

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO DE ENGENHARIAS DA MOBILIDADE
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA NAVAL

ANNA LOUISE VOIGT

**DESENVOLVIMENTO E ANÁLISE PRELIMINAR DE TECNOLOGIA PARA
SOLDAGEM SAW COM PULSAÇÃO ULTRASSÔNICA DA CORRENTE**

Joinville, 2015

Anna Louise Voigt

**DESENVOLVIMENTO E ANÁLISE PRELIMINAR DE TECNOLOGIA PARA
SOLDAGEM SAW COM PULSAÇÃO ULTRASSÔNICA DA CORRENTE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Naval no curso de Engenharia Naval da Universidade Federal de Santa Catarina, Campus de Joinville.

Orientador: Prof. Dr. Tiago Vieira da Cunha

Joinville, 2015

AGRADECIMENTOS

Muitas são as pessoas que passaram pela minha vida nesses anos de graduação, que contribuíram para a minha formação acadêmica e pessoal. Em especial, agradeço a Deus pelo dom da vida, por me guiar, proteger e por me conceder a família que tenho, especialmente, pelos meus pais Jane e Dirson Voigt. Obrigada por todo o amor, incentivo e apoio durante esses vinte e três anos.

Ao meu irmão Gustavo, pelo carinho e parceria. Igualmente a meu companheiro Josias Sommer, pela compreensão nos momentos em que estive ausente e pela alegria que tenho na sua presença. À minha segunda família, Margarete, Nelson e Jonas, que me acolheram tão bem, meu sincero obrigado.

Ao meu orientador Tiago Vieira da Cunha pela paciência e dedicação nesses três anos de convívio e aprendizado. Espero que a parceria permaneça e que a soldagem continue nos unindo.

A todos os professores da UFSC Joinville, em especial àqueles que fizeram parte da minha formação, pelo conhecimento adquirido e oportunidades. Aos professores Calil, Sacchelli e Cristiano, por todo incentivo e confiança.

A todos os meus colegas do ISI Laser e ISI Sistemas de Manufatura, em especial à Ivonete, Bruno, Gabriel e Vagner pelo auxílio e apoio nos ensaios do presente trabalho. Aos diretores Zanatta e Edson, pelas oportunidades e aprendizado.

A todos os amigos que fiz na universidade, espero reencontrá-los em breve. Aos colegas do PET e do LLP. Zucco, Janaína, Fredi e Rudimar, por todas as conversas, risadas e companhia. Aos meus amigos da JELP, só tenho motivos para me alegrar por tê-los comigo! Em especial, Andréa, Laisa, Camila, Fernanda, Gabriela, Anne, Cissa, Gehrmann e Kruger, obrigada por todos os momentos vivenciados.

RESUMO

A soldagem a arco submerso apresenta-se como um processo adequado para a aplicação em grande escala na indústria de construção naval devido à possibilidade de soldagem com elevada densidade de corrente, sendo aplicável para grandes espessuras com altas taxas de deposição. O presente trabalho propõe a aplicação da técnica de excitação ultrassônica do arco no processo SAW, com o intuito de analisar a influência dos principais parâmetros associados a pulsação da corrente sobre os cordões de solda, como a frequência e a amplitude da corrente de excitação ultrassônica. Para tanto, foi desenvolvida uma bancada experimental constituída por uma fonte convencional de soldagem, uma outra fonte capaz de pulsar a corrente com frequência de pulsação ultrassônica, um sistema completo de aquisição de dados, um dispositivo mecanizado de deslocamento de tocha, um sistema de alimentação de arame e um cabeçote de soldagem SAW. Este foi desenvolvido e construído de modo a permitir a realização de ensaios experimentais. Com a bancada assim composta, foram realizados cordões de solda que permitiram analisar os efeitos da aplicação da técnica de excitação ultrassônica do arco na soldagem a arco submerso. Foram empregadas duas amplitudes de corrente de excitação ultrassônica, 25 A e 50 A, cada qual em três frequências de pulsação diferentes, 20 kHz, 50 kHz e 80 kHz. A partir de macrografias foram realizadas análises dimensionais do cordão com foco na largura, penetração e área fundida, assim como a área da zona afetada pelo calor (ZAC). Como resultado, contrariando as informações disponíveis na literatura, não foi possível identificar alterações consideráveis na geometria do cordão de solda, assim como, na ZAC que pudessem ser atribuídas à pulsação da corrente.

Palavras-chave: soldagem, arco submerso, excitação ultrassônica do arco

ABSTRACT

The submerged arc welding is presented as a desirable process for large-scale application in the shipbuilding industry due to the possibility of welding with high current density being applicable for large thicknesses with high deposition rates. This paper proposes the application of arc ultrasonic excitation in the SAW process, in order to evaluate the influence of the main parameters associated with pulse current on weld beads, such as the frequency and amplitude of the ultrasonic excitation current. For this purpose, a test rig comprising a conventional welding source has been developed, another capable of pulsing source current with ultrasonic pulse rate, a complete system of data acquisition, a mechanized device torch displacement, a feeding system wire and SAW welding head. This was developed and constructed to allow the conducting experimental tests. With so composed bench, weld beads were performed that allowed to analyze the effects of the application of ultrasonic excitation technique of arc welding in submerged arc. Were used two current amplitudes of ultrasonic excitation 25 A and 50 A, each at three different pulse frequencies, 20 kHz, 50 kHz and 80 kHz. From macrographs dimensional analyzes were performed focusing on the bead width, penetration and molten area as the area of the heat affected zone (HAZ). As a result, contrary to the information available in the literature, not possible to identify significant changes in the geometry of the weld bead, as well as the HAZ that could be attributed to the pulse of current.

Keywords: welding, submerged arc welding, ultrasonic current excitation

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Esquema da excitação do arco de soldagem | 18 |
| Figura 2 - Cordões feitos pelo processo TIG..... | 18 |
| Figura 3 - Microscopia eletrônica de varredura da zona temperada | 20 |
| Figura 4 - Cordões com diferentes frequências de excitação da corrente | 21 |
| Figura 5 - Projeto do dispositivo no software SolidWorks | 23 |
| Figura 6 - Detalhe da construção do suporte para a bobina | 24 |
| Figura 7 - Projeto do suporte para o sistema tracionador-tocha..... | 25 |
| Figura 8 - Ilustração do isolamento elétrico do conjunto | 26 |
| Figura 9 – Ilustração do isolamento elétrico do tracionador | 27 |
| Figura 10 - Ângulo de empilhamento do fluxo AWS F7P6-EM12K | 28 |
| Figura 11 - Tubo corrugado e acoplamento tubo-reservatório | 29 |
| Figura 12 - Peças construídas..... | 30 |
| Figura 13 – Cabeçote construído | 31 |
| Figura 14 - Bancada de ensaios..... | 33 |
| Figura 15 - Posição de onde foram retiradas as amostras para macrografia..... | 36 |
| Figura 16 - Nomenclatura das áreas do cordão | 37 |
| Figura 17 - Nomenclatura adotada nas medidas lineares do cordão e da ZAC | 38 |
| Figura 18 - Macrografias dos cordões..... | 39 |
| Figura 19 - Gráficos de corrente da fonte ultrassônica..... | 41 |
| Figura 20 – Valor médio de penetração obtido nos cordões de solda realizados | 42 |
| Figura 21 - Valor médio de reforço obtido nos cordões de solda realizados | 43 |
| Figura 22 - Valor médio de largura obtido nos cordões de solda realizados | 44 |
| Figura 23 - Valor médio de área fundida obtido nos cordões de solda realizados | 45 |
| Figura 24 - Valor médio de área da ZAC obtido nos cordões de solda realizados..... | 46 |
| Figura 25 - Ensaio de microdureza realizado na amostra com a combinação 50A-80kHz | 47 |
| Figura 26 - Perfis de microdureza obtidos..... | 48 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 - Composição do arame EM12K e aço ASTM A36 | 34 |
| Tabela 2 - Parâmetros fixos nos ensaios | 35 |
| Tabela 3 - Parâmetros ajustados de cada ensaio | 36 |
| Tabela 4 - Variáveis medidas | 40 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A_{FUN} – Área fundida

ASTM - American Society for Testing and Materials

AWS – American Welding Society

A_{ZAC} – Área da zona afetada pelo calor

DBCP – Distância bico de contato-peça

IMC - Empresa que atua no ramo da soldagem desde 1993

LLP – Laboratório de Ligações Permanentes

L_{ZAC} – Largura da zona afetada pelo calor

L_{ZF} – Largura da zona fundida

PVC - Policloreto de polivinila

P_{ZF} – Penetração da zona fundida

R – Reforço do cordão

SAE - Society of Automotive Engineers

SAW – Submerged Arc Welding

TIG - Tungsten Inert Gas

UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina

ZAC – Zona afetada pelo calor

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO | 10 |
| 1.2. OBJETIVOS..... | 12 |
| 1.2.1 Objetivo Geral | 12 |
| 1.2.2 Objetivos Específicos..... | 12 |
| 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA | 14 |
| 2.1 SOLDAGEM A ARCO SUBMERSO..... | 15 |
| 2.2 TÉCNICA DE EXCITAÇÃO ULTRASSÔNICA DO ARCO | 17 |
| 3 METODOLOGIA | 22 |
| 3.1 DESENVOLVIMENTO DO CABEÇOTE DE SOLDAGEM ARCO SUBMERSO | 22 |
| 3.2 BANCADA DE ENSAIOS | 32 |
| 3.3 MATERIAIS E MÉTODOS | 34 |
| 3.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS..... | 36 |
| 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES | 39 |
| 5 CONCLUSÕES | 49 |
| 6 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS | 50 |
| REFERÊNCIAS..... | 51 |

1 INTRODUÇÃO

A soldagem na construção naval é um fator chave e a principal forma de união metálica empregada. Seu impacto no custo de produção e qualidade é direto e representa cerca de 20% a 30% das horas de produção, além de 10% do custo total da embarcação (PILIPENKO, 2001). Devido às peças de trabalho apresentarem grandes espessuras, uma considerável quantidade de material deve ser depositada nas juntas a serem soldadas. Considerando o exposto e a capacidade de utilização de altos valores de corrente do processo arco submerso, elevadas taxas de deposição e menor exigência do soldador, o mesmo apresenta-se naturalmente como ótima opção a ser empregada na indústria naval (CHANDEL et al, 1997). Neste, o arco é estabelecido entre a ponta do arame e a peça de trabalho sob uma camada de material mineral granulado conhecido por fluxo para soldagem.

Com o objetivo de aumentar a produtividade e/ou de melhorar os aspectos metalúrgicos do cordão de solda produzido, ao longo das últimas décadas diversas técnicas têm sido estudadas e desenvolvidas. Neste contexto, a introdução de energia ultrassônica na soldagem a arco tem atraído muitas atenções em função dos resultados que tem sido apresentado na literatura. Nesta técnica, proposta por Wu *et al* (1999) no final da década de 1990, o arco atua não somente como fonte de calor mas também como um mecanismo de emissão ultrassônica. Para tanto, são empregadas duas fontes em paralelo, sendo uma fonte convencional e outra fonte dotada de características dinâmicas que permita pulsar a corrente em frequências superiores a 20 kHz.

É possível encontrar na literatura a aplicação deste método em processos como plasma *melt-in* (LEI *et al*, 2011), plasma *key-hole* (LEI *et al*, 2012), TIG (ZHOU *et al*, 2010); eletrodo revestido (HE *et al*, 2006), inclusive no arco submerso. Em relação a este último, resultados como redução do tamanho de grão e aumento da tenacidade na zona fundida foram obtidos em estudos realizados por Zhang *et al* (2001), efeitos estes que evidenciam o potencial desta técnica. Os autores observam ainda um aumento expressivo no tamanho da zona afetada pelo calor, todavia, com melhora nas suas propriedades. Em razão da falta de estudos sobre esta técnica no contexto nacional e a disponibilidade de infraestrutura devido ao trabalho realizado

recentemente por Cunha (2013), este trabalho se propõe a desenvolver a infraestrutura necessária que permita realizar a avaliação preliminar acerca da aplicação da técnica de excitação ultrassônica do arco no processo SAW. Assim, espera-se obter um melhor entendimento dos possíveis efeitos proporcionados pela presente técnica. Já que, por se tratar de uma técnica relativamente nova, desenvolvida em pouco mais de uma década (WU *et al*,1999), há ainda uma certa carência de estudos que permitam compreender, de fato, as implicações quanto a sua utilização, apesar de já ser possível encontrar na literatura alguns trabalhos cujos resultados evidenciam, conforme citado anteriormente, o seu potencial. Contudo, os trabalhos encontrados são de origem chinesa, fato este que dificulta o conhecimento integral dos efeitos da aplicação da técnica. O presente trabalho visa, portanto, desenvolver estudos inéditos no âmbito nacional no que diz respeito à aplicação da técnica de excitação ultrassônica do arco no processo arco submerso, visto que o mesmo se trata de um processo amplamente utilizado na indústria naval e de estudo relevante para o contexto do curso.

A fim de possibilitar a aplicação desta técnica, estruturou-se uma bancada experimental composta por duas fontes conectadas em paralelo, uma fonte convencional e outra fonte capaz de pulsar a corrente em uma frequência ultrassônica, além de sistemas de aquisição de dados, sistema de alimentação de arame, sistema de deslocamento mecanizado de tocha de soldagem e um cabeçote de soldagem a arco submerso. Esse último foi desenvolvido e construído com características que permitiram o acoplamento do mesmo ao sistema de deslocamento de tocha comercial presente no laboratório e a conexão das duas fontes em paralelo. Para o projeto foram ainda considerados requisitos como a capacidade de suportar a bobina de arame, o tracionador e o acoplamento da tocha de soldagem com possibilidade de deslocamento vertical da mesma para o ajuste da distância entre o bico de contato-peça (DBCP). De posse da bancada foram realizados ensaios com a variação sistemática da amplitude de corrente e frequência de pulsação da fonte ultrassônica. Realizou-se ainda um cordão sem excitação ultrassônica para viabilizar a análise dos efeitos da aplicação da técnica em comparação ao SAW convencional. As análises foram realizadas com o intuito de observar as mudanças do ponto de vista de aspectos dimensionais da zona fundida

e da ZAC. Além disso, foram também realizadas análises do perfil de microdureza da região soldada.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Com base no exposto acima, tem-se, portanto, como objetivo geral deste trabalho desenvolver uma bancada de soldagem para arco submerso com pulsação ultrassônica da corrente e avaliar os potenciais efeitos geométricos relativos à aplicação da citada técnica neste processo.

1.2.2 Objetivos Específicos

A fim de atingir, de forma plena, o nível de conhecimento que se espera obter com a realização deste trabalho, o seu objetivo geral desdobra-se nos seguintes objetivos específicos:

- Desenvolver um cabeçote de soldagem arco submerso que permita a aplicação da técnica de excitação do arco;
- Conceber uma bancada de ensaios para a realização das soldagens dos corpos de prova;
- Realizar a soldagem com o processo arco submerso, empregando a técnica de excitação ultrassônica do arco;
- Avaliar os efeitos obtidos com aplicação da técnica de excitação ultrassônica aplicada ao processo de soldagem arco submerso em relação à geometria do cordão;

- Avaliar os efeitos obtidos com aplicação da técnica de excitação ultrassônica aplicada ao processo de soldagem arco submerso em relação à geometria da ZAC;
- Avaliar os efeitos obtidos com aplicação da técnica de excitação ultrassônica aplicada ao processo de soldagem arco submerso em relação ao perfil de microdureza da região soldada.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Na soldagem, o arco voltaico é a fonte de calor mais utilizada para a fusão de materiais metálicos (MARQUES *et al*, 2005), pois possui uma adequada concentração de energia a fim de promover a fusão localizada do metal a ser soldado, é de fácil controle e possui custo de equipamento relativamente baixo. O arco voltaico consiste de uma descarga elétrica, sustentada por um gás ionizado - o plasma, a alta temperatura, capaz de produzir energia suficiente para a fusão da grande maioria dos metais e, assim, promover a sua união.

Diversos são os fatores que caracterizam uma junta soldada, como as características do metal de base, o processo e os parâmetros de soldagem utilizados na confecção desta união. No que diz respeito às características do metal de base, podemos citar sua composição química, condutividade térmica e os aspectos geométricos da peça de trabalho, que juntas poderão, por exemplo, influenciar significativamente nas alterações microestruturais em diversas regiões da junta. Além dos aspectos microestruturais associados à junta, que naturalmente possui influência direta nas características mecânicas da união, tem-se também a geometria do cordão de solda. Este, de fato, deve possuir dimensões que atendam aos requisitos do projeto de engenharia do componente em produção. Neste sentido, é comum encontrar em normas de soldagem orientações acerca de suas dimensões, principalmente, aquelas associadas à sua penetração, já que a sua insuficiência pode causar sérios danos ao componente. Ainda, especificamente, em relação à penetração, esta é uma dimensão do cordão de solda de especial interesse em trabalhos científicos. O mesmo se deve não só ao aspecto qualidade, conforme abordado anteriormente, mas, a perspectiva de ganhos em produtividade ao ser considerado a possibilidade de obtenção de cordões de solda com mesma penetração, porém, em maiores velocidades de soldagem. Outra dimensão de especial interesse é a largura do cordão, visto que a mesma também possui impacto no resultado da união obtida, sobretudo, em juntas com chanfro onde é necessário o preenchimento do mesmo. Não obstante, a largura é um aspecto a ser observado, também, em situações onde se busca o revestimento de uma superfície, seja nos casos de reparo ou de deposição de uma camada com propriedades específicas.

Nesta situação, uma maior largura e uma menor penetração associada a um valor de reforço significativo, resultando assim em uma menor diluição do metal de adição no metal de base, é apropriado visto que se faz necessário um menor número de passes para o revestimento.

2.1 SOLDAGEM A ARCO SUBMERSO

Na soldagem a arco submerso (SAW), o arco é estabelecido entre o eletrodo nu e a peça de trabalho. Este arco ocorre sob uma camada de material granulado, daí o nome de arco submerso. Este material granulado é chamado de fluxo e possibilita entre outras coisas, a proteção da poça de fusão contra a contaminação atmosférica. Elementos de liga metálica no fluxo podem estar presentes a fim de melhorar a resistência mecânica e a tenacidade à fratura da solda depositada. O eletrodo pode-se apresentar em forma de arame ou fita e é continuamente alimentado por um tracionador semelhante ao que é empregado no processo MIG/MAG.

Em virtude do processo SAW ser empregado na união de grandes espessuras, o mesmo é utilizado principalmente na construção naval, fabricação de tubos e vasos de pressão. Além da união, este processo também pode ser utilizado em aplicações de revestimento de peças. Neste caso, o material de adição geralmente tem forma de fita, com uma seção de maior largura em relação à sua espessura. Como resultado, obtém-se uma série de pequenos arcos voltaicos que juntos produzem um cordão de largura considerável, mas, com relativa baixa penetração e diluição. Neste tipo de aplicação, o processo SAW é frequentemente empregado no depósito de aços inoxidáveis ou resistentes ao desgaste (por exemplo, rolos de aço para lingotamento contínuo, vasos de pressão, rodas de vagões e equipamentos para mineração, processamento de minério, construção e agricultura) (HANDBOOK, 1993).

O conhecimento de como os parâmetros do processo de soldagem afetam a geometria do cordão de solda é de suma importância, pois possibilita, por exemplo, a correta seleção dos parâmetros de modo a produzir um cordão de solda com uma

dada geometria que atenda ao projeto de engenharia. Isto torna-se principalmente útil quando da utilização de sistemas de soldagem automatizados, em que, as vezes, o próprio sistema é capaz de definir os parâmetros de soldagem de forma adequada para uma dada aplicação, resultando em um processo de alta produtividade (SHEN *et al*, 2012).

Dentre os trabalhos encontrados na literatura que abordam a influência dos parâmetros de soldagem nos aspectos dimensionais do cordão de solda e da ZAC no processo arco submerso encontra-se o de Yang *et al* (1992, 1993). Estes autores realizaram uma série de ensaios com a variação sistemática de parâmetros como diâmetro do eletrodo, polaridade de soldagem, extensão livre do eletrodo, tensão de soldagem, corrente e velocidade de soldagem, tendo como metal de base o aço ASTM A36. Segundo seus resultados, para ambas polaridades, o reforço aumenta com o aumento da corrente de soldagem. Já em relação aos resultados obtidos para os eletrodos de 2,4, 3,2 e 4mm de diâmetro, para uma extensão de eletrodo de 76,2mm foi observado um maior valor de reforço do que com 25,4mm de extensão. Para a extensão de 25,4mm e eletrodos de 2,4 e 3,2mm de diâmetro, a largura foi superior ao obtido com a extensão de 76,2mm. Contudo, para o diâmetro de 4mm as larguras em ambas as extensões analisadas foram similares. Com o aumento da tensão de soldagem, para uma mesma energia de soldagem obtida através do ajuste da velocidade de soldagem, obteve-se um aumento da largura e diminuição do reforço. Os autores observaram ainda que para a polaridade positiva, os valores de largura eram superiores aos obtidos com polaridade negativa.

O efeito da corrente, a polaridade, do diâmetro e da extensão do eletrodo sobre a taxa de fusão, reforço, largura e penetração do cordão feito pelo processo SAW também foram analisadas por Chandel *et al* (1997). Esses autores concluíram, por exemplo, que a taxa de fusão aumenta com o aumento da corrente de soldagem, com o uso da polaridade do eletrodo negativa, com a diminuição do diâmetro do eletrodo e o aumento da extensão do eletrodo.

Para a utilização do processo SAW em revestimento de um aço IS2062 (equivalente a uma aço ASTM A36) com aço inoxidável 306L, Murugan *et al* (1993) investigaram a penetração, reforço, largura e diluição em função da velocidade de alimentação de arame, velocidade de soldagem e distância do bico de contato até a peça. Os autores observaram que a tensão de soldagem não possui significativo

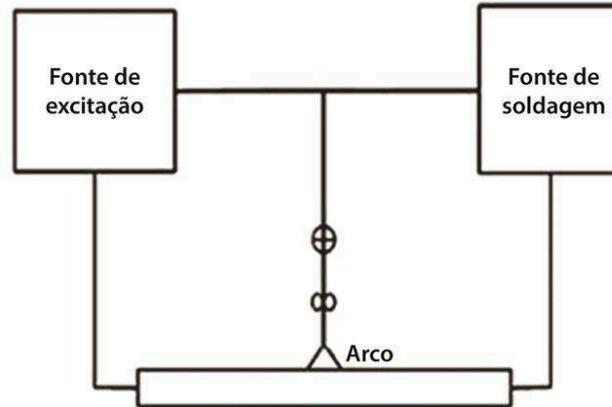
efeito sobre a penetração, mas com o aumento da tensão há um decréscimo no reforço e aumento da largura do cordão. Outro resultado obtido foi o aumento da diluição, da penetração e do reforço com o aumento da taxa de alimentação de arame, bem como a diminuição da penetração e da diluição com o aumento da distância do bico de contato à peça.

Muitos dos resultados encontrados na literatura são decorrentes de a fonte utilizada no processo arco submerso ser do tipo tensão constante. Nesta, com o aumento da taxa de alimentação de arame, para manter a tensão no valor ajustado, é preciso uma maior taxa de fusão, fazendo com que a fonte forneça mais corrente para fundir uma maior quantidade de arame (auto ajuste do arco conhecido como controle interno). Logo, com o aumento da corrente de soldagem há, na normalmente, um conseqüente aumento da penetração. Em contrapartida, ao aumentar a distância do bico de contato e a peça, uma parcela maior do eletrodo estará sendo percorrida por corrente elétrica e, conseqüentemente, e aquecida por efeito Joule. Logo, a corrente necessária para fundir o metal de adição será inferior para uma mesma tensão, portanto a penetração diminui e, por isso, normalmente aumenta-se o reforço.

2.2 TÉCNICA DE EXCITAÇÃO ULTRASSÔNICA DO ARCO

Ao longo das últimas décadas, diversas técnicas têm sido estudadas com o intuito de melhorar a produtividade e a qualidade dos cordões de solda produzidos pelos mais diversos processos de soldagem a arco. Neste contexto, no final da década de 1990, WU *et al* (1999) propuseram uma nova técnica de soldagem. Trata-se do arco com excitação ultrassônica da corrente, onde o arco atua tanto como fonte de calor, como também, um mecanismo de emissão de ultrassom. O arco com excitação ultrassônica é obtido através de uma corrente principal de soldagem e uma corrente pulsada com frequência de pulsação superior a 20 kHz. Para tanto são conectadas duas fontes em paralelo (Figura 1) sendo a fonte convencional responsável pelo fornecimento da corrente principal de soldagem e uma fonte de excitação capaz de pulsar a corrente em frequências ultrassônicas.

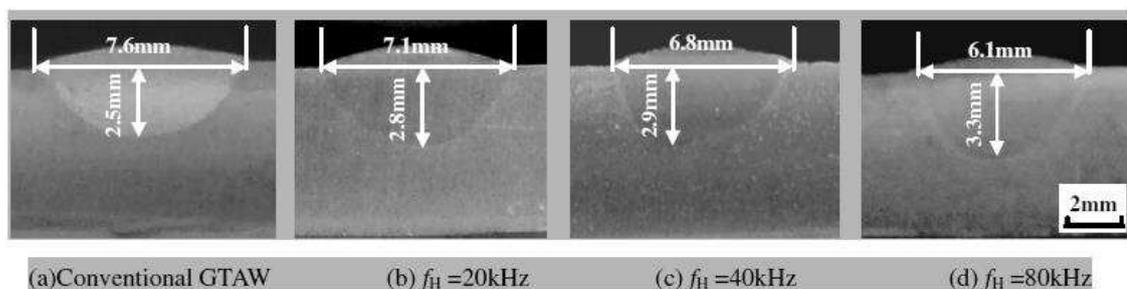
Figura 1- Esquema da excitação do arco de soldagem



Fonte: Lei *et al* (2011)

Quanto aos efeitos atribuídos à excitação ultrassônica no arco voltaico, destaca-se a constrição do arco. A mesma é observada não somente para frequências ultrassônicas como também ao utilizar-se frequências superiores a 5 kHz, segundo Cook e Eassa (1985). Esses autores apontam que o arco torna-se direcional, ou mais rígido, e exerce uma maior pressão sobre a poça de fusão. Através de imagens dos experimentos de Qi *et al* (2012), é possível observar que, para a mesma energia de soldagem no processo TIG, a largura do arco próximo a peça de trabalho sem ultrassom é de 12 mm, enquanto que empregando excitação ultrassônica foi de 8 mm e 6,7 mm para frequências de 20 kHz e 80 kHz, respectivamente. Em decorrência da constrição do arco, os autores obtiveram soldas de menor largura e maior penetração para os cordões feitos com excitação ultrassônica (Figura 2).

Figura 2 - Cordões feitos pelo processo TIG



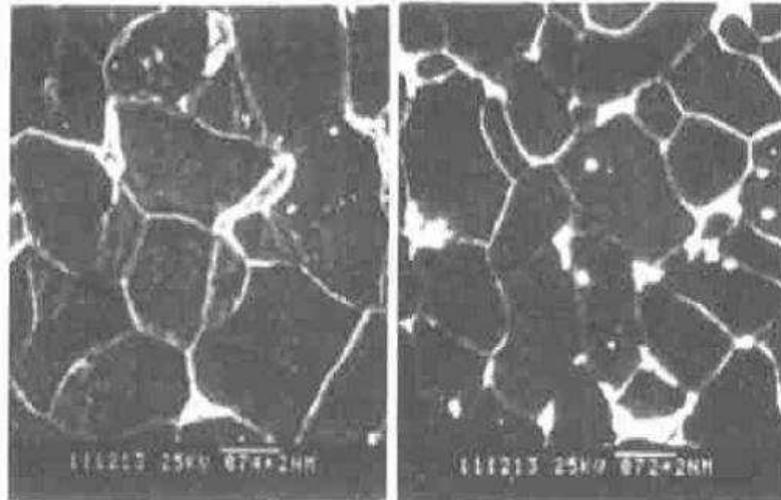
Fonte: Qi *et al* (2012)

Segundo Zhang *et al* (2000), o potencial da aplicação desta técnica pode ser observado nos resultados obtidos em diversos processos, sobretudo, nas frequências onde a excitação externa e a poça fundida entram em ressonância. Os autores investigaram o efeito da excitação ultrassônica do arco na faixa de frequência de 10 a 100 kHz e observaram que apenas nas frequências de 30, 50 e 80 kHz ocorreu um efetivo refino de grão em um aço de baixo teor de carbono. Lei *et al* (2012) estudaram a ressonância entre a poça de fusão e o arco excitado na faixa de 15kHz a 72kHz no processo plasma *keyhole*, através do método de elementos finitos. Através de experimentos os autores confirmaram que nas frequências de ressonância o efeito da aplicação da excitação ultrassônica é mais significativo em termos de redução do tamanho de grão e homogeneidade da microestrutura. Esses resultados vão de encontro aos obtidos por Lei *et al* (2011) para o processo plasma *melt-in*, que ao analisar os efeitos da técnica nas frequências de 30, 50 e 70 kHz, observam que o refino de grão foi mais evidente para as frequências de 30 e 50 kHz. Nos resultados obtidos em ensaios de resistência a tração, em relação ao plasma convencional (valor obtido no metal de solda de 203 MPa), observa-se um aumento mais expressivo para as frequências de 30 e 50 kHz (valores obtidos de 218 e 225 MPa respectivamente) do que a frequência de 70 kHz (210 MPa). No processo TIG, Zhou *et al* (2010) obtiveram uma redução de poros na junta e uma microestrutura mais refinada ao utilizar a pulsação ultrassônica do arco e obtenção de um valor superior de resistência à tração para os cordões com excitação ultrassônica nos ensaios de tração. A microestrutura refinada também foi obtida para o processo eletrodo revestido (SMAW), onde observou-se o estreitamento da zona com grãos grosseiros (HE *et al*, 2006).

Melhoras na microestrutura podem ser obtidas com o emprego da técnica na soldagem arco submerso, conforme relatado por Yang *et al* (2006), em que, além do refino de grão, ensaios de impacto a baixa temperatura mostram que o arco excitado com ultrassom pode notavelmente melhorar a resistência ao impacto na zona fundida. Relativo a isto, Wu *et al* (2006) obtiveram uma melhora em torno de 50% tanto na zona fundida, quanto na ZAC, ao realizar ensaios de impacto a uma temperatura de -70°C nos corpos de prova soldados com frequência de pulsação de 50 kHz no processo SAW. Para o mesmo processo, Zhang *et al* (2001) também

relatam um refino de grão, além da redução em 50% do tamanho de grão na zona temperada se comparado ao ensaio sem arco ultrassônico (Figura 3).

Figura 3 - Microscopia eletrônica de varredura da ZAC-GG temperada



(a) Sem ultrassom

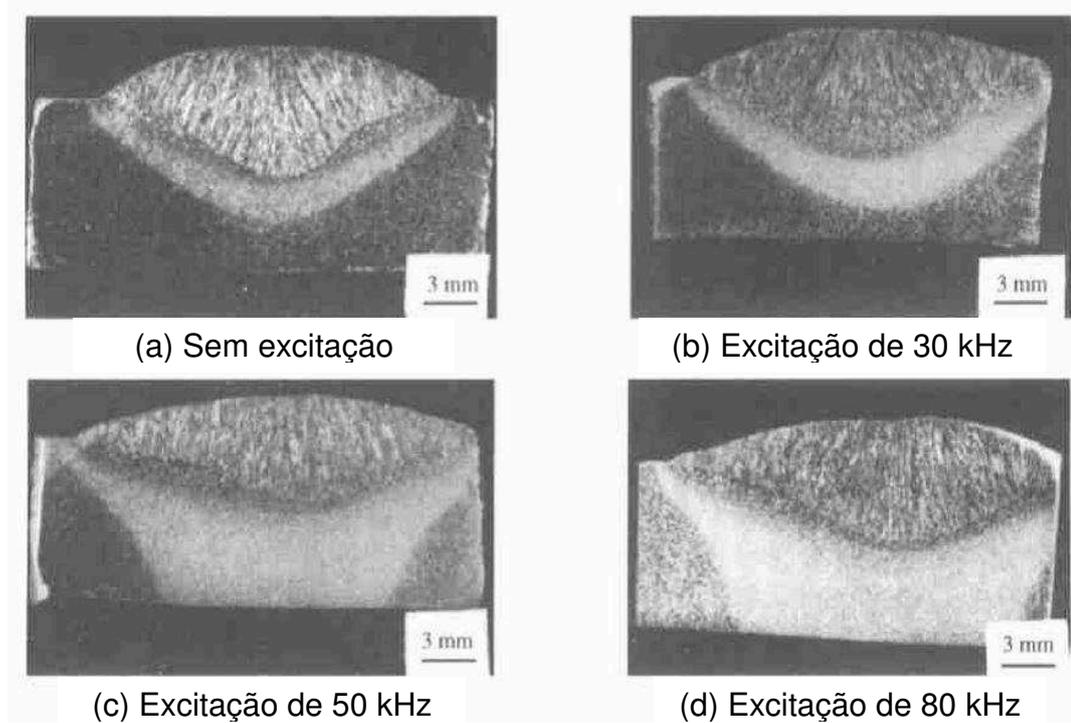
(b) Com arco ultrassônico

Fonte: Zhang *et al* (2001)

. Estes autores observaram que a microestrutura da zona fundida mudou consideravelmente de ferrita lamelar para acicular. Os cordões com excitação ultrassônica apresentaram mais ferrita acicular, enquanto que nos cordões sem excitação foi observada mais ferrita de placas laterais. Visto que a ferrita de placas laterais se forma em temperaturas superiores à ferrita acicular, os autores concluem que o arco com excitação ultrassônica acelera o resfriamento do metal na zona fundida e, conseqüentemente, acelerando a transferência de calor na ZAC. Segundo Zhang *et al* (2001), este comportamento é devido à vibração ultrassônica, pois o ultrassom se propaga na região da ZAC, que se expande e comprime periodicamente levando a mudança na densidade da matriz. Na compressão, a temperatura aumenta devido à diminuição do volume e o inverso ocorre na expansão. Na matriz, este gradiente de temperatura entre áreas em compressão e em expansão faz com que o calor transferido flua da área de maior para a de menor temperatura. Esse processo acelera a transferência de calor e altera a distribuição de temperatura e, segundo os autores, levando a um aumento do tamanho da ZAC. Em seus cordões, Zhang *et al* (2001) obtiveram um aumento expressivo da zona

afetada pelo calor (ZAC) com o aumento da frequência de excitação, conforme é mostrado na Figura 4, para uma corrente de soldagem de aproximadamente 500 A e uma tensão de 30 V.

Figura 4 - Cordões obtidos com diferentes frequências de excitação da corrente



Fonte: Zhang *et al* (2001)

3 METODOLOGIA

De modo a avaliar os efeitos da aplicação da técnica de excitação ultrassônica do arco no processo arco submerso, foram realizados cordões de solda de simples deposição sobre chapa (bead-on-plate). Para a realização dos ensaios, uma bancada foi concebida no Laboratório de Ligações Permanentes (LLP), situado no Campus da UFSC em Joinville.

O equipamento necessário para a execução do processo arco submerso convencional, conforme é frequentemente utilizado industrialmente, consiste, basicamente, de uma fonte de energia, tocha de soldagem, alimentador de arame, sistema de controle, dispositivo para alimentação do fluxo e cabos elétricos. Dispositivos auxiliares também se fazem necessários, como um dispositivo de deslocamento.

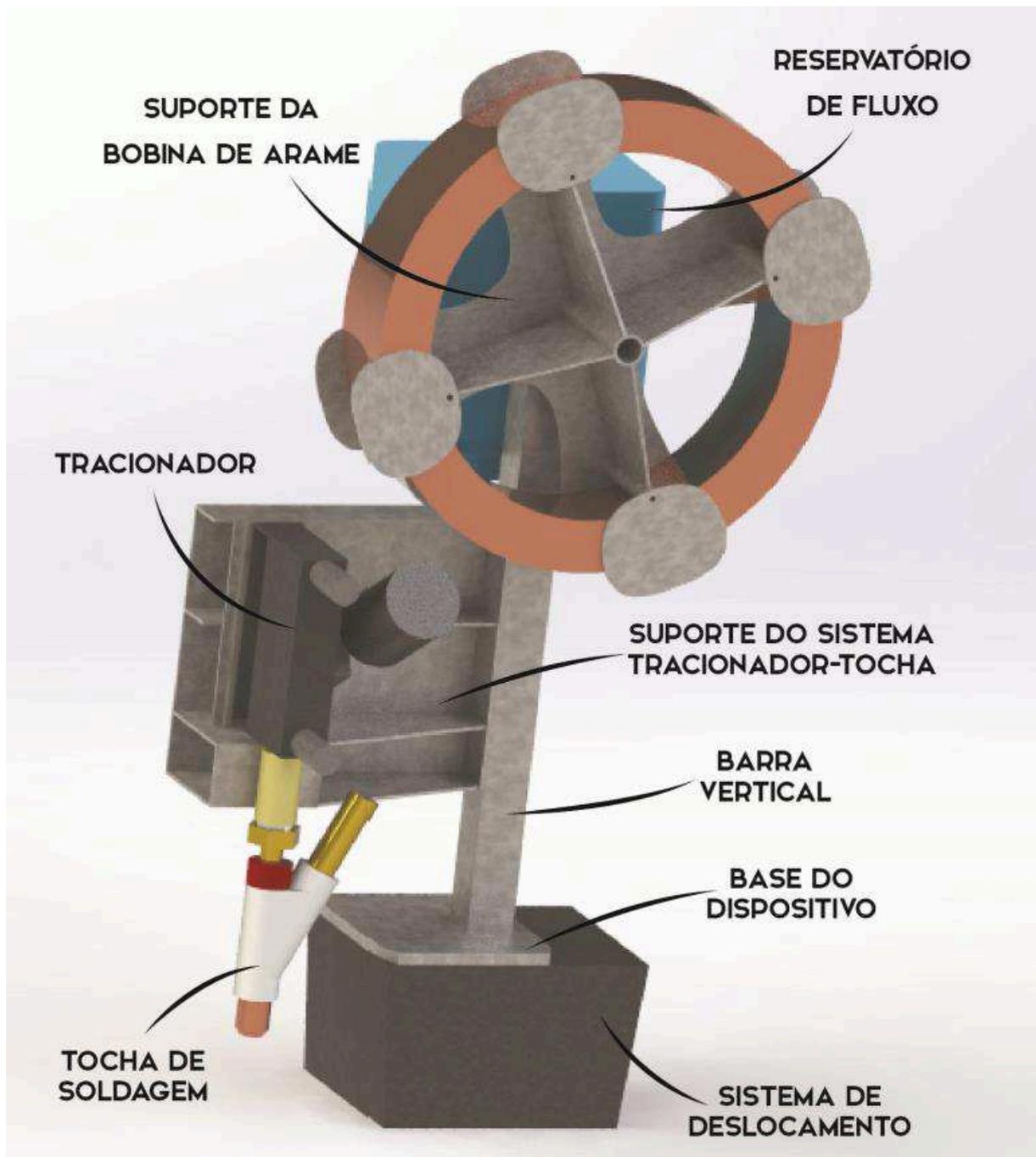
Para a aplicação da técnica de excitação ultrassônica do arco na soldagem arco submerso, além dos equipamentos básicos, faz-se necessária uma segunda fonte de energia, sendo esta responsável pela excitação do arco. A fonte em questão a ser utilizada neste trabalho foi desenvolvida por Cunha (2013), que avaliou os efeitos da excitação ultrassônica na soldagem TIG. Os demais itens necessários para o consubstanciamento da bancada em questão foram adquiridos com recursos oriundos do Programa de Educação Tutorial, cuja autora foi bolsista. Por fim, a bancada em questão foi concebida tendo como base os cabeçotes de soldagem disponíveis no mercado e as necessidades para a presente pesquisa.

3.1 DESENVOLVIMENTO DO CABEÇOTE DE SOLDAGEM ARCO SUBMERSO

Com o auxílio do software SolidWorks, foi projetado um dispositivo para ser acoplado ao sistema de deslocamento da tocha de soldagem presente no laboratório. Este dispositivo, de fato, constitui-se num cabeçote de soldagem para arco submerso, logo, como tal, o mesmo é composto por uma estrutura capaz de

comportar a bobina de arame, o tracionador de arame e permitir o posicionamento e fixação da tocha de soldagem bem como ser fixado ao supracitado sistema de deslocamento. Em virtude da bobina de arame adquirida necessitar um suporte para permitir o acoplamento ao cabeçote, desenvolveu-se um suporte para a bobina concomitantemente. A Figura 5 apresenta o dispositivo projetado.

Figura 5 - Projeto do dispositivo no software SolidWorks

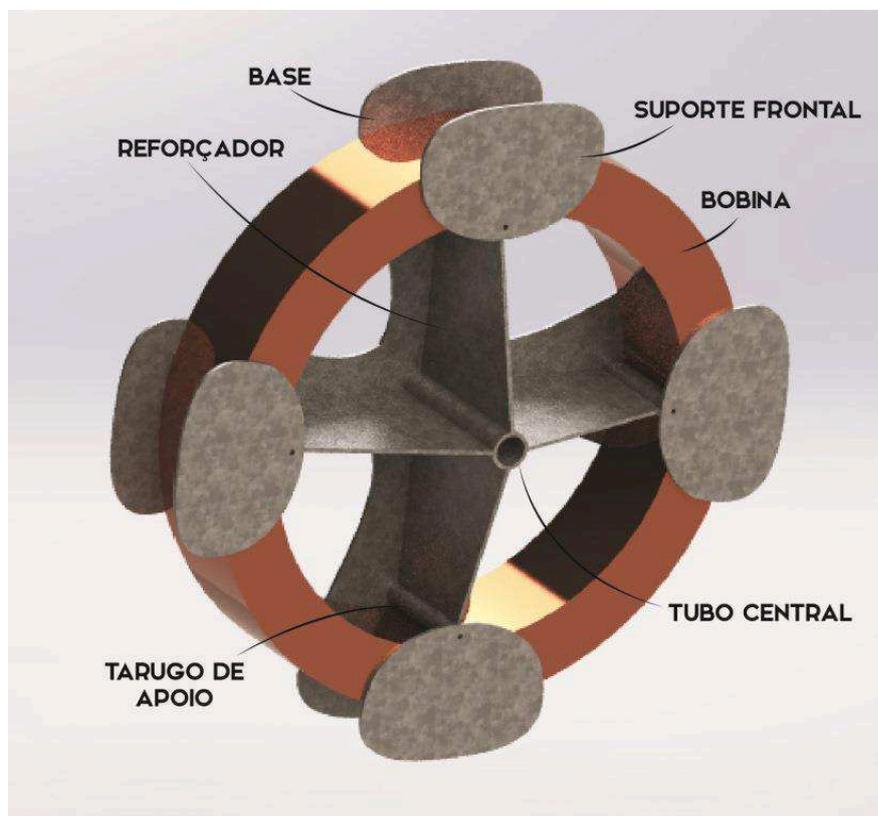


Fonte: Autor

Conforme pode ser visto o mesmo é constituído, basicamente, por um suporte para o sistema tracionador-tocha, um suporte para a bobina do arame, reservatório de fluxo, tudo isso montado sobre uma estrutura constituída por uma base e uma barra vertical.

Para o suporte da bobina do arame, foi identificada a necessidade da estrutura possuir rigidez suficiente para suportar a bobina de arame, cuja massa corresponde a 25kg na condição como adquirida. Assim, foi projetado um suporte composto por uma base de quatro pontas, enrijecida por quatro reforçadores soldados a mesma e ao tubo central (Figura 6). Para assegurar que a bobina não se soltasse da base durante a soldagem, foram projetados quatro suportes frontais presos por parafusos a pequenos tarugos de apoio fixos nas extremidades dos reforçadores, que podem ser rotacionados em direção ao centro de modo a permitir a instalação ou a retirada da bobina. Na Figura 6 apresenta os detalhes do suporte projetado.

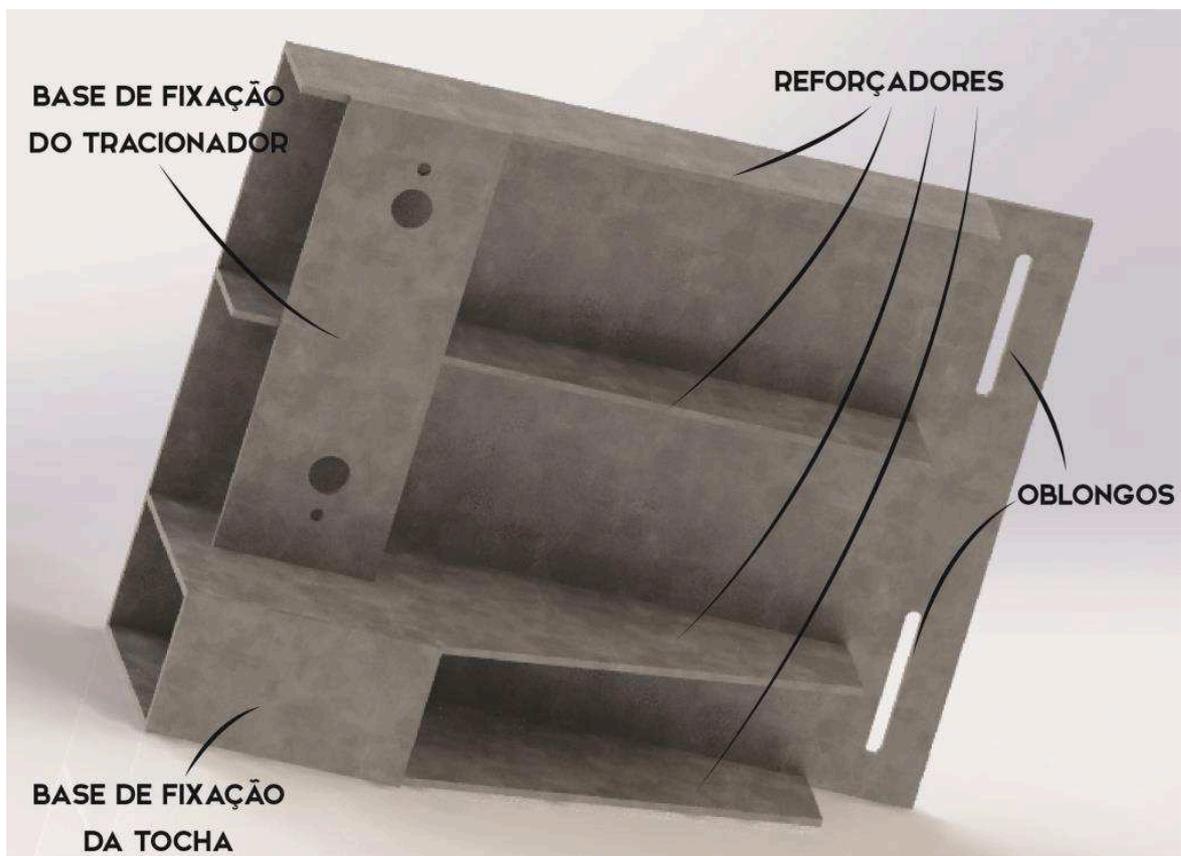
Figura 6 - Detalhe da construção do suporte para a bobina



Fonte: Autor

Visando garantir também a rigidez necessária para a estrutura (Figura 7) em que são fixadas a tocha de soldagem e o tracionador de arame, no seu projeto foram contemplados também reforçadores. Na fixação do suporte do sistema tracionador-tocha à barra vertical foram usinados oblongos de modo a possibilitar o deslocamento vertical de todo o conjunto e, assim, permitir o ajuste da distância entre a tocha de soldagem e a peça de trabalho.

Figura 7 - Projeto do suporte para o sistema tracionador-tocha

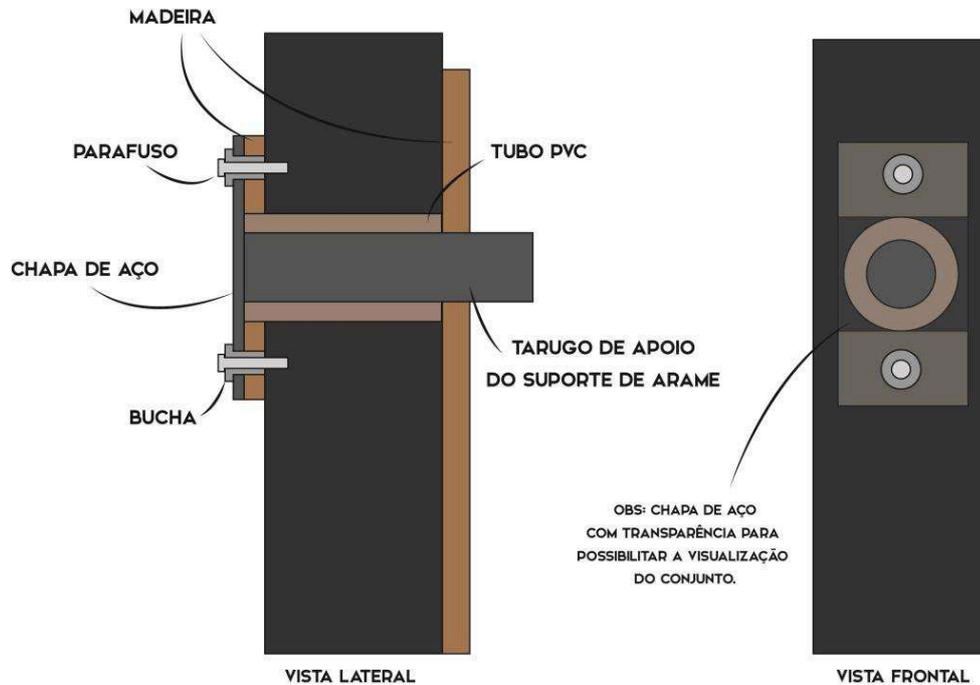


Fonte: Autor

De modo a evitar o desvio da corrente de soldagem pelo sistema de deslocamento de tocha, foi observada a necessidade de isolar eletricamente as partes em contato com a tocha de soldagem do restante do dispositivo. Deste modo, optou-se por isolar o suporte da bobina de arame da barra vertical mediante a colocação de buchas plásticas nos parafusos de fixação do tarugo de apoio do suporte de arame. Além disso, foram utilizadas peças de madeira em ambos os lados da barra vertical de modo a evitar o contato elétrico do conjunto de suporte de

arame, conforme mostra a Figura 8. Por fim, o tarugo de apoio do suporte da bobina de arame foi encoberto por um tubo de PVC.

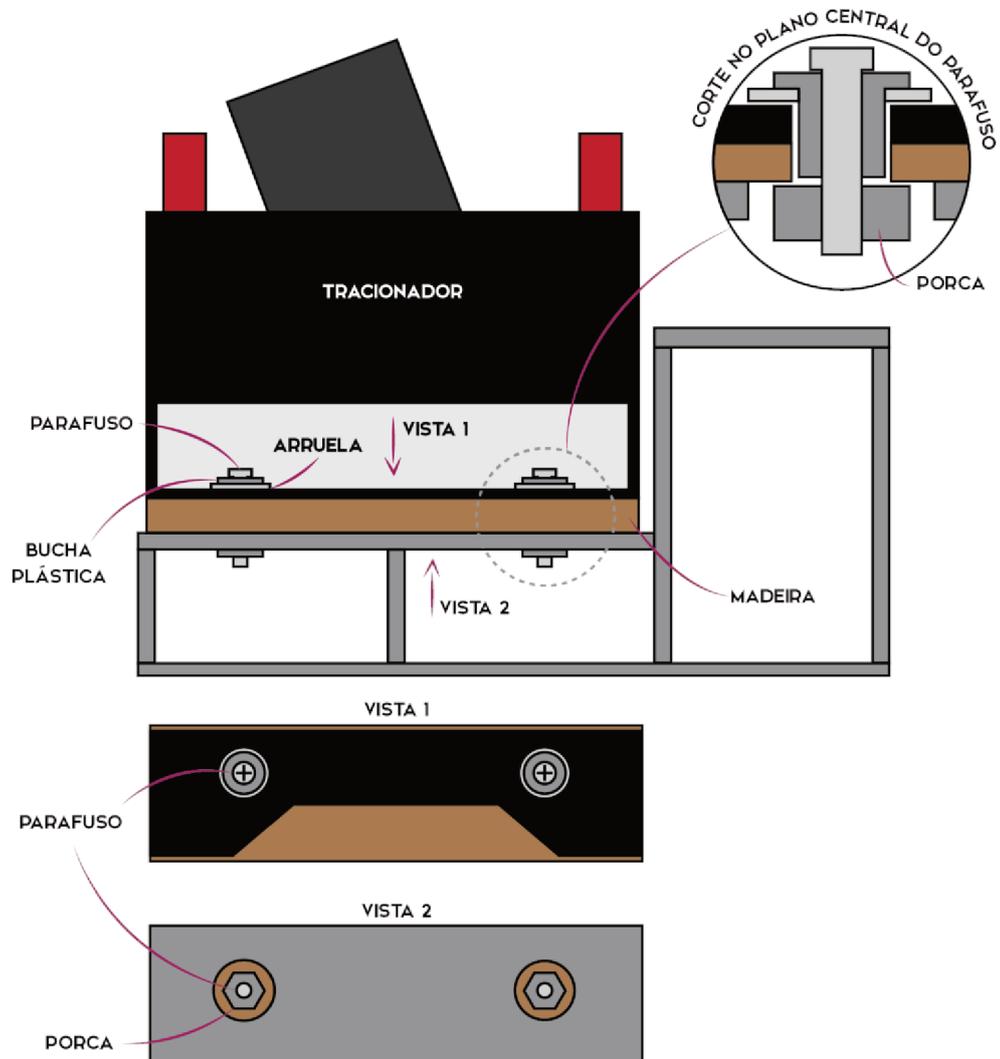
Figura 8 - Ilustração do isolamento elétrico do conjunto



Fonte: Autor

Além da bobina de arame outra parte do cabeçote precisou ser isolada. Trata-se do tracionador de arame, já que este se encontra naturalmente em contato elétrico com o arame. Para o isolamento do tracionador foi utilizada a mesma solução empregada no isolamento do suporte da bobina de arame (Figura 9). Foram utilizadas buchas plásticas para isolar o parafuso de fixação. De modo que a porca não tivesse contato com a estrutura metálica, foram feitos furos na chapa de base do tracionador. Entre a mesma e o tracionar foi posicionado uma peça de madeira para o isolamento.

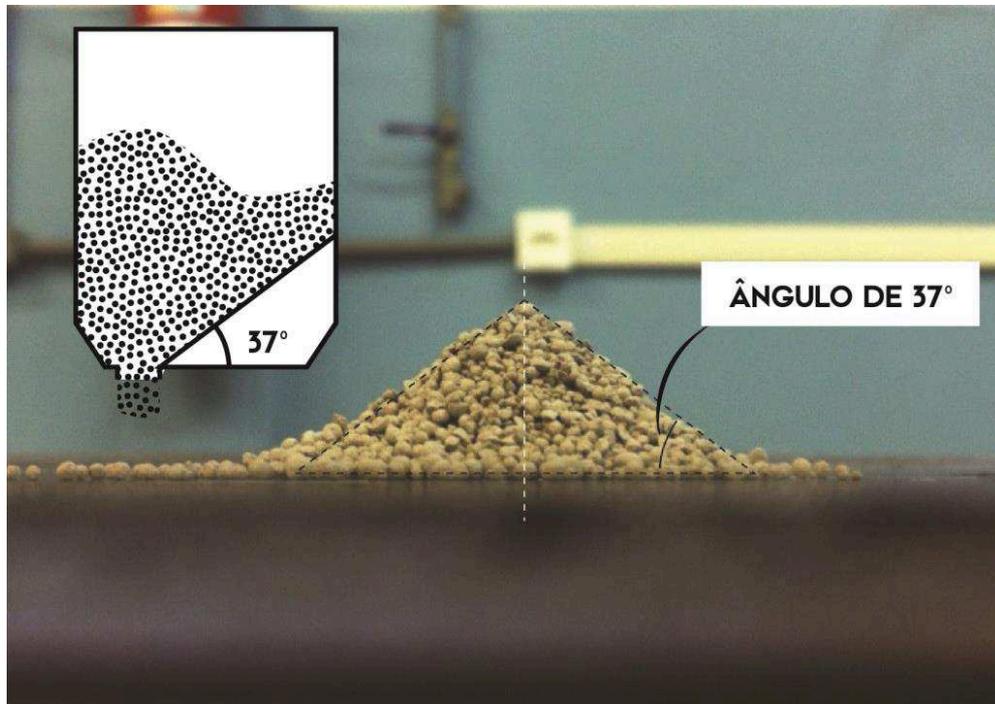
Figura 9 – Ilustração do isolamento elétrico do tracionador



Fonte: Autor

Outro item a ser desenvolvido foi o reservatório de fluxo de soldagem. De modo a evitar o acúmulo de fluxo no interior do reservatório, foi projetada uma inclinação na sua parte interna inferior de modo que todo o fluxo que fosse depositado no mesmo fosse direcionado para a sua saída. Para tanto, primeiramente, foi determinado o ângulo de empilhamento do fluxo a ser utilizado (AWS F7P6-EM12K). A Figura 10 mostra a pilha de fluxo formada. Foram feitas três pilhas e calculada a média dos ângulos das pilhas, obtendo assim um ângulo de aproximadamente 37° .

Figura 10 - Ângulo de empilhamento do fluxo AWS F7P6-EM12K



Fonte: Autor

Para o reservatório de fluxo foi utilizada uma peça plástica com uma saída que permitia o fluxo do granulado. Dentro do reservatório foi montada uma rampa com a inclinação calculada, como ilustrado na Figura 10. Para o preenchimento do vazio entre a rampa e a peça plástica, foi aplicado poliuretano expandido. Com o intuito de direcionar o fluxo do reservatório para a tocha, era necessária uma mangueira que tivesse certa flexibilidade e que não permitisse o acúmulo de fluxo no seu interior, para tanto, foi utilizado um tubo corrugado no exterior e liso na parte interna, que pode ser observado na Figura 11 juntamente com a tampa da peça plástica utilizada para acoplar o tubo com o reservatório.

Figura 11 - Tubo corrugado e acoplamento tubo-reservatório



Fonte: Autor

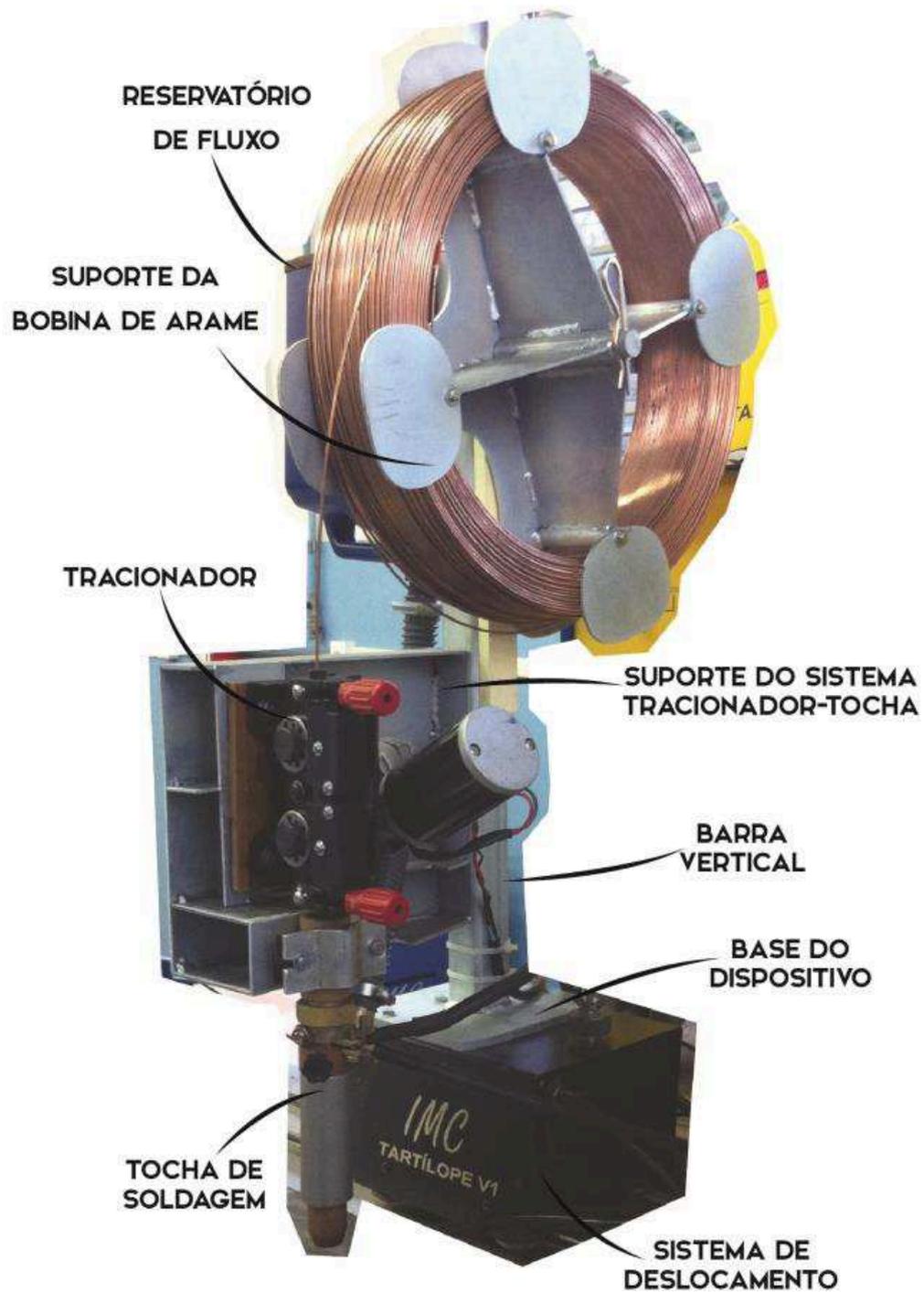
Com o projeto do cabeçote concluído, passou-se para etapa de construção e montagem do mesmo. Conforme pode ser observado, o projeto do dispositivo é tal que seus componentes são, em sua maioria, obtidos somente a partir do corte de chapas. Assim, como primeira etapa de sua construção, chapas de aço carbono SAE 1020 de 3 mm de espessura foram cortadas com o processo plasma. Na sequência, passou-se para a etapa de montagem onde foram realizadas todas as soldagens. Após sua construção, a estrutura foi então toda galvanizada para evitar corrosão. As partes anteriormente descritas podem ser vistas nas Figuras 12 e 13.

Figura 12 - Peças construídas



Fonte: Autor

Figura 13 – Cabeçote construído



Fonte: Autor

3.2 BANCADA DE ENSAIOS

A bancada de ensaios contou com uma fonte de soldagem multiprocesso, modelo DigiPLUS A7 da empresa IMC, com capacidade de corrente de até 800A e a fonte de soldagem desenvolvida por Cunha (2013) para a geração da corrente de excitação ultrassônica, ambas conectadas em paralelo. Esta última permite obter correntes pulsadas com diversas formas de onda, em frequências ultrassônicas, a qual o autor usou numa primeira aplicação para o processo TIG, porém, a mesma permite aplicação em outros processos. Segundo Cunha (2013) a citada fonte de soldagem possui capacidade de fornecimento de corrente de excitação ultrassônica com frequências de pulsação de 20 kHz a 80 kHz com amplitudes de pico a pico de até 50 A.

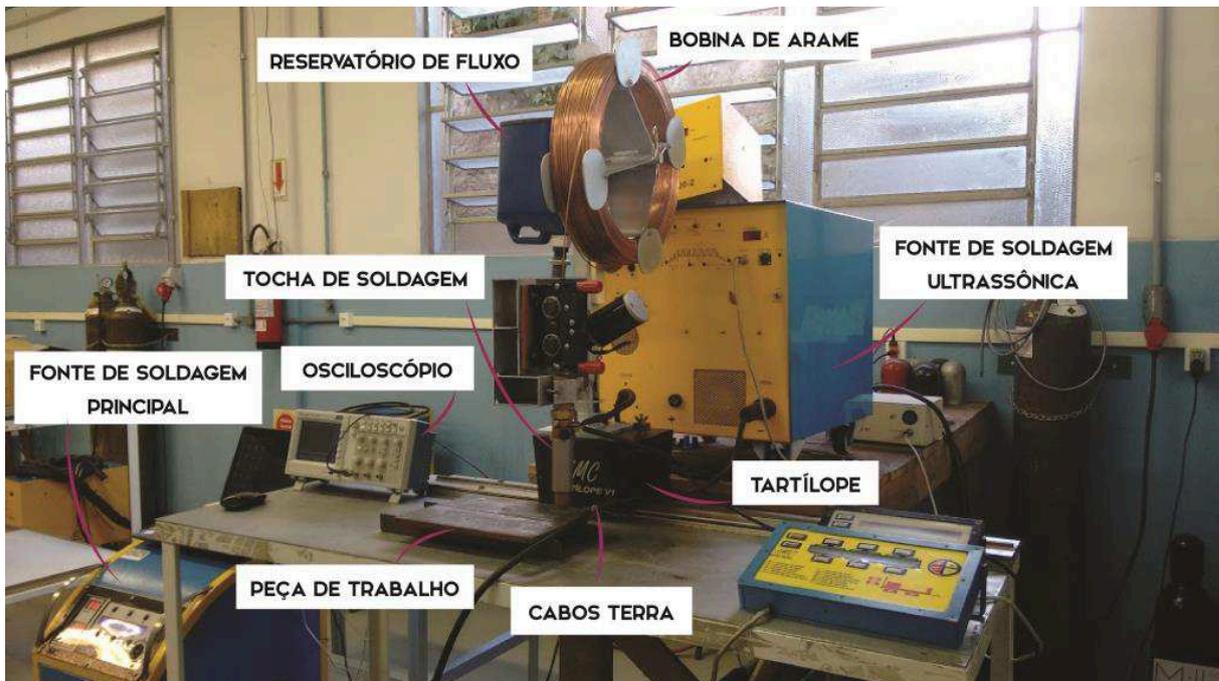
No processo arco submerso, a fonte principal opera no modo tensão constante, modo este em que o equipamento faz o auto-ajuste da corrente principal de soldagem de modo a manter constante a tensão de arco de acordo com o valor ajustado no equipamento. Dependendo do valor ajustado de velocidade de alimentação do eletrodo, a fonte deverá fornecer uma determinada corrente de modo que a tensão se mantenha próxima ao valor desejado. Contudo, deve-se atentar a capacidade máxima de fornecimento de corrente da fonte utilizada, que, neste caso, é de até 800A. Por outro lado, na fonte ultrassônica, a mesma permite o ajuste de uma corrente principal de soldagem de modo a compensar o valor médio da corrente ultrassônica ajustada, mantendo assim a corrente média igual ao valor da corrente de soldagem desejada na fonte ultrassônica, não interferindo no aporte de calor.

O ajuste da velocidade de alimentação do arame-eletrodo é feito na fonte convencional de soldagem, que se comunica com a unidade de controle externa do tracionador de arame. Este último foi acoplado ao cabeçote desenvolvido, tendo como função tracionar o arame da bobina em direção à tocha de soldagem. A tocha de soldagem empregada foi adquirida de acordo com a capacidade da fonte convencional de modelo AS 800, sendo assim, permite a soldagem com até 800 A.

Para o deslocamento do cabeçote de soldagem desenvolvido foi utilizado o Tartílope V1 fabricado pela IMC Soldagem. Este sistema de deslocamento desloca-se sobre um trilho e permite o ajuste das posições inicial e final bem como da

velocidade de soldagem. A base de apoio do cabeçote foi projetada de modo que permitisse a fixação do mesmo no sistema de deslocamento. A bancada montada e alguns dos seus itens descritos podem ser observados na Figura 14.

Figura 14 - Bancada de ensaios



Fonte: Autor

Na realização dos ensaios foi utilizado o sistema de aquisição SAP V4, com o objetivo de registrar os dados de tensão e corrente da fonte principal obtidos na realização dos ensaios. De posse desses dados foi possível obter as medidas de corrente e tensão médias de cada ensaio. O sistema SAP é conectado na fonte principal e capta apenas a corrente que é fornecida pela mesma, de modo que se faz necessária a utilização de outro sistema de aquisição baseado num osciloscópio para obter os dados da corrente ultrassônica. O sistema de aquisição de dados da corrente de excitação ultrassônica consiste em um osciloscópio e um sensor de corrente do tipo Hall na mesma configuração utilizada por Cunha (2013). Através de uma porta USB é possível salvar uma tabela de pontos dos sinais adquiridos, que podem ser carregados no computador para análise posterior.

3.3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para realização dos ensaios, foram utilizados corpos de prova de 300x110x10 mm de aço ASTM A36, material este frequentemente utilizado para a fabricação de embarcações de aço. O metal de adição utilizado foi o arame sólido de aço-carbono com diâmetro de 2,4 mm, classificação EM12K segundo a AWS 5.17. Este arame é indicado para aplicação em aços utilizados na indústria naval, vasos de pressão e plataformas marítimas. As composições químicas nominais do metal base e metal de adição encontram-se na Tabela 1.

Tabela 1 - Composição do arame EM12K e aço ASTM A36

| | Composição química (% peso) | | | | | |
|-------------------------------|------------------------------------|-----------------|----------------|----------------|----------------|-------------------------------|
| | <i>Carbono</i> | <i>Manganês</i> | <i>Silício</i> | <i>Enxofre</i> | <i>Fósforo</i> | <i>Cobre</i> |
| AWS 5.17 EM12K | 0,05-0,15 | 0,8-1,25 | 0,10- 0,35 | Máx. 0,030 | Máx. 0,030 | Máx.0,35 |
| ASTM A36 | Máx. 0,26 | | Máx. 0,40 | Máx. 0,05 | Máx. 0,04 | Mín. 0,2 quando exigido |

Fonte: Catálogo Belgo (2015) e norma ASTM A36

Segundo a especificação da AWS 5.17 para a designação do par arame-fluxo de soldagem arco submerso, a ausência da letra S no conjunto a ser utilizado nos ensaios AWS F7P6-EM12K indica que o fluxo é virgem, ou seja, não houve mistura de escória moída. O número 7 indica que a resistência a tração mínima do metal depositado possui limite de resistência de 70 a 95ksi (480 a 660 Mpa). A letra P indica que há necessidade de tratamento térmico do metal de solda após a soldagem para a obtenção das propriedades apresentadas. O número 6 indica que a uma temperatura de -60° F (-51°C), a resistência ao impacto do metal de solda deve ser igual ou superior a 27J.

Utilizando-se uma fonte principal do tipo tensão constante, após alguns testes preliminares, foi definido 30 V como sendo a tensão de soldagem a ser empregada

em todos os ensaios. Os demais parâmetros de soldagem como velocidade de alimentação de arame e distância entre bico contato-peça (DBCP) também foram fixados e seus valores se encontram na Tabela 2.

Tabela 2 - Parâmetros fixos nos ensaios

| Parâmetro | Valor |
|---|--------------|
| DBCP | 20 mm |
| Velocidade de soldagem | 60 cm/min |
| Velocidade de alimentação de arame | 2,5 m/min |
| Diâmetro do arame | 2,4 mm |

Fonte: Autor

Com o intuito de realizar um estudo preliminar da influência da excitação ultrassônica do arco no processo arco submerso sobre os aspectos dimensionais da zona fundida e da ZAC foram realizado seis diferentes cordões de solda. Para analisar os possíveis efeitos da frequência de pulsação da corrente de soldagem, foram realizados ensaios com as frequências de 20, 50 e 80 kHz, pois, de acordo com a literatura, são as frequências em que os efeitos da excitação ultrassônica são mais expressivos. Para cada frequência, foram realizados dois ensaios com diferentes amplitudes de corrente de excitação, de 25 e 50 A entre corrente de base e corrente de pulso, totalizando assim seis cordões com excitação ultrassônica. Deste modo, espera-se observar a influência da amplitude de pulso bem como da frequência de excitação. A fim de possibilitar as análises e discussão dos resultados, fez-se um ensaio sem corrente ultrassônica.

Para remover a carepa e outras impurezas fez-se uso do processo de esmerilhamento, seguido da limpeza da superfície dos corpos de prova com álcool isopropílico. Antes da realização de cada ensaio foram conferidos os valores de DBCP e posição da tocha em relação ao corpo de prova, ajustado em 30 mm a partir da borda da chapa, resultando em um cordão de solda de aproximadamente 240 mm de comprimento. Os cordões de solda foram depositados sobre uma chapa (bead-on-plate) em um único passe e com um único arame. Os parâmetros de tensão, corrente e frequência ajustados de cada ensaio estão listados na Tabela 3.

Tabela 3 - Parâmetros ajustados de cada ensaio

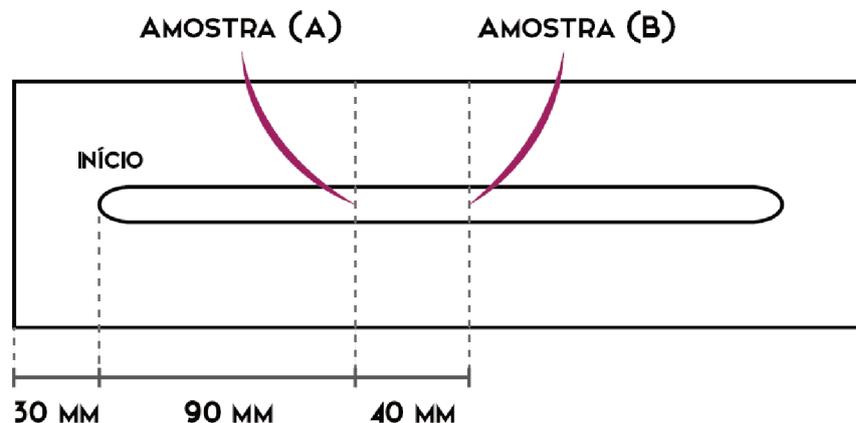
| Ensaio | Fonte principal | | Fonte ultrassônica | |
|--------|--------------------|------------------------------------|-----------------------|------------------------|
| | Tensão de soldagem | Velocidade de alimentação de arame | Corrente ultrassônica | Frequência de pulsação |
| 1 | 30 V | 2,5 m/min | 0A | 0kHz |
| 2 | 30 V | 2,5 m/min | 25A | 20kHz |
| 3 | 30 V | 2,5 m/min | 25A | 50kHz |
| 4 | 30 V | 2,5 m/min | 25A | 80kHz |
| 5 | 30 V | 2,5 m/min | 50A | 20kHz |
| 6 | 30 V | 2,5 m/min | 50A | 50kHz |
| 7 | 30 V | 2,5 m/min | 50A | 80kHz |

Fonte: Autor

3.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Com o intuito de medir os aspectos geométricos foram retiradas duas amostras de cada cordão para realização de macrografias, de modo a melhorar a confiabilidade dos resultados. A Figura 15 apresenta os locais de onde foram retiradas as amostras.

Figura 15 - Posição de onde foram retiradas as amostras para macrografia

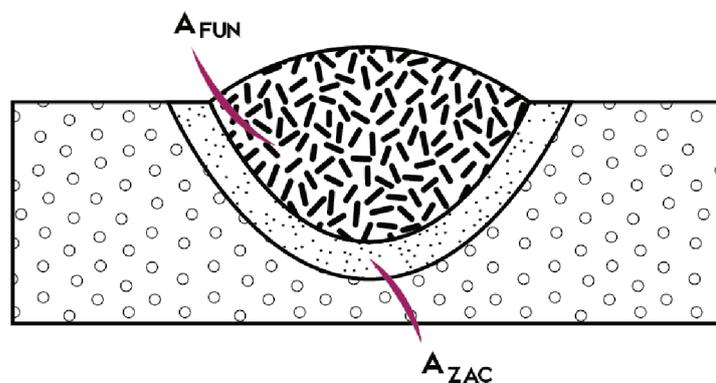


Fonte: Autor

Cada amostra passou por um processo de lixamento com diferentes granulometrias. Iniciou-se com a lixa de granulometria 180 e em seguida com as de 220, 320, 400, 600 e 1200. Após o lixamento as amostras foram polidas com pasta de diamante. O ataque químico das amostras foi feito com Nital 3,5% através da técnica de imersão. Com estes procedimentos foi possível revelar na amostra as regiões de interesse para a realização das imagens com o auxílio de um estereoscópio.

As medidas realizadas de modo a caracterizar a geometria dos cordões realizados foram subdivididas em dois grupos: medidas de área e medidas lineares. As medidas de área contemplam a área fundida (A_{FUN}) e a área da zona afetada pelo calor (A_{ZAC}). De modo a padronizar a nomenclatura optou-se por utilizar os nomes já citados de área e suas respectivas siglas. Para evitar equívocos, as áreas estão ilustradas na Figura 16.

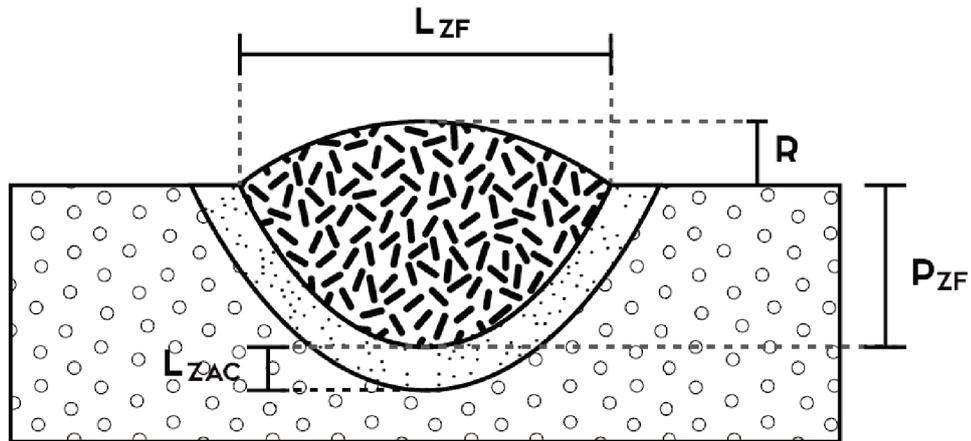
Figura 16 - Nomenclatura das áreas do cordão



Fonte: Autor

Assim como se padronizou as medidas de área, fez-se o mesmo para as medidas lineares, como largura do cordão na zona fundida (L_{ZF}). Atribuiu-se a letra R para representar o valor do reforço e designou-se a penetração do cordão na zona fundida (P_{ZF}) e a largura da ZAC na raiz do cordão (L_{ZAC}) como ilustra a Figura 17.

Figura 17 - Nomenclatura adotada nas medidas lineares do cordão e da ZAC



Fonte: Autor

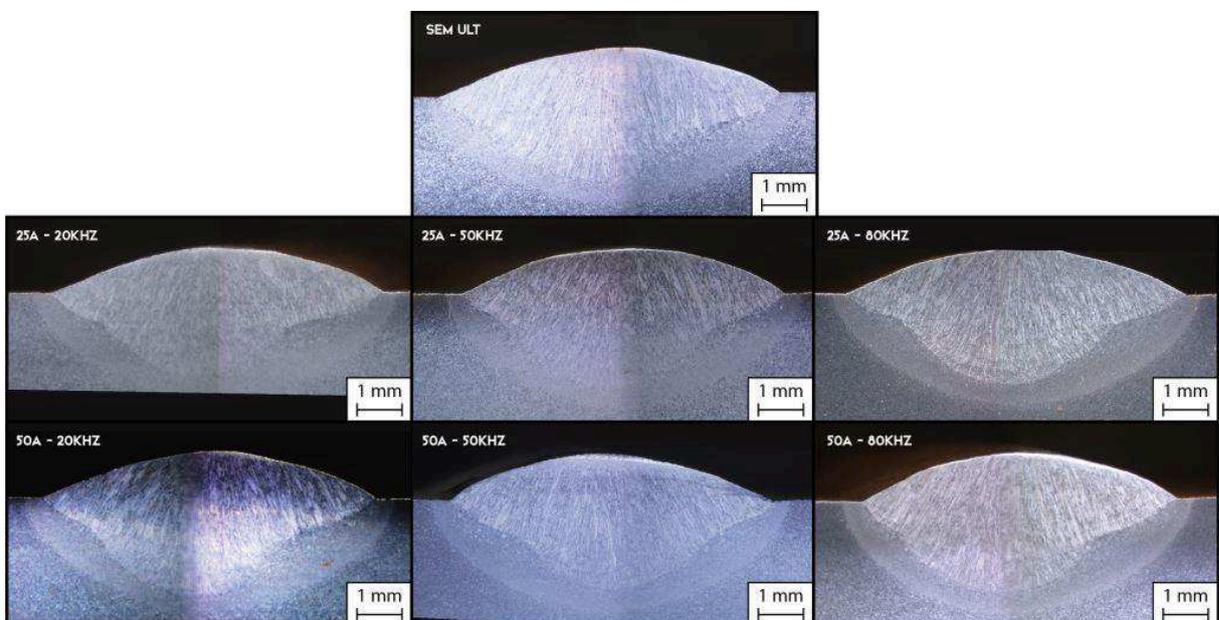
Através do programa “open source” ImageJ (2015) foi possível realizar as medidas lineares e de área dos cordões obtidos. No software é necessário informar uma medida conhecida para a calibração. Uma vez calibradas as imagens, foi possível obter as medidas desejadas.

Para os ensaios de microdureza, as amostras preparadas para as macrografias foram novamente lixadas com a lixa de grana #1200. Estas foram mais uma vez atacadas com Nital e realizados os ensaios de dureza com a aplicação de cargas de 1 kgf durante um tempo de atuação de 15 s. Os valores de dureza foram obtidos a cada 0,5 mm de distância ao longo de uma linha horizontal situada a 1 mm de distância da superfície superior do corpo de prova.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na Figura 18 são apresentadas as macrografias da seção transversal dos cordões de solda obtidos com pulsação ultrassônica do arco e sem pulsação. Conforme pode ser observado, em se tratando dos aspectos dimensionais dos cordões obtidos, percebe-se que sua geometria, em todos os casos, é semelhante em termos de forma.

Figura 18 - Macrografias dos cordões



Fonte: Autor

Com o auxílio do sistema de aquisição SAP V4 obteve-se os gráficos de tensão e corrente da fonte principal dos ensaios realizados e através do osciloscópio obtiveram-se os gráficos da corrente de excitação fornecida pela fonte ultrassônica. Os valores de corrente média e tensão média medidos estão resumidos na Tabela 4. Para o cálculo da energia de soldagem foi considerada uma eficiência térmica de 80% para o processo (DUPONT E MARDER, 1995) e pode-se observar que a energia de soldagem em todos os ensaios é semelhante.

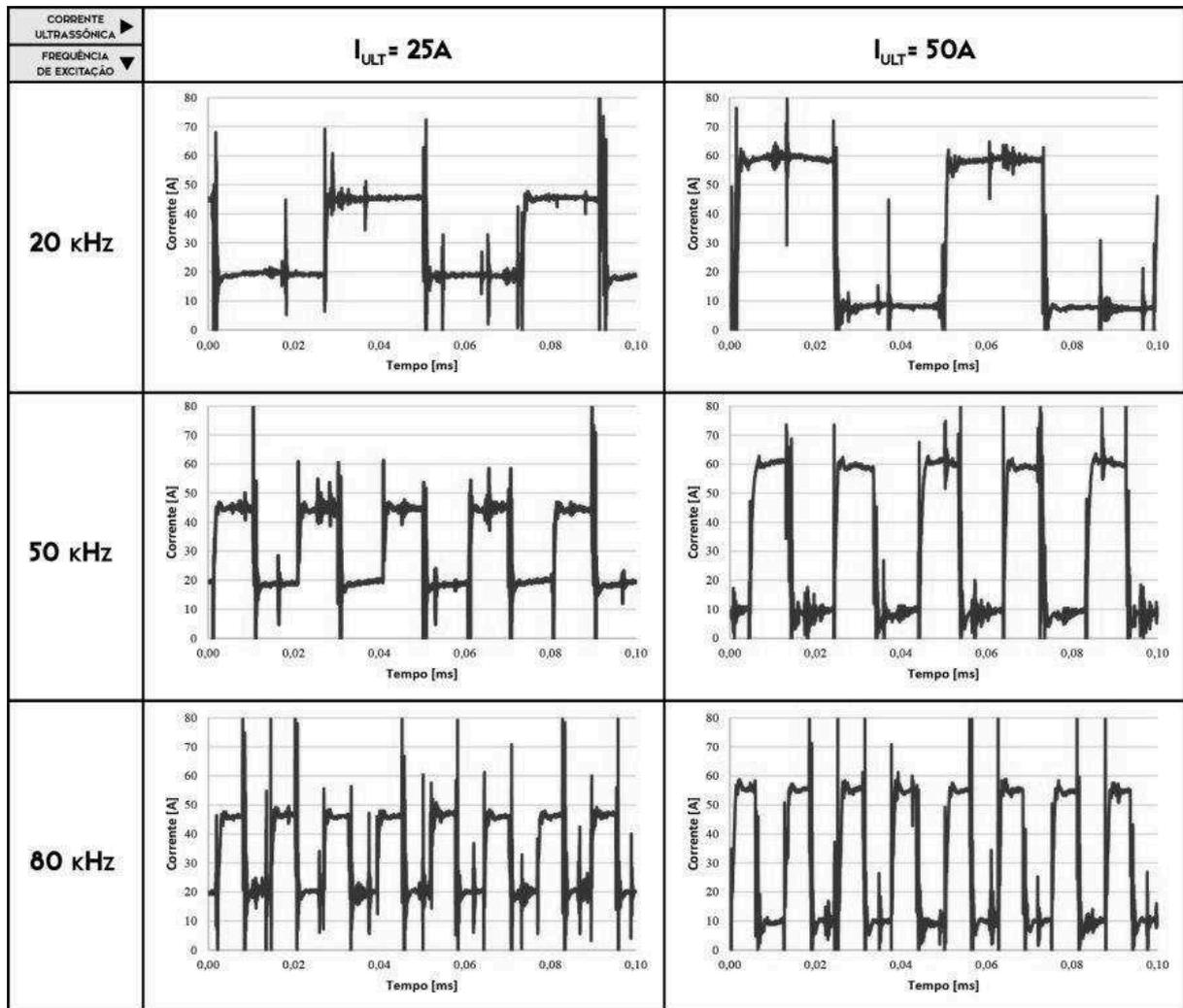
Tabela 4 - Variáveis medidas

| Ensaio | Fonte principal | | Energia de soldagem |
|--------|---------------------|-----------------------|---------------------|
| | Tensão média medida | Corrente média medida | |
| 1 | 29 V | 447 A | 1137 J/mm |
| 2 | 29 V | 445 A | 1133 J/mm |
| 3 | 29 V | 452 A | 1148 J/mm |
| 4 | 29 V | 446 A | 1136 J/mm |
| 5 | 29 V | 451 A | 1146 J/mm |
| 6 | 29 V | 442 A | 1127 J/mm |
| 7 | 29 V | 448 A | 1140 J/mm |

Fonte: Autor

A Figura 19 apresenta os gráficos de corrente da fonte ultrassônica de acordo com a frequência de pulsação e a corrente ultrassônica ajustada.

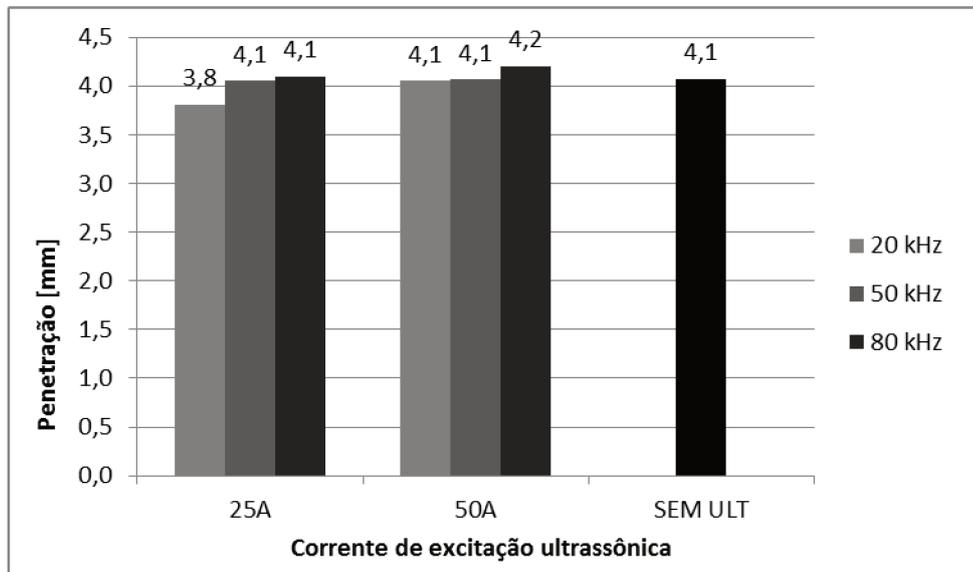
Figura 19 - Gráficos de corrente da fonte ultrassônica



Fonte: Autor

A média dos valores dos dois cordões obtidos de cada amostra são apresentados nas Figuras 20, 21, 22, 23 e 24.

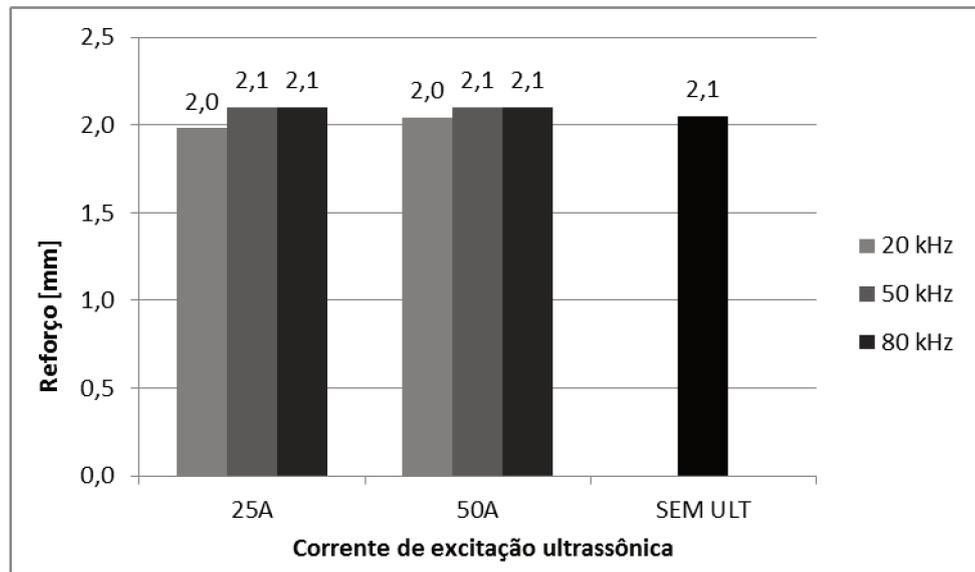
Figura 20 – Valor médio de penetração obtido nos cordões de solda realizados



Fonte: Autor

Conforme pode ser visto, apenas para a combinação 25A-20kHz o valor de penetração é inferior ao valor obtido sem excitação ultrassônica e para a 50A-80kHz o valor é superior, enquanto os demais valores são aproximadamente iguais ao valor de penetração obtida sem excitação ultrassônica. Contudo, ao observarmos os valores obtidos para a frequência de 20 kHz, com um aumento da corrente de excitação de 25 para 50 A, há um aumento de aproximadamente 8% no valor da penetração. Um aumento da penetração com o aumento da corrente também pode ser encontrado para a frequência de 80 kHz, ainda que não tão significativo. Todavia, há uma tendência de aumento da penetração com o aumento da frequência de excitação e corrente de excitação, resultado esse, semelhante ao obtido por Cunha (2013) para o processo TIG. Um comportamento análogo ocorre com os valores de reforço, que são aproximadamente constantes e iguais ao valor obtido para o cordão sem ultrassom.

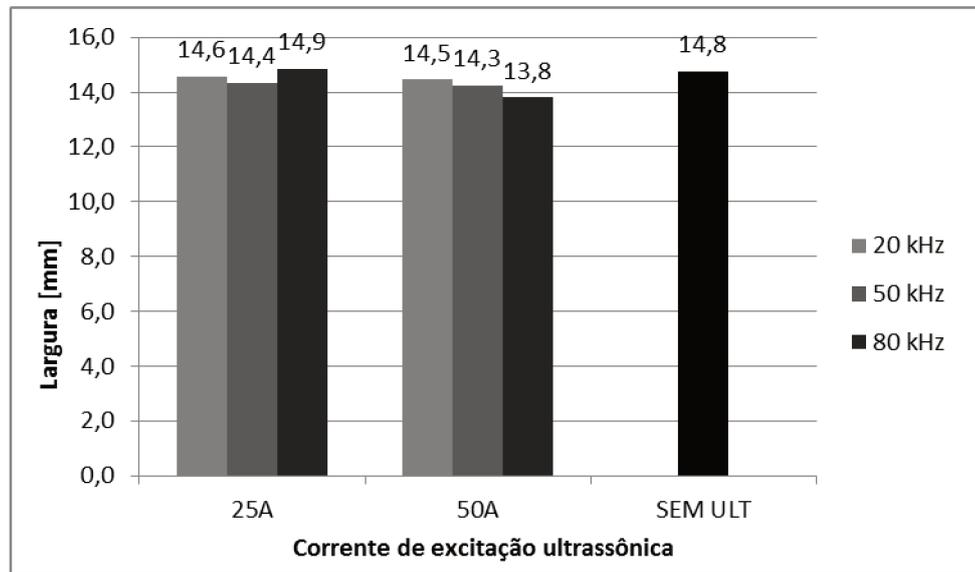
Figura 21 - Valor médio de reforço obtido nos cordões de solda realizados



Fonte: Autor

Já em relação a largura dos cordões, a diferença entre o menor e o maior valor obtido, foi de 1,1 mm, conforme como pode ser observado na Figura 22. Apenas para a combinação 25A-80kHz o valor é superior ao valor de largura encontrado para o ensaio sem excitação ultrassônica. Para todos os valores de frequência de excitação, com o aumento da corrente, foi observado uma diminuição da largura. Conforme pode ser observado para a corrente de 50A, com o aumento da frequência de pulsação, ocorre uma diminuição na largura. Este resultado pode ser devido a constrição do arco relatada na literatura por Qi *et al*, 2012 para o processo TIG. Todavia, não foi observado o mesmo comportamento para a corrente de 25 A.

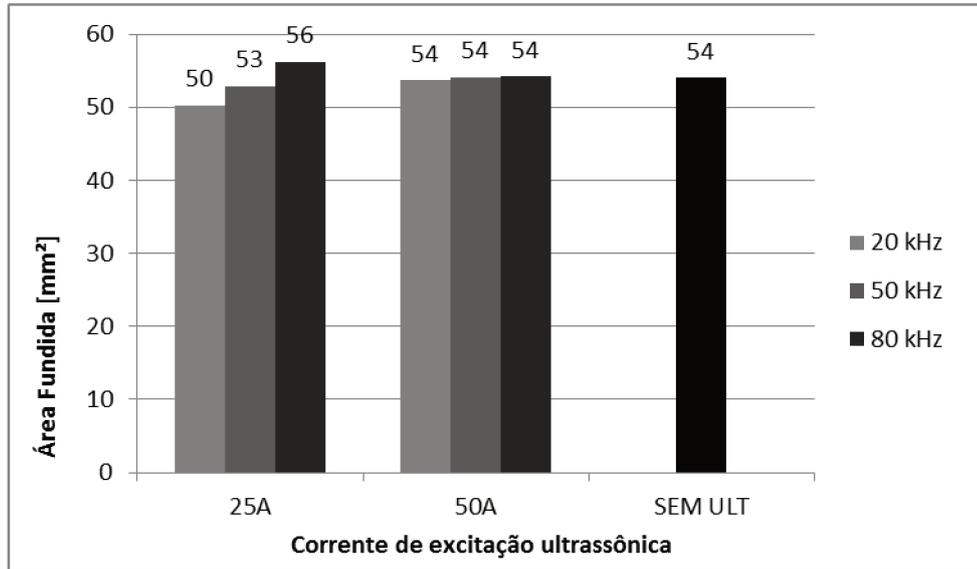
Figura 22 - Valor médio de largura obtido nos cordões de solda realizados



Fonte: Autor

Em relação a área fundida, observa-se que para a corrente de excitação de 50A o mesmo não se altera em virtude do aumento da frequência de pulsação e seu valor é aproximadamente igual ao valor obtido para o cordão sem excitação (Figura 23). Se analisarmos os valores de penetração em conjunto com os valores de largura, observamos que para a corrente de 50 A a penetração aumentou e a largura diminuiu com o aumento da frequência, resultando cordões de mesma área fundida. Destaca-se ainda a combinação 50A-80kHz pelo fato de que a mesma obteve a maior penetração e a menor largura de todos os ensaios realizados e resultou em uma área fundida de mesmo valor que o ensaio sem ultrassom, indicando uma mudança na forma da área fundida. Por outro lado, para a corrente de 25A, houve um aumento no valor da área fundida com o aumento da frequência de excitação, apesar disso para as frequências de 20kHz e 50kHz os valores são inferiores ao obtido sem ultrassom. Este resultado reflete os valores de penetração e largura obtidos para esta corrente, pois, para todas as frequências, o valor de penetração não foi superior ao obtido sem ultrassom e apenas para a frequência de 80 kHz, a largura foi superior ao valor sem ultrassom.

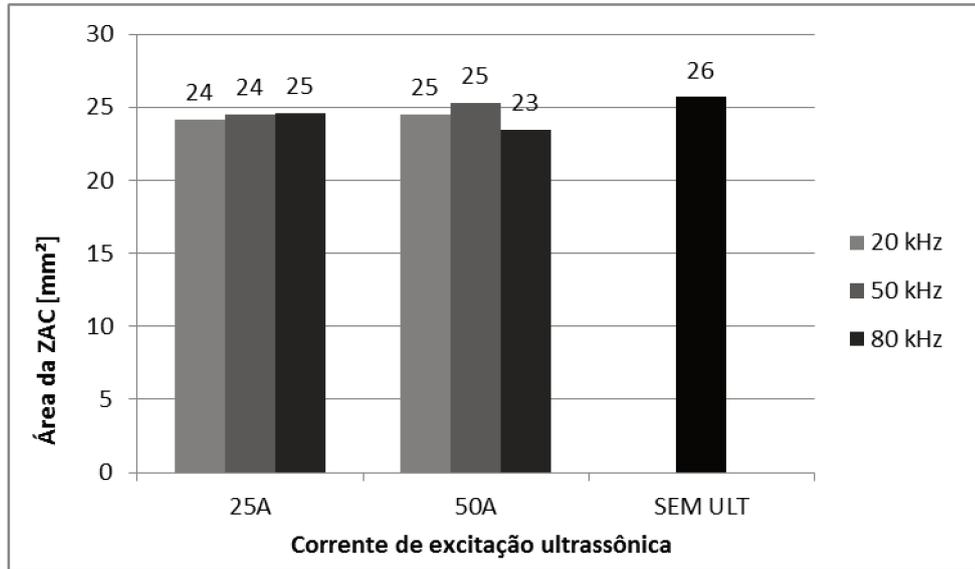
Figura 23 - Valor médio de área fundida obtido nos cordões de solda realizados



Fonte: Autor

Conforme visto, os possíveis efeitos associados à excitação ultrassônica do arco quanto aos aspectos dimensionais dos cordões realizados, como discutidos, não são expressivos. As variações observadas nas dimensões consideradas nas análises dos cordões não são significativas, de modo que este resultado possa ser devido a outros fatores inerentes à execução dos ensaios e análise. Neste contexto, tem-se o trabalho de Zhang *et al* (2001) no qual são apresentadas variações significativas de largura, penetração e formato do cordão (Figura 4), apesar de não discutidas em seu trabalho. Por outro lado, os autores chamam a atenção para o aumento significativo do tamanho da zona afetada pelo calor com o aumento da frequência de excitação. Com base nisso, neste trabalho foram avaliadas também as dimensões da ZAC obtida (Figura 24).

Figura 24 - Valor médio de área da ZAC obtido nos cordões de solda realizados



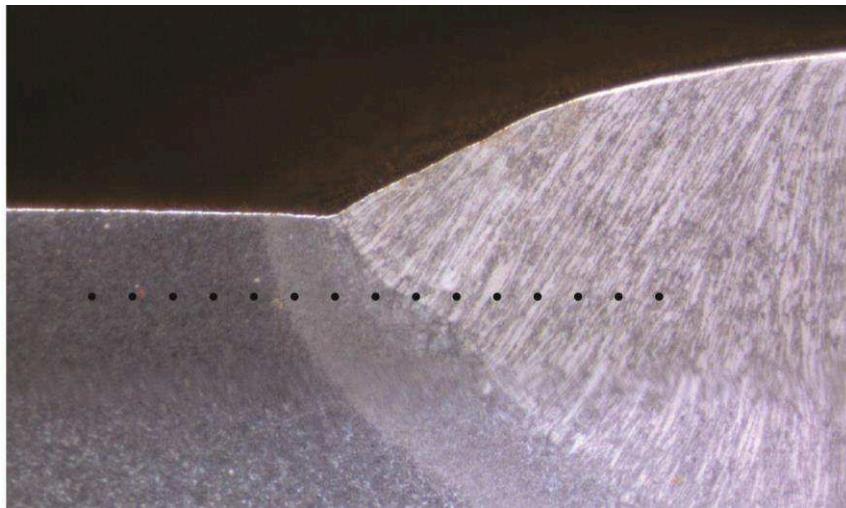
Fonte: Autor

De forma contrária aos resultados obtidos por Zhang *et al* (2001), foi obtida uma área da ZAC inferior do que aquela produzida sem excitação da corrente para todos os ensaios, em especial para a combinação 50A-80kHz, cuja área fundida foi a mesma do cordão sem ultrassom mas com forma diferente e que obteve uma redução de mais de 10% da área da ZAC em relação ao cordão sem ultrassom, resultados estes que corroboram a conclusão dos autores de que o ultrassom acelera a condução de calor. Contudo, Zhang *et al* (2001) justificam em seu trabalho o aumento da ZAC com base no efeito do ultrassom na direção do eixo axial do arco. Segundo estes autores, neste sentido tal efeito é mais intenso devido a maior amplitude de vibração ultrassônica no mesmo, o que promove o alongamento da ZAC nesta direção. Entretanto este comportamento da ZAC obtido por estes autores é típico de um aumento do aporte de calor à peça. Visto que não são apresentados em seu trabalho maiores detalhes a respeito das variáveis utilizadas, este resultado de aumento da ZAC e mudanças dimensionais do cordão sugerem que a energia de soldagem utilizada nos ensaios não foi a mesma. Logo, o aumento da ZAC obtido pelos autores pode não estar vinculado à imposição da pulsação da corrente em frequências ultrassônicas.

Os autores Zhang *et al* (2001) ainda citam que há um refino de grão na ZAC, associado a uma melhora das propriedades mecânicas nesta região, apesar de não

detalhar do que se trata esta melhora. De modo a investigar possíveis efeitos da excitação ultrassônica do arco nas propriedades mecânicas da ZAC, foram realizadas medições de microdureza no cordão sem ultrassom e nos cordões de combinação 50A-20kHz e 50A-80kHz. As indentações foram realizadas de modo que fossem obtidas as medidas desde a zona fundida até o metal de base, como ilustrado na Figura 25.

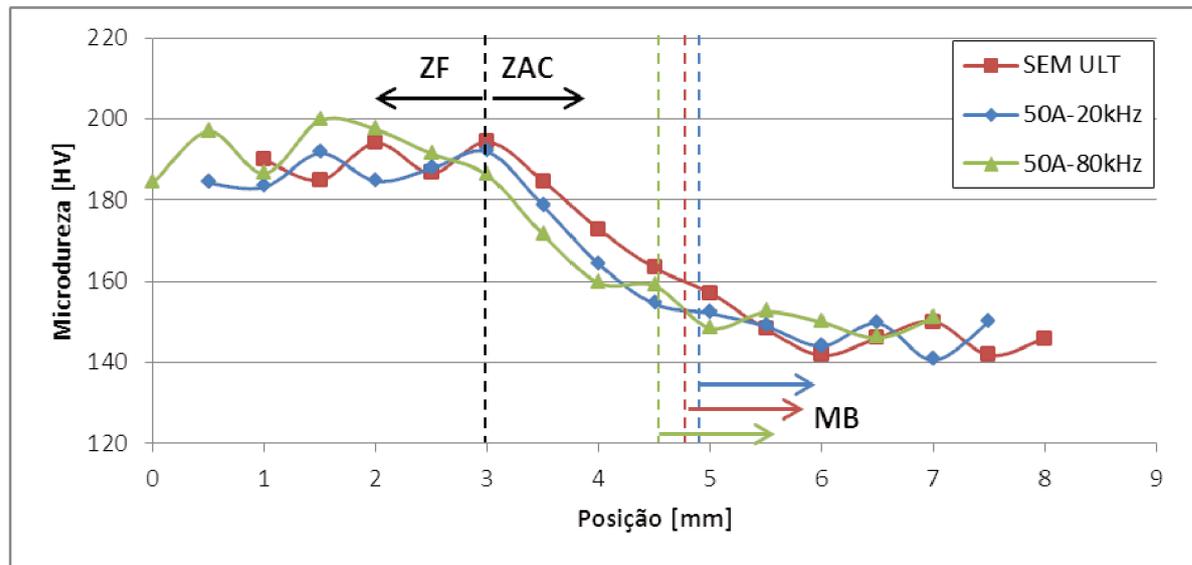
Figura 25 – Ilustração das indentações do ensaio de microdureza realizado na amostra com a combinação 50A-80kHz



Fonte: Autor

Os valores de microdureza obtidos para as três amostras são apresentados na Figura 26. Estão indicadas na figuraos limites aproximados da ZAC bem como da zona fundida (ZF) e do metal de base (MB).

Figura 26 - Perfis de microdureza obtidos



Fonte: Autor

Os valores de microdureza obtidos na amostra sem excitação ultrassônica, em especial na região da ZAC, tiveram uma tendência a apresentar valores superiores aos obtidos com excitação ultrassônica. Segundo os autores Zhang *et al* (2001) há um refino de grão com a aplicação da excitação ultrassônica do arco. Com um refino de grão, espera-se um aumento da dureza, contudo, o mesmo não ocorre. Se analisarmos a variação de valores de microdureza no metal de base, podemos concluir que a diferença dos valores obtidos na ZAC e ZF podem ser devido às variações das medições. Logo, não é possível inferir que a excitação ultrassônica do arco melhora as propriedades mecânicas do ponto de vista de microdureza e que possivelmente a melhora nas propriedades, comentada pela literatura, é obtida apenas para parâmetros muito específicos de corrente e frequência de excitação.

5 CONCLUSÕES

Com esse trabalho podemos concluir que:

- O cabeçote de soldagem a arco submerso desenvolvido atendeu de os requisitos necessários para a execução de ensaio de soldagem com o processo arco submerso;
- A bancada para a execução de ensaios de soldagem arco submerso empregando a técnica de excitação ultrassônica do arco concebida atendeu as necessidades relacionadas à execução dos experimentos do presente trabalho;
- No que diz respeito aos aspectos dimensionais do cordão e da ZAC obtidos, não se detectou mudanças significativas ao aplicar a técnica de excitação ultrassônica do arco para as combinações de corrente e frequência de pulsação estudadas. Possivelmente, ao se utilizar energias de soldagem diferentes, ocorra uma mudança na geometria, mas com os parâmetros da soldagem arco submerso utilizados, não se observa variação na geometria do cordão e da ZAC;
- Quanto aos valores de dureza, também não se observou mudanças significativas nos três perfis de microdureza analisados. É possível que a diferença dos valores de microdureza observada na ZAC seja devido à variação das medições, visto que uma mesma faixa de variação foi obtida para os valores de microdureza do metal de base.

6 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Com a realização deste trabalho e os resultados obtidos, sugere-se:

- Avaliar os efeitos obtidos com aplicação da técnica de excitação ultrassônica aplicada ao processo de soldagem arco submerso em relação aos aspectos metalúrgicos;
- Realizar ensaios de microdureza para mais combinações de corrente de excitação e frequência de pulsação ultrassônica;
- Avaliar os efeitos da técnica para outras energias de soldagem.

REFERÊNCIAS

BELGO BEKAERT. Disponível em: <http://www.belgobekaert.com.br/Produtos/Paginas/Arame-para-Arco-Submerso.aspx> . Acesso em: 12 de agosto de 2015.

CHANDEL, R. S.; SEOW, H. P.; CHEONG, F. L. Effect of increasing deposition rate on the bead geometry of submerged arc welds. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 72, n. 1, p. 124-128, 1997.

COOK, G. E.; EASSA, H. E. H. The Effect of High-Frequency Pulsing of a Welding Arc. **IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS**, 1A-21, n. 5, 1985.

CUNHA, T. V. **Desenvolvimento e avaliação de tecnologia para soldagem TIG com pulsação ultrassônica.** 266 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

DUPONT, J. N.; MARDER, A. R. Thermal efficiency of arc welding processes. **Welding Journal-Including Welding Research Supplement**, v. 74, n. 12, p. 406s, 1995.

HANDBOOK, Metals. Vol. 6: Welding, Brazing and Soldering. **ASM International, Materials Park**, OH, p. 117-118, 1993.

HE, L. *et al* Effect of Arc-ultrasonic on Welding Structure and Property of Q235A Steel with SMAW. **Hot Working Technology**, 01, 2006.

IMAGEJ. Disponível em: <http://imagej.net/> Acesso em: 20 de agosto de 2015.

LEI, Y. *et al* Effect of ultrasonic frequency arc on microstructures of joint in plasma arc welding of SiC p/Al MMCs. **Transactions of the China Welding Institution**, v. 32, n. 4, 2011.

LEI, Y. *et al* Numerical analysis of the molten pool vibration mode for arc-ultrasonic keyhole plasma arc welding. **China Welding (English Edition)**, v. 21, n. 1, 2012. Resumo.

MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q. **Soldagem: fundamentos e tecnologia**. Belo Horizonte: Ed. da UFMG, 2009.

MURUGAN, N.; PARMAR, R. S.; SUD, S. K. Effect of submerged arc process variables on dilution and bead geometry in single wire surfacing. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 37, n. 1, p. 767-780, 1993.

PILIPENKO, A. **Computer Simulation of Residual Stress and Distortion of Thick Plates in Multielectrode Submerged Arc Welding: Their Mitigation Techniques**, Ph.D. Tese, NTNU Trondheim, Norruega, 2001.

QI, B. *et al* The effect of arc behavior on weld geometry by high-frequency pulse GTAW process with 0Cr18Ni9Ti stainless steel. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 2012.

SHEN, S.; OGUOCHA, I. N. A.; YANNACOPOULOS, S. Effect of heat input on weld bead geometry of submerged arc welded ASTM A709 Grade 50 steel joints. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 212, n. 1, p. 286-294, 2012.

WU, M. *et al* Study on mechanism of arc-excited ultrasonic. **Chinese Journal of Mechanical Engineering** (in Chinese), v. 13, n. 1, 1999. Resumo.

WU, M. *et al* Arc-excited ultrasonic welding to improve the quality of 09MnNiDR joints. **Journal of Tsinghua University (Science and Technology)**, 2, 2006.

YANG, L. J.; CHANDEL, R. S.; BIBBY, M. J. **The effects of process variables on the bead height of submerged-arc weld deposits**. Canadian metallurgical quarterly, v. 31, n. 4, p. 289-297, 1992.

YANG, L. J.; CHANDEL, R. S.; BIBBY, M. J. The effects of process variables on the weld deposit area of submerged arc welds. **WELDING JOURNAL-NEW YORK-**, v. 72, p. 11-s, 1993.

YANG, B. Y. *et al* Study on arc-ultrasonic saw improving structure and property of 09MnNiDR welding joint. **Hot Working Technology**, 2, 2006. Resumo.

ZHANG, C.; WU, M.; DU, J. Improving Weld Quality by Arc-Excited Ultrasonic Treatment. **Tsinghua Science and Technology**, v. 6, n. 5, 2001.

ZHOU, S.; ZHAO, H.; QI, B. Ultra-sonic pulse tungsten inert-gas arc welding of Ti-6Al-4V alloy. **Transactions of the China Welding Institution**, v. 10, p. 15, 2010. Resumo.