

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
CÂMPUS CORNÉLIO PROCÓPIO
DIRETORIA DE GRADUAÇÃO E EDUCAÇÃO PROFISSIONAL
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

MAYCOW VINICIUS DE SOUZA

**ACOPLAMENTO DE ACCELERÔMETRO NO PROCESSO DE
SOLDAGEM POR ARAME TUBULAR**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CORNÉLIO PROCÓPIO

2017

MAYCOW VINICIUS DE SOUZA

**ACOPLAMENTO DE UM ACELERÔMETRO NO PROCESSO DE
SOLDAGEM COM ARAME TUBULAR**

Trabalho de Conclusão de Curso em
Engenharia Mecânica, do Departamento
Acadêmico de Engenharia Mecânica, da
Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. João Roberto S. Moreno
Coorientador: Prof. Me. Celso Alves Correa

CORNÉLIO PROCÓPIO

2017



**Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Cornélio Procópio
Departamento Acadêmico de Mecânica
Curso de Engenharia Mecânica**



FOLHA DE APROVAÇÃO

Maycow Vinicius de Souza

ACOPLAMENTO DE UM ACELERÔMETRO NO PROCESSO DE SOLDAGEM COM ARAME TUBULAR

Trabalho de conclusão de curso apresentado às 14:00hs do dia 28/11/2017, como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Mecânico no programa de Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O candidato foi arguido pela Banca Avaliadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Avaliadora considerou o trabalho aprovado¹.

Prof. PhD. Joao Roberto Sartori Moreno (Orientador)

Prof. Dr. Celso Naves de Souza (Membro)

Prof. Me. Celso Alves Correa (Membro)

Prof. Dra. Émillyn Ferreira Trevisani Olivio (Membro)

¹ A Folha de Aprovação assinada encontra-se na coordenação de curso.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, depois à minha família por terem me apoiado durante a realização desse trabalho.

Sou grato ao orientador Prof^o Dr. João Roberto Sartori Moreno pelos momentos de ajuda, compreensão e dedicação ao meu entendimento.

Agradeço também ao professor Me. Celso Alves Correa que coorientou esta pesquisa de forma a contribuir com meus conhecimentos, mostrando-se sempre disposto e dedicado a auxiliar a orientação desta pesquisa.

Por fim, agradeço a todos que contribuíram para a realização deste trabalho de forma direta ou indireta.

A persistência é o caminho do êxito.

(CHAPLIN, Charles).

RESUMO

SOUZA, Maycow Vinicius. **Acoplamento de um acelerômetro no processo de soldagem por arame tubular.** Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2017.

Compreendida como um processo de união de metais a soldagem pode ser dividida em vários métodos. Durante a soldagem por arame tubular podem ocorrer algumas variações, para medi-las geralmente é acoplado um acelerômetro piezoelétrico, que pode gerar diferença no potencial elétrico ou carga mecânica aplicada. Com a melhoria nesse tipo de soldagem, pode ter um aumento na produtividade, bem como diminuição de custos, sem comprometer a qualidade. Sendo assim, o objetivo geral deste trabalho foi analisar as variações no processo convencional de soldagem com Arame Tubular através do acoplamento de um acelerômetro piezoelétrico. Metodologicamente, utilizou-se bancada de experimentos um sistema de aquisição portátil da IMC-Soldagem modelo SAP-4 (Sistema de Aquisição Portátil-4) para realizar a leitura instantânea das grandezas corrente, tensão, velocidade de arame e vazão de gás, com tempo configurável de até 600 s, com taxa de amostragem de 5000 pontos por segundo para cada variável. Além da aquisição dos dados de tensão e corrente, fora utilizado um sistema de aquisição de dados da National Instruments CDAQ-9178 com os módulos de aquisição de temperatura e acelerômetro. O acelerômetro utilizado é o industrial piezoelétrico de vibração modelo KS80D, com uma faixa de frequência linear de 0,3 a 14.000 Hz. É possível notar que a aquisição de sinais é fundamental para a determinação da estabilidade e/ou instabilidade do arco elétrico e que com a utilização do acelerômetro e com o pré-processamento dos sinais adquiridos, consegue-se estimar a aceleração em RMS e comprovar a estabilidade do arco elétrico, além de que pode se observar que os maiores picos de aceleração ocorreram em frequências menores que 800 Hz. Dentre as condições de soldagem estabelecidas, quando utilizado a corrente de 230A se tem uma melhor estabilidade do arco elétrico, logo uma melhor condição para soldagem de revestimento.

Palavra-chave: Soldagem. Acelerômetro. Arame Tubular.

ABSTRACT

SOUZA, Maycow Vinicius. **Coupling of an accelerometer in the process of welding by tubular wire.** Course Completion Work - Mechanical Engineering Course, Federal Technological University of Paraná. Cornélio Procópio, 2017.

Understood as a process of joining metals welding can be divided into several methods. During welding by tubular wire some variations can occur, to measure them is usually coupled a piezoelectric accelerometer, that can generate difference in the electrical potential or applied mechanical load. With the improvement in this type of welding, you can have an increase in productivity as well as decrease costs without compromising quality. Thus, the general objective of this work was to analyze the variations in the conventional welding process with Tubular Wire through the coupling of a piezoelectric accelerometer. Methodologically, a portable acquisition system of IMC-Welding model SAP-4 (Portable Acquisition System-4) was used to perform the instantaneous reading of current, voltage, wire speed and gas flow rates with time configurable up to 600 s, with sampling rate of 5000 dots per second for each variable. In addition to acquiring voltage and current data, a National Instruments CDAQ-9178 data acquisition system was used with the temperature acquisition and accelerometer modules. The accelerometer used is the piezoelectric vibration industrial model KS80D, with a linear frequency range of 0.3 to 14.000 Hz. It is possible to notice that the acquisition of signals is fundamental for the determination of the stability and / or instability of the electric arc and that with the use of the accelerometer and the preprocessing of the acquired signals, it is possible to estimate the acceleration in RMS and to prove the stability of the electric arc, besides that it can be observed that the greatest acceleration peaks occurred in frequencies smaller than 800 Hz .At the welding conditions established, when the 230A current is used, it has a better stability of the electric arc, thus a better condition for welding the coating.

Keyword: Welding. Accelerometer. Tubular Wire.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Demonstração ilustrativa do processo de soldagem por fusão.....	15
Figura 2 – Representação de soldagem com arames tubulares com proteção externa e autoprotégidos.....	19
Figura 3 – Ilustração do Diagrama de Equilíbrio Fe-C.....	20
Figura 4 – Acelerômetro Piezoelétrico.....	24
Figura 5 - Bancada de Experimento.....	27
Figura 6 – Localização esquemática do acelerômetro.....	27
Figura 7 – Efeito das variáveis na Aceleração.....	30
Figura 8 – Gráfico da Aceleração.....	31
Figura 9 – Aquisição simultânea da corrente, tensão e aceleração para a corrente de 170 amperes.....	32
Figura 10 – Aquisição simultânea da corrente, tensão e aceleração para a corrente de 200 amperes.....	33
Figura 11 – Aquisição simultânea da corrente, tensão e aceleração para a corrente de 230 amperes.....	34
Figura 12 – Corrente de 170 amperes: (a) sinal da corrente, (b) FFT do sinal da corrente, (c) sinal do acelerômetro, (d) FFT do sinal do acelerômetro.....	35
Figura 13 – Corrente de 200 amperes: (a) sinal da corrente, (b) FFT do sinal da corrente, (c) sinal do acelerômetro, (d) FFT do sinal do acelerômetro.....	37
Figura 14 – Corrente de 230 amperes: (a) sinal da corrente, (b) FFT do sinal da corrente, (c) sinal do acelerômetro, (d) FFT do sinal do acelerômetro.....	39
Figura 15- FFT para as três correntes de soldagem.....	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química das barras de aço SAE 1020.....	25
Tabela 2 - Composição química do metal de adição – EC410NiMo MC.....	25
Tabela 3 - Parâmetros e níveis mantidos constantes durante a soldagem.....	26
Tabela 4 - Resultados de corrente, tensão e aceleração da corrente.....	29

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

AISI – American Iron and Steel Institute
AWS – American Welding Society
DBCP – Distância Bico de Contato da Peça
FCAW – Flux-Cored Arc Welding
MAG – Metal Active Gas
MIG – Metal Inert gas
SAE – Society of Automotive Engineers
UTFPR – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
RMS – Root Mean Square
FFT – Fast Fourier Transform
CCEP – Corrente Continua Eletrodo Positivo

LISTA DE SIMBOLOS

A – Ampére

C – Carbono

Cr – Cromo

Cu – Cobre

Fe – Ferro

h – horas

Hz – Hertz

min – Minutos

mm – Milímetros

Mn – Manganês

Mo - Molibdênio

MPa – Mega Pascal

Ni – Níquel

°C – Grau Celsius

P – Fósforo

ppm – Parte por Milhão

S – Enxofre

s – segundos

Si – Silício

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO.....	11
1.1 OBJETIVOS.....	12
1.1.1 Objetivo Geral.....	12
1.1.2 Objetivos Específicos.....	12
1.2 JUSTIFICATIVA.....	12
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	13
2.1 A importância histórica do processo de soldagem.....	13
2.2 A influência dos Aços de Carbono no processo de soldagem por fusão.....	20
2.3 Acelerômetro Piezoelétrico.....	23
3 MATERIAIS E EXPERIMENTOS.....	25
4 RESULTADOS.....	29
4.1 Aceleração.....	29
CONCLUSÃO.....	43
REFERÊNCIAS.....	44

INTRODUÇÃO

A soldagem é um processo histórico há tempos utilizado nas formas de forjamento e brasagem. Armas, objetos cortantes e jóias eram os mais fabricados durante a antiguidade e a Idade Média.

Conceitualmente, a soldagem é compreendida como um processo de união de metais até que cheguem a uma distância suficientemente pequenas para que haja ligações metálicas e de Van der Waals (MODENESI; MARQUES, 2006).

Atualmente, a soldagem pode ser dividida em vários métodos, o conceito desses, dependem do processo utilizado. Dentre os conceitos mais utilizados, Modenesi e Marques (2006) afirmam que é um processo de junção de metais por fusão; operação com o objetivo de unir duas ou mais peças; operação visando obter a coalescência localizada através de temperatura adequada.

A presente pesquisa aborda a soldagem a arco através de fusão. Este tipo de soldagem tem o objetivo de atingir o ponto de fusão do metal base e do metal de adição, que quando é resfriado torna-se o cordão de solda. A soldagem a arco tem sido amplamente utilizado no setor industrial, especificamente a soldagem com o arame tubular que pode ser utilizada na soldagem com aços carbono com espessura $\geq 1\text{mm}$ e na soldagem de placas (MODENESI; MARQUES, 2006).

A soldagem com arame tubular faz com que o eletrodo seja protegido e aprimorado através da utilização de gás de proteção. Já o fluxo, possui uma função desoxidante, refinadora, estabilizadora e adicionadora de elementos de liga. Os arames tubulares tiveram seu desenvolvimento objetivando melhoria na competitividade, produtividade e redução de custos (MODENESI; MARQUES, 2006).

Durante a soldagem por arame tubular podem ocorrer algumas variações, para medi-las é acoplado um acelerômetro piezoelétrico, que podem gerar diferença no potencial elétrico ou carga mecânica aplicada. Os aspectos positivos no uso do acelerômetro vão da grande faixa de frequência e

amplitude, linearidade, robustez e estabilidade satisfatória (MODENESI; MARQUES, 2006).

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Analisar as variações no processo de soldagem com Arame Tubular através do acoplamento de um acelerômetro piezoelétrico.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Analisar as variações no processo de soldagem com Arame Tubular;
- Identificar as variações entre aceleração e tempo em relação a corrente.

1.2 JUSTIFICATIVA

A principal motivação para elaboração deste trabalho está no interesse em estudar e melhorar o processo de soldagem com Arame Tubular com o auxílio de um acelerômetro piezoelétrico, isso se dá devido ao grande uso desse processo nas indústrias, tanto na fabricação quanto na manutenção de equipamentos. Com a melhoria nesse tipo de soldagem, se pode ter um aumento na produtividade, bem como na diminuição de custos, sem comprometer a qualidade.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 A importância histórica do processo de soldagem

Historicamente as primeiras formas de soldagem foram as por forjamento e brasagem. Com aproximadamente cem anos, a forma atual é um processo considerado recente (MODENESI; MARQUES, 2006).

É válido lembrar que diversos artefatos comprovam que a soldagem existe a pelo menos 4000 AC. Como exemplo, podemos citar um pingente de ouro fabricado na Pérsia. Neste período, o ferro que teve como início de fabricação em 1500 AC através de redução direta, passou a substituir o cobre e o bronze. As técnicas de martelamento eram utilizadas para blocos com poucos quilogramas, já quando mais pesados, a soldagem ocorria através de forjamento aquecido ao rubro. Armas e objetos cortantes eram os mais fabricados durante a antiguidade e a idade média, ferro e tiras de aço eram utilizados e enrijecidos através da têmpera. Nesta época a soldagem era considerada um processo de grande importância tecnológica haja vista a carência de matéria-prima, alto custo do aço e tamanho dos blocos de ferro reduzidos (MODENESI; MARQUES, 2006).

Somente nos séculos XII e XIII, com a liquidez e disponibilidade de ferro fundido através da energia gerada pelos moinhos de água e nos séculos XIV e XV com o desenvolvimento do alto forno, a fundição passou a ser considerado um processo muito relevante na fabricação, já a soldagem por forjamento foi substituída pela rebitagem e parafusagem, considerada um processo secundário de fabricação até o século XIX (MODENESI; MARQUES, 2006).

Segundo Modenesi e Marques (2006), a tecnologia da soldagem passou a ser realmente reconhecida através dos experimentos com o arco elétrico realizados por Sir Humphrey Davy (1801-1806), da descoberta do acetileno por Edmund Davy e do desenvolvimento de fontes produtoras de energia elétrica possibilitando processos de soldagem por fusão.

Como conceito, a soldagem é um processo de união de metais baseada em forças microscópicas interatômicas ou intermoleculares. No caso do processo de soldagem, essa união é possível através da “aproximação dos átomos e moléculas das partes a serem unidas [...] até distâncias

suficientemente pequenas para a formação de ligações metálicas e de Van der Waals” (MODENESI; MARQUES, 2006 p. 4).

Várias são as definições que abrangem o termo soldagem. Para tal, é necessário observar o processo utilizado, se na fabricação, na recuperação, formação, corte ou recobrimento de peças. Dentre as definições, as mais encontradas em bibliografias segundo Modenesi e Marques (2006) são:

- "Processo de junção de metais por fusão". (Deve-se ressaltar que não só metais são soldáveis e que é possível soldar metais sem fusão).
- "Operação que visa obter a união de duas ou mais peças , assegurando, na junta soldada, a continuidade de propriedades físicas, químicas e metalúrgicas".
- "Operação que visa obter a coalescência localizada produzida pelo aquecimento até uma temperatura adequada, com ou sem a aplicação de pressão e de metal de adição." (Definição adotada pela AWS - American Welding Society).
- "Processo de união de materiais baseado no estabelecimento, na região de contato entre os materiais sendo unidos, de forças de ligação química de natureza similar às atuantes no interior dos próprios materiais." (MODENESI, MARQUES, 2006 p. 5).

A Associação Americana de Soldagem (*American Welding Society-AWS*) define como conceito de soldagem o processo utilizado para “obter a coalescência (união) localizada de metais e não-metais, produzida por aquecimento até uma temperatura adequada, com ou sem utilização de pressão e/ou material de adição” (MARQUES, MODENESE, BRACARENSE, 2011 p.19).

Diversos são os tipos de soldagem. Dois métodos principais são utilizados. O primeiro trata a soldagem por pressão, que incide em deformar a superfície de contato gerando a aproximação de átomos. Esse método pode ser potencializado através do aquecimento e soldagem por fusão. A soldagem por fusão depende do calor local empregado, com o objetivo de atingir o ponto de fusão do metal base e do metal de adição formando a poça de fusão, que ao ser resfriada e solidificada torna-se cordão de solda (MARQUES, MODENESE, BRACARENSE, 2011). A figura 1 demonstra através de ilustração como ocorre o processo de soldagem através de fusão.

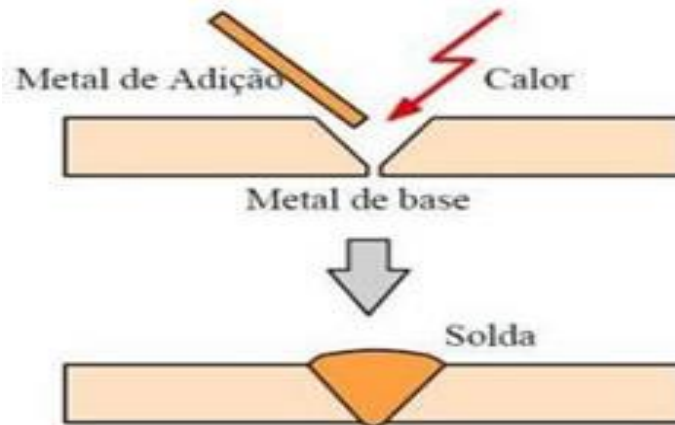


Figura 1 - Demonstração ilustrativa do processo de soldagem por fusão
FONTE: MODENESI, P. J.; MARQUES, P. V.; SANTOS, D. B. *Introdução à metalurgia da soldagem*. Universidade Federal De Minas Gerais, Departamento de Engenharia Metalúrgica, 2012 p.12.

São vários os processos de soldagem através da fusão e por este motivo, são separados em subgrupos. O Quadro 1 demonstra simplificadaamente alguns desses processos, suas características e aplicações.

Quadro 1- Processos de Soldagem através de fusão

(continua)

PROCESSO	FONTES DE CALOR	TIPO DE CORRENTE E POLARIDADE	AGENTE PROTETOR OU DE CORTE	OUTRAS CARACTERÍSTICAS E POSSÍVEIS APLICAÇÕES
Soldagem por eletro-escória	Aquecimento por resistência da escória líquida	Contínua ou alternada	Escória	Automática/mecanizada, junta na vertical, arame alimentado mecanicamente na poça de fusão. Não existe arco. Aplica-se na soldagem de aços carbono, baixa e alta liga, espessura ≥ 50 mm. O processo pode ser utilizado na soldagem de peças de grande espessuras e eixos.
Soldagem ao Arco Submerso	Arco elétrico	Contínua ou alternada. Eletrodo +.	Escória e gases gerados.	Automática/mecanizada/semi-automática, o arco arde sob uma camada de fluxo granular. O processo pode ser utilizado na soldagem de aços carbono, baixa e alta liga, espessura ≥ 10 mm. Posição plana ou horizontal de peças estruturais, tanques, vasos de pressão, entre outros.
Soldagem com Eletrodos Revestidos	Arco elétrico	Contínua ou alternada. Eletrodo + ou -	Escória e gases gerados.	Manual. Vareta metálica recoberta por camada de fluxo, pode ser aplicado na soldagem de quase todos os metais exceto cobre puro, metais preciosos, reativos e de baixo ponto de fusão, usado na soldagem em geral.
Soldagem com Arame Tubular	Arco elétrico	Contínua. Eletrodo +.	Escória e gases gerados ou fornecidos por fonte externa, em geral o CO ₂ .	O fluxo está contido dentro de um arame tubular de pequeno diâmetro, automático ou semi-automático, pode ser aplicado na soldagem de aços carbono com espessura ≥ 1 mm e na soldagem de placas.
Soldagem MIG/MAG	Arco elétrico	Contínua. Eletrodo +.	Argônio ou Hélio, Argônio + O ₂ , Argônio + CO ₂ , CO ₂ .	Automática, mecanizada ou semi-automática, arame sólido. Própria a aplicação na soldagem de aços carbono, baixa e alta liga, não ferrosos, com espessura ≥ 1 mm, soldagem de tubos, chapas, em qualquer posição.

Quadro 1- Processos de Soldagem através de fusão

(conclusão)

Soldagem a Plasma	Arco elétrico	Contínua. Eletrodo -.	Argônio, Hélio ou Argônio + Hidrogênio	Manual ou automática. O arame é adicionado separadamente, eletrodo não consumível de Tungstênio, o arco é constricto por um bocal. Pode ser aplicado em todos os metais exceto Zn, Be e suas ligas, com espessura de até 1,5 mm, passes de raiz.
Soldagem TIG	Arco elétrico	Contínua ou alternada Eletrodo -.	Argônio, Hélio ou mistura desses.	Manual ou automática, eletrodo não consumível de Tungstênio, o arame é adicionado separadamente. Próprio para soldagem de todos os metais exceto Zn, Be e suas ligas, espessura entre 1 e 6mm, soldagem de não ferrosos e aço inox, passe de raiz de soldas em tubulações.
Soldagem por Feixe Eletrônico	Feixe eletrônico	Contínua. Alta Tensão. Peça +.	Vácuo ($\times 10^{-4}$ mm Hg).	Soldagem automática, sem transferência de metal, feixe de elétrons focalizado em um pequeno ponto. Próprio para soldagem de todos os metais exceto nos casos de evolução de gases ou vaporização excessiva, a partir de 25 mm de espessura, utilizado para indústria nuclear e aeroespacial.
Soldagem a Laser	Feixe de luz		Argônio ou Hélio	Soldagem automática, sem transferência de metal, feixe de elétrons focalizado em um pequeno ponto. Próprio para soldagem de todos os metais exceto nos casos de evolução de gases ou vaporização excessiva, a partir de 25 mm de espessura, utilizado para indústria nuclear e aeroespacial, corte de materiais não metálicos.
Soldagem a Gás	Chama oxi-acetilênica		Gases CO, H ₂ , CO ₂ , H ₂ O.	Manual, arame adicionado separadamente. Soldagem manual de aço carbono, Cu, Al, Zn, Pb e bronze. Próprio para soldagem de chapas finas e tubos de pequeno diâmetro.

Fonte: Adaptada de: MODEDESI, P. J.; MARQUES, P. V. *Soldagem I: Introdução aos processos de soldagem*. Universidade Federal De Minas Gerais, Departamento de Engenharia Metalúrgica, 2006 p.11.

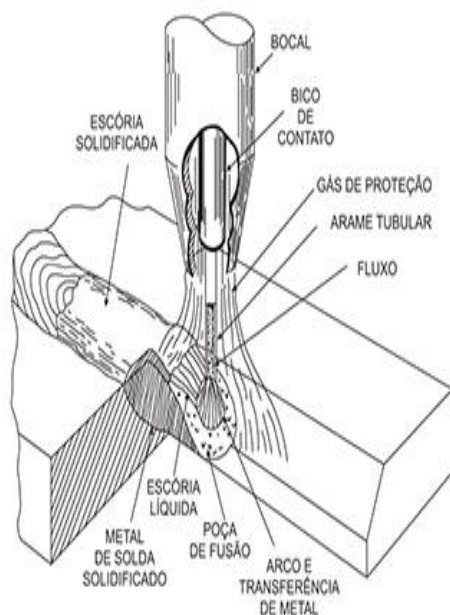
Atualmente, os processos de soldagem por fusão que possuem maior importância industrial, são os que utilizam os processos de soldagem a arco. Segundo Modenesi e Marques (2011 p. 12), o “arco é uma descarga elétrica em um meio gasoso parcialmente ionizado [...] mantido entre um eletrodo cilíndrico e o metal base”.

Dentre esse processo, pode acontecer de o metal utilizado como base não fazer parte do circuito elétrico, porém, na maioria dos casos, o eletrodo é fundido pelo arco e acaba por fornecer metal de adição para a solda, isso quando utilizado eletrodos consumíveis. Pode acontecer a não fundição de forma significativa, em geral quando são utilizados eletrodos de tungstênio ou grafite. Na soldagem a arco, o formato do cordão de solda irá depender da corrente e tensão elétrica fornecida, bem como nos processos da velocidade com que o arco se desloca ao longo da junta (MODENESI; MARQUES, 2006).

Delimitando o tema de estudo, passa-se a abordar especificamente a soldagem com arame tubular. Este tipo de soldagem utiliza como fonte de calor o arco elétrico, a corrente deve ser contínua e o eletrodo +. São utilizados como agente protetor ou de corte escória e gases gerados ou fornecidos por fonte externa, em geral o CO₂. O fluxo está contido dentro de um arame tubular de pequeno diâmetro, automático ou semi-automático. Este procedimento de soldagem pode ser aplicado na soldagem de aços carbono com espessura ≥ 1mm e na soldagem de placas.

Segundo Marques, Modenese e Bracarense (2011), o método de soldagem com arame tubular permite a proteção do eletrodo e pode ser aprimorado através do uso de um gás de proteção, considerado uma fonte externa. O material interno, chamado de fluxo, possui função desoxidante, refinador do material de solda, estabilizador do arco elétrico e adicionador de elementos de liga. Vale ressaltar que existem também arames tubulares cujo enchimento é realizado com pós de metais. A Figura 2 diferencia a soldagem com arames tubulares com proteção externa e autoprotetidos.

Soldagem com arames tubulares com proteção externa



Soldagem com arames tubulares autoprotetidos

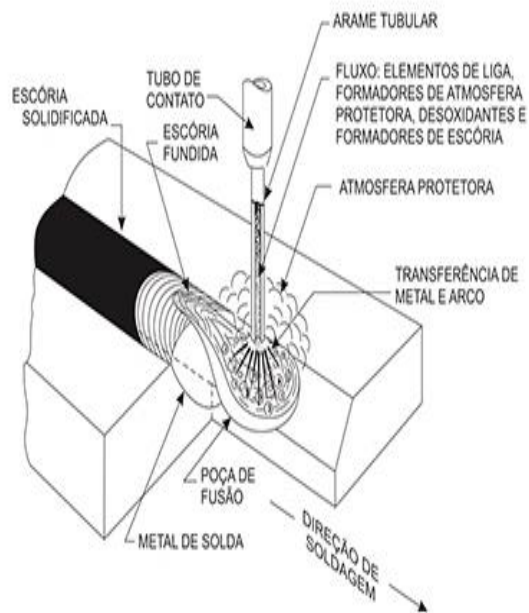


Figura 2 – Representação de soldagem com arames tubulares com proteção externa e autoprotetidos

Fonte: Soldagem com arames tubulares. Disponível em:

http://www.esab.com.br/br/pt/education/blog/processo_soldagem_arames_tubulares.cfm

Acesso em 08 de setembro de 2017.

Os arames tubulares foram desenvolvidos buscando melhorar a competitividade, a produtividade e redução de custos, a Figura acima demonstra que o fluxo pode conter minerais e ferros-liga em seu interior fornecendo gás de proteção, desoxidantes e materiais que formam escória. O fato é que esse fluxo estabiliza o arco, influenciando mecanicamente as propriedades mecânicas do material de solda e no perfil da mesma (CAMPOS, 2015).

Dentre as vantagens da soldagem com arame tubular, temos o “alto fator de trabalho do soldador, alta taxa de deposição, alto rendimento, resultando em alta produtividade e qualidade da solda” (CAMPOS, 2015 p. 25).

Esse tipo de soldagem também proporciona os benefícios da soldagem manual com eletrodos revestidos (SMAW), havendo alta versatilidade, probabilidades de ajustes da composição química do cordão e facilidade de operação em campo (CAMPOS, 2015).

Para Campos, (2015) o arame tubular proporciona uma flexibilidade maior aumentando a produtividade com baixo custo.

2.2 A influência dos Aços de Carbono no processo de soldagem por fusão

O conceito de aço refere-se a liga entre ferro e carbono além de alguns elementos residuais advindos do processo de fabricação. Os aços, podem ter suas propriedades variadas dependendo de sua composição e temperatura utilizada durante o tratamento. Em relação a máxima solubilidade do carbono no ferro em temperatura ambiente, o limite pode chegar a 0,008%, já no caso de dissolução de carbono no ferro este limite pode atingir o máximo de 2,11% (CAMPOS, 2015; CHIAVERINI, 1988).

Os aços são comumente classificados de acordo com a porcentagem de carbono na composição: “até 0,14%, aço baixo carbono, entre 0,15% e 0,29% aço doce, entre 0,30% e 0,59%, aço médio carbono e entre 0,60% e 2,00% são os aços alta liga” (CAMPOS, 2005 p. 15).

Quanto à solubilidade e resistência, os mais produzidos são o aço doce e de baixo carbono. As quantidades baixas de elementos de liga podem alterar as propriedades mecânicas, trazendo resistência, tenacidade e diminuição da corrosão.

Para que haja um bom entendimento do aço é necessário o estudo completo do diagrama de equilíbrio Fe-C, representado pela Figura 3.

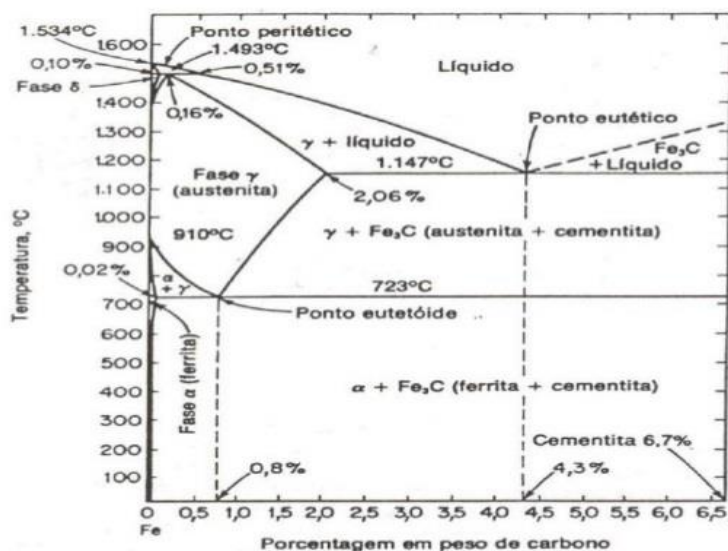


Figura 3 – Ilustração do Diagrama de Equilíbrio Fe-C

Fonte: POLLACK, H. *Materials science and metallurgy*. 4ed, PRENTICE-HALL, UPPER SADDLE RIVER, NJ, 1988.

No diagrama de Equilíbrio Fe-C, a porcentagem de peso de carbono pode atingir um valor máximo de 6,7%. Para que haja um valor de mercado considerável, o valor máximo utilizado varia entre 4,0 e 4,5% (CHIAVERINI, 1988).

Existem quatro elementos que podem influenciar as propriedades mecânicas do aço, a austenita, que só atinge a estabilidade com temperatura acima de 727°C, tem ótima resistência mecânica e tenacidade além de não ser magnética. A ferrita, que contém ferro em estado alotrópico alfa e traços de carbono, possuindo baixa dureza e resistência à tração, com ótima resistência ao choque e alongamento. A cementita, que por ser um carboneto de ferro possui alta dureza e é bastante quebradiça. Pode ser responsabilizada por aumentar a dureza e resistência, e também por diminuir a ductilidade, sendo sua estrutura cristalina e ortorrômbica. A perlita é a junção de ferrita e cementita, para tal, suas propriedades são consideradas intermediárias, podendo alterar a faixa de temperatura principalmente onde duas formas alotrópicas coexistirem (CHIAVERINI, 1988).

Chiaverini (1988) relata que vários são os sistemas de classificação de aços, haja vista a variedade e quantidade. Os sistemas de classificação mais utilizados como base são os do *American Iron and Steel Institute – AISI* e da *Society of Automotive Engineers - SAE*. O Quadro 2 representa a classificação dos dois sistemas:

Quadro 2 - Tipos de aço de acordo com os sistemas de classificação SAE e AISI

(continua)

Designação		
SAE	AISI	Tipos de Aço
10XX	C10XX	Aços carbono comuns
11XX	C11XX	Aços de usinagem (ou corte) fácil com alto S
13XX	13XX	Aço manganês com 1,75% de Mn
23XX	23XX	Aços Níquel com 3,5% de Ni
25XX	25XX	Aços Níquel com 5,0% de Ni

Quadro 2 - Tipos de aço de acordo com os sistemas de classificação SAE e AISI

(conclusão)

31XX	31XX	Aços Níquel Cromo com 1,25% de Ni e 0,65% de Cr
33XX	E33XX	Aços Níquel Cromo com 3,5% de Ni e 1,55% de Cr
40XX	40XX	Aços Molibdênio com 0,25% de Mo
41XX	41XX	Aços Cromo Molibdênio com 0,50% ou 0,90% de Cr e 0,12% ou 0,20% de Mo
43XX	43XX	Aço Níquel Cromo com Molibdênio com 1,80% de Ni e 0,20% ou 0,25% de Mo
46XX	46XX	Aço Níquel Molibdênio com 1,55% ou 1,80% de Ni e 0,20% ou 0,25% de Mo
47XX	47XX	Aço Níquel Cromo Molibdênio com 1,05% de Ni e 0,45% de Cr e 0,20% de Mo
48XX	48XX	Aço Níquel Molibdênio com 3,5% de Ni e 0,25% de Mo
50XX	50XX	Aço Cromo com 0,28% ou 0,65% de Cr.
50BXX	50BXX	Aço Cromo Boro com baixo teor de Cr e no mínimo 0,0005% de B
51XX	51XX	Aço Cromo com 0,80% a 1,05% de Cr
61XX	61XX	Aço Cromo vanádio com 0,8 ou 0,95% de Cr a 0,1% ou 0,15% de V
86XX	86XX	Aço Níquel Molibdênio com baixos teores de Ni, Cr e Mo
87XX	87XX	Aço Níquel Molibdênio com baixos teores de Ni, Cr e Mo
92XX	92XX	Aço Silício Manganês com 0,85% de Mn e 2,0% de Si
93XX	93XX	Aço Silício Manganês com 3,25% de Ni, 1,20% de Cr e 0,12% de Mo
94BXX	94BXX	Aço Níquel Cromo Molibdênio com baixos teores de Ni, Mo e no mínimo 0,0005% de B
98XX	98XX	Aço Níquel Cromo Molibdênio com 1,0% de Ni, 0,80 de Cr e 0,25 de Mo

Fonte: Adaptado de CAMPOS, C. A. K. de. *Análise da morfologia de cordões de solda em depósitos de aço inoxidável martensítico sobre um substrato em aço SAE 1020*. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Tecnológica Federal do Paraná Departamento Acadêmico de Mecânica - Curso de Engenharia Mecânica. Cornélio Procópio, 2015.

O quadro 2 permite observar que a classificação é fundamentada na porcentagem de Carbono que possui o aço, onde os dois dígitos finais representam os centésimos de Carbono, podendo sofrer variações de 0,05% a 0,95%. Caso o Carbono ultrapasse 1,00% haverá, ao invés de dois dígitos, três e a classificação tem um total de cinco dígitos. O aço SAE 1020, pode ser considerado um aço de baixo custo, e seu nível de Carbono é em torno de 0,2% (CAMPOS, 2015).

De acordo com Chiaverini (1988), impurezas como fósforo, enxofre, manganês, silício e alumínio na composição química do aço são comuns, elas reagem com elementos não metálicos como oxigênio e nitrogênio, formando as inclusões não metálicas que surgem na fase final de desoxidação. As inclusões podem prejudicar ou não a qualidade do aço, uma quantidade acima do permitido pode tornar a liga inconfiável.

O momento da soldagem por arame tubular pode sofrer algumas variações, quanto menor o deslocamento sofrido pela peça, melhor a qualidade da solda. Muitas vezes, as variações sofridas não podem ser visualizadas a olho nu, dessa forma, o acoplamento do acelerômetro piezoelétrico permitirá chegar a menor variação possível da peça, como poderá ser observado no item a seguir.

2.3 Acelerômetro Piezoelétrico

Os acelerômetros são elementos sensores que permitem medir vibrações. Além de sua utilidade industrial, produtos utilizados no dia-a-dia como tênis de corrida, tablets, airbags e notebooks possuem aplicações de acelerômetro. As vantagens no uso do acelerômetro é que esses são pequenos, leves, possuem várias faixas de frequência (1 a 10000 Hz) sendo capazes de medir frequências de 0,02 Hz (MEDEIROS, 2014). Como pode ser observado através da figura 4.



Figura 4 – Acelerômetro Piezoelétrico

Fonte: Acelerômetro piezoelétrico. Disponível em:

<http://www.directindustry.com/pt/fabricante-industrial/acelerometro-62014.html> Acesso em 10 de Setembro de 2017.

Segundo Medeiros (2014 p. 42), “os acelerômetros piezoelétricos utilizam cristais naturais ou sintéticos que são capazes de gerar diferença no potencial elétrico ou carga a partir de uma tensão mecânica aplicada”. As vantagens no uso desse tipo de acelerômetro vão da grande faixa de frequência e amplitude, boa linearidade, robustez e estabilidade satisfatória.

Rodrigues et al (2010), indica que a variação de movimento (F), a massa (m) em seu interior produz uma tensão mecânica no material piezoelétrico, que responde gerando uma carga elétrica (Q) proporcional ao movimento. Essa variação pode ser melhor compreendida através da seguinte fórmula:

$$Q = dij F = dij m . a$$

Os acelerômetros podem variar conforme seu funcionamento, compressão do elemento piezoelétrico, força perpendicular ao plano e o tipo shear em que a massa sísmica gera força de cisalhamento no elemento piezoelétrico. Esses acelerômetros apresentam alta impedância de saída, por isso a carga gerada é de baixa intensidade. É necessário o uso de um circuito condicionador de sinais, para isso um amplificador de carga converte a carga elétrica em sinal de tensão elétrica e amplifica o sinal de saída. O acelerômetro piezoelétrico convencional possui como vantagens “maior faixa de temperatura, maior durabilidade, baixa sensibilidade a descargas eletrostáticas”. A desvantagem é necessitar de amplificador de carga, cuidados na instalação e operação, efeitos de ruídos e necessitar de cabos muito longos (RODRIGUES, 2010 p. 2).

3 MATERIAIS E EXPERIMENTOS

Os ensaios foram realizados exclusivamente com o processo de soldagem com arame tubular (FCAW).

Como metal de base foi adotado barras de aço trefiladas SAE 1020, com corpos de prova nas seguintes dimensões: 185,00 mm (milímetros) de comprimento; 63,50 mm (milímetros) de largura e 12,70 mm (milímetros) de espessura. A Tabela 1 demonstra a composição química das barras, fornecida pelo fabricante através de certificado da composição química.

Tabela 1 - Composição química das barras de aço SAE 1020

Elementos	C	Mn	Si	P	S	Cu	Cr	Ni	Sn	N ppm
Teor em %	0,18/ 0,23	0,30/ 0,60	0,10/ 0,30	0,03 máx.	0,035 máx.	0,200 máx.	0,150 máx.	0,150 máx.	0,060 máx.	80
Resistência à tração (MPa)				40	Limite de Escoamento (MPa)					30

Fonte: MORENO, J. R. S.; CORREA, C. A. ; MARIN, L. G. Estudo da estabilidade do arco elétrico gerado pela soldagem de revestimento (FCAW) devido à variação da tensão/corrente e velocidade de soldagem. **Revista SODEBRAS**, v. 134, p. 145-150, 2017.

O metal de adição selecionado foi o arame tubular inoxidável martensítico utilizado na construção e recuperação de componentes de turbinas Francis, Kaplan e Pelton, especificado segundo a norma ASME 2007, seção II, parte C (AWS SFA 5-22) como AWS EC 410 NiMo MC. O diâmetro do arame adotado foi de 1,2 milímetros (mm) e a composição química fornecida pelo fabricante está apresentada na Tabela 4:

Tabela 2 - Composição química do metal de adição – EC410NiMo MC- Martensítico

Elementos	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
Teor em %	0,027	0,440	0,590	0,024	0,006	0,500	0,860	0,430
Resistência à tração: 910 MPa				Limite de Escoamento: 830 MPa				

Fonte: MORENO, J. R. S.; CORREA, C. A. ; MARIN, L. G. Estudo da estabilidade do arco elétrico gerado pela soldagem de revestimento (FCAW) devido à variação da tensão/corrente e velocidade de soldagem. **Revista SODEBRAS**, v. 134, p. 145-150, 2017.

A Tabela 3 apresenta os parâmetros de soldagem determinados como constantes:

Tabela 3 - Parâmetros e níveis mantidos constantes durante a soldagem

PARÂMETRO	NÍVEL
Polaridade do Eletrodo	CCEP- Corrente contínua eletrodo positivo.
Gás de Proteção	98% Argônio + 2% Oxigênio
Vazão do Gás	18 litros por minuto
Ângulo da Tocha	90°
Posição de Soldagem	Plana
Temperatura de Interpasse	150 °C
Velocidade de Alimentação do Arame	8,5 metros por minuto
Quantidade de Cordões	01

Fonte: MORENO, J. R. S.; CORREA, C. A. ; MARIN, L. G. Estudo da estabilidade do arco elétrico gerado pela soldagem de revestimento (FCAW) devido à variação da tensão/corrente e velocidade de soldagem. **Revista SODEBRAS**, v. 134, p. 145-150, 2017.

Foi utilizado na bancada de experimentos um sistema de aquisição portátil da IMC-Soldagem modelo SAP-4 (Sistema de Aquisição Portátil-4) para realizar a leitura instantânea das grandezas corrente, tensão, velocidade de arame e vazão de gás, com tempo configurável de até 600 s, com taxa de amostragem de 5000 pontos por segundo para cada variável. A leitura dos valores médios e eficazes da corrente e tensão, de potência, de tempo de arco aberto, quantidade de arame para acompanhamento da produção e qualidade da solda pode ser feita com amostras de 1 s por até 80 h seguidas, ou em 0.1 s por 8 h.

Além da aquisição dos dados de tensão e corrente, fora utilizado um sistema de aquisição de dados da National Instruments CDAQ-9178 com os módulos de aquisição de temperatura e acelerômetro. O acelerômetro utilizado é o industrial piezelétrico de vibração modelo KS80D, com uma faixa de frequência linear de 0,3 a 14.000 Hz.

Os equipamentos foram distribuídos na bancada como na Figura a seguir:

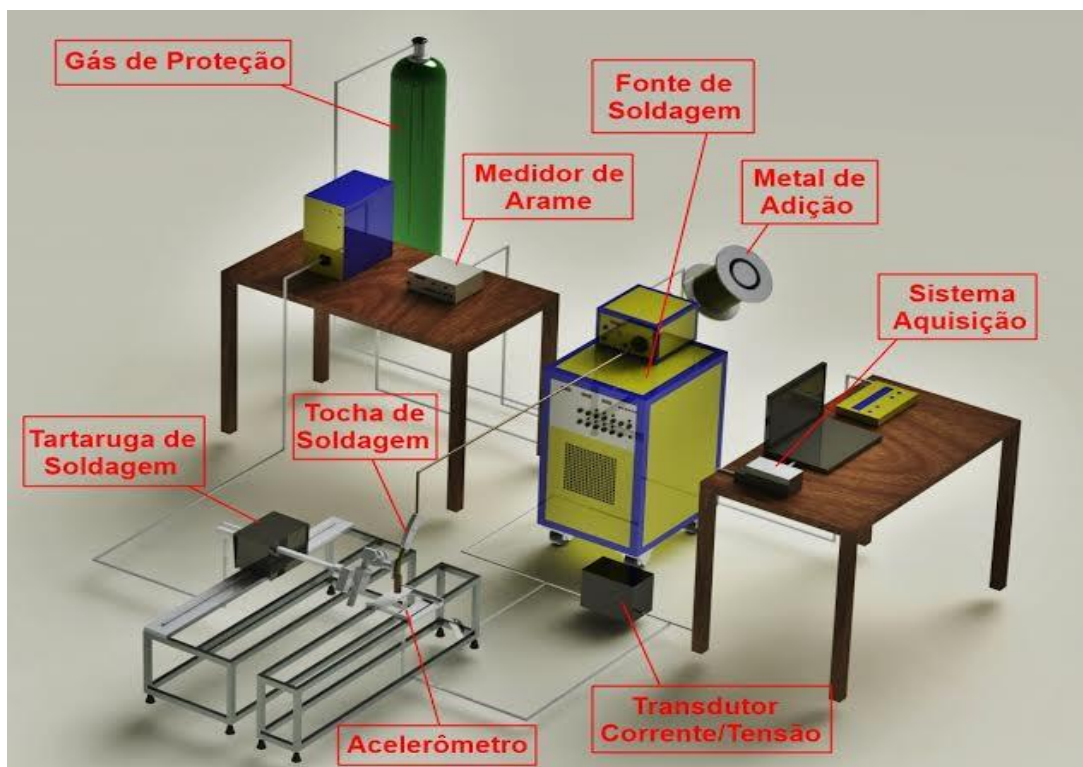


Figura 5 - Bancada de Experimento

Fonte: MORENO, J. R. S.; CORREA, C. A. ; MARIN, L. G. Estudo da estabilidade do arco elétrico gerado pela soldagem de revestimento (FCAW) devido à variação da tensão/corrente e velocidade de soldagem. **Revista SODEBRAS**, v. 134, p. 145-150, 2017.

Durante a soldagem a temperatura da peça é maior que a temperatura de utilização do acelerômetro, então o mesmo foi colocado lateralmente na mesa de soldagem e na linha central do corpo de prova, sendo mostrado esquematicamente na Figura abaixo.

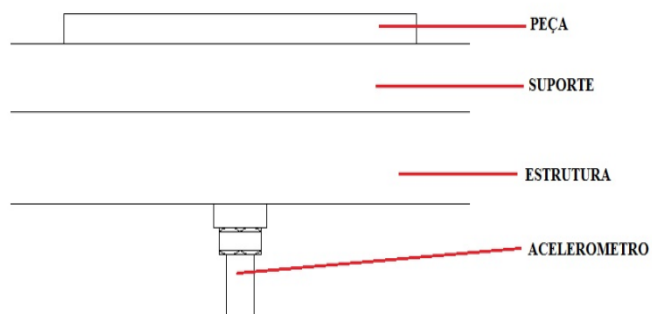


Figura 6 – Localização esquemática do acelerômetro.

Fonte: SOUZA, 2017.

No início dos experimentos, foram feitos testes iniciais para a verificação da resposta do acelerômetro, e se a localização deste não afetava os resultados na aquisição da aceleração.

4. RESULTADOS

Serão apresentados e discutidos os resultados obtidos durante o desenvolvimento experimental. Serão abordados os resultados da aceleração durante a soldagem.

4.1 Aceleração

Pensando em facilitar a análise dos dados, foi utilizada a Tabela 4 que demonstra os resultados de corrente, tensão e aceleração da corrente. Para os resultados serem mais confiáveis, escolheu-se um intervalo entre 20 e 30 segundos, assim a corrente e a tensão já estão mais estabilizadas, diminuindo os erros sistemáticos.

Tabela 4 – Resultados de corrente, tensão e aceleração da corrente.

Número do Ensaio	Parâmetros de Soldagem				Resultados		
	Corrente Média (A)	Frequência de Pulsação (Hz)	Velocidade de Soldagem (mm/min.)	DBCP (mm)	Corrente RMS (A)	Tensão RMS (V)	Aceleração RMS (m/s^2)
1	170	18,18	300	30	193,2465	15,2346	0,3779
2		22,22	350	33	185,4450	16,9629	0,3147
3		20,00	400	36	160,5643	17,7862	0,2945
4	200	20,00	300	33	191,3539	25,4825	0,2009
5		18,18	350	36	182,2212	26,3488	0,1854
6		22,22	400	30	178,3370	22,1801	0,2065
7	230	22,22	300	36	209,9335	27,8447	0,1810
8		20,00	350	30	215,3948	25,3854	0,1700
9		18,18	400	33	195,2679	25,3066	0,1665

Fonte: MORENO, J. R. S.; CORREA, C. A. ; MARIN, L. G. Estudo da estabilidade do arco elétrico gerado pela soldagem de revestimento (FCAW) devido à variação da tensão/corrente e velocidade de soldagem. **Revista SODEBRAS**, v. 134, p. 145-150, 2017.

A aceleração pode ser considerada uma variável mecânica, já que é um fenômeno vibratório que pode ser medido. Neste caso, o acelerômetro é capaz de medir velocidade e aceleração. Através de uma excitação vibratória, o transdutor gera um sinal através de uma carga ou tensão elétrica adequada a aceleração, ou uma força proporcional à sensibilidade, esse sinal permite realizar a leitura adequada ao equipamento de medição (MEDEIROS, 2014).

A Figura 7 a seguir mostra o efeito das variáveis na aceleração, e de acordo com a Tabela acima a média geral da aceleração foi de $0,2330 \text{ m/s}^2$, representada pela linha tracejada na Figura. Observa-se que a frequência de pulsação, a velocidade de soldagem e a DBCP não afetaram a aceleração. Com o aumento da corrente média a aceleração diminuiu, e possivelmente este resultado se deva ao fato de que as correntes utilizadas estão próximas à região de mudança do tipo de transferência (curto-circuito para globular) causando uma estabilidade e/ou instabilidade no arco elétrico e por consequência diminuindo a aceleração, sendo que por maior experiência que se tenha o soldador, não é possível verificar este comportamento a olho nu.

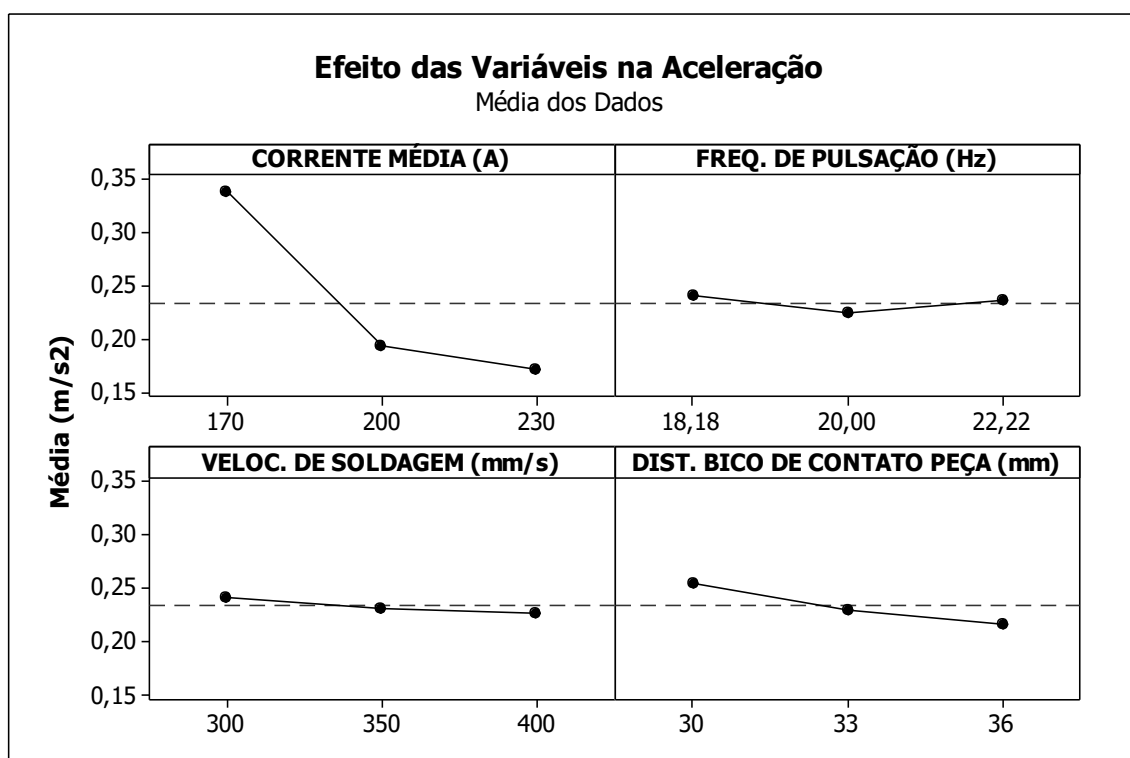


Figura 7 – Efeito das variáveis na Aceleração.
Fonte: SOUZA, 2017.

A Figura seguinte demonstra o gráfico da aceleração. Os ensaios de 1 a 3 são com corrente de 170 amperes, os de 4 a 6 com corrente de 200 amperes e 7 a 9 com corrente de 230 amperes. A média da aceleração em RMS para a corrente de 170 amperes foi de $0,3290 \text{ m/s}^2$, para a corrente de 200 amperes de $0,1976 \text{ m/s}^2$ e para a corrente de 230 amperes de $0,1725 \text{ m/s}^2$. Observamos que com o aumento da corrente média de 170 para 200 amperes a aceleração diminuiu e também de 200 para 230 amperes. Como o nível da aceleração

diminuiu em 230 amperes demonstra que nestas condições temos uma menor ocorrência de vibrações e que as condições de soldagem foram melhores que em correntes de 170 e 200 amperes, somente a corrente média afetou a aceleração. Possivelmente em correntes de 230 amperes temos um melhor balanço entre a velocidade de alimentação do arame e a velocidade de soldagem. Também podemos afirmar que houve uma menor vibração em RMS com correntes de 230 amperes e que possivelmente nesta condição temos uma melhor estabilidade do arco elétrico.



Figura 8 – Gráfico da Aceleração.
Fonte: SOUZA, 2017.

Para uma melhor compreensão dos resultados da aceleração foram selecionadas as três condições RMS com corrente pulsada, um para a corrente de 170 amperes (0,3779 m/s²), outro para a corrente de 200 amperes (0,2065 m/s²) e outro para 230 amperes (0,1665 m/s²), pois temos as maiores variação de corrente e tensão; e as piores e melhores condições para a soldagem de revestimento, principalmente na morfologia do cordão. Foi então selecionado um intervalo de 0,5 segundo em todos os ensaios para uma melhor compreensão, e então analisados os sinais correspondentes dentro desta faixa.

As Figuras 9, 10 e 11 apresentam os sinais sincronizados da corrente, tensão e aceleração, sendo que na Figura 9 a corrente é de 170 amperes, frequência de pulsação de 18,18 Hz, velocidade de soldagem de 300 mm/s, DBCP com 30 mm e com aceleração em RMS de 0,3779 m/s². Ainda nesta

figura cada pico de corrente associado simultaneamente com um pico de tensão há uma transferência da ponta do arame para a peça. Observamos que houve vários destacamentos irregulares provocando uma instabilidade do arco elétrico na transferência da corrente de 170 amperes (a), sendo esta irregularidade comprovada com picos na corrente e tensão. E a cada irregularidade na transferência a aceleração tem um comportamento similar ao da corrente e da tensão, fazendo com que o valor atingido em RMS seja de $0,3779 \text{ m/s}^2$; possivelmente este tipo de comportamento esteja associado a menor energia de soldagem no arco elétrico, fazendo com que a ponta do eletrodo não esteja suficientemente aquecida, ou a gota não tenha a formação adequada.

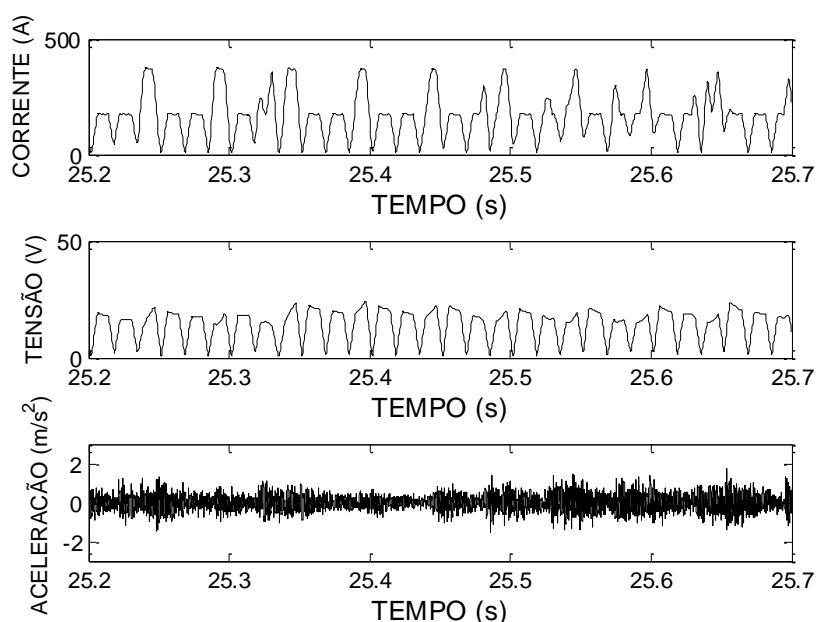


Figura 9 – Aquisição simultânea da corrente, tensão e aceleração para a corrente de 170 amperes.

* $\bar{\gamma} = 0,3779 \text{ m/s}^2$

Fonte: SOUZA, 2017.

Na Figura 10 da aquisição de dados, a corrente é de 200 amperes, frequência de pulsação de 22,22 Hz, velocidade de soldagem de 400 mm/s, DBCP com 30 mm e com aceleração em RMS de $0,2065 \text{ m/s}^2$. Observamos nesta figura que a corrente, a tensão e a aceleração tem um comportamento melhor que na corrente de 170 amperes (Figura 8), e isto se deve ao fato de termos uma maior energia do arco, facilitando o aquecimento na ponta do eletrodo e também a sua transferência para a peça com uma melhor

estabilidade do arco elétrico. Quando comparamos o valor em RMS da aceleração na corrente de 200 amperes foi de $0,2065 \text{ m/s}^2$ e na corrente de 170 amperes de $0,3779 \text{ m/s}^2$, com uma redução de 46% do valor em RMS.

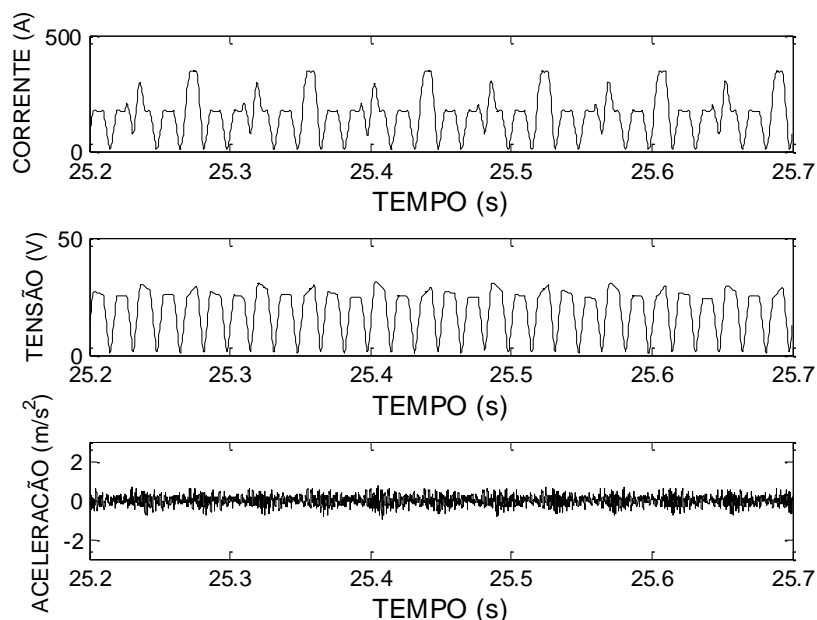


Figura 10 – Aquisição simultânea da corrente, tensão e aceleração para a corrente de 200 amperes.

* $\bar{\gamma}=0,2065 \text{ m/s}^2$

Fonte: SOUZA, 2017.

Na Figura 11 a corrente é de 230 amperes, frequência de pulsação de 18,18 Hz, velocidade de soldagem de 400 mm/s, DBCP com 33 mm e com aceleração em RMS de $0,1665 \text{ m/s}^2$. Nos sinais adquiridos para a corrente de 230 amperes podemos observar que os destacamentos da gota são uniformes e regulares, e também ocorreu o toque da gota na peça duas vezes antes de ocorrer a transferência, com a corrente e tensão se aproximando de zero. Possivelmente nestas condições de soldagem a gota tocou a peça, porém não houve transferência, pois a gota não tinha se formado ainda e estava com um pequeno volume, efeito este chamado “colchão” no processo de arame tubular (BRAGA (1997) apud BONISZEWSKI, (1992)). Nesta condição a energia do arco foi maior facilitando o destacamento da gota com o aquecimento do eletrodo. Também em cada pico da corrente houve um destacamento da gota, com um aumento da tensão e da aceleração, e esta transferência para a corrente de 230 amperes é considerada estável. Quando comparamos a

aceleração em RMS de 230 amperes ($0,1665 \text{ m/s}^2$) com a aceleração de 200 amperes ($0,2065 \text{ m/s}^2$), houve uma diminuição de 20%, comprovando a estabilidade do arco elétrico.

Possivelmente houve destacamento da gota por curto circuito devido à baixa corrente e tensão de acordo com dados adquiridos, fazendo com que esta condição de soldagem ficasse estável ou instável. A instabilidade do arco elétrico também foi encontrada entre outros por DUTRA (1989, 1990), JOHNSON et al (1991), KIM & EAGAR (1993), WANG et al (1995), ADOLFSSON et al (1999), LIMA & FERRARESI (2006), PEIXOTO et al (2011).

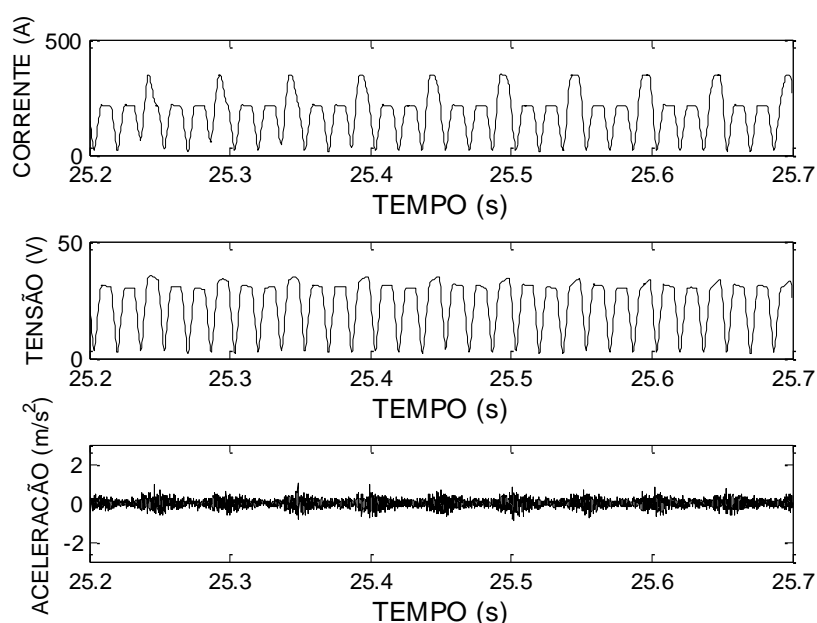


Figura 11 – Aquisição simultânea da corrente, tensão e aceleração para a corrente de 230 amperes.

* $\bar{\gamma}=0,1665 \text{ m/s}^2$

Fonte: SOUZA, 2017.

Na Figura 12 (c) cada pico do sinal do acelerômetro corresponde a um destacamento regular e/ou irregular da corrente, confirmando a irregularidade da transferência do arco elétrico; e quando a transferência é regular o acelerômetro tem o mesmo comportamento (tempo entre 25,35 e 25,45 segundos). Na FFT da aceleração (d) são quatro regiões que aparecem picos de aceleração e com grande variação de espectro na frequência. Estas regiões registram valores entre $0,04$ e $0,07 \text{ m/s}^2$ (abaixo de 800 Hz). Apenas uma

região aparece com valores abaixo de $0,04 \text{ m/s}^2$ (frequência entre 800 e 1000 Hz.).

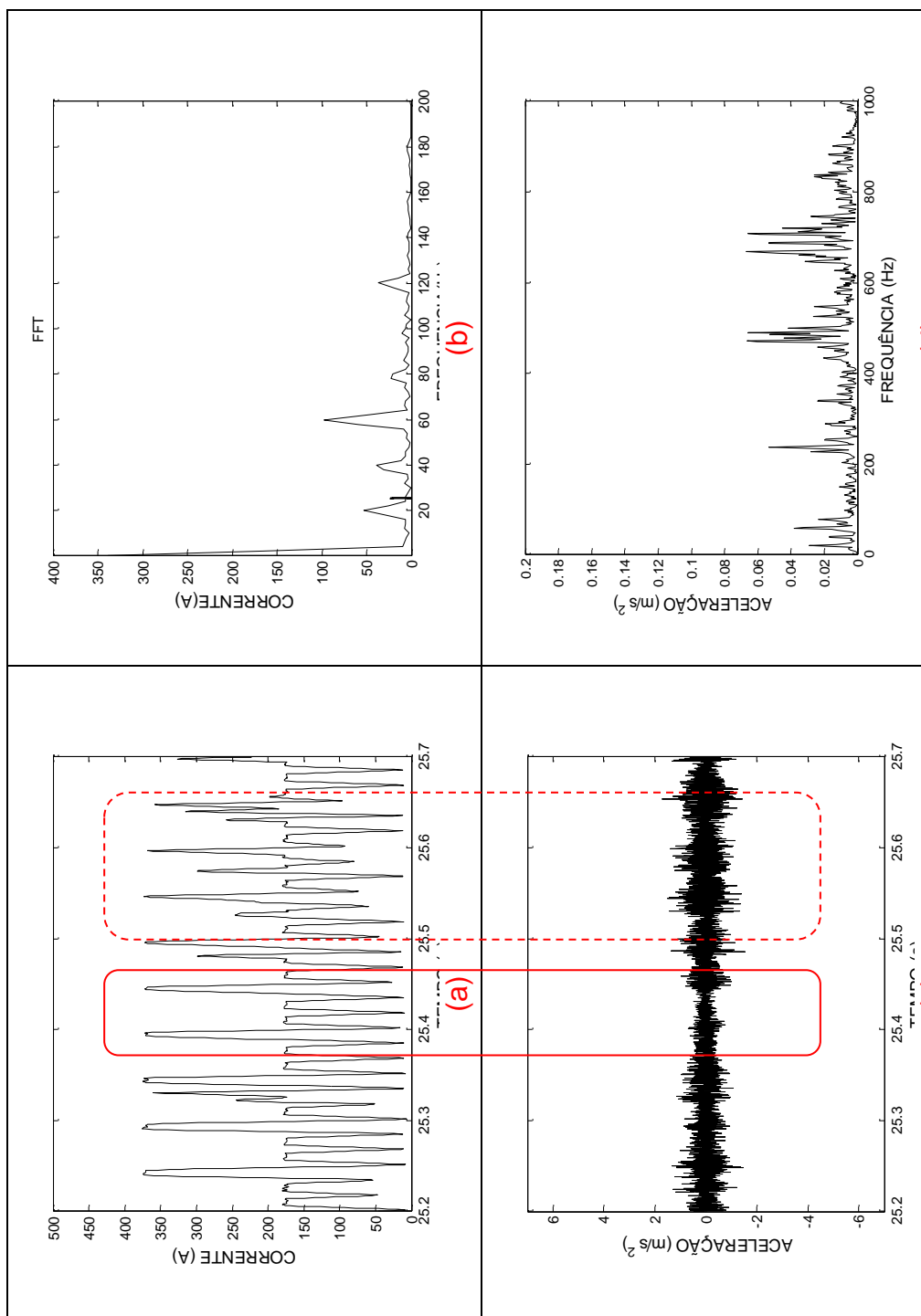


Figura 12 – Corrente de 170 amperes: (a) sinal da corrente, (b) FFT do sinal da corrente, (c) sinal do acelerômetro, (d) FFT do sinal do acelerômetro.
Fonte: Autoria própria

Na Figura 13 na corrente de 200 amperes (a) segundo dados da aquisição há irregulares da frequência da transferência, porém quando comparados a corrente de 170 amperes (Figura 12 – a) são melhores. Na

corrente de 200 amperes temos uma maior energia do arco de soldagem e com isto um maior aquecimento da ponta do eletrodo e fazendo com que o mesmo tenha uma transferência em melhores condições. O arco elétrico tem um comportamento estável próximo em 25,4 segundos e um comportamento instável na região de 25,6 segundos, porém não há praticamente nenhuma alteração no comportamento do acelerômetro (d). Este tipo de comportamento pode ser explicado por um maior aquecimento na ponta do eletrodo devido ao efeito joule, pois quando observamos a Tabela 6 que a tensão média em RMS para a corrente de 170 amperes foi de 16,66 Volts, e na corrente de 200 amperes a tensão RMS média é de 24,67 Volts, favorecendo a transferência da gota para a poça de fusão.

A FFT do sinal da corrente (b) apresenta uma linha distante do eixo x em diversas regiões. Na FFT da aceleração (d) existem diversos picos de aceleração com intensidade entre 0,04 e 0,14 m/s^2 , porém a amplitude destes picos é menor quando comparados com corrente de 170 amperes (Figura 12 – d). Existem ainda diversos picos de aceleração com intensidade menor que 0,04 e com diversas frequências, e de acordo com a Tabela 6 o valor em RMS médio da aceleração para a corrente de 200 amperes foi de 0,1976 m/s^2 , enquanto que para 170 amperes a média da aceleração foi de 0,3290 m/s^2 , com uma redução de 66% da aceleração.

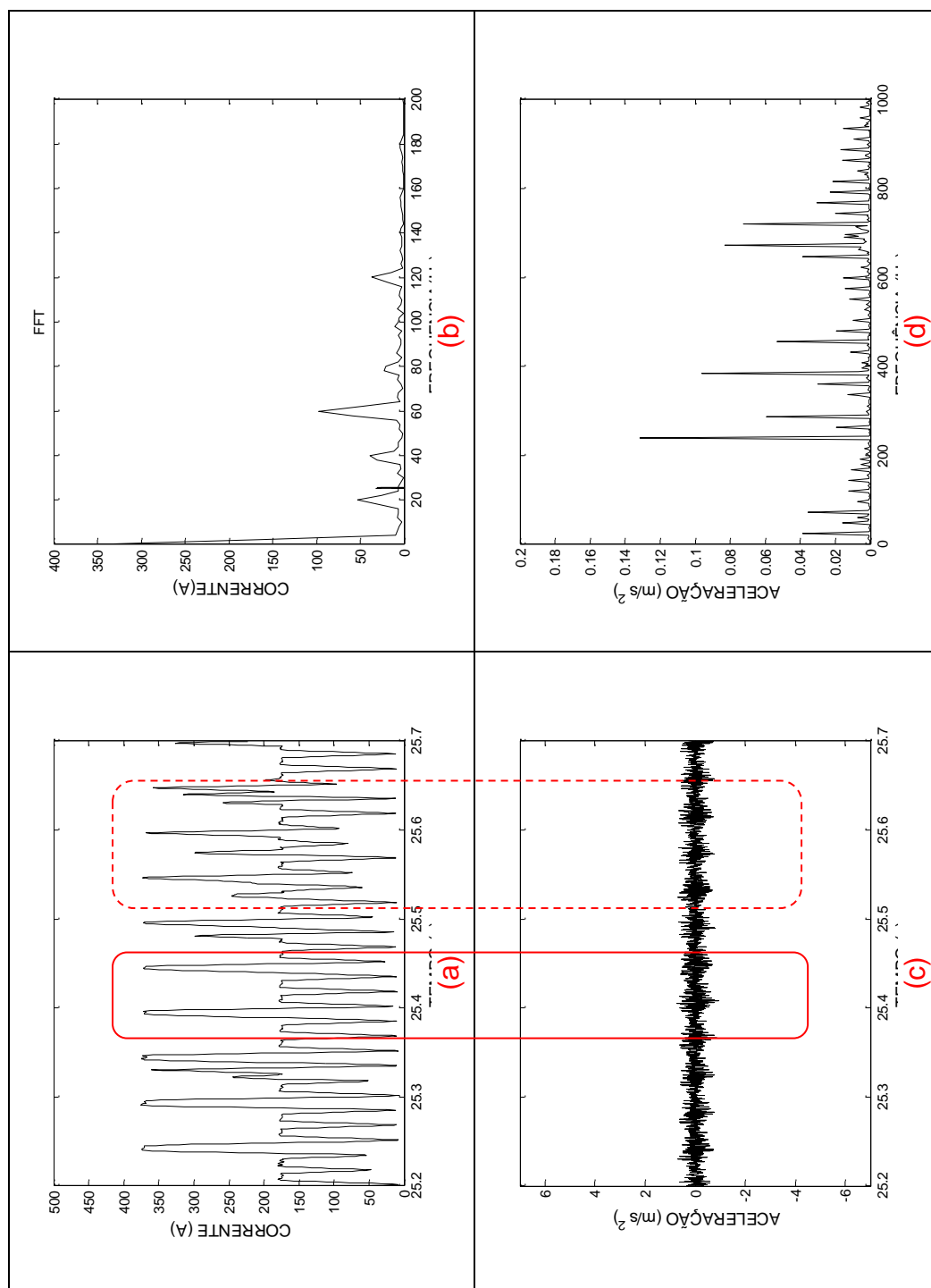


Figura 13 – Corrente de 200 amperes: (a) sinal da corrente, (b) FFT do sinal da corrente, (c) sinal do acelerômetro, (d) FFT do sinal do acelerômetro.
Fonte: Autoria própria.

Na Figura 14 na corrente de 230 amperes (a) segundo dados da aquisição exibe dados regulares da frequência da transferência. Em cada pico de corrente em 350 amperes houve um pico de tensão, ocorrendo à transferência da gota para a poça de fusão. Observamos também nesta figura que o arco elétrico se comporta de maneira estável, entre os intervalos da transferência há duas quedas de corrente, que provavelmente se devem ao

fenômeno efeito colchão denominado por BRAGA (1997) apud BONISZEWSKY (1982) onde o fluxo interno do arame empurra a gota para fora do centro, e a gota toca a peça sem transferência. Este comportamento também foi encontrado por LOPERA et al (2011) na soldagem GMAW, que utilizou o método de filmagem em alta velocidade para comprovar os tipos de transferência metálica.

O sinal do acelerômetro também registra este comportamento em seus resultados (Figura 14-c) e não há oscilações na aquisição quando comparados as correntes de 200 e 230 amperes. Na condição de 230 amperes o valor em RMS da aceleração foi de $0,1665 \text{ m/s}^2$, valor este menor que os resultados para as correntes de 170 e 200 amperes. Nesta condição de soldagem (230 amperes) a razão entre velocidade de alimentação do arame e a velocidade de fusão é a melhor, e o calor gerado na ponta do arame por efeito joule favorece a transferência para a poça de fusão. Na FFT da corrente (b) observamos que o sinal é estável, e há picos de corrente somente nas condições selecionadas nos ensaios (próximos a 20,00 Hz) e seus múltiplos. Na FFT da aceleração (d) observamos que há duas regiões com intensidades maiores que $0,04 \text{ m/s}^2$, uma próxima a 500 Hz e outra a 700 Hz com amplitudes menores, quando comparados aos da corrente de 170 e 200 amperes. O comportamento do acelerômetro não pode ser comparado a nenhuma norma para a área de soldagem, pois na norma ISO 2372 (VDI 2056) de vibrações mecânicas de máquinas com velocidades de operação entre 10 e 200 revoluções por minuto, classifica em grupos os valores de aceleração em RMS para máquinas rotativas, classificando a severidade do nível de vibração com base na amplitude em velocidade (RMS), expressas em mm/s, com medidas numa faixa de frequência entre 10 Hz e 1.000 Hz. ARATA et al (1981) com aplicação de acelerômetro na soldagem GMAW convencional mediu o destacamento da gota na transferência para a poça de fusão com frequência de 50 Hz.

Os resultados na corrente de 230 amperes dentre as condições de soldagem estabelecidas são as melhores na estabilidade do arco elétrico, e também neste caso, são as melhores condições para a soldagem de revestimento.

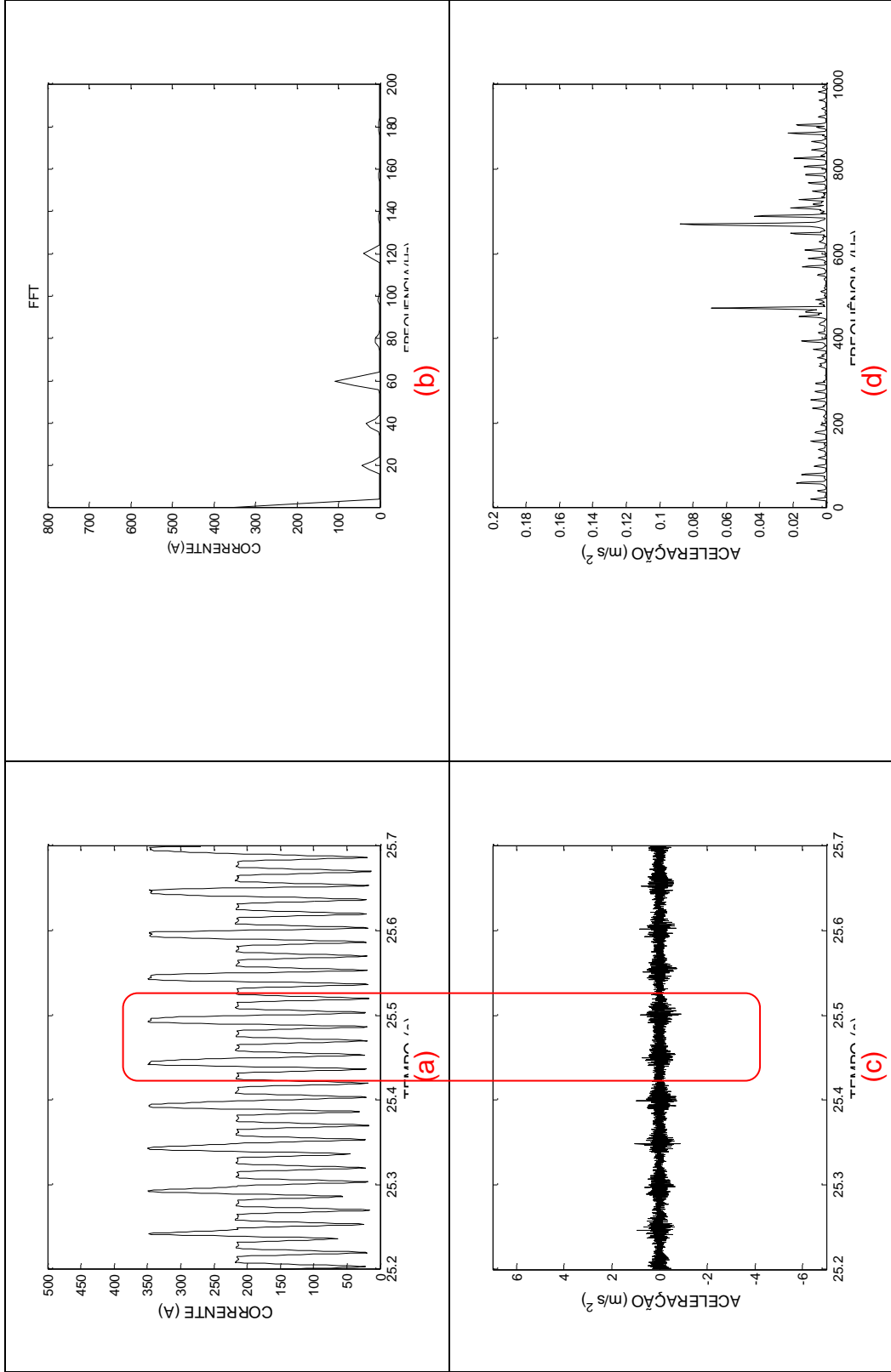


Figura 14 – Corrente de 230 amperes: (a) sinal da corrente, (b) FFT do sinal da corrente, (c) sinal do acelerômetro, (d) FFT do sinal do acelerômetro.
Fonte: Autoria própria.

A Figura 15 apresenta a FFT para as três correntes de soldagem, extraídas das Figuras 12, 13 e 14.

Na Figura 15 (c) em corrente 230 amperes, quando comparados as correntes de 170 amperes (a) e 200 amperes (b), verifica-se que o comportamento do resultado é muito diferente e praticamente estável, sendo o destacamento da gota em frequências próximas de 20 Hz e os sinais adquiridos não apresentam irregularidades, considerando este arco estável. Nesta condição o aporte de calor foi maior, aquecendo melhor a ponta do eletrodo, melhorando a transferência para a poça de fusão, estes resultados para a corrente de 230 amperes são as melhores condições para a soldagem de revestimento. A instabilidade do arco elétrico também foi encontrada entre outros por DUTRA (1989, 1990), MAZZAFERRO & MACHADO (1990), JOHNSON et al (1991), KIM & EAGAR (1993), WANG, LIU & JONES (1995), ADOLFSSON et al (1999), LIMA & FERRARESI (2006), PEIXOTO et al (2011), MUÑOZ et al (2014).

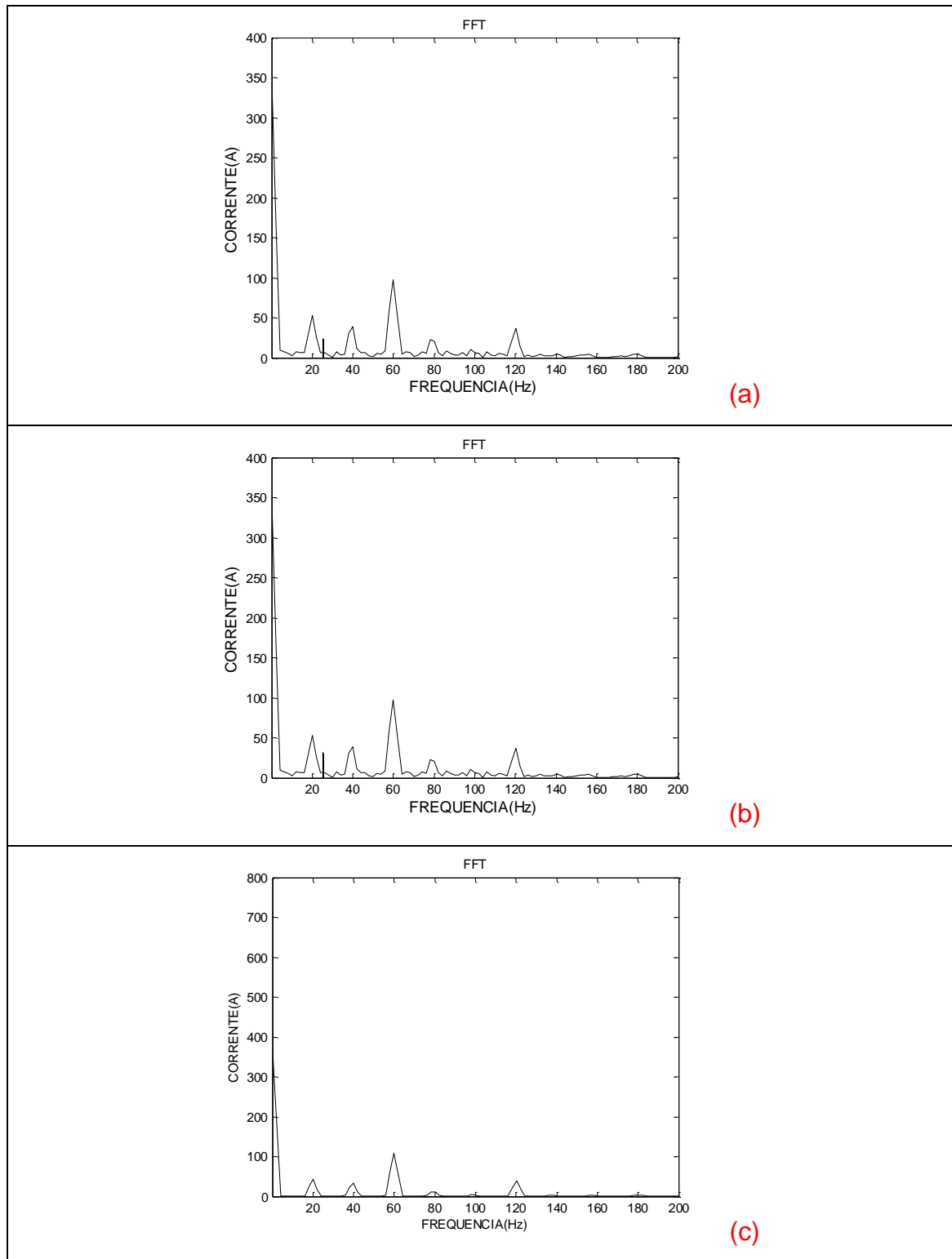


Figura 15: FFT para as três correntes de soldagem (a) 170A (b) 200A (c) 230A

Fonte: Autoria própria.

CONCLUSÃO

Conforme os resultados encontrados neste trabalho, pode-se concluir que os parâmetros de solda influenciam substancialmente no desenvolvimento da soldagem. Através destes resultados é possível analisar as interferências destes parâmetros na aceleração que interfere diretamente na qualidade da solda.

Na corrente de 170A foi obtido uma aceleração de $0,3779\text{m/s}^2$, já quando a corrente é aumentada para 200A houve uma aceleração de $0,2065\text{m/s}^2$, ou seja, uma redução de 46%. Comparando a aceleração de $0,1665\text{m/s}^2$ para a corrente de 230A, com a aceleração de $0,2065\text{m/s}^2$ para corrente de 200A se vê uma redução de 20%.

Aplicando a transformada rápida de Fourier nos sinais das acelerações para as correntes de 170A, 200A e 230A, será obtido o valor da aceleração em RMS. Na corrente de 170A, se observa uma aceleração de $0,3290\text{m/s}^2$, contra $0,1976\text{m/s}^2$ da corrente de 200A, com isso há uma redução de 66%. Na FFT da aceleração para corrente de 230A, se tem uma aceleração em RMS de $0,1665\text{m/s}^2$, ou seja, uma redução de 15,74% se comparado a aceleração para corrente de 200A.

É possível notar que a aquisição de sinais é fundamental para a determinação da estabilidade e/ou instabilidade do arco elétrico e que com a utilização do acelerômetro e com o pré-processamento dos sinais adquiridos, consegue-se estimar a aceleração em RMS e comprovar a estabilidade do arco elétrico, além de que pode se observar que os maiores picos de aceleração ocorreram em frequências menores que 800 Hz.

Com os resultados obtidos conclui-se que dentre as condições de soldagem estabelecidas, quando utilizado a corrente de 230A se tem uma melhor estabilidade do arco elétrico, logo uma melhor condição para soldagem de revestimento.

REFERÊNCIAS

ACELERÔMETRO PIEZOELÉTRICO. Disponível em:

<http://www.directindustry.com/pt/fabricante-industrial/acelerometro-62014.html>

Acesso em 10 de Setembro de 2017.

ADOLFSSON, S.; BAHRAMI, A.; BOLMSJO, G.; CLAEISSON, I. Quality monitoring in short-circuit gas metal arc welding. **Welding Journal**, February, 1999.

ARATA, Y.; INOUE, K.; FUTAMATA, M.; TOH, T. Investigation on welding arc sound (report 4) : vibration analysis of base metal during welding. **Transactions of JWRI**. v.10 n.(1).

BONISZEWSKI, T. Self-shielded arc welding. Cambridge, England: Woodhead Publishing Ltd in **Association with The Welding Institute**, 1992.

BRAGA, E. M. **Soldagem a arame tubular autoprottegido em corrente pulsada**. Dissertação de Mestrado, UFPA. Belém, PA, Brasil, 1997.

CAMPOS, C. A. K. de. **Análise da morfologia de cordões de solda em depósitos de aço inoxidável martensítico sobre um substrato em aço SAE 1020**. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Tecnológica Federal do Paraná Departamento Acadêmico de Mecânica - Curso de Engenharia Mecânica. Cornélio Procópio, 2015.

CHIAVERINI, V. **Aços e Ferros Fundidos**. 6ªED. São Paulo: ABM, 1988.

DUTRA, J.C. PROCEDIMENTO COMPUTADORIZADO DE DETERMINAÇÃO, SELEÇÃO E CONTROLE DE VARIÁVEIS NA SOLDAGEM MIG/HAG. Tese de Doutorado, UFSC, Florianópolis, SC. Brasil, 1997.

JOHSON, J. A. et al, Process control of GMAW: sensing of metal transfer mode. **Welding Journal**, April, 1991.

KIM, Y.S.; EAGAR, T.W., Metal transfer in pulsed current gas metal arc welding. **Welding Journal**, v.72, n. 7, 1993.

LIMA, A. C.; GONÇALVES, A. R.; FERRARESI, V. A. Delimitação da Região de Transferência por Curto-circuito de Três Arames Tubulares Autoprotégidos, **61º Congresso Anual da ABM**, Rio de Janeiro, RJ, 24 a 27 de julho, 2006.

LOPERA, J. E. P., et. al., Uso da técnica de perfilografia para visualização dos modos de transferência metálica no processo de soldagem GMAW usando uma câmera CMOS de alta velocidade, COBEF 2011, Universidade de Brasília.

MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q. **Soldagem: Fundamentos e Tecnologia**. 3ªed. Belo Horizonte: UFMG, 2011.

MAZZAFERRO, J.A.E; MACHADO, I.G. Método computacional par prvisão de distorções em chapas de alumínio soldadas a topo pelo processo de MIG. Laboratório de soldagem e técnicas conexas – UFRGS. Porto Alegre – RS. 1991.

MEDEIROS, K. A. R. **Análise metrológica da aplicação de acelerômetros piezoelétricos à medição de vazão na indústria petrolífica**. Dissertação de Mestrado. PUC- Pontifícia Universidade Católica. Rio de Janeiro, 2014.

MODENESI, P. J.; MARQUES, P. V.; SANTOS, D. B. **Introdução à metalurgia da soldagem**. Universidade Federal De Minas Gerais, Departamento de Engenharia Metalúrgica, 2012 p.12.

MODENESI, P. J.; MARQUES, P. V. **Soldagem I: Introdução aos processos de soldagem**. Universidade Federal De Minas Gerais, Departamento de Engenharia Metalúrgica, 2006 p.11.

MORENO, J. R. S.; CORREA, C. A. ; MARIN, L. G. Estudo da estabilidade do arco elétrico gerado pela soldagem de revestimento (FCAW) devido à variação da tensão/corrente e velocidade de soldagem. **Revista SODEBRAS**, v. 134, p. 145-150, 2017.

POLLACK, H. **Materials science and metallurgy**. 4ed, Prentice-hall, Upper Saddle River, NJ, 1988.

RODRIGUES, J.R.; CAMPOS, A.N.; MATEUS, C.F.R.; SUTÉRIO, R. **Identificação das principais componentes de incertezas de calibração de acelerômetro piezoelétrico pelo método da comparação: uma revisão atual**. Simpósio Brasileiro de Engenharia Inercial. Rio de Janeiro, 2010.

SOLDAGEM COM ARAMES TUBULARES. Disponível em:

http://www.esab.com.br/br/pt/education/blog/processo_soldagem_arames_tubulares.cfm Acesso em 08 de setembro de 2017.

WANG, W.; LIU, S.; JONES, J.E. Flux cored arc welding: arc signals, processing and metal transfer characterization. *Welding Journal*, v. 74, n.11, November, 1995.