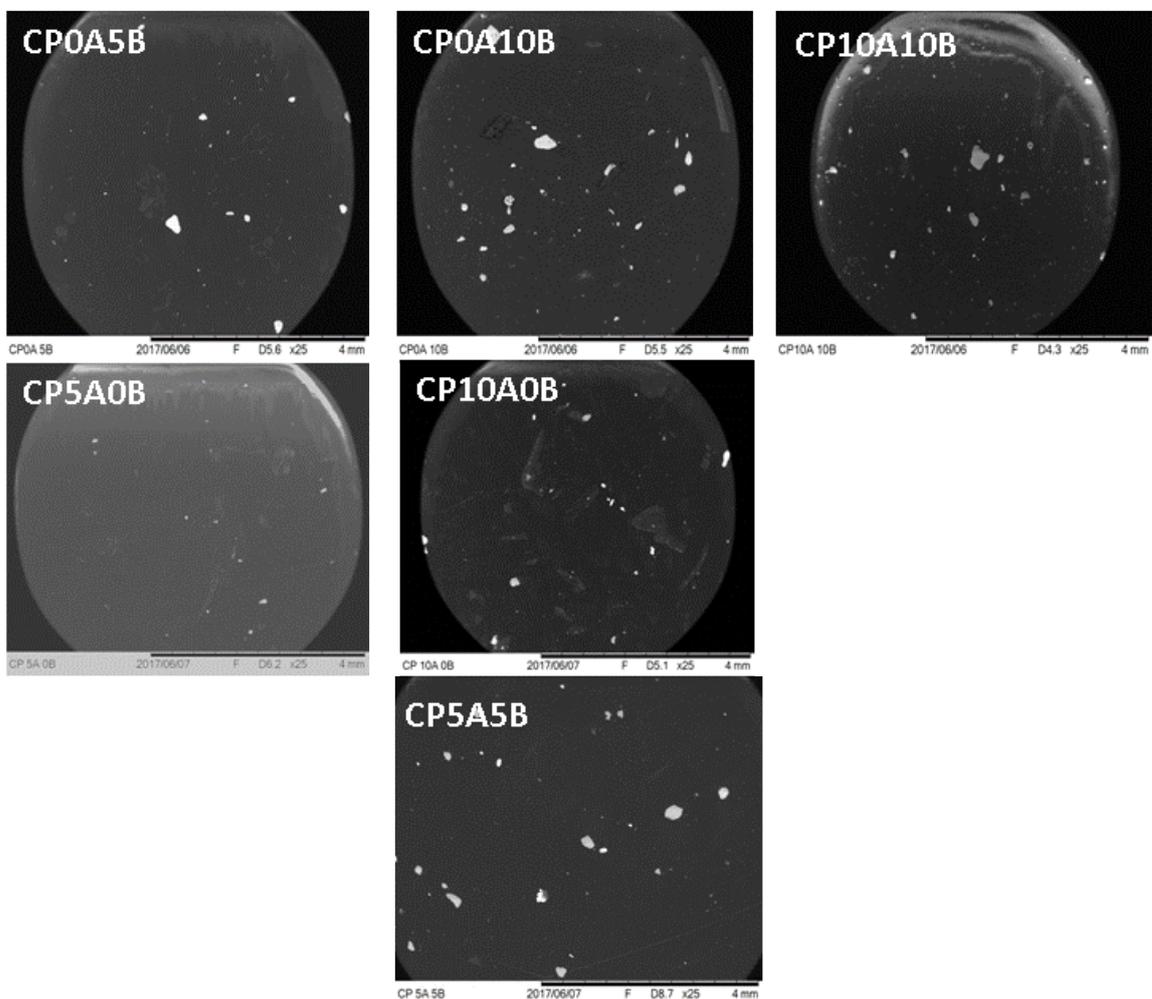


Fonte: A autora, 2017

5.3 Microscopias

A Figura 47, realizada no MEV com ampliação 25X sem necessidade de metalização, demonstra uma distribuição uniforme das partículas na matriz para todos os percentuais de revestimento: 5%, 10% e 20%. Não há evidências de aglomerados ou heterogeneidades.

Figura 47 – MEV dos compósitos ampliados 25X com os seguintes percentuais de resíduos (a) 5%; (b) 10% e (c) CB20%



(a)

(b)

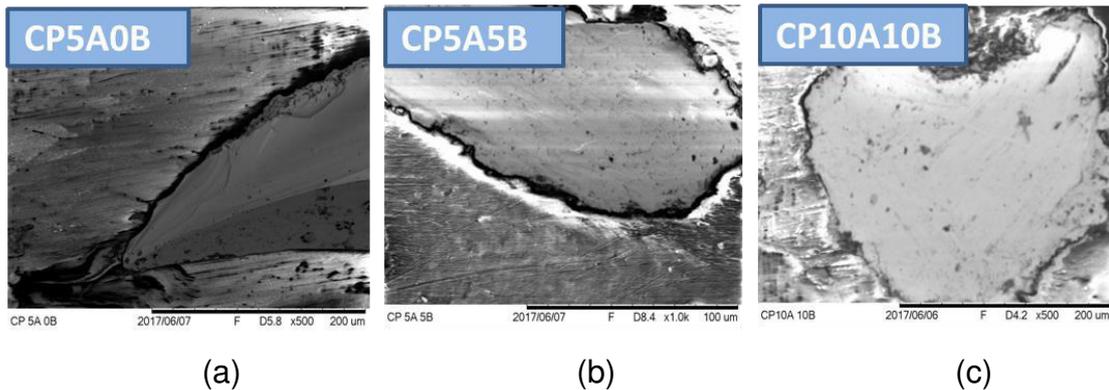
(c)

Fonte: A autora, 2017

Esta distribuição da carga na matriz possibilita maior confiabilidade dos resultados de comportamento mecânico em qualquer região da amostra, promovendo menores valores de desvio-padrão observados nas análises de dureza shore D.

Observa-se pela análise da Figura 48, feitas pelos MEV com percentuais de reforço de 5%, 10% e 20% a existência de vazios entre as partículas do revestimento de eletrodo e a matriz, independentemente do percentual do reforço.

Figura 48 – MEV dos compósitos com os seguintes percentuais de resíduos e ampliações respectivamente (a) 5% - 500X; (b) 10% - 1000X e (c) 20% - 500X



Fonte: A autora, 2017

A Figura 48 mostra claramente as interfaces entre as diferentes fases dos compósitos. Observa-se que há poucas interações físicas entre o reforço e a matriz. Tal fato é explicado pela natureza inorgânica do reforço, que não interage covalentemente com a matriz orgânica da poliolefina. Para um melhor resultado de interação entre as fases, seria necessário a avaliação do uso de um agente compatibilizante, como o polietileno grafitizado com anidrido maleico.

6 CONCLUSÕES

- O módulo de elasticidade a flexão é diretamente influenciado pela quantidade de resíduo de revestimento de eletrodo, sendo acrescido de aproximadamente 600 Mpa para amostras de PEAD somente para 1.000 Mpa para as amostras com 20% de resíduo.

- Existe uma correlação entre a resistência a tração e o percentual de resíduo de revestimento de eletrodo, em que esta propriedade mecânica é reduzida de aproximadamente 19 Mpa para amostras de PEAD puro para 17 Mpa para amostras com teores de 20% de resíduo.

- A dureza Shore D indicou um decréscimo nos valores das amostras com utilização de resíduo se comparados às amostras de PEAD puro. A média das amostras de PEAD puro foi de aproximadamente 62 HD enquanto a média das amostras dos compósitos foi de 58 HD. Esta propriedade mecânica também registrou menor desvio padrão dos valores para os compósitos do que para amostras de PEAD.

- As microscopias foram realizadas sem a necessidade de metalização e apresentaram boa distribuição e homogeneidade das partículas do reforço na matriz, porém poucas áreas de interação entre as diferentes fases.

- O resíduo do tipo A apresentou maior influência no aumento do módulo de elasticidade à flexão e menor influência na redução da tensão máxima à tração.

- Neste trabalho, foram desenvolvidos compósitos a partir da utilização de um plástico e um resíduo da indústria. Obteve-se, no final, um material contendo um menor teor de derivados do petróleo e propriedades mecânicas equivalentes.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Avaliar a utilização de outros tipos de plásticos como matriz (Polipropileno – PP, Policloreto de Vinila – PVC e Poliestireno de Alto Impacto -HIPS).

-Avaliar a utilização do Polietileno Graftizado com Anidrido Maleico como agente compatibilizante;

-Avaliar a utilização de outros tipos de revestimentos de eletrodos.

-Realizar análises térmicas.

-Realizar análises de resistência à chama.

8 REFERÊNCIAS

_____ American Society for Testing and Materials. **ASTM D2240 – Standard Test Method for Rubber Property – Durometer Hardness.** United States of America, 2000.

_____ American Society for Testing and Materials. **ASTM D638 - Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics.** PA 19428-2959, United States of America, 2003.

_____ American Society for Testing and Materials. **ASTM D 790: Standard Test Method for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials.** United States of America, 2003.

ARAÚJO, Joyce Rodrigues de. **Compósito de polietileno de alta densidade reforçado com fibra de curauá obtidos por extrusão e injeção.** Campinas: Dissertação de Mestrado em Química a Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, 2009.

BAPTISTA, Carlos. **Ensaio Mecânicos - Ensaio de Flexão.** EEL – Escola de Engenharia de Lorena – Universidade de São Paulo, 2012.

BARBACOV, Naira E.; PEREIRA, Raquel da Silva; GUTERRES, Albino Moura; LOCATELLI Débora Regina Schneider. **Diagnóstico de Resíduos Sólidos Industriais: um estudo em indústrias metal-mecânica em um município de médio porte do Rio Grande do Sul.** ENGEMA – Encontro Internacional sobre Gestão Empresarial e Meio Ambiente, 2010.

BRAGA, Eduardo Magalhães. **Processo de soldagem eletrodo revestido.** V1, 1ed. Belém: Universidade Federal do Pará, Get-Solda grupo de estudos em tecnologia de soldagem, 2007.

CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciências e engenharia de materiais: uma introdução**. 8 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012

CHOUDHURY, A. **Isothermal crystallization and mechanical behavior of ionomer treated sisal/HDPE composites**. *Materials Science and Engineering A*, v.91, p.492–500, 2008.

CAMATTA, Paulo. **Compósitos 1 - Materiais, Processos, Aplicações, Desempenhos e Tendências**. Cargas. cap 2, p 199-224. São Paulo: ALMACO - Associação Latino-America de Materiais Compósitos, 2008.

CAMATTA, Paulo. **Compósitos Poliméricos – Conceito, Mercado, Aplicação, Processos de fabricação, Desafios e Oportunidades**. São Paulo: Simpósio da Faculdade SENAI, 2015.

CAMATTA, Paulo. **I Reunião GT Infusão**. São Paulo: ABMACO – Associação Brasileira de Materiais Compósitos, 2007.

CENTRO DE INFORMAÇÃO METAL MECÂNICA – CIMM. **O Durômetro Shore**. 2013.

COSSOLINO, Leiliane Cristina; PEREIRA Antônio Henrique Alves. **Módulos elásticos: visão geral e métodos de caracterização**. Informativo Técnico-Científico ITC-ME/ATCP. 2010

COUTINHO, Fernanda M.B.; MELLO, Ivana L.; SANTA MARIA, Luiz C.de. **Polietileno: Principais tipos, propriedades e aplicações**. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, vol 13, nº1, p 1-13, 2003.

ELBRAS ELETRODOS DO BRASIL LTDA. **Eletrodos Revestidos – Características e Fundamentos**. Contagem, 2016.

FORTES, Cleber. **Apostila de Eletrodos Revestidos**. Brasil: ESAB BR, 2005.

FUNDAÇÃO BRASILEIRA DE TECNOLOGIA DA SOLDAGEM (FBTS). **Apostila do curso de inspetor de soldagem – Módulo 4: Consumíveis de Soldagem**. Rio de Janeiro, 2014

FUNDAÇÃO BRASILEIRA DE TECNOLOGIA DA SOLDAGEM (FBTS). **Apostila do curso de inspetor de soldagem – Módulo 5: Processos de Soldagem**. Rio de Janeiro, 2014

FREDEL, Márcio C.; ORTEGA, Patrícia; BASTOS, Edson. **Propriedades Mecânicas: Ensaio Fundamentais**. Vol. 1. Florianópolis: CERMAT - NÚCLEO DE PESQUISAS EM MATERIAIS CERÂMICOS E COMPÓSITOS UFSC. 2015

HILLING, Éverton. **Viabilidade técnica de produção de compósitos de polietileno (HDPE) reforçados com resíduos de madeira e derivados das indústrias moveleiras**. Curitiba: Tese para obtenção de título de doutor em ciências florestais a Universidade Federal do Paraná, 2006.

JENNEY, Cynthia; O'BRIEN, Annette. **Welding Handbook - Welding Science and technology**. 19th Edition, Vol 1. Publisher: American Welding Society. Miami, 2001.

LEITE, Antônio Carlos. **Interpretação das normas de qualificação de procedimento de soldagem, para o processo de eletrodo revestido, conforme as normas: ASME IX, API 1104 e AWS D1.1**. São Caetano do Sul: Monografia para obtenção de título de Especialista em Engenharia de Soldagem ao Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia, 2013.

MOREIRA, Waldomiro. **Compósitos 1 - Materiais, Processos, Aplicações, Desempenhos e Tendências**. Resinas Termofixas. cap 2, p 35-88. São Paulo: ALMACO - Associação Latino-America de Materiais Compósitos, 2008.

MOREIRA, Waldomiro. **Compósitos 1 - Materiais, Processos, Aplicações, Desempenhos e Tendências**. Controle de qualidade na moldagem com resinas poliéster e gel coats. cap 2, p 123-178. São Paulo: ALMACO - Associação Latino-America de Materiais Compósitos, 2008.

MULINARI, Daniella Regina. **Comportamento térmico, mecânico e morfológico dos compósitos de polietileno de alta densidade reforçados com fibras de celulose do bagaço de cana de açúcar**. Guaratinguetá: Tese para obtenção de título de doutor em Engenharia Mecânica à Universidade Estadual Paulista, 2009.

NERIS, Manoel Messias. **Soldagem – Eixo Tecnológico: Controle e Processos Industriais**. São Paulo: Cetec Capacitações, 2012.

SENAI. DR.PE. **Tecnologia de solda – Processo Eletrodo Revestido**. Recife, SENAI – Departamento Regional de Pernambuco, 1998.

UNITOR SHIPS SERVICE AS. **The Welding Handbook - Marine products: welding and related process for repair and maintenance onboard**. Oslo:14th edition, 2nd revision, Wilhelmsen Ships Service,1968.

ZURSTRASSEN, Edouard. **Compósitos 1 - Materiais, Processos, Aplicações, Desempenhos e Tendências**. Reforços. cap 3, p 235-270. São Paulo: ALMACO - Associação Latino-America de Materiais Compósitos, 2008.