

UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ
Pedro Soares Cardozo Neto

**Estudo da variação das propriedades mecânicas
pela troca de processos de soldagem com mesma
energia.**

Taubaté - SP
(2019)

Pedro Soares Cardozo Neto

**Estudo da variação das propriedades mecânicas
pela troca de processos de soldagem com mesma
energia.**

Trabalho de Graduação apresentado para
obtenção do Certificado de Graduação do
curso de Engenharia Mecânica do
Departamento de Engenharia Mecânica
da Universidade de Taubaté.

Orientador: Prof. Antônio Carlos Tonini

Coorientador: Prof. Eduardo Esperança Canetti

**Taubaté – SP
(2019)**

SIBi – Sistema Integrado de Bibliotecas / UNITAU

C268e Cardozo Neto, Pedro Soares
Estudo da variação das propriedades mecânicas pela troca de processos de soldagem com mesma energia / Pedro Soares Cardozo Neto. -- 2019.
43 f. : il.

Monografia (graduação) – Universidade de Taubaté, Departamento de Engenharia Mecânica e Elétrica, 2019.

Orientação: Prof. Me. Antônio Carlos Tonini, Departamento de Engenharia Mecânica

Coorientação: Prof. Eduardo Esperança Canetti.

1. SAW. 2. MIG. 3. Energia. 4. Soldagem. 5. Equivalência. I. Título.
II. Graduação em Engenharia Mecânica.

CDD – 671.56

Ficha catalográfica elaborada por Shirlei Righeti – CRB-8/6995

Pedro Soares Cardozo Neto

Estudo da variação das propriedades mecânicas pela troca de processos de soldagem com mesma energia.

Trabalho de Graduação apresentado para obtenção do Certificado de Graduação do curso de Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Taubaté.

DATA: 17/06/2019

RESULTADO: APROVADO

BANCA EXAMINADORA:

Prof.: ANTÔNIO C. TOVINI UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ

Assinatura: 

Prof.: IVAIR SAUTOS UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ

Assinatura: 

17 de Junho de 2019

Dedico este trabalho aos meus pais Davi Soares Cardozo e
Silvia Stela Tuan Cardozo pelos exemplos, pela dedicação e
amor incondicional.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a minha família por todo suporte e carinho que me impulsionaram na busca deste objetivo.

À Universidade de Taubaté – UNITAU, que ofereceu um excelente ambiente educacional com profissionais qualificados.

Ao meu orientador, Msc Antônio Carlos Tonini por me nortear profissionalmente na engenharia mecânica.

Ao meu coorientador, *Prof.* Eduardo Esperança Canetti por mostrar um caminho, por mim desconhecido, me impondo novos desafios e me ensinando técnica e humanamente como nenhum outro companheiro de trabalho.

A todos colegas que pude ter o prazer de dividir meu ano de estágio na Fatec Pindamonhangaba, em especial aos técnicos Flávio Felício da Silva e Laerte Luiz, responsáveis pelos laboratórios da instituição.

Aos meus amigos formandos, os quais me ensinaram a lealdade e dedicação necessárias para concluir estes cinco anos de lutas e, por agora, fazerem deste encerramento de ciclo um lugar ainda mais feliz.

A meu amigo Leandro Galvão pela grande ajuda prestada no corte das amostras dos corpos-de-prova e aos amigos da Tervale Terraplanagem, por ceder o maquinário necessário para a execução do serviço.

E, finalmente, a todos aqueles que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho.

“Se pelo menos pudéssemos encontrar serenidade,

Seria bom se pudéssemos viver como um só,

Quando essa raiva, ódio e intolerância terminarem”

(Ozzy Osbourne)

RESUMO

A soldagem é o processo mais amplamente utilizado na união permanente de materiais, com carácter de construção de projetos ou na recuperação de componentes os processos de soldagem se fazem fundamentais em suas mais diversas variações. Dentre os processos mais utilizados industrialmente estão o Arco Submerso (SAW) e o arco elétrico com gás de proteção ativo (MIG) que serão aplicados em aço API 5L X65.

Foram escolhidos os processos SAW e MIG devido a sua automatização, o que nos permite controlar parâmetros importantes na obtenção do valor de energia de soldagem, o qual deverá ser o mesmo para ambos os processos. O material-base utilizado foi o aço API 5L X65 visando aplicar o experimento em materiais com composição nobre possibilitando a evidenciação dos resultados obtidos. Também foi levado em consideração na escolha do tema da pesquisa a sua utilidade no cenário industrial, já que o objetivo principal é determinar uma equivalência de parâmetros em diferentes processos, criando assim uma alternativa de produção para as empresas com atuação em soldagem as quais poderão definir a partir de suas máquinas e qualificações o processo que a beneficiará economicamente. Os resultados obtidos nos mostram uma grande semelhança entre os perfis de dureza dos corpos de prova ensaiados, o que nos mostra através da conversão permitida pela American Welding Society, um valor para os limites de resistência parelho, indicando assim uma confirmação da possibilidade de troca dos processos desde que aplicada a mesma energia de soldagem em ambos processos.

Palavras-chave: SAW. MIG. Energia. Soldagem. Equivalência.

ABSTRACT

Welding is the most widely used process in the permanent joining of materials, with the character of project construction or in the recovery of components, the processes of welding become fundamental in their most diverse variations. Among the most industrially used processes are the Submerged Arc Welding (SAW) and Metal Inert Gas (MIG) that will be applied in steel API 5L X65.

The SAW and MIG processes were chosen because of their automation, which allows us to control important parameters in obtaining the welding energy value, which should be the same for both processes. The base material used was steel - aiming to apply the experiment in materials with noble composition, allowing the results to be obtained. It was also taken into consideration in the choice of the research theme its usefulness in the industrial scenario, since the main objective is to determine an equivalence of parameters in different processes, thus creating an alternative of production for the companies with operation in welding which can define from their machines and qualifications the process that will benefit economically. The obtained results show a great similarity between the hardness profiles of the test specimens tested, which shows us, through the conversion allowed by the American Welding Society, a value for resistance limits of the samples, thus indicating a confirmation of the possibility of exchange of the samples processes since the same welding energy is applied in both welding processes.

KEYWORDS: SAW. MIG. Energy. Welding. Equivalence.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Cronologia da soldagem	15
Figura 2 – Classificação dos processos de soldagem.....	16
Figura 3 – Esquemática da soldagem a arco submerso	17
Figura 4 – Esquemática do processo MIG	18
Figura 5 - Esquematização de um ensaio de dobramento guiado	22
Figura 6 - Placas chanfradas e unidas por mata-juntas e babadores	28
Figura 7 - Pré-aquecimento contra humidade	29
Figura 8 - Disposição do equipamento MIG ligado à sua automação	29
Figura 9 - Passe Raiz executado	30
Figura 10 - Sequência de soldagem intermediária	30
Figura 11 - Conjunto MIG finalizado.....	31
Figura 12 - Montagem do processo SAW	31
Figura 13 - Cordões do processo SAW.....	32
Figura 14 - Corte das Amostras	33
Figura 15 - Corpo de prova em lixamento	33
Figura 16 - Corpo de prova MIG após ataque	34
Figura 17 - Macrografia realizada na ZTA do conjunto SAW	34
Figura 18 – Perfil de dureza	37

LISTA DE TABELAS E GRÁFICOS

Tabela 1 - Definições das propriedades mecânicas API 5L X65.....	27
Tabela 2 - Definição dos Parâmetros para obtenção de uma mesma Energia de Soldagem [J]	28
Tabela 3 - Conversão da dureza para resistência a tração ASTM A 370.....	39
Tabela 4 - Conversão Rockwell A para resistência a tração em MPA (versão compactada).....	40

LISTA DE ABREVIATURAS E SIMBOLOGIAS

AR: gás argônio

AWS: American Welding Society

CO: gás monóxido de carbono

CO₂: gás dióxido de carbono

DEP: Distância eletrodo-peça

GMAW: processo de soldagem Gas Metal Arc Welding

GTAW: processo de soldagem Gas Tungsten Arc Welding

I: corrente de soldagem

SAW: processo de soldagem Submerged Arc Welding

T: tempo de soldagem

TIG: processo de soldagem Tungstens Inert Gas

V: tensão de soldagem

V: velocidade de soldagem

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 JUSTIFICATIVA	13
1.2 ESCOPO DO TRABALHO	13
1.3 OBJETIVOS	14
1.4 DEFINIÇÃO DA METODOLOGIA	14
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1 ARCO SUBMERSO (SAW)	16
2.2 SOLDAGEM A ARCO ELÉTRICO COM GÁS DE PROTEÇÃO (MIG)	17
2.3 ENERGIA DE SOLDAGEM	18
2.3.1 Rendimento Térmico	19
2.3.2 Tensão	20
2.3.3 intensidade de Corrente	20
2.4 ENSAIOS MECÂNICOS	21
2.4.1 Ensaio de tração	22
2.4.2 Ensaio de dobramento	22
2.4.3 Dureza	23
2.4.3.1 Ensaio de resistência à penetração	23
2.5 METALOGRAFIA	24
2.5.1 Macrografia	25
3 METODOLOGIA	26
4 DESENVOLVIMENTO	27
4.1 PREPARAÇÃO DOS CONJUNTOS A SEREM SOLDADOS	27
4.2 EXECUÇÃO DA SOLDAGEM MIG	29
4.3 EXECUÇÃO DA SOLDAGEM SAW	31
4.4 CORTE DAS AMOSTRAS	32
4.5 MACROGRAFIA	33
4.6 ENSAIO DE DOBRAMENTO	35
4.7 ENSAIO DE TRAÇÃO	36
4.7 ENSAIO DE DUREZA	37
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	38
6 CONCLUSÃO	41
REFERÊNCIAS	42

1 INTRODUÇÃO

Atualmente a indústria tem buscado a maior eficiência produtiva com o menor custo de fabricação possível, que juntamente com a eficiência energética integram os principais dramas atuais da indústria. Devido à necessidade de um aumento na produtividade é que os processos de soldagem utilizando gases inertes ganharam força nas últimas décadas, uma vez que, são capazes de fornecer elevadas densidades de correntes fornecidas pelas fontes modernas e, principalmente, pela tendência à automatização do processo, foram pioneiros na possibilidade de se conectar um computador em uma máquina de solda, sendo capazes de acompanhar as variáveis obtendo respostas mais rápidas e eficientes (MOREIRA FILHO, 2008).

Na soldagem por arco submerso um arco é formado entre a peça de trabalho e o final do consumível, onde ambos estão cobertos por uma camada de fluxo granular (daí o nome arco submerso). O arco fica, portanto, escondido. Parte do fluxo é fundida gerando uma capa protetora sobre a poça de fusão da solda. O restante não fundido é recolhido para a reutilização.

O consumível utilizado é quase sempre um arame sólido, mas recentemente arames tubulares foram introduzidos. A soldagem por Arco Submerso é geralmente realizada com equipamentos automáticos, embora existam pistolas de soldagem manuais para o processo. Para aumentar a produtividade, um arranjo com vários consumíveis pode ser introduzido.

Devido à sua elevada taxa de deposição de metal, é um processo particularmente adequado para longas articulações retas de boa qualidade na posição vertical. É amplamente utilizado na fabricação de vasos de pressão, em plantas químicas, em estruturas pesadas, em reparação e na indústria de construção naval.

1.1 JUSTIFICATIVA

Com ambos processos caminhando juntos no controle de parâmetros devido a possibilidade de automação, notou-se a possibilidade de equalização da energia de soldagem dos métodos, esperando assim obter-se resultados mecânicos equivalentes na qualidade dos cordões executados. Se confirmado o resultado, empresas que por ventura utilizem algum dos dois processos, ganharam uma alternativa para sua produção, seja visando aumentar a produtividade em uma troca MIG para SAW, seja por eventual problema com o equipamento do processo atualmente utilizado, através da substituição do método até que seja efetuado reparo na linha original do projeto, ou ainda uma possibilidade aumentada no escopo de serviços prestados com um equipamento já existente na empresa.

1.2 ESCOPO DO TRABALHO

Para que se possam ter parâmetros equivalentes entre esses processos de soldagem, aplicou-se na construção da Especificação de Procedimento de Soldagem (EPS) valores de corrente (A), tensão (V) e velocidade de avanço (v) (m/min) de forma com que houvesse equilíbrio entre os processos nos valores obtidos para energia de soldagem.

Os valores dos parâmetros usados foram baseados no uso adequado de ambas fontes de soldagem utilizadas (*MIG-SAW*), visando minimizar a possibilidade de defeitos nos corpos-de-prova bem como manter a segurança do operador e o funcionamento das máquinas.

Os cordões, a análise metalográfica e os ensaios mecânicos foram feitos nos Laboratório de Soldagem, Laboratório de Metalografia e Laboratório de Ensaios Mecânicos da Fatec Pindamonhangaba. Após a realização de todos os ensaios e pré-testes, foram feitas comparações entre os cordões de solda obtidos em cada processo.

1.3 OBJETIVOS

Este trabalho tem por objetivo comparar as resistências mecânicas dos corpos de prova obtidos através da solda de duas placas do aço API 5L X65, utilizando o arame ER70S-6 com 1,2mm e com 4,00mm, respectivamente nos processos MIG e SAW, mantendo-se como parâmetro de comparação a mesma energia de soldagem entre os processos.

1.4 DEFINIÇÃO DA METODOLOGIA

Para tal estudo de caso, utilizou-se a pesquisa experimental, onde controlou-se as diversas variáveis presentes na energia de soldagem dos processos em foco. Os fatores do planejamento foram dois tipos de soldagem (MIG e SAW) e os níveis do planejamento serão dois diferentes parâmetros na soldagem da junta, um nível mais baixo para soldagem MIG e um nível equivalente ao anterior para a soldagem SAW. E então, foi avaliado; o aspecto superficial, geometria do cordão; ensaio de tração; ensaio de dobramento, possibilitando a avaliação do limite de resistência à tração e o limite de ruptura. Através de todos esses dados será possível comparar os cordões formados por cada tipo de soldagem.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Soldagem é a operação que visa obter a união de duas ou mais peças, assegurando na junta a continuidade das propriedades físicas e químicas [...] e solda é a junta resultante da operação de soldagem. (NERIS, 2012, p.5)

Processo esse que vem sendo amplamente utilizado desde o começo da Primeira Guerra Mundial, ganhando força em seu desenvolvimento tecnológico a partir da Segunda Grande Guerra, desenvolvendo novos processos e aperfeiçoando os procedimentos já existentes.

A história da soldagem, porém mostra artefatos soldados utilizando brasagem há mais de 4000 anos e por forjamento com mais de 3000 anos. Fato é que a soldagem acompanha o desenvolvimento da humanidade, caminhando sempre na mesma direção, usando e suportando novas tecnologias conforme mostrado a seguir:

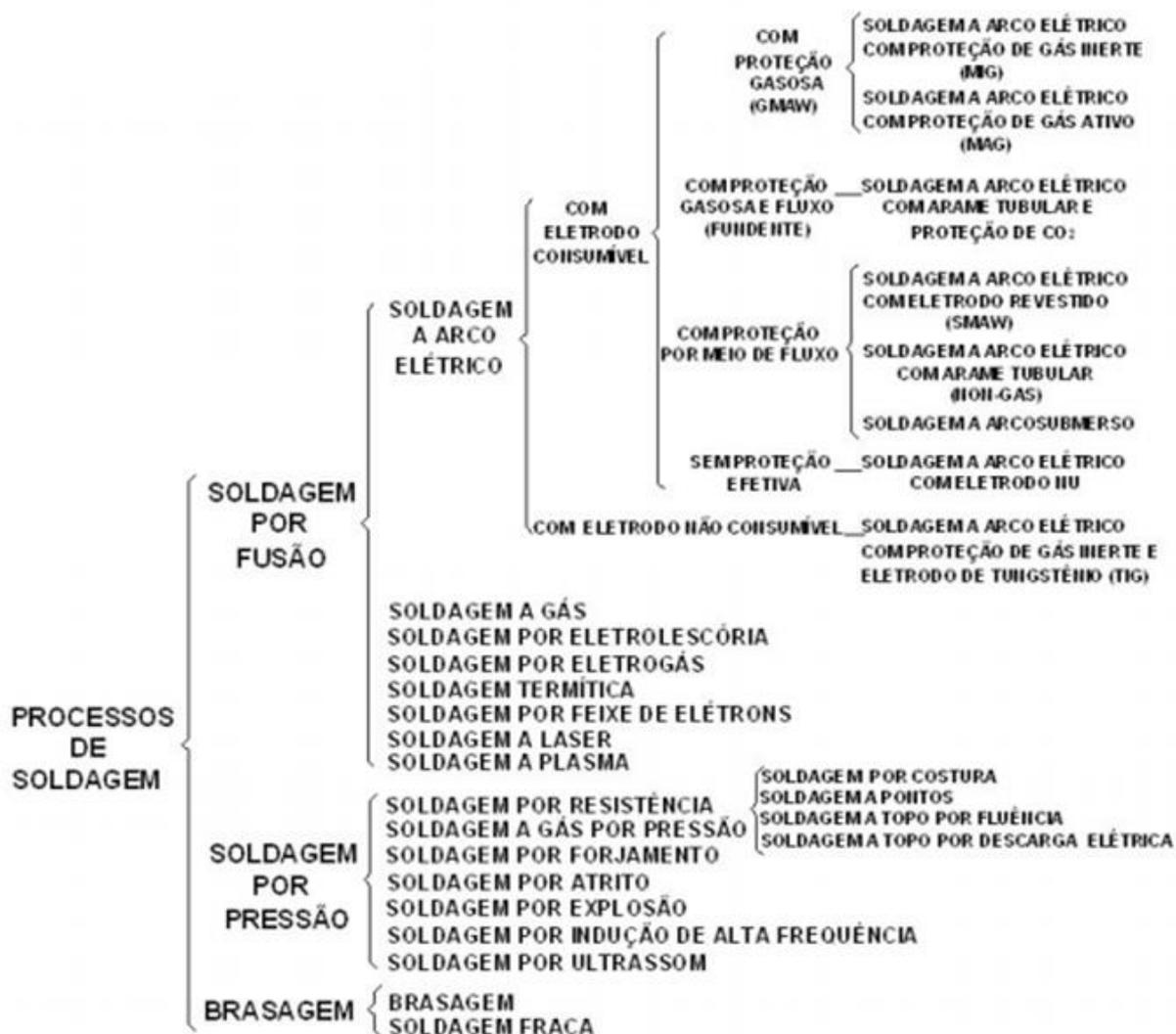
Figura 1 – Cronologia da soldagem

- 1801 Sir Humphrey Davis descobre o fenômeno do arco elétrico
- 1836 Edmund Davy descobre o Acetileno
- 1885 N. Bernardos e S. Olsewski depositam patente do processo de soldagem por arco elétrico
- 1889 N.G. Slavianoff e C. Coffin substituem o eletrodo de grafite por arame metálico
- 1901 Fouché e Picard desenvolvem o primeiro maçarico industrial para soldagem oxiacetilênica
- 1903 Goldschmidt descobre a solda aluminotérmica
- 1907 O. Kjellberg deposita a patente do primeiro eletrodo revestido
- 1919 C. J. Halsag introduz a corrente alternada nos processos de soldagem
- 1926 H.M. Hobart e P.K. Denver utilizam gás inerte como proteção do arco elétrico
- 1930 Primeiras normas para eletrodo revestido nos EUA
- 1935 Desenvolvimento dos processos de soldagem TIG e Arco Submerso
- 1948 H.E. Kennedy desenvolve o processo de soldagem MIG
- 1950 França e Alemanha desenvolvem o processo de soldagem por feixe de elétrons
- 1953 Surgimento do processo MAG
- 1953 Primeiras aplicações do processo PLASMA convencional
- 1957 Desenvolvimento do processo de soldagem com arame tubular e proteção gasosa
- 1958 Desenvolvimento do processo de soldagem por eletro-escória, na Rússia
- 1960 Desenvolvimento de processo de soldagem a laser, nos EUA
- 1970 Aplicados os primeiros robôs nos processos de soldagem

Fonte: Neris M.M. Soldagem; Eixo Tecnológico: Controle e Processos Industriais (2012)

Atualmente seria difícil precisar um número de processos utilizados já que existem inúmeras peculiaridades na indústria ao redor do globo, o que torna cada tipo de soldagem útil de alguma forma. Tarefa ainda mais complexa seria classificar os tipos de soldagem, já que conforme listados os processos surgem controvérsias. Uma dessas classificações é a por família envolvendo o fenômeno físico e utilizando para as subdivisões a forma de energia empregada no processo, como mostrado abaixo:

Figura 2 – Classificação dos processos de soldagem



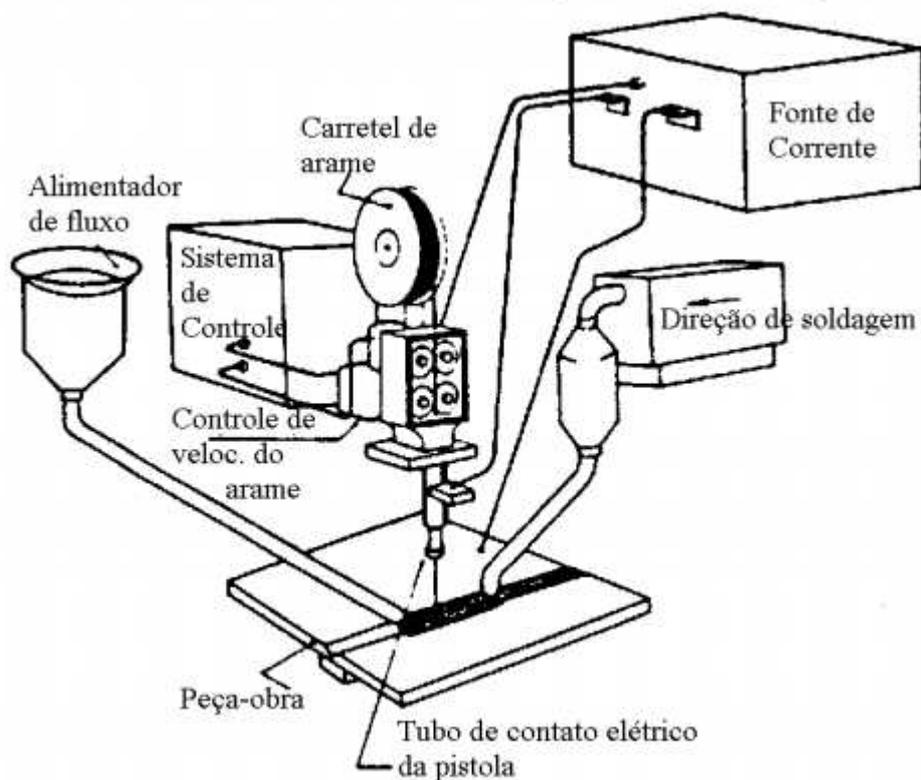
Fonte: Neris M.M. Soldagem; Eixo Tecnológico: Controle e Processos Industriais (2012)

Neste trabalho, serão estudados dois processos de soldagem por fusão, à arco elétrico com eletrodos consumíveis que se diferenciarão, segundo família, pelo tipo de proteção empregado ao metal recém-fundido.

2.1 ARCO SUBMERSO (SAW)

O arco submerso é um método no qual o calor requerido para fundir o metal é gerado por um arco formado pela corrente elétrica passando entre o arame de soldagem e a peça de trabalho e recebe este nome justamente por que recobre a área de aplicação de solda com um material mineral granulado, conhecido como fluxo, o que o torna um processo sem arco visível, faíscas, respingos ou fumos.

Figura 3 – Esquemática da soldagem a arco submerso



SOLDAGEM A ARCO SUBMERSO

Fonte: Neris M.M. Soldagem; Eixo Tecnológico: Controle e Processos Industriais (2012)

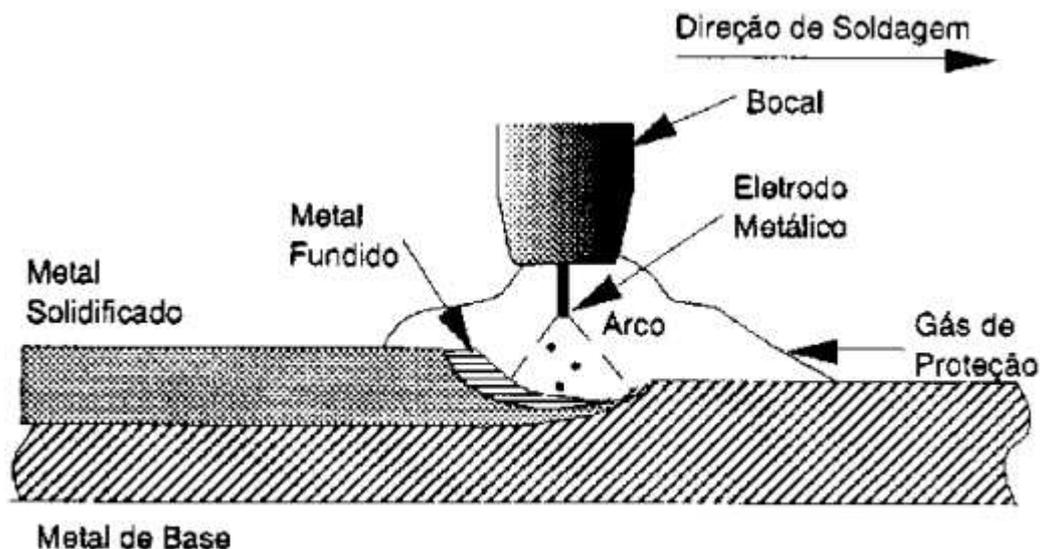
O arco submerso possui características que propiciam seu destaque nas preferências da indústria, nem mesmo sua limitação quanto as posições em que pode operar (soldagem plana e horizontal em ângulo) pode ofuscar seu desempenho elevado em velocidade de soldagem, maiores taxas de deposição, boa integridade do metal de solda, processo de fácil uso, melhor ambiente de trabalho e maior segurança para o operador.

Atende correntes de até 2000^a, CA ou CC, com um único arame, soldas em monopasse com até 16mm de espessura e sem limite de espessuram em soldas multipasse podendo atingir até 400cm/min na velocidade de avanço ou maiores velocidades conforme aumentado o número de arames dispostos na alimentação da poça de fusão.

2.2 SOLDAGEM A ARCO ELÉTRICO COM GÁS DE PROTEÇÃO (MIG)

Na soldagem ao arco elétrico com gás de proteção (GMAW – Gas Metal Arc Welding), também conhecida como soldagem MIG/MAG (MIG – Metal Inert Gas e MAG – Metal Active Gas), um arco elétrico é estabelecido entre a peça e um consumível na forma de arame. O arco funde continuamente o arame à medida que este é alimentado à poça de fusão. O metal de solda é protegido da atmosfera pelo fluxo de um gás (ou mistura de gases) inerte ou ativo.

Figura 4 – Esquemática do processo MIG



SOLDAGEM MIG/MAG

Fonte: Neris M.M. Soldagem; Eixo Tecnológico: Controle e Processos Industriais (2012)

O processo de soldagem MIG funciona com corrente contínua (CC), normalmente com o arame no pólo positivo. Essa configuração é conhecida como polaridade reversa. A polaridade direta é raramente utilizada por causa da transferência deficiente do metal fundido do arame de solda para a peça. São comumente empregadas correntes de soldagem de 50 A até mais que 600 A e tensões de soldagem de 15 V até 32 V. Um arco elétrico autocorrigido e estável é obtido com o uso de uma fonte de tensão constante e com um alimentador de arame de velocidade constante.

A soldagem MIG pode ser executada em todas as posições, sem a necessidade de remoção de escória, com alta taxa de deposição de solda em uma alta velocidade de soldagem e pouca distorção nas peças a tornando um dos mais utilizados processos de soldagem atualmente, seja na manutenção e efetuação de reparos, seja na flexibilização de uso em posições não comuns de soldagem ou até na possibilidade de automação do processo.

2.3 ENERGIA DE SOLDAGEM

Define-se como energia de soldagem a quantidade de calor adicionada ao material por unidade de comprimento linear, chamado também de *heat input* ou aporte térmico, essa energia aplicada depende diretamente do processo de soldagem utilizado, da velocidade de avanço da solda, e das tensões e correntes aplicados nos processos. Sabendo disso, utilizasse a seguinte equação para obtenção do valor de energia de soldagem:

Inicialmente:
$$E = f \cdot \frac{I \cdot A}{v} \quad (1)$$

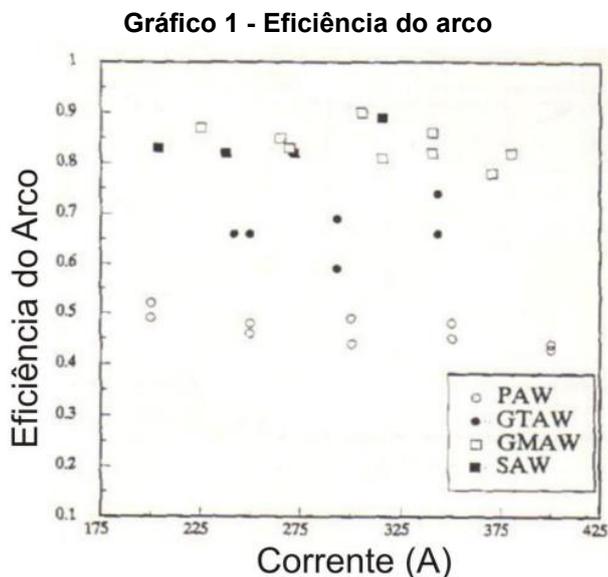
Fazendo:
$$E_1 = E_2 \quad (2)$$

Então:
$$f_1 \cdot \frac{I_1 \cdot A_1}{v_1} = f_2 \cdot \frac{I_2 \cdot A_2}{v_2} \quad (3)$$

Onde: E – Energia de Soldagem (J/mm) f – Rendimento Térmico (%) A - tensão (V)
I - corrente (A) v - Velocidade de avanço (m/min)

2.3.1 Rendimento Térmico

Frequentemente utiliza-se como denominação para rendimento térmico, por alguns autores, as expressões “eficiência do arco” e “eficiência da fusão”, mas a definição segue a mesma para ambos: capacidade do material absorver da fonte a energia produzida em forma de calor por unidade de tempo de soldagem. Através de medições com calorímetros, da entalpia de fusão, em J/mm³ (Quantidade de energia requerida para elevar a temperatura do metal sólido até a temperatura de fusão e para converter esse volume do estado sólido para o estado líquido), das médias de potência elétrica calculadas por meio do produto da corrente e da tensão do arco em diferentes instantes e do tempo de soldagem fica evidenciada a diferença de eficiência térmica em situações que sejam, mesmo que minimamente, diferentes entre si.



Publicado por AWS Handbook, segundo DuPont e Marder (1995)

Como mostrado no gráfico acima, os valores de eficiência não obtiveram variações significativas para os processos em alvo neste estudo, MIG e SAW, apresentando valores de $0,84 \pm 0,04$. Outros processos estudados pelo gráfico apresentam distanciamento mais claro, o que influiria diretamente no valor final da eficiência térmica do processo e por consequência em um resultado de energia de soldagem inferior se além dos valores de corrente, os outros parâmetros de soldagem fossem equivalentes.

2.3.2 Tensão

A diferença de potencial entre dois pontos ou a diferença de potencial elétrico por unidade de carga elétrica é conhecida como tensão elétrica. Essa diferença de potencial aplicada do bico de contato presente em bocais de solda à arco elétrico até o ponto de aplicação de solda criam uma tensão no arco elétrico e que varia de acordo com seu comprimento, criando assim um parâmetro de suma importância na soldagem, a Tensão. Responsável direta pelo controle da largura do cordão de solda esse parâmetro se mostra subordinado também ao diâmetro do eletrodo utilizado, ao modo de transferência e, quando presente, ao gás de proteção utilizado.

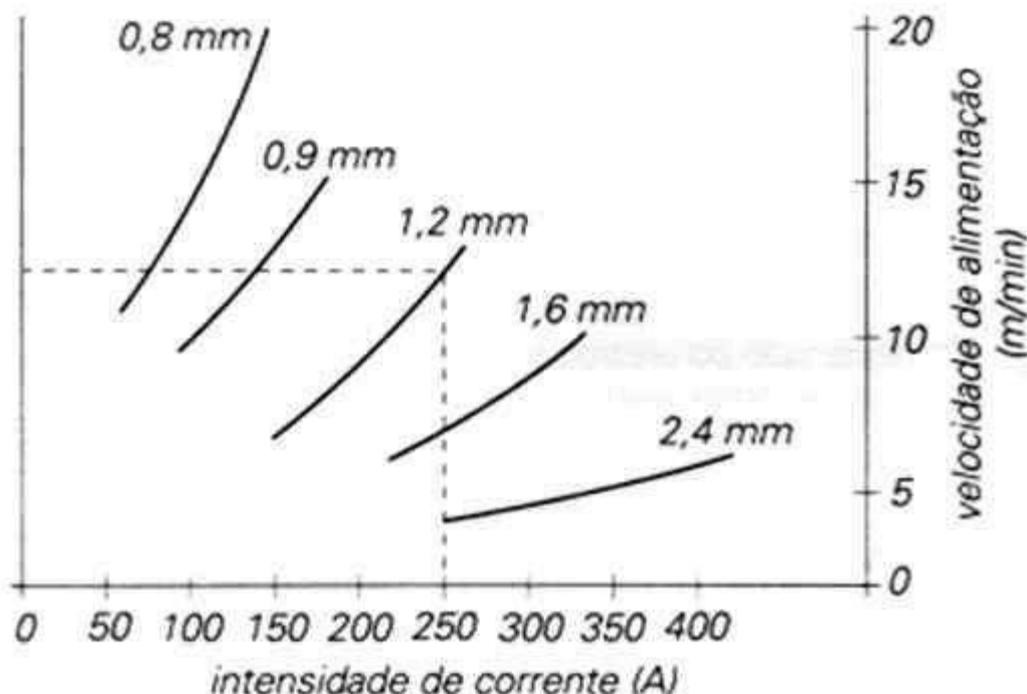
Se todas essas variáveis se mantiverem constantes, o aumento da tensão do arco provoca maior largura e menor altura do cordão, melhor molhagem, ou distribuição do metal depositado, e redução da penetração. Tensões excessivas do arco provocam porosidade, salpicos e mordeduras; por outro lado, tensões mínimas resultam em porosidade e cordões muito convexos.

Um arco com comprimento muito pequeno pode causar curto-circuitos acidentais quando a transferência é globular ou em “spray”, resultando em instabilidade do arco e conseqüente porosidade no cordão. Já o comprimento muito grande tende a oscilar e a causar um cordão de penetração e largura irregulares.

2.3.3 intensidade de Corrente

Fator que, em soldagem, nos leva a taxa de fusão do eletrodo e a transferência do metal fundido. A velocidade de alimentação do arame e sua composição criam uma relação linear com a intensidade de corrente, em aplicações de arames compostos de materiais resistivos, como os aços-não-ligados, e com diâmetros superiores, a intensidade da corrente cai, diminuindo a deposição de material na peça. O inverso também é verificado quando aplicamos a mesma intensidade de corrente em materiais de boa condutividade e com diâmetros menores, observa-se em situações assim uma maior deposição de material e necessidade de correção da velocidade de alimentação do arame para com a solda.

Gráfico 2 - Relação entre a intensidade da corrente, velocidade de alimentação e diâmetros de eletrodo



Fonte: Portal InfoSolda

Costuma-se, inclusive, observar o comprimento de arame que resta junto ao bocal após a solda, se esse comprimento se mantiver adequado ao *stick-out*, é um indicativo positivo da velocidade de alimentação do arame em relação aos valores da corrente utilizados.

2.4 ENSAIOS MECÂNICOS

Com o objetivo principal de comparar corpos-de-prova submetidos a soldagens em diferentes processos mas com mesma energia, a melhor forma de se obter dados válidos para sua resolução será aplicar esforços mecânicos de forma igual em todas as variações destacadas, como destaca ZOLIN (2011) em seu estudo dos Ensaios Mecânicos e Análise de Falhas: “Entre os diversos ensaios, destacamos os mecânicos, por serem os que melhor revelam as propriedades necessárias para a construção da maioria dos equipamentos industriais.”

Através de ensaios mecânicos conseguimos identificar os materiais que melhor se adaptam as nossas necessidades perante os mais diversos projetos ou até mesmo quando foram executados processos de fabricação e é preciso avaliar as influências geradas no material. Dentre algumas vantagens dos ensaios mecânicos estão: prevenção de acidentes, garantia da satisfação do cliente, controle dos problemas de manufatura, redução de custo e manutenção da qualidade.

Para serem realizados, alguns ensaios precisam de um elemento material, chamado corpo de prova, que pode ser uma amostra padronizada ou a própria peça em estudo. Existem normas e procedimentos a serem seguidos por todos ensaios mecânicos com o objetivo de torná-los comparáveis entre si, também se faz necessária a adoção de níveis de exigência mínimos para cada um dos testes aplicados e também com o que for solicitado pelo produto em serviço.

São classificados como destrutivos, quando o corpo de prova perde sua funcionalidade após o teste ou como não destrutivos quando as características do produto são mantidas operantes.

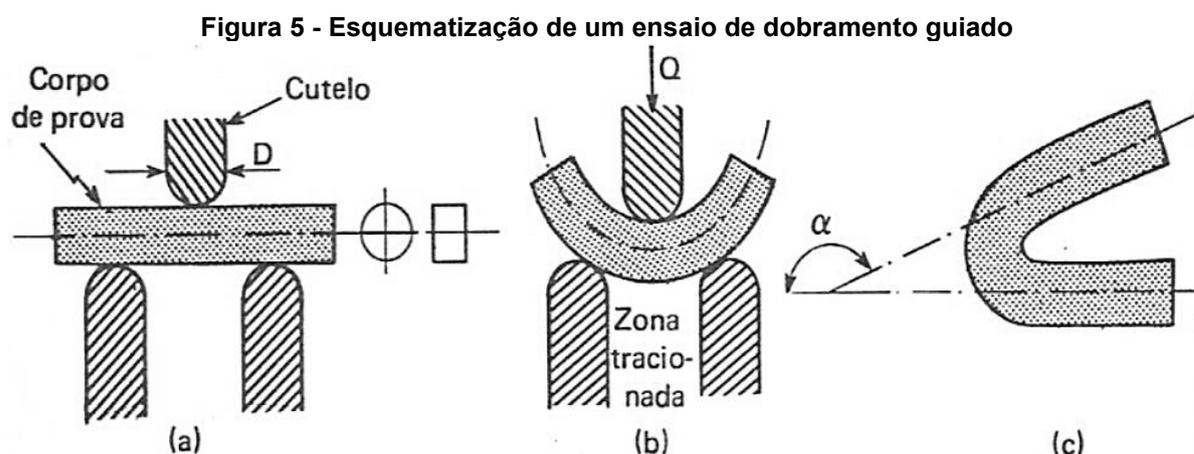
Entre os ensaios não destrutivos, temos: ensaio por inspeção visual, por líquidos penetrantes, por magnéticas, por ultrassom, por radiografia, por emissão acústica e por correntes parasitas. Já a gama dos destrutivos é composta por: Tração, flexão (dobramento), compressão, torção, dureza, fadiga, fratura (choque) e fluência.

2.4.1 Ensaio de tração

O ensaio de tração consiste na aplicação de uma força, que, ao agir sobre uma superfície de um corpo sólido provoca uma deformação na direção do esforço produzindo uma pressão. Quando essa força tende ao alongamento, acontece o que chamamos de tensão de tração. Há uma relação entre tensão aplicada (carga sobre área da secção transversal da peça) e a deformação resultante. São produzidos resultados na forma do gráfico tensão-deformação, evidenciando as fases pelas quais passa o material do ponto inicial do ensaio, onde começa a ser aplicada a força, até ser alcançado o ponto de ruptura.

2.4.2 Ensaio de dobramento

Submeter um corpo de prova, assentado sobre dois apoios afastados por uma distância especificada dobrando-o por intermédio de um cutelo que aplica um esforço de flexão no centro do corpo até que seja obtido um ângulo de dobramento desejado, que segundo ZOLIN (2011), caracteriza em linhas gerais o ensaio de dobramento. Apesar de apenas nos fornecer resultados qualitativos, o ensaio de dobramento é um método eficiente de detectar defeitos metalúrgicos e de continuidade do material em estudo.



Fonte: Portal Biopdi

A representação acima mostra em (a) o ponto inicial do ensaio, logo em seguida, em (b), a ação de avanço do cutelo em direção ao vão livre dos apoios devido a carga

(Q) aplicada através do cutelo no centro do corpo de prova, causando a tração das fibras inferiores (em contato com o apoio) e, ao mesmo tempo, compressão das fibras superiores (em contato com o cutelo). O corpo de prova em (c) demonstra o resultado final do dobramento onde a angulação (α) pode variar de acordo com a intensidade necessária a cada ensaio em função do material e da espessura do corpo de prova. Nesse mesmo estágio ficam evidenciados possíveis defeitos metalúrgicos e de compacidade do material através da aparição de trincas, fissuras ou rompimento do corpo de prova antes da obtenção do ângulo especificado nos dando a confirmação, ou não, do atendimento dos fatores mecânicos desejados.

2.4.3 Dureza

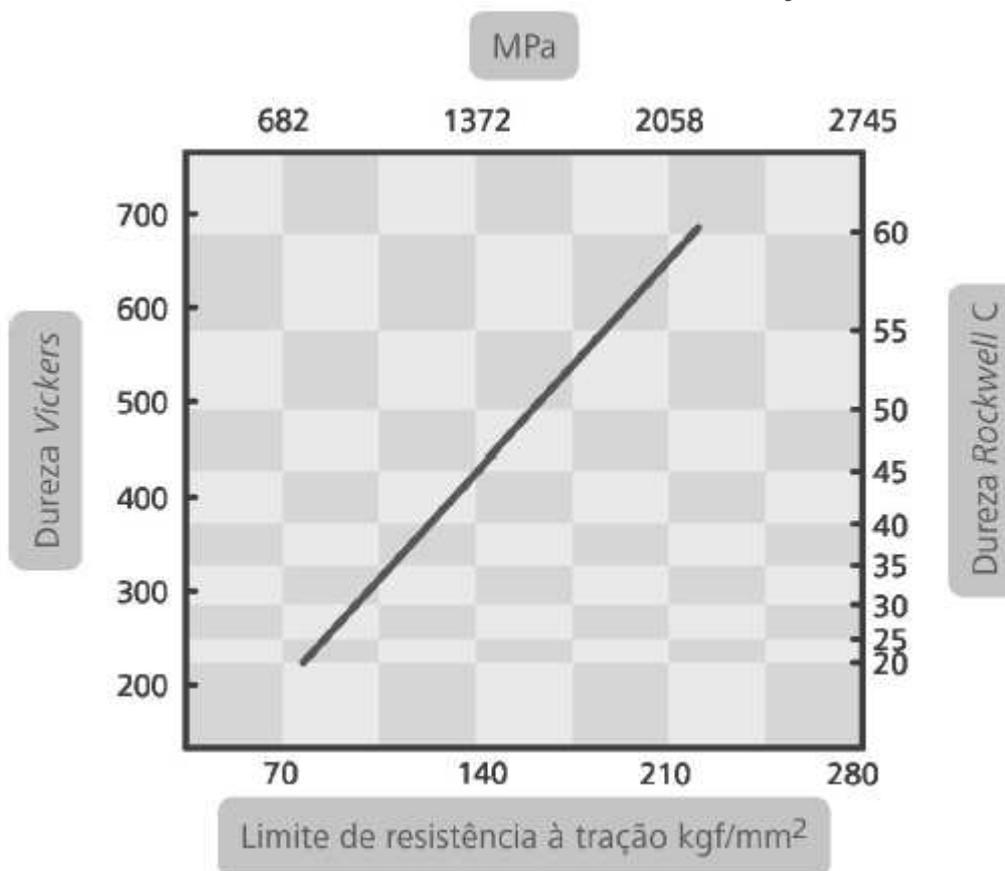
Como disse ZOLIN (2011), existe uma certa complexidade na definição de dureza, devido a variação do conceito de acordo com sua área de aplicação. Na mineralogia se deve a resistência de um material ao risco em relação a outro material, em termos metalúrgicos é a capacidade de resistência a deformação plástica permanente, na mecânica é a resistência ao desgaste ou à penetração e na usinagem é a dificuldade ao corte. Dentro do objetivo do trabalho e das ligações entre a capacidade de resistir à penetração com sua resistência a ruptura, fez-se necessário a aplicação deste ensaio não destrutivo aos corpos de prova. Para peças fundidas e forjadas emprega-se geralmente o método de ensaio Brinell, a partir de amostras retiradas de várias partes das peças para conferir sua uniformidade. Para peças usinadas acabadas, utiliza-se o método Rockwell. Em peças rompidas em serviço, o ensaio de dureza é muito útil, devido à relação existente entre dureza e resistência à tração e à impossibilidade de, geralmente, não se poder confeccionar corpos de prova para ensaio de tração, a partir de pedaços da peça fraturada. (CHIAVERINI, 1986, p. 150).

2.4.3.1 Ensaio de resistência à penetração

Para peças fundidas e forjadas emprega-se geralmente o método de ensaio Brinell, a partir de amostras retiradas de várias partes das peças para conferir sua uniformidade. Para peças usinadas acabadas, utiliza-se o método Rockwell. Em peças rompidas em serviço, o ensaio de dureza é muito útil, devido à relação existente entre dureza e resistência à tração e à impossibilidade de, geralmente, não se poder confeccionar corpos de prova para ensaio de tração, a partir de pedaços da peça fraturada. (CHIAVERINI, 1986, p. 150).

Dividida em ensaios de penetração estáticos, os mais usados, e os ensaios de penetração dinâmicos (dureza escleroscópia) essa metodologia de ensaios nos fornece uma característica importante para reconhecer o tipo de material, a relação entre as durezas dos aços e suas durezas.

Gráfico 3 - Gráfico Dureza x Resistência à Tração



Fonte: CTISM (1986)

A determinação da dureza dos metais constitui um método rápido e não-destrutivo que permite avaliar as condições de fabricação e tratamento das ligas metálicas, as diferenças estruturais locais e a influência de elementos de liga e, embora não sirva como parâmetro para o projeto de peças, correlaciona-se com razoável aproximação com algumas propriedades mecânicas, como a resistência à tração, particularmente no caso dos aços. (CHIAVERINI, 1986, p. 135).

Cria-se então uma relação direta com a resistência a tração do material através de sua dureza como determina o ASTM A370, lembrando em suas determinações que os valores são aproximados e podem variar de acordo com os trechos específicos medidos, porém com confiabilidade de 90% dos valores obtidos.

2.5 METALOGRAFIA

Segundo PAVANATTI (2017), é a ciência que estuda e interpreta a estrutura interna dos materiais a partir de uma superfície preparada, e relaciona essas estruturas com as suas composições químicas, propriedades físicas e mecânicas. Com o objetivo de identificar o tipo, local, intensidade e tamanho das discontinuidades, observar tamanho de grão, penetração do cordão de solda, observar e identificar as alterações térmicas sofridas por soldagem, identificar o processo de fabricação da peça, identificar o tipo de tratamento térmico aplicado, entre outros, a metalografia garante uma gama de ferramentas a análise dos materiais garantindo confiabilidade ao processo.

2.5.1 Macrografia

Existem alguns tipos de ensaios metalográficos, será abordado e utilizado neste trabalho o ensaio de macrografia. Definido por visualizações aumentadas em até dez vezes, a macrografia permite observar a zona de alteração térmica, identificar o processo de fabricação da peça, determinar o tipo, a forma, o tamanho, o local, a intensidade das descontinuidades e etc.

3 METODOLOGIA

Aproveitando-se dos conceitos vistos durante aulas laboratoriais e acompanhamento de processos de soldagem criou-se o desejo de redigir um trabalho de conclusão de curso que fosse desenvolvido naquele ambiente.

Em um trabalho de graduação, podemos utilizar variadas formas de metodologia para o estudo do tema, será trabalhado neste trabalho a pesquisa experimental.

“A pesquisa experimental consiste em determinar um objeto de estudo, selecionar as variáveis que seriam capazes de influenciá-lo, definir as formas de controle e de observação dos efeitos que a variável produz no objeto” Gil (2007)

Partindo desse princípio elaborou-se uma sequência de experimentação baseada em variações de parâmetros de soldagem com o objetivo de igualar as energias fornecidas aos corpos de prova soldados em processos MIG e SAW. Com as variáveis controladas e os corpos de prova em condição de igualdade, buscou-se através de ensaios mecânicos comprovar esta experimentação.

A partir da delimitação do percurso do projeto foram buscados recursos técnicos para que houvesse embasamento na construção da monografia, tendo acesso a livros de conceitos e normas técnicas, o desenvolvimento se fez de forma natural, aplicando as metodologias exigidas pelas associações responsáveis por cada área explorada ao longo deste trabalho.

A partir da obtenção das chapas de aço API 5L X65 iniciou-se a preparação dos conjuntos a serem soldados. Utilizou-se um par de chapas chanfradas em 45° unidas por um conjunto de mata-juntas e extensores usados para evitar uma possível queda na qualidade da solda ao seu início e término, bem como uma união do conjunto com a bancada de trabalho.

Posterior a isso foram definidos os valores de cada parâmetro junto a fórmula de energia de soldagem, onde se têm valores de Energia de Soldagem (J/mm), Rendimento Térmico (%), V - tensão (V), corrente (A), Velocidade de avanço (m/min), levando em consideração a igualdade final em energias de soldagem.

Em seguida ocorreram as execuções dos cordões, inicialmente se fazendo o pré-aquecimento da peça apenas para que fosse retirada uma possível umidade nas regiões do chanfro soldadas, e logo em seguida a execução dos passes ao longo do corpo de prova. A soldagem se iniciou com o conjunto destinado para o processo MIG, após este ser finalizado, executaram-se as mesmas sequências para o conjunto a ser soldado no processo SAW.

Por fim, foram liberadas do mata-juntas e dos babadores os corpos de prova que seguiram para corte das amostras utilizadas nos testes de dureza, tração, dobramento e ainda por análise macrográfica.

Com a execução de todos os ensaios mecânicos previstos, obteve-se meios de comparação entre os processos e ainda dados para que fossem feitas pesquisas futuras na área, visando uma possível tomada de trocas de processos de soldagem como algo natural no meio industrial.

4 DESENVOLVIMENTO

Nesta pesquisa experimental, foram utilizadas para execução do estudo as dependências da instituição Fatec Pindamonhangaba, que possibilitaram desde de o preparo das amostras do aço API 5L X65 cedidas pelo idealizador e orientador do projeto Prof. Eduardo Esperança Canetti, passando pela execução dos processos de soldagem focados e, por fim, a análise dos resultados através dos diversos ensaios realizados nos laboratórios de metalografia e de ensaios mecânicos. Será dedicada a esta seção a descrição e ilustração de todo o passo a passo da pesquisa, bem como a apresentação detalhada de dados utilizados para a mesma.

Assim que definido o escopo do trabalho, e dado o recebimento das amostras de aço API 5L X65, iniciou-se a criação de uma sequência de execução, de forma que todas as etapas tivessem um cronograma compatível com as resoluções dispostas no AWS Handbook que ditam as normas globais em soldagem. Após estudo prévio dos parâmetros e verificação de disponibilidade das máquinas e dependências, definiu-se o roteiro utilizado na execução do experimento em: preparação das amostras, execução dos cordões de solda do processo MIG e do processo SAW, seguido da preparação das amostras dos corpos soldados e seus ensaios mecânicos.

4.1 PREPARAÇÃO DOS CONJUNTOS A SEREM SOLDADOS

A partir do recebimento das 4 unidades das placas de aço API 5L X65, foi projetada uma sequência de trabalho para que se tornasse possível a execução do experimento.

Tabela 1 - Definições das propriedades mecânicas API 5L X65

API 5L X Grades

Grade	Chemical Composition								Yield Strength	Tensile Strength	Yield to Tensile	Elongation
	C	Si	Mn	P	S	V	Nb	Ti	min. (KSI)	min. (KSI)	Ratio (max)	%
API 5L X52	0.16	0.45	1.65	0.020	0.010	0.07	0.05	0.04	52	66	0.93	21
API 5L X56	0.16	0.45	1.65	0.020	0.010	0.07	0.05	0.04	56	71	0.93	19
API 5L X60	0.16	0.45	1.65	0.020	0.010	0.08	0.05	0.04	60	75	0.93	19
API 5L X65	0.16	0.45	1.65	0.020	0.010	0.09	0.05	0.06	65	77	0.93	18
API 5L X70	0.17	0.45	1.75	0.020	0.010	0.10	0.05	0.06	70	82	0.93	17

Fonte: API Grades

Dado o material previamente chanfrado em 45° nas dimensões 200x100x22 foram necessárias uniões entre os pares soldados através de mata-juntas e o uso de babadores ao final dos chanfros. Com o objetivo de manter o material soldado restrito a peça, os mata-juntas foram dispostos nas uniões soldadas, imediatamente embaixo de onde eram feitos os cordões, já os babadores são peças metálicas instaladas ao final do curso da perna de solda em processos automatizados, geralmente com a intenção de preservar a área da peça com soldas em estado normal, mantendo seu início e final fora da peça, preservando as propriedades do conjunto.

Figura 6 - Placas chanfradas e unidas por mata-juntas e babadores



Fonte: Arquivo pessoal

Em seguida foram realizados procedimentos para que houvesse maior qualidade de soldagem em ambos conjuntos, iniciando pelo lixamento das áreas responsáveis por fazer o contato conjunto-bancada, permitindo assim a abertura e manutenção do arco de solda. As bases montadas através do mata-juntas e os calços de cobre usados para que se transmitisse a corrente foram montados também e sobre áreas esmerilhadas das bancadas por onde passariam os processos realizados.

Definiu-se o primeiro processo a ser executado como o MIG e devido aos cálculos correspondentes a energia de soldagem, foram definidos os parâmetros utilizados.

Tabela 2 - Definição dos Parâmetros para obtenção de uma mesma Energia de Soldagem [J]

PARÂMETROS	PROCESSOS	
	MIG	SAW
CORRENTE [A]	150	600
TENSÃO [V]	20	30
VELOCIDADE DE AVANÇO [M/MIN]	0,16667	1
$E = f_1 \cdot \frac{I_1 A_1}{v_1} = f_2 \cdot \frac{I_2 A_2}{v_2}$	17999,64	18000

Fonte: Arquivo pessoal

Levou-se em consideração a faixa de trabalho ideal para cada um dos equipamentos utilizados na operação, permitindo um trabalho com segurança para o operador e zelo com o equipamento.

Em seguida foram montadas em suas posições, e submetidas a um aquecimento mínimo, onde se removeu uma possível humidade das peças, porém sem que fossem aplicadas energias térmicas ao experimento.

Figura 7 - Pré-aquecimento contra humidade



Fonte: Arquivo pessoal

4.2 EXECUÇÃO DA SOLDAGEM MIG

Com os parâmetros definidos, a peça limpa e sem humidade e os equipamentos disponíveis iniciou-se a montagem e execução dos processos MIG e SAW, respectivamente.

Figura 8 - Disposição do equipamento MIG ligado à sua automação



Fonte: Arquivo pessoal

Iniciando pelo passe raiz no conjunto destinado a soldagem MIG, foram-se executando os cordões, sempre se verificando os parâmetros aplicados através da energia de soldagem, além do fluxo de gás (Argônio-CO₂) definido em 12l/min.

Figura 9 - Passe Raiz executado

Fonte: Arquivo pessoal

A sequência de soldagem foi definida de forma que os cordões sempre atendessem a norma da ASTM, cobrindo o passe anterior em 50% e permitindo a sobreposição dos cordões inferiores pelos superiores também em 50%.

Figura 10 - Sequência de soldagem intermediária

Fonte: Arquivo pessoal

Após um total de 22 cordões, o nível de solda ultrapassou o nível dos chanfros, encerrando assim a sequência no conjunto destinado ao processo MIG.

Figura 11 - Conjunto MIG finalizado



Fonte: Arquivo pessoal

Com o final do procedimento de soldagem no conjunto MIG, reservou-se em repouso, aguardando a execução do conjunto SAW e posterior corte de corpos de prova de sua seção.

4.3 EXECUÇÃO DA SOLDAGEM SAW

Seguindo a mesma definição de parâmetros baseada em igualdade da energia de soldagem, forneceu-se a máquina os dados necessários em sua fonte e em seu carro, alinhando os processos focados pelo trabalho.

Figura 12 - Montagem do processo SAW



Fonte: Arquivo pessoal

Com a montagem realizada, parâmetros definidos e operador a postos, iniciou-se a sequência de soldagem SAW. Com a mesma norma em vigor, os cordões foram dispostos a 50% do centro e 50% acima de cada cordão antecessor.

Com diferenças fundamentais entre os processos, foram necessários alguns cordões a menos no processo SAW em relação ao processo MIG, o que conferiu mais agilidade na execução, aspecto ainda mais destacado quando para que houvesse equivalência energética, o parâmetro velocidade de avanço obteve valores bem elevados no processo SAW. O processo MIG precisou de mais tempo de arco aberto por unidade de comprimento para obter a mesma energia de soldagem, além dos parâmetros corrente e tensão que são caracteristicamente menores em relação ao processo SAW.

O gás de proteção usado no processo MIG deu lugar ao fluxo utilizado no processo SAW, fluxo esse que contém partículas de diversos elementos responsáveis por, unidos, proteger a região soldada após e posteriormente ao processo.

Figura 13 - Cordões do processo SAW



Fonte: Arquivo pessoal

Após realização de 10 cordões o procedimento SAW foi encerrado, e encaminhado juntamente ao conjunto MIG para o corte das sessões destinadas aos ensaios mecânicos.

4.4 CORTE DAS AMOSTRAS

Visando os ensaios mecânicos, foram retiradas de ambos os conjuntos, amostras para realização de ensaios de tração, dobramento, dureza e macrografia.

Foram retirados um total de 5 seções para que se pudessem eliminar a parte da zona quase estacionária, além de se obter os corpos de prova.

Utilizou-se lixadeiras manuais e do tipo guilhotina no corte das amostras.

Figura 14 - Corte das Amostras

Fonte: Arquivo pessoal

4.5 MACROGRAFIA

Primeiro procedimento feito pós corte, a macrografia nos permite analisar a região afetada termicamente pela solda, nos permitindo ter um guia visual nos ensaios subsequentes, como por exemplo, no ensaio de dureza, onde são retirados pontos de todas as zonas da amostra.

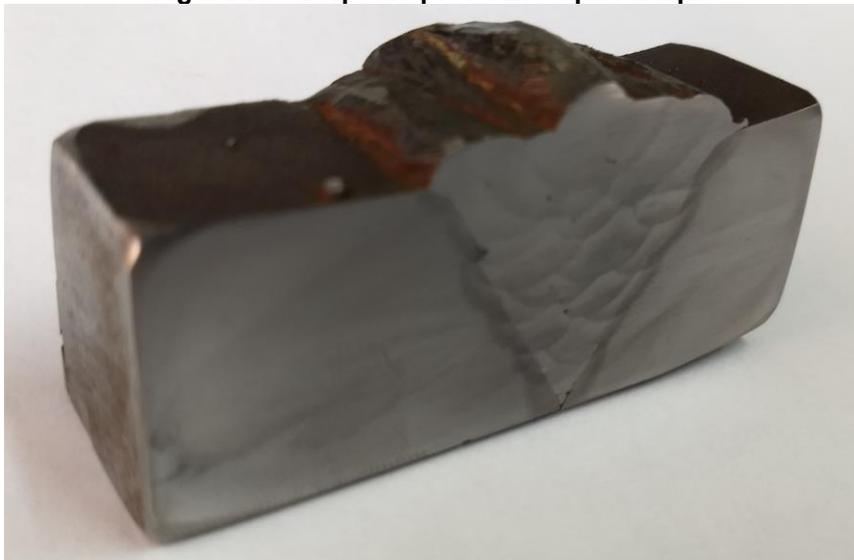
Com uma seção de cada conjunto soldado preparada, foram executados os lixamentos necessários para se obter a rugosidade correta para a análise macrográfica, seguindo a seguinte sequência de lixamento estabelecida pelo laboratório: 80, 180, 220, 320, 400 e 600.

Figura 15 - Corpo de prova em lixamento

Fonte: Arquivo pessoal

Após obtenção dos corpos de prova lixados na rugosidade adequada, os mesmos são submetidos a ataque químico através da solução Nital 10%, o que possibilita a visualização das regiões presentes nos corpos de prova.

Figura 16 - Corpo de prova MIG após ataque



Fonte: Arquivo pessoal

Quando feito de forma cuidadosa, as macrografias são capazes de revelar pequenos defeitos de soldagem como as faltas de fusão e alguns poros formados na região soldada, de forma a auxiliar a identificação dessas falhas os corpos de prova são levados a um microscópio ótico para que sejam analisados em um aumento de até 10 vezes, caso haja necessidade de maior análise, ou de análise estrutural o corpo de prova é levado a um lixamento superior e polido, para ser submetido a análises de micrografia.

Figura 17 - Macrografia realizada na ZTA do conjunto SAW



Fonte: Arquivo pessoal

4.6 ENSAIO DE DOBRAMENTO

Com intuito qualitativo, realizou-se ensaios de dobramento em corpos de prova retirados dos dois conjuntos soldados, onde foi feita a averiguação da qualidade da solda. Através da análise da área que foi rompida, foi possível verificar a falta de fusão em alguns pontos da amostra. Defeito esse que impediu a aplicação da carga máxima no corpo de prova, causando seu rompimento precoce.

Gráfico 4 – Tensão x deformação SAW – Ensaio de dobramento



Fonte: Arquivo pessoal

O mesmo ensaio foi aplicado no corpo de prova retirado do conjunto soldado pelo processo MIG, onde se obtiveram os mesmos resultados provenientes da falta de fusão.

Gráfico 5 - Tensão x Deformação MIG – Ensaio de dobramento

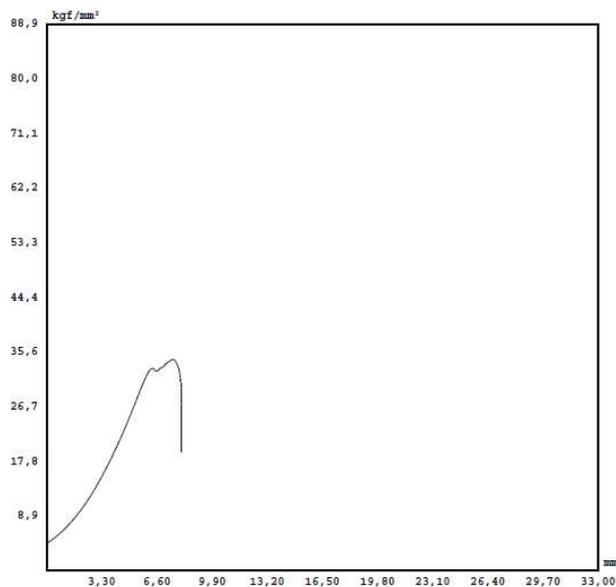


Fonte: Arquivo pessoal

4.7 ENSAIO DE TRAÇÃO

Com o objetivo de se obter dados numéricos dos corpos de prova, foram ensaiadas amostras de ambos os conjuntos soldados em um ensaio de tração, onde seria possível se obter valores de carga máxima e limite de resistência.

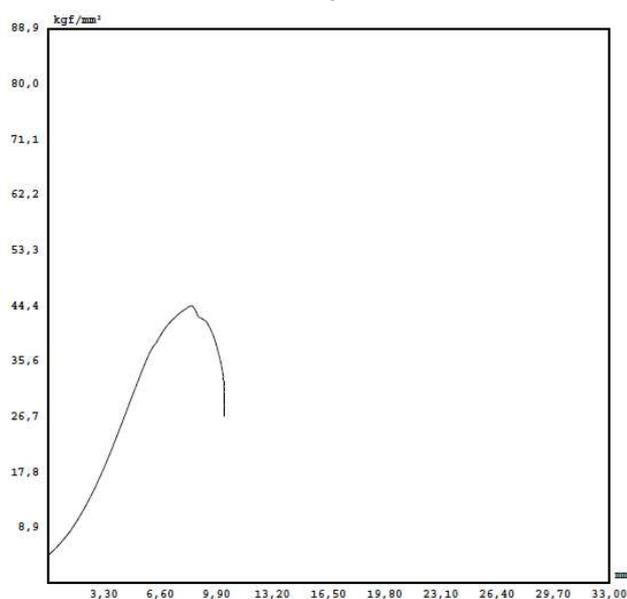
Gráfico 6 - Tensão x Deformação MIG - Ensaio de tração



Fonte: Arquivo pessoal

Devido à falta de fusão ocorrida em ambos os conjuntos, os ensaios de tração também tiveram seus valores comprometidos.

Gráfico 7 - Tensão x Deformação SAW - Ensaio de Tração



Fonte: Arquivo pessoal

4.7 ENSAIO DE DUREZA

Como parte da análise dos resultados, os valores de dureza dos corpos de prova são de fundamental valia, pois nos fornecem dados específicos de cada região estudada. Além de nos fornecerem uma alternativa aos testes de tração, tendo seus valores correspondentes em ensaios de tração, nos fornecendo valores de resistência a tração com precisão de 10% segundo a norma ASTM A 370.

Figura 18 – Perfil de dureza



Fonte: Arquivo pessoal

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram testados ao longo deste trabalho as propriedades mecânicas de corpos de prova retirados de conjuntos soldados pelos processos SAW e MIG, onde de acordo com a faixa de operação segura das máquinas foram definidos os parâmetros de soldagem que se fizessem correspondentes, através da energia aplicada pelo processo, no conjunto. Propriedades mecânicas que foram averiguadas por meio de ensaios mecânicos, os quais nos forneceram a visualização das regiões influenciadas pela soldagem, a qualidade da solda executada, a resistência a tração dos conjuntos e suas respectivas durezas.

Com esses dados em mãos iniciou-se o estudo de seus resultados, elaboraram-se gráficos e tabelas com a finalidade de evidenciar ao leitor as semelhanças e disparidades dos processos.

Gráfico 8 - Perfil de dureza MIG em escala Rockwell A



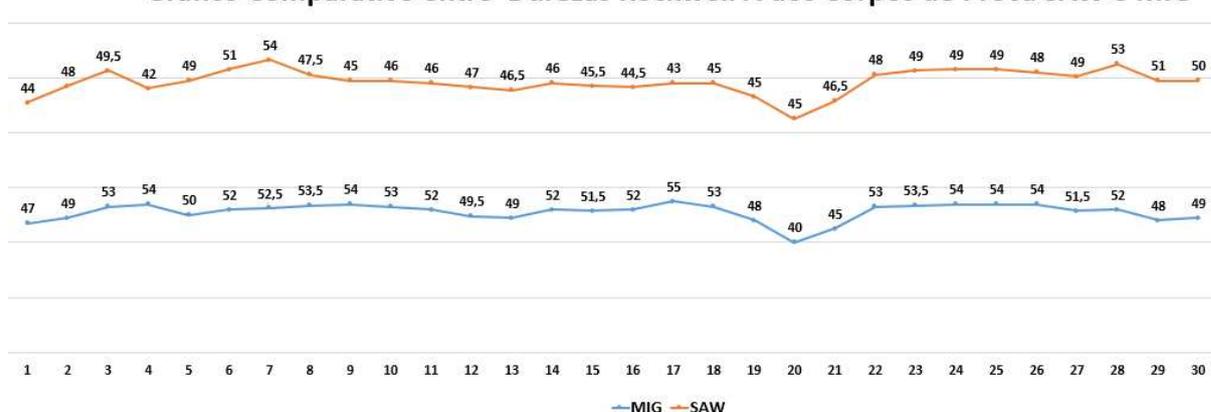
Fonte: Arquivo pessoal

Gráfico 9 - Perfil de dureza SAW em escala Rockwell A



Fonte: Arquivo pessoal

Gráfico 10 - Comparativo entre as durezas obtidas
Gráfico Comparativo entre Durezas Rockwell A dos Corpos de Prova SAW e MIG



Fonte: Arquivo pessoal

Em um total de 30 medições de dureza em escala Rockwell A executadas ao longo dos corpos de prova, se verificou valores e tendências aproximadas entre os processos, o que dá indícios que a energia de aproximadamente 18.000J aplicada em cada cordão resultou em uma mesma influência nas propriedades mecânicas. Porém quando aplicados os valores de dureza na tabela de conversão proposta pela norma ASTM A 370, observa-se uma diferença na média geral dos valores de resistência a tração obtidos.

Tabela 3 - Conversão da dureza para resistência a tração ASTM A 370



TABLE 3 Approximate Hardness Conversion Numbers for Non-austenitic Steels^a (Rockwell B to other Hardness Numbers)

Rockwell B Scale, 100-kgf Load $\frac{1}{16}$ -in. (1.588-mm) Ball	Vickers Hardness Number	Brinell Hardness, 3000-kgf Load, 10-mm Ball	Knoop Hardness, 500-gf Load and Over	Rockwell A Scale, 60-kgf Load, Diamond Penetrator	Rockwell F Scale, 60-kgf Load, $\frac{1}{16}$ -in. (1.588-mm) Ball	Rockwell Superficial Hardness			Approximate Tensile Strength ksi (MPa)
						15T Scale, 15-kgf Load, $\frac{1}{16}$ -in. (1.588-mm) Ball	30T Scale, 30-kgf Load, $\frac{1}{16}$ -in. (1.588-mm) Ball	45T Scale, 45-kgf Load, $\frac{1}{16}$ -in. (1.588-mm) Ball	
100	240	240	251	61.5	---	93.1	83.1	72.9	116 (800)
99	234	234	246	60.9	---	92.8	82.5	71.9	114 (785)
98	228	228	241	60.2	---	92.5	81.8	70.9	109 (750)
97	222	222	236	59.5	---	92.1	81.1	69.9	104 (715)
96	216	216	231	58.9	---	91.8	80.4	68.9	102 (705)
95	210	210	226	58.3	---	91.5	79.8	67.9	100 (690)
94	205	205	221	57.6	---	91.2	79.1	66.9	96 (675)
93	200	200	216	57.0	---	90.8	78.4	65.9	94 (650)
92	195	195	211	56.4	---	90.5	77.8	64.8	92 (635)
91	190	190	206	55.8	---	90.2	77.1	63.8	90 (620)
90	185	185	201	55.2	---	89.9	76.4	62.8	89 (615)
89	180	180	196	54.6	---	89.5	75.8	61.8	88 (605)
88	176	176	192	54.0	---	89.2	75.1	60.8	86 (590)
87	172	172	188	53.4	---	88.9	74.4	59.8	84 (580)
86	169	169	184	52.8	---	88.6	73.8	58.8	83 (570)
85	165	165	180	52.3	---	88.2	73.1	57.8	82 (565)
84	162	162	176	51.7	---	87.9	72.4	56.8	81 (560)
83	159	159	173	51.1	---	87.6	71.8	55.8	80 (550)
82	156	156	170	50.6	---	87.3	71.1	54.8	77 (530)
81	153	153	167	50.0	---	86.9	70.4	53.8	73 (505)
80	150	150	164	49.5	---	86.6	69.7	52.8	72 (495)
79	147	147	161	48.9	---	86.3	69.1	51.8	70 (485)
78	144	144	158	48.4	---	86.0	68.4	50.8	69 (475)
77	141	141	155	47.9	---	85.6	67.7	49.8	68 (470)
76	139	139	152	47.3	---	85.3	67.1	48.8	67 (460)
75	137	137	150	46.8	99.6	85.0	66.4	47.8	66 (455)
74	135	135	147	46.3	99.1	84.7	65.7	46.8	65 (450)
73	132	132	145	45.8	98.5	84.3	65.1	45.8	64 (440)
72	130	130	143	45.3	98.0	84.0	64.4	44.8	63 (435)
71	127	127	141	44.8	97.4	83.7	63.7	43.8	62 (425)
70	125	125	139	44.3	96.8	83.4	63.1	42.8	61 (420)
69	123	123	137	43.8	96.2	83.0	62.4	41.8	60 (415)
68	121	121	135	43.3	95.6	82.7	61.7	40.8	59 (405)
67	119	119	133	42.8	95.1	82.4	61.0	39.8	58 (400)
66	117	117	131	42.3	94.5	82.1	60.4	38.7	57 (395)
65	116	116	129	41.8	93.9	81.8	59.7	37.7	56 (385)

Fonte: Norma ASTM A 370 (2015)

Fez-se os cálculos de conversão baseados na tabela acima, aplicados a partir dos valores de dureza do Gráfico 10, e então obtiveram-se as médias:

Tabela 4 - Conversão Rockwell A para resistência a tração em MPA (versão compactada)

CONVERSÃO DOS VALORES DE DUREZA EM ROCKWELL A PARA VALORES DE RESISTÊNCIA A TRAÇÃO (SEGUNDO NORMA ASTM A370)			
MIG		SAW	
VALORES DUREZA ROCKWELL A	VALORES DE RESISTÊNCIA A TRAÇÃO [MPA]	VALORES DUREZA ROCKWELL A	VALORES DE RESISTÊNCIA A TRAÇÃO [MPA]
47	460	44	415
49	485	48	470
54	590	48	470
51,5	560	49	485
MÉDIA	548,0769231	MÉDIA	457,962963

Fonte: Arquivo pessoal

6 CONCLUSÃO

Partindo das análises propostas nesta pesquisa experimental, temos uma relação estabelecida entre o valor de energia de soldagem aplicado com os resultados obtidos em ensaios mecânicos que foram realizados nos corpos de prova retirados dos conjuntos soldados. Essa relação se mostrou forte na comparação entre as curvas de dureza dos experimentos (Gráfico 10), embora ainda haja uma diferenciação do nível de dureza dessas curvas, resultado esse também observado na Tabela 3. As médias de resistência a tração obtidas foram maiores na soldagem com processo MIG, o processo SAW obteve resultados comparados relativos a resistência a tração 15% menores.

Essa pesquisa indica que existe a relação imaginada que fundamentou o experimento, porém se faz necessário a partir deste momento, novos estudos que possibilitem o alcance de uma relação mais correta entre o valor de energia de soldagem aplicada entre os processos e suas propriedades mecânicas.

Ainda se faz advertência ao processo de soldagem quanto sua aplicação, já que houve faltas de fusão. Em um próximo estudo se recomenda qualificação dos profissionais operadores dos equipamentos.

REFERÊNCIAS

Annual Book of ASTM Standards, Vol. 01 e 02. Disponível em:<<http://astm.org>> Acesso em 25 de maio de 2019

Annual Book of ASTM Standards, Vol. 03. Disponível em:<<http://astm.org>> Acesso em 29 de maio de 2019

Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04 e 05. Disponível em:<<http://astm.org>> Acesso em 02 de junho de 2019

ARCO SUBMERSO. Disponível em:<https://www.esab.com.br/br/pt/education/blog/processo_soldagem_arco_submerso.cfm> Acesso em 11 de maio de 2019

Catálogo API de materiais. Disponível em:< <https://www.api5lx.com/api5lx-grades/api-5l-x65.php>> Acesso em 10 de maio de 2019

ENSAIOS MECÂNICOS. Disponível em:<<https://biopdi.com.br/artigos/ensaio-de-dobramento>> Acesso em 13 de maio de 2019

ENERGIA DE SOLDAGEM. Disponível em:<<http://infosolda.com.br/wp-content/uploads/Downloads/Artigos/metall/energia-de-soldagem.pdf>> Acesso em 12 de maio de 2019

PAVANATI, Henrique Cezar. Metalografia. Disponível em:<<http://pavanati.com.br/doc/Teoria%20Basica%20de%20Metalografia.pdf>> Acesso em 13 de maio de 2019

PALADY, Paul. FMEA: Análise dos Modos de Falha e Efeitos: prevenindo e prevenindo problemas antes que ocorram. São Paulo: Imam, 1997. 270 p.

UM ESTUDO DA EFICIÊNCIA E PRODUTIVIDADE DOS PRINCIPAIS PROCESSOS DE SOLDAGEM A ARCO. Disponível em:<<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/95699/298665.pdf?sequence=1&isAllowed=y>> Acesso em 10 de maio de 2019