

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

RUI ROSA DE MORAIS JÚNIOR

**ESTUDO DO DESEMPENHO DA SOLDAGEM POR ELETRODO REVESTIDO EM
DIFERENTES POSIÇÕES POR MEIO DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA**

Bagé

2015

RUI ROSA DE MORAIS JÚNIOR

**ESTUDO DO DESEMPENHO DA SOLDAGEM POR ELETRODO REVESTIDO EM
DIFERENTES POSIÇÕES POR MEIO DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Produção da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Produção.

Orientador: Prof. Dr. Eng. Marcelo Xavier Guterres

Bagé

2015

RUI ROSA DE MORAIS JÚNIOR

**ESTUDO DO DESEMPENHO DA SOLDAGEM POR ELETRODO REVESTIDO EM
DIFERENTES POSIÇÕES POR MEIO DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Engenharia de Produção da
Universidade Federal do Pampa, como requisito
parcial para obtenção do Título de Bacharel em
Engenharia de Produção.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em:

10 de dezembro de 2015.

Banca examinadora:

Prof. Dr. Marcelo Xavier Guterres

Orientador

UNIPAMPA

Prof. Dr. Alexandre Ferreira Galio

Coorientador

UNIPAMPA

Prof. Dr. Wladimir Hernandez Flores

UNIPAMPA

AGRADECIMENTOS

À Deus, por me guiar por todo o caminho traçado até aqui.

À Universidade Federal do Pampa por proporcionar a realização do curso de Engenharia de Produção na cidade onde nasci;

Aos professores do curso de Engenharia de Produção, pela paciência, esforço, conselhos e dedicação sem limites tanto nos assuntos de cunho profissional como pessoal;

Aos professores Marcelo Xavier Guterres, Alexandre Ferreira Galio e Wladimir Hernandez Flores, que me orientaram e auxiliaram durante todo o tempo, redimindo dúvidas e indicando o melhor caminho a seguir;

Aos amigos Renato Diaz de Santa Helena e Mozer Cardoso Botelho, por me auxiliarem nas atividades práticas deste trabalho;

Ao professor Vanderlei Eckhardt pela cedência do uso dos laboratórios;

Aos meus pais e irmã, Rui Rosa de Morais Filho, Maria Christina Gonçalves Silveira de Morais e Iális Silveira de Morais pelo incentivo e confiança que em mim depositaram;

Aos meus amigos e colegas de curso, que durante todo o trajeto me apoiaram, fazendo grande diferença no aprendizado.

RESUMO

A soldagem é uma técnica largamente empregada no mundo, abrangendo todas as áreas da engenharia. Em determinadas circunstâncias, para manter o funcionamento de uma linha de produção, a peça a ser soldada não pode ser removida e conseqüentemente, o soldador que deverá se adaptar a posição de soldagem. Há indicativos na literatura que estas diferentes posições de soldagem podem vir a influenciar a resistência mecânica da ligação por solda. Além disso, para análise de desempenho de uma junta soldada, testes mecânicos são realizados para avaliar seu desempenho. O objetivo da presente pesquisa é testar a hipótese da influência das posições de soldagem, na força de ruptura das amostras soldadas, quando empregados tipos diferentes de eletrodos revestidos. A fim de levantar os dados necessários à aplicação do estudo, foram realizados ensaios de tração em 9 grupos de corpos de provas (CPs) soldados. Cada grupo com 10 CPs, onde estes foram soldados em três posições (1G, 3G e 4G) com três diferentes tipos de eletrodos (AWS E6010 - celulósico, AWS E6013 - rutílico e AWS E7018 - básico). Por meio dos dados coletados nos ensaios, foi empregada a técnica de Análise de Variância (*Analysis of Variance* - ANOVA), para verificação da hipótese. Para as análises utilizou-se como ferramenta de apoio a metodologia estatística o suplemento *Action* versão 2.8 (2014), que trabalha de forma integrada ao software de planilhas eletrônicas Microsoft Excel. Com a aplicação da ANOVA foi possível constatar que as soldas dos CPs executadas na posição 1G (Plana), apresentaram maior Força de ruptura para todos os eletrodos estudados. Os CPs soldados com o eletrodo E7018 apresentaram maior Força de ruptura em comparação com os demais eletrodos, sendo que na posição 3G, os resultados comparativos não apresentaram diferenças significativas.

Palavras-chave: soldagem, eletrodo revestido, ensaios de tração, análise de variância.

ABSTRACT

Welding is a widely technique used in the world, it cover all areas of engineering. In certain circumstances, to keep the operation of a production line, the part to be welded can not be removed and consequently, the welder must adjust the welding position. There are indications in the literature that these different welding positions can change the mechanical strength of the welding samples. Thus, mechanical tests of a welded samples are conduct to evaluate their performance. The aim of this work is evaluate the hypothesis of the influence of the welding positions, on the breaking strength, of the samples welded, by the used of different types of coated electrodes. In order to get the information necessary for implementing the study, tensile tests will be conducted in 9 groups of samples welded. Each group with 10 samples where they will be welded in three positions (1G, 3G and 4G) with three different electrodes (AWS E6010 - cellulosic, AWS E6013 - rutile and AWS E7018 - basic). By the data collected in the mechanical tests, it will be used the technique of analysis of variance (ANOVA), to verify the hypothesis. For the analysis was used as a support tool to supplement the statistical methodology Action version 2.8 (2014), working in an integrated manner to popular software from Microsoft Excel spreadsheets. With the application of ANOVA was established that the welds of samples run on 1G position (Plan), had a higher breaking strength for all the studied electrodes. Samples soldiers with E7018 electrode showed higher breaking strength compared to the other electrodes, and in the 3G position, the comparative results showed no significant differences.

Keywords: welding, coated electrode, tensile tests, analysis of variance.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Patente de soldagem a arco com eletrodo de carvão | 17 |
| Figura 2 - Posições de soldagem | 20 |
| Figura 3 - Soldagem a arco elétrico com eletrodo revestido | 24 |
| Figura 4 - Circuito de soldagem para o processo com eletrodos revestidos...26 | |
| Figura 5 - Classificação de eletrodos revestidos para aços carbono | 31 |
| Figura 6 - Posições de soldagem designadas pela <i>ASME</i> | 32 |
| Figura 7 - Curva tensão deformação convencional | 33 |
| Figura 8 - Diagrama tensão deformação típico para aço estrutural | 35 |
| Figura 9 - Estrangulamento (estricção) de uma barra sob tração. | 35 |
| Figura 10 - Classificação dos materiais quanto a elasticidade. | 36 |
| Figura 11 – Módulo de elasticidade | 37 |
| Figura 12 - Gráfico tensão-deformação de um metal ou liga metálica..... | 38 |
| Figura 13 - Curva tensão deformação com n definido para 0,2%..... | 40 |
| Figura 14 – Gráfico tensão deformação..... | 41 |
| Figura 15 – Dados ajustados a distribuição normal. | 44 |
| Figura 16 - Regiões de rejeição ao utilizar <i>ANOVA</i> para testar hipótese | 48 |
| Figura 17 - Etapas do estudo..... | 51 |
| Figura 18 – CP a ser soldado | 53 |
| Figura 19 - Entalhe na solda..... | 53 |
| Figura 20 - Máquina Universal de Ensaios | 54 |
| Figura 21 - Gráfico tensão-deformação fornecido pelo software TESC 3.04.. | 56 |
| Figura 22 - Fabricação do suporte fixação dos CPs | 59 |
| Figura 23 – Marcação, corte e limpeza das peças | 59 |
| Figura 24 - Soldagem dos CPs..... | 60 |
| Figura 25 - Fonte inversora para soldagem | 60 |

| | |
|---|----|
| Figura 26 - Execução do entalhe na solda..... | 62 |
| Figura 27 – Marcação e medição dos CPs..... | 63 |
| Figura 28 - Fixação do CP na máquina de ensaio..... | 63 |
| Figura 29 - Gráfico de efeitos - E6010..... | 67 |
| Figura 30 – Gráfico papel da probabilidade - E6010 | 68 |
| Figura 31 - Histograma de resíduos - E6010..... | 68 |
| Figura 32 - Resíduos x Valores ajustados - E6010..... | 69 |
| Figura 33 - Resíduos x Ordem de coleta dos dados - E6010..... | 69 |
| Figura 34 - Gráfico de efeitos - E6013..... | 70 |
| Figura 35 – Gráfico papel da probabilidade - E6013 | 71 |
| Figura 36 – Histograma de resíduos - E6013 | 71 |
| Figura 37 - Resíduos x Valores ajustados - E6013..... | 72 |
| Figura 38 - Resíduos x Ordem de coleta dos dados - E6013..... | 72 |
| Figura 39 - Gráfico de efeitos - E7018..... | 74 |
| Figura 40 – Gráfico papel da probabilidade - E7018 | 74 |
| Figura 41 – Histograma de resíduos - E7018 | 75 |
| Figura 42 - Resíduos x Valores Ajustados - E7018 | 75 |
| Figura 43 - Resíduos x Ordem de coleta dos dados - E7018 | 76 |
| Figura 44 - Gráfico de efeitos - Posição 1G..... | 77 |
| Figura 45 – Gráfico papel da probabilidade - Posição 1G | 78 |
| Figura 46 – Histograma de resíduos - Posição 1G | 78 |
| Figura 47 - Resíduos x Valores Ajustados - Posição 1G | 79 |
| Figura 48 - Resíduos x Ordem de coleta dos dados - Posição 1G | 79 |
| Figura 49 - Gráfico de efeitos - Posição 4G..... | 81 |
| Figura 50 – Gráfico papel da probabilidade - Posição 4G | 82 |
| Figura 51 - Histograma de resíduos - Posição 4G..... | 82 |

Figura 52 - Resíduos x Valores ajustados - Posição 4G.....83

Figura 53 - Resíduos x Ordem de coleta dos dados - Posição 4G83

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 - Resistência da solda em função da posição e do eletrodo | 21 |
| Tabela 2 - Especificações AWS para classificação de eletrodos revestidos .. | 30 |
| Tabela 3 - Propriedades mecânicas dos ER para aços carbono. | 42 |
| Tabela 4 - Tabela resumida da análise de variância | 49 |
| Tabela 5 - Dados das dimensões dos CPs | 54 |
| Tabela 6 - Dados dos ensaios em CPs..... | 55 |
| Tabela 7 - Médias das amostras coletadas dos 9 grupos..... | 56 |
| Tabela 8- ANOVA para CPs | 57 |
| Tabela 9 - Condições de armazenagem dos eletrodos revestidos | 61 |
| Tabela 10- Especificações dos eletrodos utilizados | 61 |
| Tabela 11 - Classificação dos grupos de CPs | 62 |
| Tabela 12 - Médias da Força (kN) de ruptura dos 9 grupos estudados..... | 65 |
| Tabela 13 - ANOVA para o eletrodo E6010..... | 66 |
| Tabela 14 - ANOVA para o eletrodo E6013..... | 70 |
| Tabela 15 - ANOVA para o eletrodo E7018..... | 73 |
| Tabela 16 - ANOVA para a posição 1G..... | 76 |
| Tabela 17 - ANOVA para a posição 3G..... | 80 |
| Tabela 18 - ANOVA para a posição 3G..... | 80 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|-------|---|
| AD | Anderson-Darling |
| ANOVA | <i>Analysis of variance</i> |
| ASME | <i>American Society of Mechanical Engineers</i> |
| ASTM | <i>American Society for Testing and Materials</i> |
| AWS | <i>American Welding Society</i> |
| CA | Corrente Alternada |
| CC | Corrente Contínua |
| CC+ | Corrente contínua com eletrodo no polo positivo |
| CC- | Corrente contínua com eletrodo no polo negativo |
| CPs | Corpos de prova |
| ER | Eletrodo Revestido |
| LaMet | Laboratório de Metrologia e Ensaio Mecânicos |
| LAFAB | Laboratório de Fabricação |
| MQE | Média dos quadrados entre grupos |
| MQD | Média dos quadrados dentro dos grupos |
| MTQ | Média total dos quadrados |
| SAE | <i>Society of automotive Engineers</i> |
| SI | Sistema internacional de unidades |
| STQ | Soma total dos quadrados |
| SQE | Soma dos quadrados entre grupos |
| SQD | Soma dos quadrados dentro dos grupos |
| TIG | <i>Tungsten inert gas</i> |

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| LISTA DE FIGURAS | 7 |
| LISTA DE TABELAS..... | 10 |
| LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS | 11 |
| 1 INTRODUÇÃO..... | 15 |
| 1.1 Relevância do Tema..... | 19 |
| 1.2 Definição do problema..... | 20 |
| 1.3 Objetivo | 21 |
| 1.4 Delimitação do tema..... | 22 |
| 1.5 Estrutura da pesquisa..... | 23 |
| 2 PROCESSO DE SOLDAGEM COM ELETRODO REVESTIDO | 24 |
| 2.1 Tipos de equipamento de soldagem com eletrodo revestido | 24 |
| 2.2 Sentido de circulação da corrente elétrica | 26 |
| 2.3 Eletrodos revestidos para soldagens..... | 27 |
| 2.4 Tipos de revestimento | 28 |
| 2.5 Especificação <i>American Welding Society</i> A5.1 | 30 |
| 2.6 Posições de soldagem..... | 31 |
| 3 PROPRIEDADES MECÂNICAS EM PEÇAS SOLDADAS | 33 |
| 3.1 Limite de elasticidade | 36 |
| 3.2 Módulo de elasticidade | 37 |
| 3.3 Limite de proporcionalidade | 38 |
| 3.4 Limite de escoamento..... | 39 |
| 3.5 Limite de resistência..... | 40 |
| 3.6 Limite de ruptura..... | 41 |
| 3.7 Propriedades mecânicas dos eletrodos revestidos (<i>AWS A5.1</i>).. | 42 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 4 | ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA) | 44 |
| 4.1 | ANOVA de fator único..... | 45 |
| 4.2 | A distribuição F | 48 |
| 5 | METODOLOGIA | 50 |
| 5.1 | Métodos científicos de pesquisa | 50 |
| 5.2 | Tipo de pesquisa | 50 |
| 5.3 | Definição do procedimento metodológico..... | 51 |
| 5.3.1 | Definição teórica da pesquisa..... | 52 |
| 5.3.2 | Parte Experimental..... | 52 |
| 5.3.3 | Análise e interpretação dos resultados..... | 56 |
| 5.4 | Limitações do método | 57 |
| 6 | DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL | 59 |
| 7 | ANÁLISE DOS RESULTADOS | 65 |
| 7.1 | ANOVA para o Eletrodo AWS E6010..... | 66 |
| 7.2 | ANOVA para o Eletrodo AWS E6013..... | 70 |
| 7.3 | ANOVA para o Eletrodo AWS E7018..... | 73 |
| 7.4 | ANOVA para a posição 1G (Plana)..... | 76 |
| 7.5 | ANOVA para a posição 3G (Vertical) | 80 |
| 7.6 | ANOVA para a posição 4G (Sobre cabeça) | 80 |
| 8 | CONCLUSÕES | 84 |
| 9 | CONSIDERAÇÕES FINAIS | 86 |
| | REFERÊNCIAS | 87 |
| | APÊNDICE A – MEDIDAS DOS CORPOS DE PROVA | 90 |
| | APÊNDICE B – DADOS DE ENSAIOS DOS CORPOS DE PROVA | 91 |
| | ANEXO 1 – RELATÓRIO DE ENSAIO TESC 3.04 GRUPO 1.1 | 92 |
| | ANEXO 2 – RELATÓRIO DE ENSAIO TESC 3.04 GRUPO 1.3 | 93 |

| | |
|--|------------|
| ANEXO 3 – RELATÓRIO DE ENSAIO TESC 3.04 GRUPO 1.4 | 94 |
| ANEXO 4 – RELATÓRIO DE ENSAIO TESC 3.04 GRUPO 2.1 | 95 |
| ANEXO 5 – RELATÓRIO DE ENSAIO TESC 3.04 GRUPO 2.3 | 96 |
| ANEXO 6 – RELATÓRIO DE ENSAIO TESC 3.04 GRUPO 2.4 | 97 |
| ANEXO 7 – RELATÓRIO DE ENSAIO TESC 3.04 GRUPO 3.1 | 98 |
| ANEXO 8 – RELATÓRIO DE ENSAIO TESC 3.04 GRUPO 3.3 | 99 |
| ANEXO 9 – RELATÓRIO DE ENSAIO TESC 3.04 GRUPO 3.4 | 100 |

1 INTRODUÇÃO

A soldagem está profundamente ligada às atividades industriais do mundo moderno, tais como: construção naval, ferroviária, aeronáutica, automobilística e caldeiraria. Neste sentido, é raro a indústria que pode prescindir da soldagem como processo de produção ou de manutenção (WAINER; BRANDI; MELLO, 2010).

A engenharia metalúrgica com suas técnicas e o conhecimento tecnológico a ela relacionada estão estreitamente ligados ao avanço das ciências como a física e a química. Uma consequência direta deste fato é busca de novas técnicas de soldagem que sejam compatíveis com as novas ligas metálicas desenvolvidas pelos cientistas da área de materiais.

Alguns processos, como a brasagem¹ e a soldagem por forjamento², têm sido utilizados desde épocas remotas. Por exemplo, no Museu do Louvre, há em exposição um pingente de ouro, possivelmente manufaturado por técnicas de soldagem, em torno do ano 4000 A.C. (OKUMURA; TANIGUCHI, 1982).

Por outro lado, a fabricação com ferro se iniciou em torno de 1.500 anos AC, substituindo o cobre e o bronze na confecção de diversos artefatos. Este era produzido em fornos por redução direta³ e conformado por martelamento na forma de pequenos blocos de pouco peso. Quando peças maiores eram necessárias, estes blocos eram soldados por forjamento. Isto é, o material era aquecido ao rubro e colocava-se areia entre as peças e martelava-se até a formação da solda (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009).

Destaca-se ainda, que os processos de soldagem já eram utilizados na antiguidade e na idade média para a fabricação de armas e outros instrumentos cortantes. Basicamente, a técnica primordial consistia em obter o ferro por redução direta. Porém, o material obtido possuía um teor de carbono muito baixo (inferior a 0,1%), ocasionando desta forma uma peça com baixa resistência mecânica. Para

¹ Denomina-se brasagem, ao grupo dos processos que realizam a união de materiais através da fusão de um metal de adição com temperatura de fusão mais baixa do que a temperatura do metal de base (MACHADO, 1996).

² Forjamento é o nome genérico de operações de conformação mecânica efetuadas com esforço de compressão sobre um material dúctil, de tal modo que ele tende a assumir o contorno ou perfil da ferramenta de trabalho (MARCONDES, 2015).

³ Neste processo, o minério de ferro era misturado com carvão em brasa e soprado com ar. Durante esta operação, óxido de ferro era reduzido pelo carbono, produzindo-se ferro metálico sem a fusão do material (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009).

contornar este problema, os soldadores soldavam pequenas tiras de aço com elevado teor de carbono nos locais de corte, sendo endurecidas por têmpera⁴. É importante destacar que o aço com elevado teor de carbono naqueles períodos era um material escasso e de alto custo.

Igualmente, espadas de elevada resistência mecânica e tenacidade⁵ foram fabricadas no oriente médio, na antiguidade. O processo de fabricação era semelhante ao mencionado anteriormente, no qual tiras alternadas de aço e ferro eram soldadas entre si e deformadas por compressão e torção. O resultado era uma lâmina com uma fina alternância de regiões de alto e baixo teor de carbono (MARQUES, MODENESI; BRACARENSE, 2009).

A partir do século XIX, a tecnologia de soldagem começou a mudar radicalmente. Devido as experiências realizadas por Sir Humphrey Davy (1778 - 1829) e Edmund Davy (1785 - 1857), que permitiram a combinação do gás acetileno com fontes produtoras de energia elétrica, possibilitando o aparecimento dos processos de soldagem por fusão. Tal fato motivou o que se chama de processo de soldagem por arco elétrico⁶ (WAINER; BRANDI; MELLO, 2010).

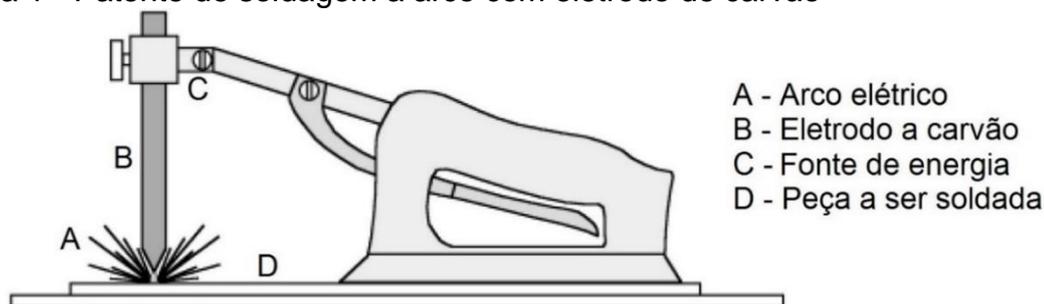
Vale mencionar, que a primeira patente de um processo de soldagem foi obtida na Inglaterra por Nikolas Bernados e Stanislav Olszewsky no ano de 1885. O seu princípio de funcionamento se dava pela criação de um arco elétrico entre um eletrodo de carvão e a peça a ser soldada. Este processo é ilustrado na Figura 1.

⁴ É o aquecimento do aço acima da zona crítica, com permanência nesta temperatura o tempo necessário para completa homogeneização da austenita e seguido de um resfriamento rápido, em água, óleo ou salmoura (CHIAVERINI, 1986).

⁵ Corresponde à quantidade de energia necessária para romper um material, podendo, portanto, ser medida pela quantidade de trabalho por unidade de volume necessário para levar o material à ruptura sob a ação de uma carga estática (CHIAVERINI, 1986).

⁶ Um arco elétrico é resultante de uma ruptura dielétrica de um gás a qual produz uma descarga de plasma (gás ionizado), similar a uma fagulha instantânea, resultante de um fluxo de corrente em meio normalmente isolante tal como o ar. Um termo arcaico para ele é arco voltaico (FURTADO, 2015).

Figura 1 - Patente de soldagem a arco com eletrodo de carvão



Fonte: Adaptado de Marques, Modenesi e Bracarense, 2009.

Por volta de 1890, Slavianoff (Rússia) e Coffin (Estados Unidos), desenvolveram independentemente a soldagem a arco com eletrodo metálico não revestido. Isto é, que não possui um revestimento capaz de estabilizar o arco, a consequência é que o mesmo não fornece um meio de proteção contra o ar atmosférico (OKUMURA; TANIGUCHI, 1982).

Em 1907, o sueco Oscar Kjellberg patenteia o processo de soldagem a arco com eletrodo revestido. Em sua forma original, este revestimento era constituído de uma camada de cal, cuja função era unicamente estabilizar o arco (FORTES, 2005). No decorrer dos anos seguintes, foram desenvolvidos os processos de soldagem por resistência, por aluminotermia e a gás (OKUMURA; TANIGUCHI, 1982). A partir desta fase, os procedimentos de soldagem se desenvolveram rapidamente. Além disso, os processos usados até então foram aperfeiçoados com a inclusão de novos processos, equipamentos e tecnologias.

Sob outra perspectiva, no que diz respeito aos processos de manufatura, a revolução industrial obrigou que as empresas estabelecessem métodos padronizados de produção. O efeito deste fato foi a incorporação de métodos de controle de qualidade dos produtos. Atualmente, entende-se que o controle de qualidade precisa começar pela matéria prima e deve ocorrer durante todo o processo de produção. Incluindo a inspeção e/ou ensaios finais nos produtos acabados (COSTA, 2000).

No que se refere a aprovação de uma junta soldada é comum que se realize testes mecânicos para avaliar seu desempenho, comparando-a com o metal base ou outra junta soldada. Os testes geralmente utilizados são os de tração e dobramento.

Para os materiais de menor espessura, normalmente é realizado o ensaio de Erichsen⁷ (MADEIRA; MODENESI, 2010).

No ensaio de dobramento é fornecido uma indicação qualitativa da ductilidade⁸ do material, sendo relativamente simples a sua realização. No entanto, no que se refere ao ensaio de tração, o mesmo permite a determinação do limite de ruptura do material, do escoamento, do alongamento, entre outras características.

Uma aplicação importante do teste de tração é que o mesmo também permite determinar a resistência à tração de juntas soldadas. Permitindo a qualificação do soldador ou do procedimento de soldagem. Sendo que, um dos equipamentos utilizados para a realização do ensaio é a máquina universal de ensaio (SOUZA, 1982).

Recentemente, técnicas modernas de instrumentação e controle também foram integradas pela área de soldagem. Possibilitando o desenvolvimento de novos modelos teóricos e empíricos para uma melhor compreensão dos fenômenos associados à soldagem. Sendo que os experimentos de laboratório são imprescindíveis para se comparar os resultados reais com os resultados teóricos (NETO; SCARMINIO; BRUNS, 2001).

Após a execução dos experimentos os dados obtidos devem ser organizados e sumarizados por meio das técnicas da estatística descritiva. Na sequência devem ser testadas as hipóteses formuladas a priori por meio da estatística bayesiana. Ou seja, o que se pretende é inferir o comportamento das variáveis respostas (y_1, y_2, \dots, y_n) em função das variáveis independentes (x_1, x_2, \dots, x_n). Nesta perspectiva, uma das principais técnicas estatísticas utilizadas para a interpretação dos dados experimentais é a Análise de Variância (ANOVA - sigla em inglês de *analysis of variance*). Essencialmente, a técnica consiste em verificar se existe uma diferença significativa entre as médias aritméticas, e se os fatores exercem influência em alguma variável dependente. Ou seja, busca compreender as variações inerentes às unidades experimentais e quais são as distintas fontes de variação (CHAVES, 2005).

⁷ O ensaio Erichsen é um ensaio de estiramento no qual um punção de ponta esférica força a chapa, que é presa por um prensa-chapa, até que a mesma sofra estrição e/ou ruptura. Este ensaio tem sido utilizado na avaliação de juntas soldadas para aços de menor espessura, de até 2mm (MADEIRA; MODENESI, 2010).

⁸ Corresponde à capacidade de um material poder ser deformado apreciavelmente antes de romper. O aço de baixo carbono, por exemplo, é uma liga de grande ductilidade (CHIAVERINI, 1986).

Finalmente, conclui-se que a realização de ensaios mecânicos e sua interpretação estatística são imprescindíveis para a melhoria dos processos de fabricação. Assim, a presente investigação pretende contribuir para a validação de técnicas pré-estabelecidas de soldagem, por meio da realização de diferentes ensaios em juntas soldadas, com análise dos dados obtidos pela ANOVA.

1.1 Relevância do Tema

A soldagem é uma técnica largamente empregada no mundo, abrangendo todas as áreas da engenharia. Praticamente em tudo que se utiliza aço, a técnica de soldagem se faz presente. Por exemplo, pode-se unir por processos de soldagem desde peças com espessura inferior a 1mm até estruturas de grandes dimensões. Ainda, o processo de soldagem pode ser utilizado em diferentes ambientes, tanto no chão de fábrica, quanto no campo. Também pode ser aplicado no alto de estruturas elevadas ou até mesmo debaixo d'água.

A soldagem pode ser empregada tanto para trabalhos simples (fabricação de grades, peças de decoração, etc), como para situações em que ocorrem solicitações extremas (navios, estruturas marítimas, vasos de pressão, etc.). Para ambos os casos devem ser atendidos os requisitos de qualidade a um custo competitivo.

A soldagem é muito versátil em termos dos tipos de ligas metálicas e das espessuras que podem ser unidas. A disponibilidade de um grande número de tipos de processos de soldagem permite a união da maioria das ligas comumente utilizadas.

Em projetos de grande porte que necessitam de operações com solda, o controle de soldagem se dá mediante ensaios realizados por profissionais especializados. Tais profissionais fazem uso de ensaios mecânicos para determinar as propriedades de resistência da solda, realizados no próprio produto ou em corpos de prova (CPs) de dimensões e formas especificadas. Um dos mais importantes ensaios mecânicos para a determinação da resistência da solda é o ensaio de tração.

Algo importante a ser destacado com relação a união de materiais com solda, diz respeito ao superdimensionamento ou o subdimensionamento da ligação. O primeiro porque gera desperdício de material e maior consumo de energia. O segundo porque a ligação vai falhar (ruptura) e, além do prejuízo, pode causar sérios acidentes, com danos irreparáveis.

As considerações anteriores servem para elucidar o quanto é importante conhecer e avaliar a resistência da solda. Que pode vir a ser identificada por meio da realização de ensaios mecânicos.

Uma vez que, os resultados numéricos dos experimentos podem ser considerados como uma variável aleatória, logo se faz necessário o emprego de técnicas estatísticas para estabelecer a resistência média da solda. Nesse ponto, um método largamente empregado é a *ANOVA*. De maneira geral, a *ANOVA* também permitirá verificar se existem diferenças significativas entre as técnicas de soldagem no que diz respeito a resistência da solda obtida. Ainda, de acordo com Tusset et al. (2008), a Análise de Variância é uma ferramenta que permite investigar se distintos tratamentos provocam diferenças significativas nas variáveis dependentes (y_1, y_2, \dots, y_n). Isto é, se as médias obtidas para cada grupo são diferentes entre si estatisticamente. Uma vez que, o procedimento de *ANOVA* é bastante difundido, inúmeros bons softwares estatísticos e planilhas eletrônicas permitem facilmente a aplicação da referida técnica estatística.

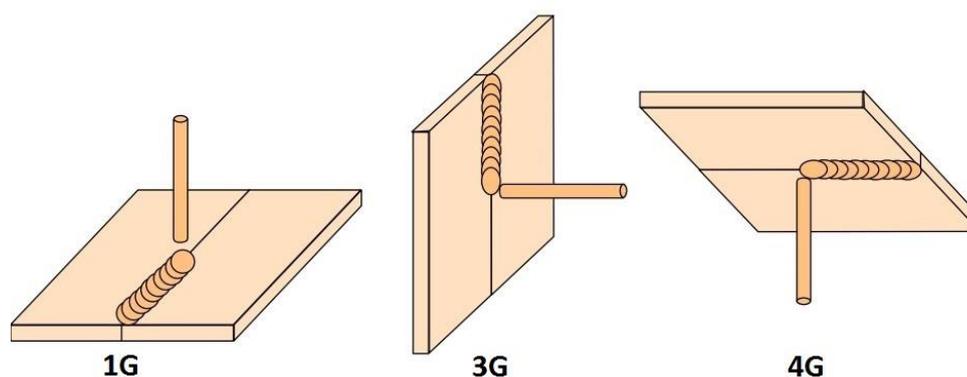
Indubitavelmente, pelo exposto até então, pode se concluir a relevância do tema do presente trabalho. Que consiste no emprego de técnicas estatísticas e da realização de ensaios mecânicos, para mensurar a resistência e a qualidade da solda, devido a aplicação de diferentes posições de soldagem.

1.2 Definição do problema

Ao realizar-se uma solda em uma peça, a posição do eletrodo pode tomar configurações diferentes: plana, vertical ou sobre cabeça, como ilustrado na .

Figura 2.

Figura 2 - Posições de soldagem



Fonte: Marques, Modenesi e Bracarense, 2009.

Em determinadas circunstâncias, por exemplo, para manter o funcionamento de uma linha de produção, a peça a ser soldada não pode ser removida e conseqüentemente, dada esta situação o soldador que deverá se adaptar a posição de soldagem conveniente. Ainda, há indicativos na literatura que estas diferentes posições de soldagem podem vir a influenciar a resistência mecânica da ligação por solda (SENAI, 1998). Assim, com base nas informações disponibilizadas anteriormente, a presente pesquisa procura responder ao seguinte questionamento:

“Qual a influência das posições de soldagem (plana, vertical e sobre cabeça) na resistência mecânica da solda, quando empregados diferentes eletrodos revestidos?”

Para que o leitor tenha uma melhor compreensão da pergunta que se quer responder, foi elaborada a Tabela 1. Onde \bar{y}_{ij} representa a resistência mecânica média da solda de um corpo de prova devido ao eletrodo do tipo i e da posição de soldagem j .

Tabela 1 - Resistência da solda em função da posição e do eletrodo

| Tipo de Eletrodo | Posições de soldagem | | |
|------------------|----------------------|----------------|------------------|
| | Plana (a) | Vertical (b) | Sobre cabeça (c) |
| Eletrodo tipo 1 | \bar{y}_{1a} | \bar{y}_{1b} | \bar{y}_{1c} |
| Eletrodo tipo 2 | \bar{y}_{2a} | \bar{y}_{2b} | \bar{y}_{2c} |
| ... | ... | ... | ... |
| Eletrodo tipo n | \bar{y}_{na} | \bar{y}_{nb} | \bar{y}_{nc} |

Fonte: Autor, 2015.

Finalmente, o que se quer verificar é se as resistências médias das soldas serão diferentes entre si estatisticamente, devido a posição de soldagem.

1.3 Objetivo

Fixado o problema de investigação, estabelece-se como objetivo verificar a validade da seguinte hipótese:

“As posições de soldagem (plana, vertical e sobre cabeça) não interferem na resistência final da solda, quando empregados eletrodos de diferentes revestimentos”.

Para tanto, a técnica a ser empregada para verificação da hipótese será a ANOVA. Pois, de acordo com Tusset et. al. (2008), este procedimento estatístico permite investigar a existência das diferenças significativas entre os grupos estudados. No caso presente, os grupos a serem analisados estão representados de forma geral na Tabela 1.

1.4 Delimitação do tema

A aplicação proposta neste trabalho analisará somente três tipos de eletrodos, são eles: AWS E6010 - revestimento celulósico; AWS E6013 - revestimento rutilico; e AWS E7018 - revestimento básico. Sendo que os mesmos são empregados na soldagem de aços de baixo e médio teor de carbono.

É importante mencionar que existe uma grande diversidade de eletrodos disponíveis no mercado. Os selecionados para esta pesquisa se justificam, pelo fato de possuírem limites de resistência pré-estabelecidos pelos fabricantes. Igualmente, a corrente de soldagem utilizada para os eletrodos em tela é a mesma, variando apenas o tipo de revestimento.

No que diz respeito as posições de solda selecionadas na presente pesquisa, serão utilizadas somente plana, vertical e sobre cabeça. A razão pela escolha de tais posições se justifica para o desenvolvimento de um suporte de fixação dos corpos de prova. Quando se quer realizar uma soldagem fora de posição são utilizados artifícios para fixação das peças nas bancadas de soldagem, através de parafusos, grampos ou estruturas soldadas.

Do ponto de vista acadêmico essa fixação provoca variações indesejadas nos experimentos como distorções, falta de repetibilidade, perda de tempo na fixação e na retirada dos corpos de prova (VARGAS et al., 2010). Portanto, será fabricado um suporte que permita fixar os corpos de provas nas três posições, garantindo uma certa padronização na execução das soldas.

Com relação aos ensaios de tração, esses serão realizados em uma máquina universal com capacidade de 100 kN (10 toneladas) o que limita as dimensões dos corpos de prova. Tal máquina permite obter medições precisas da deformação pela carga aplicada. A facilidade de execução e a produtividade dos resultados tornam o ensaio de tração o mais importante de todos os ensaios mecânicos. Os esforços ou

cargas são mensurados na própria máquina de ensaio sendo o corpo de prova levado até a sua ruptura.

1.5 Estrutura da pesquisa

Com relação à estrutura do projeto, este é dividido em 8 (oito) capítulos, conforme são apresentados a seguir:

No capítulo 1, foi apresentado uma introdução, ambientando o leitor sobre o que será discutido no decorrer do trabalho, contendo uma justificativa tratando dos motivos que levam à realização da pesquisa e aplicação na área pretendida. É composta pela relevância do tema, definição do problema junto com o objetivo e a delimitação do tema.

Após, será apresentado o referencial teórico nos capítulos 2 à 4, com o objetivo de auxiliar a aplicação propriamente dita do trabalho. Esse auxílio se dará através da contextualização e estudo de assuntos pertinentes ao tema da pesquisa, onde serão apresentados os seguintes tópicos: processos de soldagem com eletrodo revestido; resistência à tração em soldas e análise de variância.

Logo em seguida, são apresentados os capítulos 5 e 6, constituídos de uma proposta metodológica composta por todos os passos e técnicas utilizadas para a realização do trabalho. Também será detalhada a execução de todos os passos para a coleta dos dados, onde serão analisados a posteriori.

No capítulo 7, são apresentados os resultados das análises estatísticas dos dados obtidos no capítulo anterior, para atingir objetivo deste estudo.

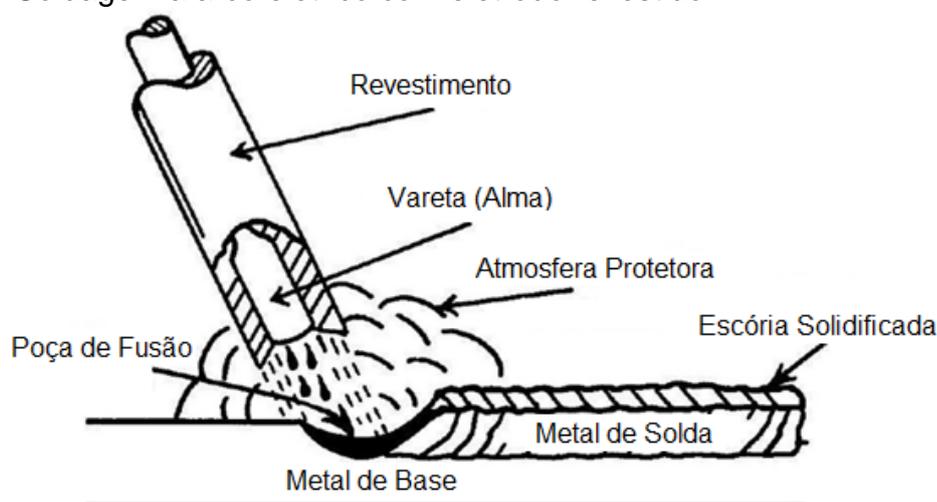
Por fim, nos capítulos 8 e 9 são apresentadas as conclusões e considerações finais, além de recomendações para a continuação desta pesquisa em trabalhos futuros.

2 PROCESSO DE SOLDAGEM COM ELETRODO REVESTIDO

Denomina-se soldagem o processo de união entre duas partes metálicas, usando uma fonte de calor, com ou sem aplicação de pressão. A solda é o resultado desse processo (WAINER; BRANDI; MELLO, 2010).

A soldagem a arco elétrico com eletrodo revestido conhecida também como soldagem manual a arco elétrico, é o mais empregado dos vários processos de soldagem. A soldagem é realizada com o calor de um arco elétrico mantido entre a extremidade de um eletrodo metálico revestido e a peça de trabalho, conforme ilustrado na Figura 3.

Figura 3 - Soldagem a arco elétrico com eletrodo revestido



Fonte: Fortes, 2005.

O calor produzido pelo arco funde o metal de base, a alma do eletrodo e o revestimento. Quando as gotas de metal fundido são transferidas através do arco para a poça de fusão, são protegidas da atmosfera pelos gases produzidos durante a decomposição do revestimento. A escória líquida flutua em direção à superfície da poça de fusão, onde protege o metal de solda da atmosfera durante a solidificação. Outras funções do revestimento são proporcionar estabilidade ao arco e controlar a forma do cordão de solda (FORTES, 2005).

2.1 Tipos de equipamento de soldagem com eletrodo revestido

De acordo com Marques, Modenesi e Bracarense (2009), no processo de soldagem com eletrodo revestido a corrente elétrica pode ser obtida por meio de diferentes máquinas de solda, entre eles, estão os geradores, transformadores, retificadores e inversores eletrônicos.

Os geradores são máquinas rotativas acopladas a uma fonte geradora, normalmente um motor elétrico. Fornece somente corrente contínua (CC), destinada à alimentação do arco elétrico. Os geradores resistem bem aos trabalhos de soldagem de longa duração, à plena carga. Permitem o uso de todos os tipos de eletrodos devido à corrente contínua. Apresentam, como desvantagem, o alto custo de aquisição em relação aos demais equipamentos, bem como, um alto custo de manutenção, por possuírem partes móveis. Entretanto, apresentam como vantagens a estabilidade do arco elétrico e a possibilidade de gerar sua própria energia através do acoplamento de um dispositivo girante.

Os transformadores de soldagem podem apenas ser conectados à corrente alternada e fornecem somente esse tipo de corrente. Entre as principais vantagens, estão o baixo custo de aquisição e manutenção e eliminam o risco de surgimento do sopro magnético⁹, que provoca uma fusão desigual do eletrodo e defeito na solda, principalmente inclusões de escória. Entre as desvantagens, está o desequilíbrio da rede de alimentação, devido à sua ligação monofásica. Não podem ser usados com eletrodos que não proporcionem boa ionização da atmosfera por onde flui o arco elétrico.

Os retificadores além de um transformador, possuem um conjunto retificador para ser usado em CC e CA, estes tipos de máquinas podem ser utilizados em soldagens TIG (*Tungsten Inert Gas*). Sendo que, os retificadores são elementos que somente permitem a passagem de corrente em um só sentido, portanto convertem a corrente alternada em corrente contínua de saída. As pulsações se interrompem com a utilização da corrente de soldagem. Os retificadores, no que diz respeito aos custos de aquisição e de manutenção, possuem vantagens inerentes às máquinas de CC. Isto é, operam com baixas tensões em vazio, proporcionando um regime de arco elétrico estável. Ainda permitem a utilização de qualquer tipo de eletrodo.

Por fim, os inversores de frequência geralmente transformam a CA, convertendo-a em altas voltagens e armazenando-a em um banco de capacitores em voltagem CC. Um microprocessador controla a entrega desta energia para um

⁹ O sopro magnético é um efeito na soldagem que consiste em um desvio do arco de sua posição normal de operação e que tende a ocorrer de uma forma intermitente e similar a uma chama sendo soprada. O sopro magnético resulta de uma distribuição assimétrica do campo magnético em torno do arco, o que causa o aparecimento de forças radiais atuando sobre o arco e levando à alteração de sua posição (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009).

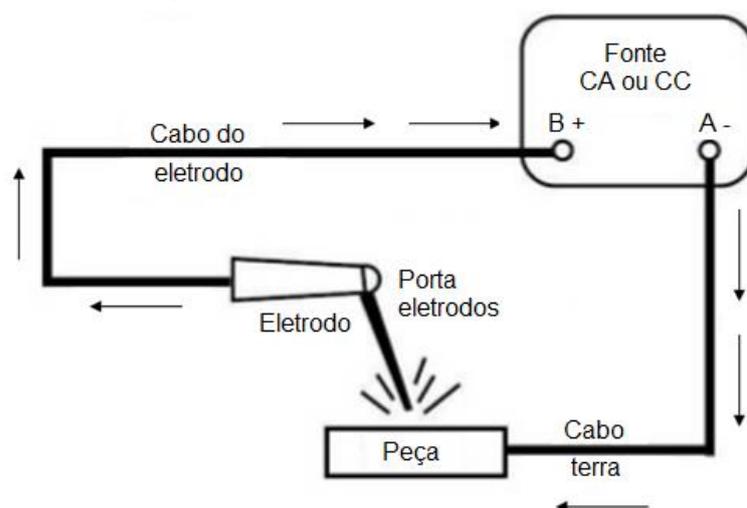
segundo transformador conforme a corrente desejada para a soldagem, retornando com a corrente suave/estável e controlada.

Os inversores, com base nestes princípios, podem ser mais eficientes do que as máquinas de solda tradicionais, principalmente porque os controles da regulação da amperagem desejada são micro processados, fazendo com que, por exemplo, uma oscilação de energia elétrica na rede não altere a amperagem de saída na soldagem. Além disso, comparados aos tamanhos dos equipamentos tradicionais, chegam a pesar um quinto de uma máquina de solda tradicional na mesma faixa de potência. O que torna este tipo de equipamento muito útil para aplicações em grandes alturas, espaços confinados, necessidade de grande mobilidade, entre outros. Além de serem mais econômicos em relação às demais máquinas apontadas anteriormente.

2.2 Sentido de circulação da corrente elétrica

Na Figura 4, pode-se observar, que a corrente circula do polo negativo (-) para o polo positivo (+). No processo de soldagem, quando a máquina de solda está operando, a corrente elétrica sai pelo borne A, desloca-se pelo cabo até a peça, que está sendo soldada e provoca a fusão do material da peça com o material do eletrodo, por meio do arco elétrico. Em seguida, passa pelo eletrodo e retorna ao borne B, através do cabo, entra novamente na máquina pelo circuito interno (SENAI, 1998).

Figura 4 - Circuito de soldagem para o processo com eletrodos revestidos



Fonte: Adaptado de Fortes, 2005.

De acordo com Áquila (2012), quando se faz uso da corrente contínua na soldagem a arco, têm-se dois tipos de polaridades, a direta e a inversa, que pode ser observado na Figura 4. Na primeira delas, à peça é o polo positivo e o eletrodo o polo

negativo (CC-). E na segunda, a peça é o polo negativo e o eletrodo o polo positivo (CC+).

Com a aplicação de uma fonte de corrente contínua de soldagem, pode-se ter diferentes temperaturas na peça e no eletrodo em função da polaridade utilizada. A composição química da alma e do revestimento influenciam de forma complexa a taxa de fusão¹⁰. Pois dependem das características de cada fator investigado, o mesmo ocorre com a espessura do revestimento (FELIZARDO; BRACARENSE; VALLE, 2003).

2.3 Eletrodos revestidos para soldagens

Na soldagem a arco elétrico, o eletrodo é um dos mais importantes elementos na transferência de material. Em um eletrodo não revestido, acontece no decorrer da transferência, a combinação de oxigênio (O₂), hidrogênio (H₂) e nitrogênio (N₂), existentes na atmosfera, com o metal fundido e com a poça de fusão. Os gases O₂, H₂ e N₂ tendem a oxidar o metal de adição do cordão de solda, bem como interferir no arco elétrico, no resfriamento e na estrutura resultante (FORTES, 2005).

Os eletrodos geralmente apresentam revestimentos de materiais não metálicos. Esses ao se fundirem, formam uma escória que, solidificando-se, atua como uma cobertura protetora do material de adição e do cordão de solda (SEBASTIÃO, 1996).

Vale mencionar que existem eletrodos que, em função da composição do revestimento, geram gases e fumos, os quais protegem o arco da ação dos gases encontrados na atmosfera (O₂, H₂ e N₂), bem como o metal de adição. O revestimento torna mais fácil a fusão do eletrodo, melhorando ainda a condutibilidade elétrica na região do arco, tornando-o mais estável e de fácil condução (WORLDS, 2011).

O eletrodo é constituído por um núcleo metálico, também chamada de alma, com 350 à 470 mm de comprimento, revestido por uma camada de minerais (argila, fluoretos e carbonatos) e/ou outros materiais (celulose, ferro e ligas), com um diâmetro total típico entre 1 a 8mm (WAINER; BRANDI; MELLO, 2010).

A alma do eletrodo conduz a corrente elétrica e serve como metal de adição. O revestimento gera escória e gases que protegem da atmosfera a região sendo soldada

¹⁰ Valor do metal depositado por unidade de tempo (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009).

e estabilizam o arco. O revestimento pode ainda conter elementos que são incorporados à solda, influenciando sua composição química e características metalúrgicas (MODENESI; MARQUES; SANTOS, 2012).

O processo de solda com eletrodo revestido (ER), é apropriado para a maioria das ligas metálicas. Os eletrodos estão disponíveis em diversos materiais, entre eles, aços carbono (baixa/alta liga), ferros fundidos, alumínio, cobre e níquel. No entanto, não é adequado sua composição com ligas de baixo ponto de fusão (chumbo, estanho ou zinco) devido a intensa energia gerada pelo arco elétrico. Também, não é recomendado para materiais extremamente reativos (zircônio ou titânio) por não oferecer suficiente proteção à contaminação e/ou reação do metal fundido com os gases da atmosfera (MACHADO, 1996).

De acordo com os autores Marques, Modenesi e Bracarense (2009), o revestimento dos eletrodos possui algumas funções, tais como:

- a) Estabilizar o arco;
- b) Ajustar a composição química do cordão de solda, pela adição de elementos de liga e eliminação de impurezas;
- c) Proteger a poça de fusão e o metal de solda contra a contaminação da atmosfera, através da geração de gases e de uma camada de escória;
- d) Realizar ou possibilitar reações de refino metalúrgico (desoxidação, dessulfuração);
- e) Facilitar a remoção da escória e controlar suas propriedades físicas e químicas;
- f) Facilitar a soldagem nas diversas posições;
- g) Dissolver óxidos e contaminações nas superfícies da junta;
- h) Reduzir o número de respingos e fumos;
- i) Diminuir a velocidade de resfriamento da solda;
- j) Possibilitar o uso de diferentes tipos de corrente e polaridade; e
- k) Aumentar a taxa de deposição.

2.4 Tipos de revestimento

De acordo com Marques, Modenesi e Bracarense (2009), dependendo dos compostos empregados e da proporção com que esses se encontram no

revestimento, os eletrodos revestidos podem ser classificados em ácidos, básicos, celulósicos, oxidantes e rutilícos.

O revestimento dos eletrodos do tipo ácido, são constituídos de óxido de ferro, manganês e sílica. Produzem escória abundante e porosa, de fácil remoção. Esse pode ser utilizado com CC ou CA. A penetração é média e sua taxa de fusão é elevada, levando a uma poça de fusão volumosa, o que acaba limitando sua aplicação nas posições plana e horizontal. As propriedades da solda são consideradas boas, mas sua resistência a formação de trincas de solidificação é baixa. A aparência do cordão de solda é muito boa.

Já o revestimento do tipo básico, geralmente apresenta as melhores propriedades mecânicas e metalúrgicas entre todos os eletrodos, destacando-se a tenacidade. Possui elevados teores de carbonato de cálcio e fluorita, gerando um metal de solda altamente desoxidado e com baixíssimo nível de inclusões complexas de sulfetos e fosfetos. Este não opera bem em CA, quando o teor de fluorita é muito elevado. A escória fluida é facilmente destacável. O cordão é de média penetração e perfil plano ou convexo. Requer ressecagem a temperaturas relativamente altas, por ser altamente higroscópico¹¹ após algumas horas de contato com a atmosfera.

No revestimento celulósico, o eletrodo apresenta elevada produção de gases resultantes da combustão dos materiais orgânicos. A quantidade de escória produzida é pequena, o arco é muito agressivo, causando grandes volumes de respingos e alta penetração, não sendo adequado para enchimento de chanfros. O aspecto do cordão de solda não é bom, apresentando irregularidades (escamas). As características mecânicas da solda são consideradas boas, exceto a possibilidade de fragilização pelo hidrogênio. São recomendados para soldagem fora da posição plana, tendo grande aplicação na soldagem circunferencial de tubulações e na execução de passe de raiz¹² em geral.

Por outro lado, o revestimento oxidante, é constituído principalmente de óxido de ferro e manganês. Produz escória oxidante, abundante e fácil de destacar. O eletrodo pode ser usado em CC ou CA, apresentando baixa penetração. O metal

¹¹ Capaz de absorver a umidade do ar.

¹² Região mais profunda do cordão de solda. Em uma junta chanfrada, corresponde à região do cordão junto da fresta e do encosto. Tende a ser a região mais propensa à formação de descontinuidades em uma solda (WORLDS, 2011).

depositado possui baixo teor de carbono e manganês, e propriedade inadequadas para aplicações de responsabilidade, embora a aparência do cordão seja muito boa.

Por fim, o revestimento rutilico, contem quantidade significativa de rutilo (TiO_2) e produz uma escória abundante, densa e de fácil destacabilidade. São de fácil manipulação, podem ser utilizados tanto em CC quanto CA, em qualquer posição. Produz um cordão de bom aspecto, com média ou baixa penetração. Possuem grande versatilidade e são de uso geral;

2.5 Especificação *American Welding Society* A5.1

Os autores Marques, Modenesi e Bracarense (2009), destacam que existem no mercado uma grande variedade de eletrodos, que apresentam distintas características operacionais, aplicáveis a diferentes materiais e que produzem soldas com características desiguais. Para racionalizar o mercado, os eletrodos revestidos são classificados de acordo com sistemas propostos por diferentes sociedades. Porém, as classificações mais utilizadas no Brasil são as propostas pela *American Welding Society* (AWS). A Tabela 2 apresenta as especificações AWS para eletrodos revestidos.

Tabela 2 - Especificações AWS para classificação de eletrodos revestidos

| Especificação | Tipo de Eletrodo |
|---------------|--|
| AWS A 5.1 | Eletrodos revestidos para soldagem a arco de aços ao carbono |
| AWS A 5.3 | Eletrodos revestidos para soldagem a arco do alumínio e suas ligas |
| AWS A 5.4 | Eletrodos revestidos para soldagem a arco de aços inoxidáveis |
| AWS A 5.5 | Eletrodos revestidos para soldagem a arco de aços de baixa liga |
| AWS A 5.6 | Eletrodos revestidos para soldagem a arco de cobre e suas ligas |
| AWS A 5.11 | Eletrodos revestidos para soldagem a arco de níquel e suas ligas |
| AWS A 5.13 | Eletrodos revestidos para revestimentos por soldagem a arco |
| AWS A 5.15 | Eletrodos e varetas para soldagem do ferro fundido |

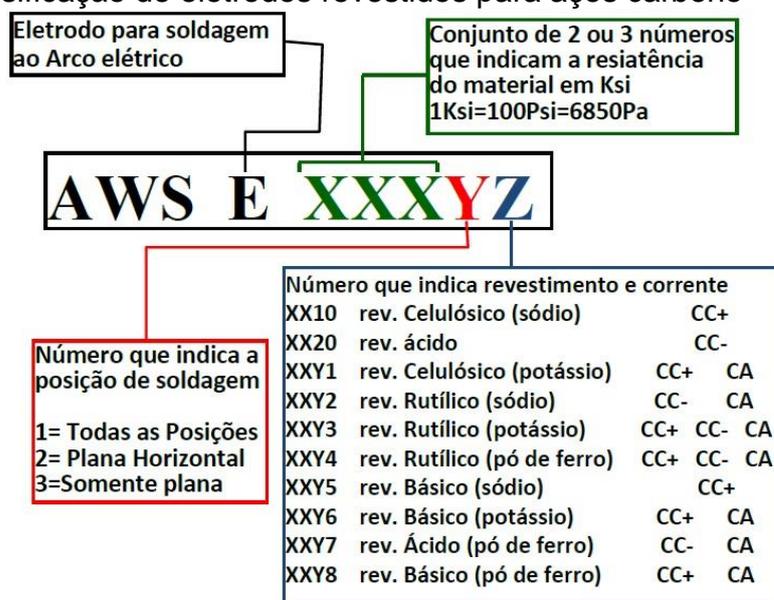
Fonte: Marques, Modenesi e Bracarense, 2009.

De acordo com Fortes (2005), essa especificação da AWS foi desenvolvida ao longo dos anos por um comitê composto de membros que representam os fabricantes de consumíveis de solda, usuários da indústria de soldagem e membros independentes de universidades e laboratórios.

Os eletrodos para aços carbono são classificados pelos fabricantes de consumíveis, em conformidade com a especificação AWS A 5.1, com base nas

propriedades mecânicas do metal de solda, no tipo de revestimento, na posição de soldagem, e no tipo de corrente (CA ou CC). O sistema de classificação é elaborado para fornecer certas informações sobre o eletrodo e o metal de solda depositado. O significado das designações da AWS é mostrado na Figura 5 (FORTES, 2005).

Figura 5 - Classificação de eletrodos revestidos para aços carbono



Fonte: Adaptado de Fortes, 2005.

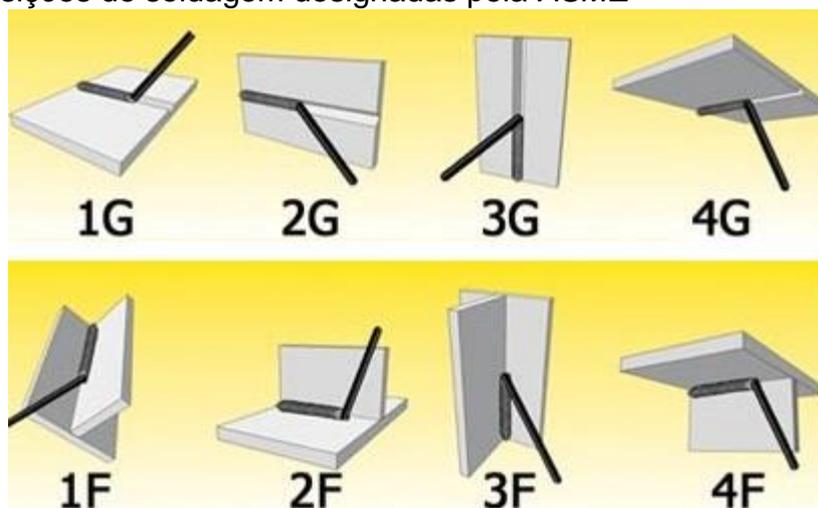
Essas classificações em conformidade com a especificação AWS A5.1 são determinadas pelo fabricante de eletrodos de acordo com os resultados dos testes. A *American Society of Mechanical Engineers (ASME)* utiliza na íntegra as especificações de eletrodos da AWS adicionando as letras SF antes do número da especificação. Então, a especificação AWS A5.1 transforma-se na especificação ASME SFA5.1. Tanto a classificação quanto os requisitos são os mesmos (FORTES, 2005).

2.6 Posições de soldagem

A posição da peça a ser soldada e do eixo da solda determinam a posição de soldagem, que pode ser plana, horizontal, vertical ou sobre cabeça. A posição de soldagem tem uma forte influência sobre o grau de dificuldade de sua execução e na sua produtividade. Em geral, a soldagem na posição plana é a mais fácil de ser executada, possibilitando maior produtividade (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009)

As posições de soldagem são designadas pela *ASME* por um dígito seguido de uma letra. Assim, as posições plana, horizontal, vertical e sobre cabeça são designadas, respectivamente por 1G, 2G, 3G e 4G nas juntas com solda de topo e, por 1F, 2F, 3F e 4F nas juntas com solda de filete. Estas são mostradas na Figura 6. Tal forma de indicar as posições de soldagem é amplamente usada na indústria. (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009).

Figura 6 - Posições de soldagem designadas pela *ASME*



Fonte: Adaptado de Marques, Modenesi e Bracarense, 2009.

Vale mencionar, que nem sempre a peça que vai ser soldada pode ser colocada na posição mais cômoda, devido a sua forma e tamanho. A mudança da disposição das partes das peças a serem soldadas é o que determina as posições de soldagem. A solda executada na posição sobre cabeça exige maior habilidade do soldador comparada a solda executada na posição plana (SENAI, 1998).

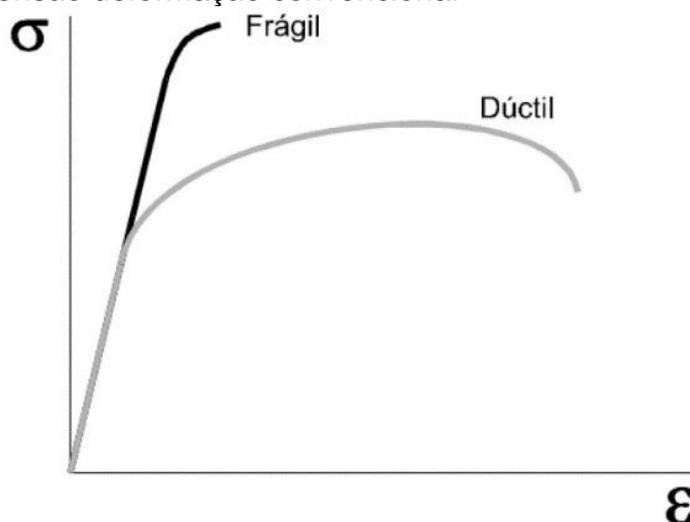
3 PROPRIEDADES MECÂNICAS EM PEÇAS SOLDADAS

Conforme Sanches (2010), soldas depositadas em uma peça ou estrutura devem possuir propriedades mecânicas adequadas para a aplicação pretendida. Estas propriedades são em geral, especificadas e verificadas em testes de qualificação ou em amostras retiradas de um lote da produção. As propriedades mecânicas frequentemente avaliadas são o limite de resistência a tração, o escoamento, a ductilidade e a tenacidade da junta soldada.

Entre os diversos ensaios disponíveis para avaliação das propriedades mecânicas dos materiais, o mais utilizado é o ensaio de tração, por ser um tipo de ensaio relativamente simples e de realização rápida. Esse tipo de ensaio utiliza corpos de prova preparados segundo as normas técnicas convencionais e consiste na aplicação gradativa de carga de tração uniaxial às extremidades do corpo de prova (GARCIA; SPIM; SANTOS, 2012).

O levantamento da curva de tensão de tração (σ) pela deformação (ε) sofrida pelo corpo constitui o resultado de teste de tração. É possível caracterizar um material entre dois grupos. Em materiais frágeis o domínio plástico é praticamente inexistente, indicando sua pouca capacidade de absorver deformações permanentes. No entanto, os materiais dúcteis admitem deformação plástica permanente, após a deformação elástica. A Figura 7 mostra o esboço de curvas tensão deformação obtidas nos ensaios de tração (DALCIN, 2012).

Figura 7 - Curva tensão deformação convencional



Fonte: Dalcin, 2012.

O autor Souza (1982) define tensão como a resistência interna de um corpo a uma força externa (F) aplicada sobre ele, por unidade de área (A), o que pode ser observado na Equação 1. A deformação é definida como a variação de uma dimensão qualquer desse corpo, por unidade da mesma dimensão, quando esse corpo é submetido a um esforço qualquer. A unidade de tensão no Sistema Internacional (SI) é Pascal [Pa].

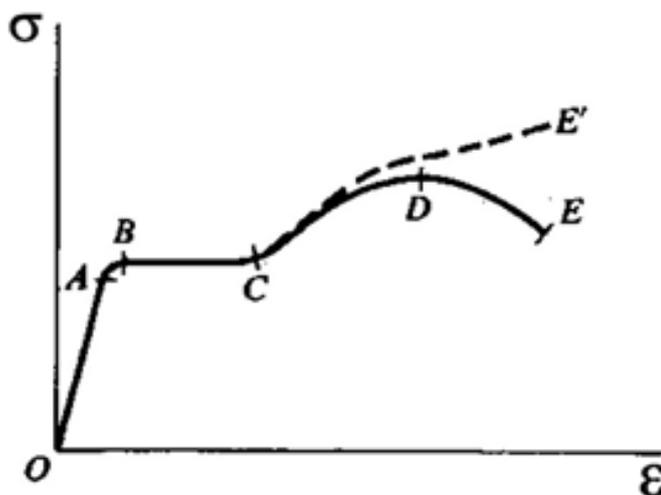
$$\sigma = \frac{F}{A} \quad [MPa] \quad (1)$$

Segundo Timoshenko e Gere (1983), a forma típica da curva tensão deformação para o aço estrutural está representada na Figura 8. Onde as deformações axiais estão representadas no eixo horizontal, sendo as tensões correspondentes dadas pelas ordenadas dos pontos da curva OABCDE. De O até A, as tensões são diretamente proporcionais às deformações e o diagrama é linear. Além desse ponto, a proporcionalidade já não existe e o ponto A é chamado limite de proporcionalidade.

Com o aumento da carga, as deformações crescem mais rapidamente do que as tensões, até um ponto B, onde uma deformação considerável começa a aparecer, sem que haja aumento apreciável da força de tração. Este fenômeno é conhecido como escoamento do material e a tensão no ponto B é denominada tensão de escoamento ou ponto de escoamento (TIMOSHENKO; GERE, 1983).

Na região BC, diz-se que o material tornou-se plástico e a barra pode realmente deformar-se plasticamente, na ordem de 10 a 15 vezes o alongamento ocorrido até o limite de proporcionalidade. No ponto C, o material começa a oferecer resistência adicional ao aumento da carga, acarretando acréscimo de tensão para um aumento da deformação, atingindo o valor máximo ou tensão máxima, no ponto D. Além deste ponto, a maior deformação é acompanhada por uma redução da carga, ocorrendo, finalmente, a ruptura do corpo de prova no ponto E do diagrama (TIMOSHENKO; GERE, 1983).

Figura 8 - Diagrama tensão deformação típico para aço estrutural



Fonte: Timoshenko e Gere, 1983.

Durante o alongamento da barra, há uma contração lateral, que resulta na diminuição da área de seção transversal. Isto não tem nenhum efeito no diagrama tensão deformação até o ponto C. Porém, deste ponto em diante a diminuição da área afeta de maneira apreciável o cálculo da tensão. Ocorre estrangulamento (estricção) na barra, observado na Figura 9. No caso de ser considerada a estricção no cálculo da tensão, tomando-se a área real da seção reduzida, a curva do diagrama tensão deformação verdadeira segue a linha interrompida CE' da Figura 8 (TIMOSHENKO; GERE, 1983).

Figura 9 - Estrangulamento (estricção) de uma barra sob tração.



Fonte: Timoshenko e Gere, 1983.

A carga total que a barra suporta diminui depois de atingir a tensão máxima, linha DE, porém tal diminuição decorre da redução da área e não por perda da resistência do material. Este resiste realmente a um acréscimo de tensão até o ponto de ruptura. Entretanto, para fins práticos, o diagrama tensão deformação convencional OABCDE, baseado na seção transversal original, dá informações satisfatórias para fins de projeto (TIMOSHENKO; GERE, 1983).

A aplicação de uma força em um corpo sólido promove uma deformação do material na direção do esforço. O ensaio de tração consiste em submeter um material a um esforço que tende a alongá-lo. Geralmente, o ensaio é realizado em um corpo de prova de formas e dimensões padronizadas, para que os resultados obtidos

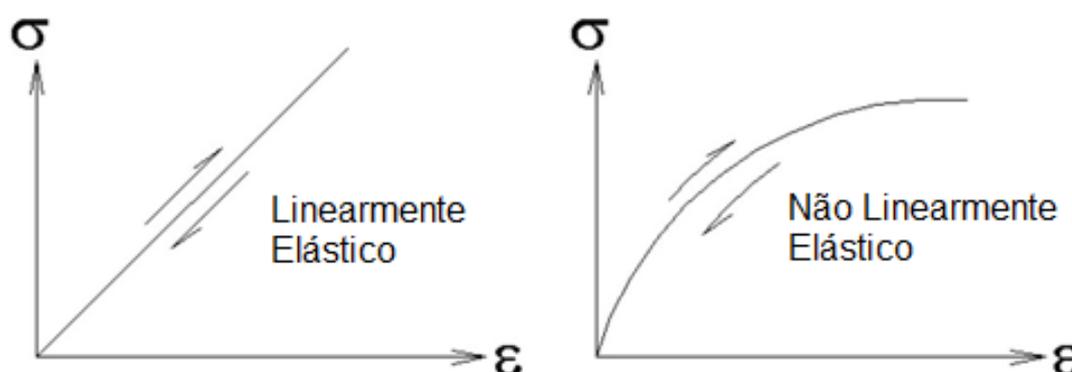
possam ser comparados ou reproduzidos. O corpo de prova é fixado em uma máquina de ensaio que aplica esforços crescentes na sua direção axial sendo medidas as deformações correspondentes por intermédio de um aparelho especial chamado extensômetro¹³. Os esforços ou cargas são medidos na própria máquina de ensaio e o corpo de prova é levado até a sua ruptura (SOUZA, 1982).

3.1 Limite de elasticidade

Segundo Mascia (2006), durante um ensaio de tração, quando um corpo de prova de um material é aliviado, a deformação sofrida durante a carga pode desaparecer parcialmente ou totalmente. A propriedade do material, pela qual ele tende a voltar à forma inicial é denominada elasticidade. Quando a barra retorna totalmente à forma original, ela é perfeitamente elástica, mas se não retornar ela é parcialmente elástica e a deformação que fica é a deformação permanente.

Alguns materiais elásticos apresentam uma relação linear entre tensão e deformação. Tais materiais, como o aço, são chamados de linearmente elásticos. Outros, como a borracha, são não linearmente elásticos, como mostra a Figura 10.

Figura 10 - Classificação dos materiais quanto a elasticidade.



Fonte: Mascia, 2006.

Com a aplicação da tensão (σ), o material sofre uma deformação (ε) o que aumenta o comprimento (L) do comprimento inicial (L_0). A deformação linear é dada pela Equação 2, e sua unidade é adimensional [mm/mm] (SOUZA, 1982).

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{L - L_0}{L_0} \left[\frac{\text{mm}}{\text{mm}} \right] \quad (2)$$

¹³ São usados para medir deformações em diferentes estruturas. A medida é realizada colando um extensômetro nestas estruturas, convertendo a deformação causada em uma quantidade elétrica (voltagem) e amplificando-a para leitura em um local remoto (WEBER, 2008).

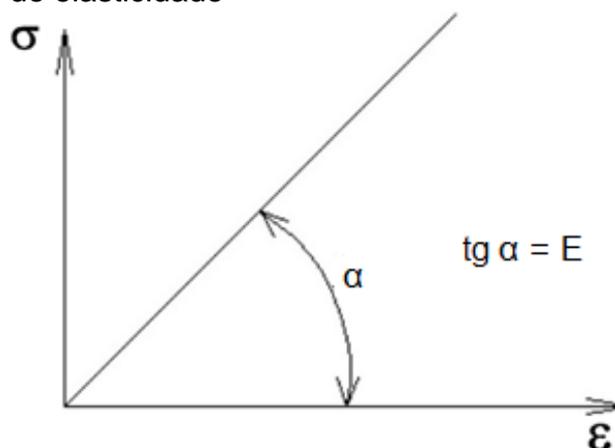
3.2 Módulo de elasticidade

De acordo com Hibbeler (2004), as curvas tensão deformação para a maioria dos materiais utilizados em projetos de engenharia apresentam relação linear entre tensão e deformação na região de elasticidade. Conseqüentemente, um aumento na tensão provoca um aumento proporcional na deformação. Esse fato, descoberto por Robert Hooke, em 1676, com auxílio de molas, é conhecido como Lei de Hooke (Equação 3).

$$\sigma = E \varepsilon \quad [MPa] \quad (3)$$

Onde E representa o módulo de elasticidade ou módulo de Young¹⁴. A Equação 3 representa a porção inicial reta do diagrama tensão deformação até o limite de proporcionalidade. Por sua vez, o módulo de elasticidade representa o declive desta reta, representado na Figura 11.

Figura 11 – Módulo de elasticidade



Fonte: Mascia, 2006.

Assim, substituindo as Equações (1) e (2) na equação (3), encontra-se a Equação 4. Podendo-se afirmar que o alongamento de uma barra linearmente elástica é diretamente proporcional à carga e ao comprimento e inversamente proporcional ao módulo de elasticidade e à área da seção. O produto $E \times A$ é chamado de rigidez axial. (MASCIA, 2006).

$$\Delta L = \frac{L_0 F}{E A} \quad (4)$$

O autor Marinho (1996), destaca que na fase elástica, se dividir a tensão pela deformação, em qualquer ponto, obtêm-se sempre um valor constante. Este valor,

¹⁴ . É o coeficiente angular da parte linear da curva tensão deformação e é diferente para cada material (MASCIA, 2006).

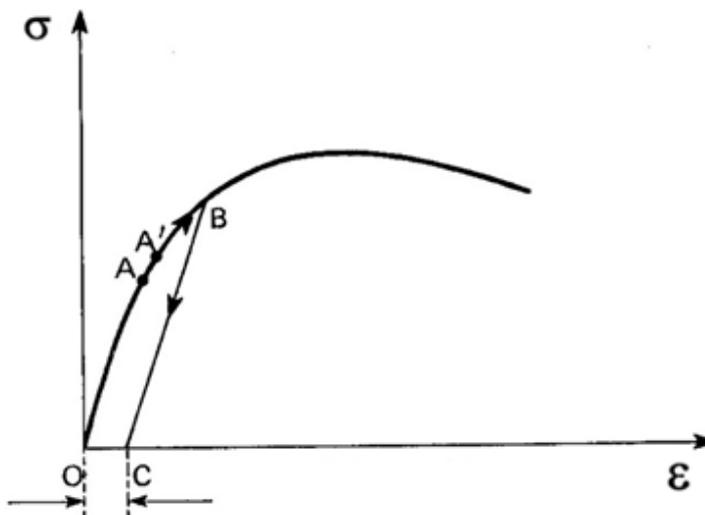
denomina-se módulo de elasticidade. O módulo de elasticidade é a medida da rigidez do material. Quanto maior for o módulo, menor será a deformação elástica resultante da aplicação de uma tensão e mais rígido será o material. Esta propriedade é muito importante na seleção de materiais para fabricação de molas.

3.3 Limite de proporcionalidade

Na Figura 12, pode-se observar, que ao ser atingida uma tensão em que o material já não mais obedece à Lei de Hooke, ou seja, a deformação não é proporcional à tensão, chega-se ao ponto A', denominado limite de proporcionalidade.

A posição relativa entre A e A' é muito discutível e alguns autores colocam A' abaixo de A. Na verdade, esses dois pontos muitas vezes se confundem e torna-se muito difícil determiná-los, com precisão, devido ao fato de que o desvio da linearidade é sempre gradual e não há precisamente um ponto bem determinado para cada um desses limites mencionados (SOUZA, 1982).

Figura 12 - Gráfico tensão-deformação de um metal ou liga metálica



Fonte: Souza, 1982.

O limite elástico pode mesmo estar na parte curva do gráfico. O metal pode ter o ponto A fora da zona onde o material obedece à lei de Hooke e então o limite elástico é definido. Nesse caso, como a tensão máxima que permite ainda ao material possuir, para todos os fins práticos, sua total elasticidade. Admite-se que uma deformação residual de $1 \times 10^{-3} \%$ seja o limite da zona elástica. Essas considerações são mais aplicáveis aos metais dúcteis ou moles. Metais extremamente duros podem romper dentro da zona elástica e daí esses conceitos deixam de ser importantes (SOUZA, 1982).

Porém, a Lei de Hooke só é válida até um determinado valor de tensão, denominado limite de proporcionalidade. Este valor é representado na Figura 12 por A', a partir do qual a deformação deixa de ser proporcional à carga aplicada. Para efeitos de cálculo, pode se considerar que o limite de proporcionalidade e o limite de elasticidade são coincidentes (GARCIA; SPIM; SANTOS, 2012).

3.4 Limite de escoamento

Terminada a zona elástica, atinge-se a zona plástica, onde a tensão e a deformação não são mais relacionados pelo módulo de elasticidade e em qualquer ponto do diagrama. Havendo descarregamento do material até tensão igual a zero, o metal fica com uma deformação permanente ou residual. A Figura 12 mostra um descarregamento do ponto B na zona plástica até a linha das abscissas. Nota-se que a linha BC é paralela à linha OA. Pois o que se perde é a deformação causada na zona plástica, restando a deformação ocorrida na zona elástica (SOUZA, 1982).

O início da plasticidade é verificado em vários metais e ligas dúcteis, principalmente no caso dos aços de baixo carbono pelo fenômeno do escoamento. O escoamento é um tipo de transição heterogênea e localizada, caracterizado por um aumento relativamente grande da deformação com variação pequena da tensão. Depois do escoamento o metal está encruado (SOUZA, 1982).

Vários outros metais e ligas não exibem esse fenômeno. O escoamento em certos casos não é nítido. Sua ocorrência pode se dar tão ligeiramente, que a sensibilidade da máquina não consegue acusá-lo com precisão suficiente.

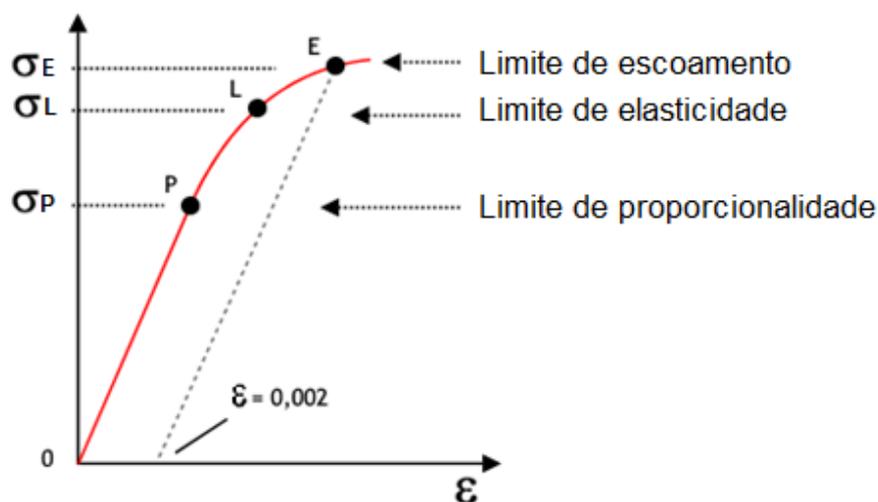
Isso acontece, por exemplo, quanto mais duro é o material. O escoamento é caracterizado praticamente por uma oscilação ou uma parada do ponteiro da máquina enquanto a duração do fenômeno. Denomina-se limite de escoamento, à tensão atingida durante o escoamento e é dado pela Equação 5. Onde Q_e é a carga em Newton [N] durante o escoamento, e S_0 a área da secção transversal do material dada em milímetros ao quadrado [mm²] (SOUZA, 1982).

$$\sigma_e = \frac{Q_e}{S_0} \text{ [MPa]} \quad (5)$$

O ponto limite de escoamento pode ser nítido ou imperceptível. Caso seja imperceptível, convencionou-se adotar uma deformação padrão que corresponda ao limite de escoamento. É conhecido como limite n de escoamento. O valor de n pode

assumir, para aços e ligas em geral, $n = 0,2\%$ ($e = 2 \times 10^{-3}$), para cobre e suas ligas e metais de grande ductilidade, $n = 0,5\%$ ($e = 5 \times 10^{-3}$), e para ligas metálicas muito duras, como aços ferramentas, $n = 0,1\%$ ($e = 1 \times 10^{-3}$). O procedimento para verificar o limite de escoamento para aços e ligas é exemplificado na Figura 13 (GARCIA; SPIM; SANTOS, 2012).

Figura 13 - Curva tensão deformação com n definido para 0,2%.



Fonte: MSPC, 2015.

De acordo com Chiaverini (1986), a importância do conhecimento do limite convencional n ou do limite de escoamento dos metais e suas ligas reside no fato de que esses valores são empregados pelos engenheiros para seus projetos e cálculos, especialmente quando se trata de ligas dúcteis.

3.5 Limite de resistência

Completado o escoamento, o metal entra na fase plástica e o ensaio prossegue até ser atingida uma tensão máxima suportada pelo metal, que caracteriza o final da zona plástica. O limite de resistência (σ_r) do metal é determinado pela Equação 6. Onde Q_r , é a carga máxima atingida durante o ensaio e S_0 é área da seção transversal do material (SOUZA, 1982).

$$\sigma_r = \frac{Q_r}{S_0} \text{ [MPa]} \quad (6)$$

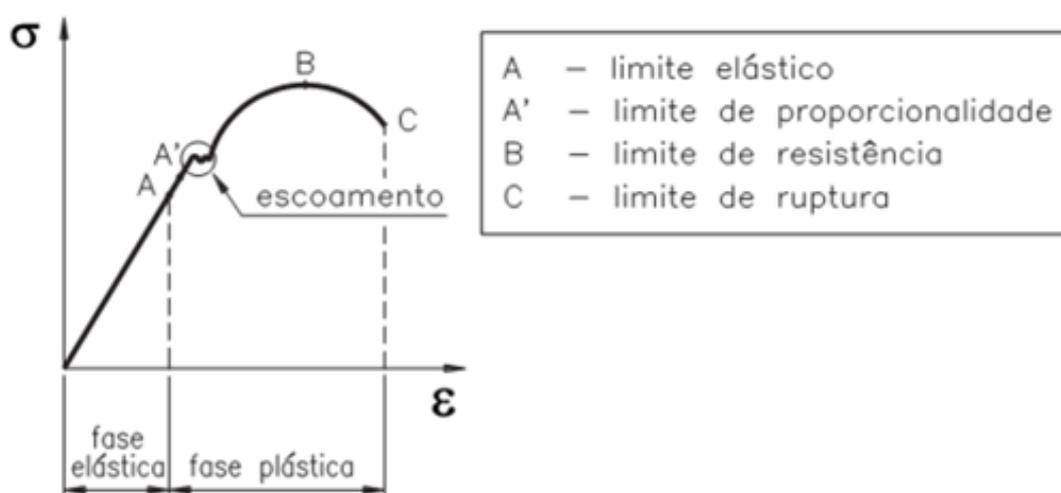
O limite de resistência a tração, tem sua importância ligada ao fato de que é, por seu intermédio, que os materiais são especificados (CHIAVERINI, 1986).

3.6 Limite de ruptura

Após ser atingida a carga máxima entra-se na fase de ruptura do material, caracterizada pelo fenômeno da estrição. Sendo ele uma diminuição da seção transversal do corpo de prova, em uma certa região do mesmo. Quanto mais dúctil é o material, mais estreita se torna a seção nessa fase. E nessa região que se dá a ruptura do corpo de prova finalizando o ensaio. Durante essa fase, a deformação torna-se não-uniforme e a força deixa de agir unicamente na direção normal à seção transversal do corpo de prova (SOUZA, 1982).

Devido à diminuição de área que acontece no corpo de prova depois de atingir a carga máxima, a tensão no limite de ruptura é menor do que no limite de resistência. Na Figura 14, pode se analisar todos esses elementos representados em um mesmo diagrama de tensão deformação (DALCIN, 2007).

Figura 14 – Gráfico tensão deformação



Fonte: Dalcin, 2007.

Mais duas outras propriedades mecânicas podem ser facilmente determinadas pelo ensaio de tração, o alongamento total do corpo de prova e a estrição. O alongamento A , expresso em porcentagem, é calculado pela Equação 7. Onde L_0 é uma distância inicial marcada no corpo de prova antes do ensaio, geralmente especificada pelas normas técnicas e L é a distância final após a ruptura do corpo de prova (SOUZA, 1982).

$$A = \frac{L - L_0}{L_0} 100 \text{ [%]} \quad (7)$$

A estricção é medida, também em percentagem, pela diminuição da secção transversal do corpo de prova após a ruptura. A expressão que calcula a estricção, representada pela letra grega psi (ψ), é demonstrada na Equação 8, onde S é a secção transversal após a ruptura do corpo de prova

$$\psi = \frac{S_0 - S}{S_0} 100 [\%] \quad (8)$$

As propriedades dadas pelas Equações (5) a (8) constituem as propriedades mecânicas geralmente fornecidas por um ensaio de tração (SOUZA, 1982).

3.7 Propriedades mecânicas dos eletrodos revestidos (AWS A5.1)

As características mais importantes dos metais para o soldador são suas propriedades mecânicas. Estas são categorizadas em termos descritivos para identificar as propriedades dos metais (GEARY; MILLER, 2013).

Em corpos de prova soldados, também são realizados ensaios mecânicos (ou físicos) no metal depositado. Para esse tipo de ensaio, os eletrodos devem ser envelhecidos na faixa de 95°C a 105°C por 48 horas antes do ensaio de tração, com exceção dos de baixo hidrogênio (E7015, E7016, E7018, E7028 e E7048). Isso não é considerado um tratamento térmico, pois simplesmente acelera a difusão do hidrogênio do metal de solda nos eletrodos do tipo celulósico ou rutilico (FORTES, 2005). A Tabela 3 mostra as propriedades mecânicas para os eletrodos revestidos aplicáveis aos aços carbono.

Tabela 3 - Propriedades mecânicas dos ER para aços carbono.

| Classe | σ_e (MPa) | σ_r (MPa) | AI (%) |
|--------|------------------|------------------|--------|
| E6010 | ≥331 | ≥414 | ≥22 |
| E6011 | ≥331 | ≥414 | ≥22 |
| E6012 | ≥331 | ≥414 | ≥17 |
| E6013 | ≥331 | ≥414 | ≥17 |
| E6020 | ≥331 | ≥414 | ≥22 |
| E6022 | - | ≥414 | - |
| E6027 | ≥331 | ≥414 | ≥22 |
| E7014 | ≥399 | ≥482 | ≥17 |
| E7015 | ≥399 | ≥482 | ≥22 |
| E7016 | ≥399 | ≥482 | ≥22 |
| E7018 | ≥399 | ≥482 | ≥22 |
| E7024 | ≥399 | ≥482 | ≥17 |
| E7028 | ≥399 | ≥482 | ≥22 |
| E7048 | ≥399 | ≥482 | ≥22 |

Fonte: Adaptado de Fortes, 2005.

O autor Souza (1982), destaca que em materiais soldados, pode-se retirar corpos de prova com a solda, mas o único valor registrado é a carga de ruptura. Pois em materiais heterogêneos a determinação da parte que sofre o escoamento é duvidosa. O alongamento é afetado pela solda e não se pode precisar de antemão a secção inicial. A menos que não haja nenhuma irregularidade entre a solda e o metal-base, pode-se calcular o limite de resistência e a estricção com finalidades apenas práticas.

Pode se medir também em qualquer caso, a eficiência da solda, que seria o quociente entre a carga de ruptura do material soldado e a carga de ruptura do material-base, em porcentagem, o que mostra a Equação 9.

$$Eficiência = \frac{Qr_{solda}}{Qr_{base}} 100 \text{ [%]} \quad (9)$$

Caso a solda seja mais resistente que o metal-base, usa-se as propriedades do material da solda, que podem ser medidas confeccionando corpos de prova do material da solda, os quais são ensaiados normalmente à tração (SOUZA, 1982).

4 ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA)

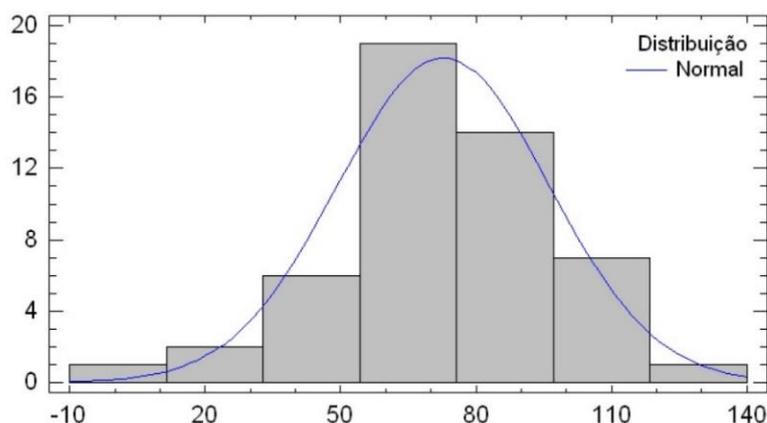
O autor Devore (2006) define *ANOVA*, como sendo um teste que contempla um conjunto de situações experimentais e procedimentos estatísticos para a análise de respostas quantitativas de unidades experimentais. Segundo Freund e Simon (2000), a análise da variância expressa uma medida da variação total em um conjunto de dados, como uma soma de termos, dos quais é atribuído a uma fonte.

Algumas considerações fundamentais devem ser realizadas antes de aplicar a *ANOVA*. A primeira delas é que as amostras analisadas devem ser escolhidas de forma aleatória, assim como serem independentes. Por exemplo, se em um experimento com voluntários, forem obtidos um dado de cada um destes, pode-se admitir que tais dados sejam independentes. Essa aleatoriedade entre os níveis do fator proporcionará resultados válidos do teste (VIEIRA, 2006).

A segunda consideração, diz respeito a normalidade das amostras. Pois torna-se necessário averiguar se os fatores produzem mudanças sistemáticas em alguma variável de interesse. Para saber se é admissível pressupor que os dados de um experimento contêm distribuição normal, o pesquisador pode desenvolver um gráfico de probabilidades normais. Se as pressuposições a respeito dos erros forem válidas e se não há valores discrepantes, os resíduos padronizados parecerão observações independentes de uma distribuição normal padronizada.

A Figura 15 mostra um exemplo de conjunto de dados ajustados à distribuição normal. Porém são os testes de normalidade que indicarão o aceite ou não dessa hipótese (VIEIRA, 2006).

Figura 15 – Dados ajustados a distribuição normal.



Fonte: Grigolo e Oliveira, 2012.

Por fim, as populações pesquisadas devem apresentar variância iguais. Isso pode ser constatado desde que os tratamentos sejam similares e tenham o mesmo número de repetições. O uso de número igual de repetições é a melhor proteção contra os efeitos de variâncias desiguais. Se alguma amostra não atender a uma dessas três considerações, a análise de variância, teoricamente, não deve ser aplicada (VIEIRA, 2006).

4.1 ANOVA de fator único

De acordo com Mann (2006), para descobrir se três métodos distintos produzem diferentes médias aritméticas (μ_1, μ_2, μ_3) para os resultados deve ser testada a hipótese nula, representada na Equação 10, onde as médias das populações são iguais.

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 \quad (10)$$

Porém, caso as médias não sejam iguais (pelo menos uma), é testada a hipótese alternativa, representada na Equação 11.

$$H_1: \mu_1 \neq \mu_2 \neq \mu_3 \quad (11)$$

Para selecionar um procedimento que possa avaliar as hipóteses utilizando as três médias aritméticas de populações em um único teste, é utilizado a análise de variância. A ANOVA fornece esse tipo de procedimento, sendo utilizado para confrontar médias aritméticas de três ou mais populações (MANN, 2006).

Ao utilizarmos ANOVA de fator único, pode-se analisar somente um único fator, ou variável. Por exemplo, em um teste de igualdade das médias aritméticas dos resultados dos alunos ensinados por meio de três métodos de ensino diferentes. Estamos considerando somente um fator, que corresponde o efeito de diferentes métodos de ensino em relação aos resultados dos alunos. De acordo com Mann (2006), a aplicação de ANOVA de fator único requer que as seguintes premissas sejam verdadeiras:

- a) As populações a partir das quais as amostras são extraídas são distribuídas de maneira aproximadamente normal;
- b) As populações a partir das quais as amostras são extraídas possuem a mesma variância ou desvio padrão; e
- c) As amostras extraídas a partir de diferentes populações são aleatórias e independentes.

Para realizar um teste ANOVA de igualdade entre médias aritméticas das populações, a variação total nas medidas é subdividida em duas partes. A devida às diferenças entre os grupos, e a inerente variação dentro os grupos. A variação total é representada através da soma total dos quadrados (*STQ*). Uma vez que as médias aritméticas da população dos c grupos são assumidas como sendo iguais no âmbito da hipótese nula, uma medida da variação total entre todas as observações foi obtida através da soma das diferenças ao quadrado entre cada observação individual e a média geral ou grande média, \bar{X} , que é baseada em todas as observações em todos os grupos combinados. A variação total e a média geral são calculadas nas Equações (12) e (13) respectivamente (LEVINE et al., 2005).

$$STQ = \sum_{j=1}^c \sum_{i=1}^{n_j} (X_{ij} - \bar{X})^2 \quad (12)$$

$$\bar{X} = \frac{\sum_{j=1}^c \sum_{i=1}^{n_j} X_{ij}}{n} \quad (13)$$

Onde, X_{ij} = i -ésima observação no grupo ou nível j , n_j = número de observações do grupo j , n = número total de observações em todos os grupos combinados e c = número de grupos ou níveis de fator de interesse.

A variação entre grupos, usualmente chamada de soma dos quadrados entre grupos (*SQE*), é medida através da soma das diferenças ao quadrado entre a média aritmética da amostra de cada grupo, \bar{X}_j , e a média geral, \bar{X} , ponderada com base no tamanho da amostra, n_j , em cada grupo. A variação entre grupos é calculada utilizando-se a Equação 14.

$$SQE = \sum_{j=1}^c n_j (\bar{X}_j - \bar{X})^2 \quad (14)$$

Onde, \bar{X}_j = média aritmética da amostra do grupo j , n_j = número de observações no grupo ou nível j , \bar{X} = média geral ou grande média, e c = número de grupos ou níveis sendo comparados.

A variação dentro dos grupos, usualmente conhecida como soma dos quadrados dentro dos grupos (*SQD*), mede a diferença entre cada observação e a média aritmética de seu próprio grupo, e a soma dos quadrados dessas diferenças ao

longo de todos os grupos. A variação dentro do grupo é calculada através da fórmula da Equação 15.

$$SQD = \sum_{j=1}^c \sum_{i=1}^{n_j} (X_{ij} - \bar{X}_j)^2 \quad (15)$$

Onde, \bar{X}_j = média aritmética da amostra do grupo j , X_{ij} = i -ésima observação no grupo ou nível j .

Uma vez que c níveis do fator estão sendo comparados, existem $c - 1$ graus de liberdade associados à soma dos quadrados entre os grupos. Uma vez que cada um dos c níveis contribui com $n_j - 1$ graus de liberdade, existem $n - c$ graus de liberdade associados à soma dos quadrados dentro dos grupos, apresentada na Equação 16.

$$\sum_{j=1}^c (n_j - 1) = n - c \quad (16)$$

Além disso, existem $n - 1$ graus de liberdade associados à soma total dos quadrados, uma vez que cada observação X_{ij} está sendo comparada com a média geral ou grande média, \bar{X} , baseada em todas as n observações.

Se cada uma dessas somas de quadrados for dividida pelos graus de liberdade associados, três variâncias, ou termos de quadrados da média, MQE (média dos quadrados entre grupos), MQD (média dos quadrados dentro dos grupos) e MTQ (média total dos quadrados) são obtidas nas Equações (17), (18), (19) respectivamente.

$$MQE = \frac{SQE}{c - 1} \quad (17)$$

$$MQD = \frac{SQD}{n - c} \quad (18)$$

$$MTQ = \frac{STQ}{n - 1} \quad (19)$$

Uma vez que uma variância é calculada através da divisão da soma das diferenças ao quadrado, pelos graus de liberdade apropriados, todos os termos de quadrados da média correspondem a variâncias.

Para Levine et al. (2005), embora o principal interesse esteja concentrado em comparar as médias aritméticas de c grupos para determinar se existe um efeito de tratamento entre eles, o procedimento ANOVA deriva do fato de ser obtido através da análise de variâncias. Se a hipótese nula for verdadeira, e não existirem diferenças reais nas médias aritméticas dos c grupos, todos os três termos de quadrados das médias (MQE , MQD e MTQ) fornecem estimativas da variância, σ^2 , inerentes aos dados. Logo, para testar a hipótese nula H_0 em relação à hipótese alternativa H_1 a estatística do teste F é calculada como sendo igual a razão entre duas variâncias, MQE e MQD , conforme demonstrado na Equação 20.

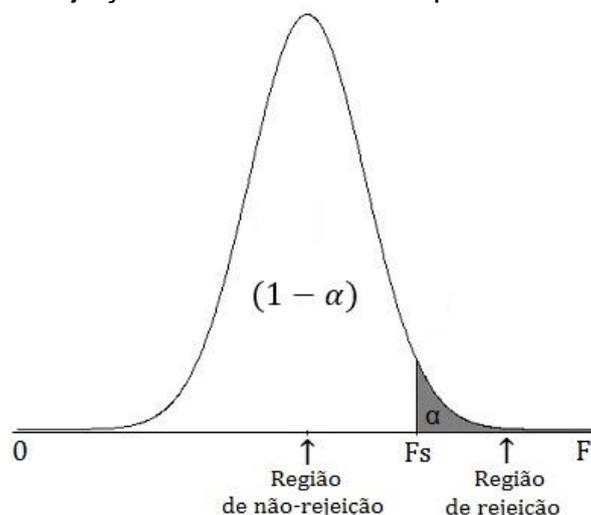
$$F = \frac{MQE}{MQD} \quad (20)$$

A estatística do teste F segue uma distribuição F , com $c - 1$ graus de liberdade, correspondentes a MQE no numerador e $n - c$ graus de liberdade, correspondentes a MQD no denominador.

4.2 A distribuição F

Para um dado nível de significância, α , a hipótese nula é rejeitada, se a estatística do teste F calculada for maior do que o valor crítico de cauda superior, F_s , a partir da distribuição F , tendo $c - 1$ graus de liberdade no numerador e $n - c$ graus de liberdade no denominador. Portanto, conforme mostrado na Figura 16, a regra de decisão é rejeitar H_0 se $F > F_s$, caso contrário, não rejeitar H_0 .

Figura 16 - Regiões de rejeição ao utilizar ANOVA para testar hipótese



Fonte: Adaptado de Levine et al., 2005.

Se a hipótese nula for verdadeira, é esperado que a estatística do teste F calculada seja aproximadamente igual a 1, uma vez que ambos os termos de quadrados da média aritmética do numerador e denominador estão estimando a real variância, σ^2 , inerente aos dados. Se H_0 for falsa (existem diferenças reais nas médias aritméticas), espera-se que a estatística do teste F calculada seja substancialmente maior do que 1, uma vez que o numerador, MQE, estará estimando o efeito do tratamento ou as diferenças entre os grupos, além da variabilidade inerente aos dados, enquanto o denominador, MQD, estará medindo somente a variabilidade.

Desta forma, o procedimento ANOVA fornece um teste F, no qual a hipótese nula é rejeitada, em um nível de significância selecionado, α , somente se a estatística calculada F for maior do que F_s , o valor crítico da cauda superior da distribuição F , que possui $c - 1$ e $n - c$ graus de liberdade conforme ilustrado na Figura 16 (LEVINE et al., 2005).

Os resultados de uma análise de variância são geralmente apresentados em uma tabela resumida de ANOVA, cujo formato é apresentado na Tabela 4.

Tabela 4 - Tabela resumida da análise de variância

| Fonte | Graus de liberdade | Soma dos quadrados | Quadrados da média aritmética (Variância) | F |
|-------------------|--------------------|--------------------|---|-----------------------|
| Entre os grupos | $c - 1$ | SQE | $MQE = \frac{SQE}{c - 1}$ | $F = \frac{MQE}{MQD}$ |
| Dentro dos grupos | $n - c$ | SQD | $MQD = \frac{SQD}{n - c}$ | |
| Total | $n - 1$ | STQ | | |

Fonte: Levine et al., 2005.

As entradas para essa tabela incluem as fontes de variação (entre grupos, dentro de grupos, e total), os graus de liberdade, as somas dos quadrados, a média dos quadrados (variâncias) e a estatística calculada F.

Além disso, o valor-p (a probabilidade de ser obtida uma estatística F tão grande quanto, ou maior do que aquela obtida, sabendo-se que a hipótese nula é verdadeira) está incluído na tabela resumida de ANOVA. O valor-p permite conclusões diretas em relação a hipótese nula, sem recorrer a uma tabela de valores críticos da distribuição F. Caso o valor-p seja menor do que o nível de significância escolhido, α , a hipótese nula é rejeitada (LEVINE et al., 2005).

5 METODOLOGIA

Este capítulo tem por finalidade apresentar os procedimentos metodológicos que serão empregados na presente investigação. Para tanto, inicialmente estabeleceu-se o marco teórico da pesquisa, que consistiu na revisão da literatura apresentadas nos capítulos 2 a 4.

Na sequência, é definido o método de pesquisa (indutivo ou dedutivo) e o tipo de pesquisa a ser realizada (qualitativa, descritiva ou experimental). Por fim, as etapas necessárias para a coleta de dados e posterior análise estatística.

5.1 Métodos científicos de pesquisa

De acordo com Lakatos e Marconi (1992), existem essencialmente dois métodos científicos de pesquisa. O método dedutivo e o método indutivo.

No método dedutivo uma nova verdade é descoberta a partir de outras verdades já conhecidas. Sendo que o ponto inicial é uma teoria consolidada. “A investigação nesse método começa com o planejamento das suposições das características dos fenômenos num conjunto axiomático e com coerência entre os postulados, prosseguindo com um processo de dedução lógica sempre a partir dos postulados iniciais” (GIL, 2002). Por outro lado, no método indutivo uma nova conclusão é alcançada após considerar um número suficiente de casos particulares ou experiências. De maneira geral, o método indutivo é fundamentado que nas mesmas circunstâncias, as mesmas causas produzem o mesmo efeito.

Com referência ao que foi mencionado anteriormente, pode-se inferir que o método da presente pesquisa é o indutivo. Uma vez que, as análises e experimentos que serão realizados com o material selecionado (aço carbono) se converterão em conclusões acerca das melhores técnicas empregadas no processo de soldagem com eletrodo revestido.

5.2 Tipo de pesquisa

Com base nas definições propostas por Gil (2002) quanto ao tipo de pesquisa, pode-se concluir que a presente investigação se trata de uma pesquisa aplicada, do ponto de vista de sua natureza; quantitativa, no que diz respeito à forma de abordagem do problema; descritiva do ponto de vista de seus objetivos e; experimental no que diz respeito a seus procedimentos técnicos.

A pesquisa é aplicada, pois busca a geração de conhecimentos, para aplicação prática, voltados à solução de problemas específicos. É quantitativa, já que requer o uso de recursos e técnicas estatísticas para a validação da hipótese inicial. Descritiva, uma vez que esta envolve o uso de técnicas de levantamento de dados para sua aplicação. Por fim, a pesquisa em questão é considerada experimental, devido ao fato de possuir um objeto de estudo, do qual, o comportamento de uma determinada característica é avaliada por meio de experiências.

5.3 Definição do procedimento metodológico

Foram definidos os procedimentos a serem seguidos nas fases do estudo, de forma a alcançar o objetivo da pesquisa. Desta forma, o presente estudo foi dividido em três etapas, como ilustra a Figura 17.

Figura 17 - Etapas do estudo



Fonte: Autor, 2015.

5.3.1 Definição teórica da pesquisa

Na primeira fase, foi delineado o problema da pesquisa como sendo a influência na resistência da solda à tração, pela posição adotada pelo soldador e pelo tipo de eletrodo revestido empregado.

Parte-se daí a fixação das hipóteses, demonstradas nas Equações (21) e (22). Essas hipóteses partem do pressuposto de que as médias das resistências das soldas à tração, com três tipos de revestimentos de eletrodos, são iguais ou diferentes nos três tipos de posições de soldas estudadas.

$$H_0: \bar{y}_{1a} = \bar{y}_{2a} = \bar{y}_{3a} \quad (21)$$

$$H_1: \bar{y}_{1a} \neq \bar{y}_{2a} \neq \bar{y}_{3a} \quad (22)$$

Na sequência, foi realizada a revisão teórica do problema da pesquisa, apresentadas nos capítulos 2 a 4, na qual, estabeleceu-se o embasamento nos assuntos abordados no estudo, dentre eles, o processo de soldagem com eletrodo revestido, ensaios de tração, propriedades mecânicas dos materiais e análise de variância.

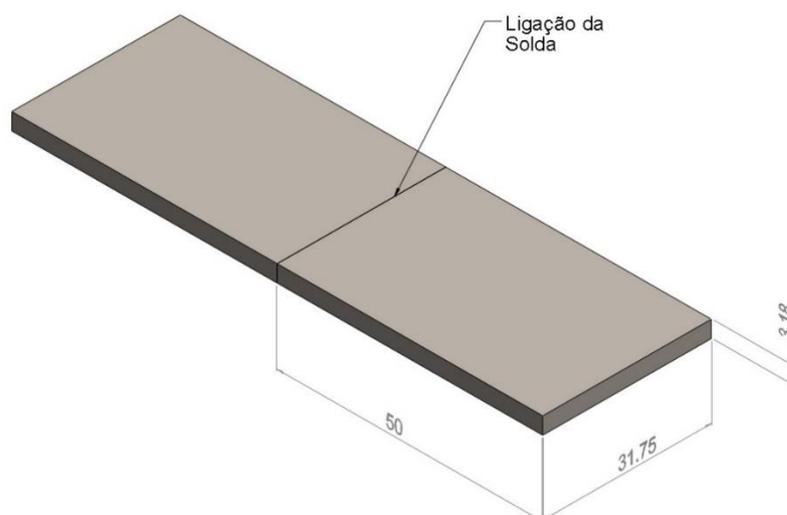
Com base na revisão teórica, determinou-se que o instrumento de coleta de dados a ser utilizado no presente estudo é o ensaio de tração realizados em corpos de prova soldados.

5.3.2 Parte Experimental

Na segunda fase, dar-se-á início ao processo de coleta de dados, por meio da aplicação de ensaios de tração realizados no Laboratório de Metrologia e Ensaios Mecânicos (LaMet) da Universidade Federal do Pampa, localizado na cidade de Bagé-RS, a fim de levantar todos os dados necessários à aplicação do estudo.

Para realização dos ensaios, inicialmente será fabricado um suporte de fixação dos CPs, de forma a permitir a soldagem nas 3 (três) posições estudadas. Logo em seguida, serão adquiridas barras chatas com para a confecção das peças que formarão os corpos de prova. Cada 2 peças constituirá um corpo de prova, conforme mostra a Figura 18.

Figura 18 – CP a ser soldado

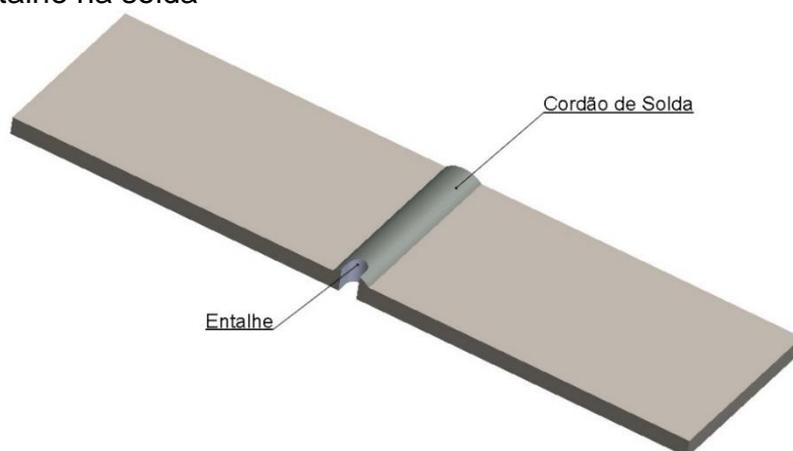


Fonte: Autor, 2015.

Após as peças serão cortadas e escovadas, de forma a estarem isentas de óleo, graxa e ferrugem, e também, para a retirada das rebarbas resultante do corte. As peças serão fixadas no suporte para a realização das soldas no Laboratório de Fabricação (LAFA) da UNIPAMPA, *campus* Bagé. Após a execução da soldagem, os corpos de prova serão classificados em nove grupos. Cada grupo com 10 unidades, com CPs que serão soldados na mesma posição e mesmo tipo de eletrodo. Os CPs serão assinalados com o número de seu grupo e a ordem de execução da solda, por meio de uma caneta de marcação permanente.

Logo após, será executado um entalhe, por meio de uma serra policorte de metais, para garantir a concentração de tensões e a ruptura na região da solda e não no metal-base, ilustrado na Figura 19 (CHIAVERINI, 1986).

Figura 19 - Entalhe na solda



Fonte: Autor, 2015.

Cada CP terá suas dimensões de espessura largura e comprimento mensuradas com um paquímetro digital, e os dados iniciais obtidos serão classificados e registrados de acordo com a Tabela 5.

Tabela 5 - Dados das dimensões dos CPs

| Grupo N°: | N° do CP | Espessura (mm) | Largura (mm) | Altura (mm) |
|-------------------|----------|----------------|--------------|-------------|
| _____ | 1 | | | |
| | 2 | | | |
| | 3 | | | |
| Eletrodo: | 4 | | | |
| _____ | 5 | | | |
| | 6 | | | |
| | 7 | | | |
| Posição de solda: | 8 | | | |
| _____ | 9 | | | |
| | 10 | | | |

Fonte: Autor, 2015.

Após o registro dos principais dados necessários para o estudo, parte-se para a aplicação física dos ensaios. Para tanto, será sorteada a ordem dos grupos a serem ensaiados. Após será utilizada a máquina universal de ensaios, EMIC DL 10000, disponível no LaMet – UNIPAMPA, apresentada na Figura 20.

Figura 20 - Máquina Universal de Ensaios



Fonte: Autor, 2015.

Cada CP será fixado na máquina através do aperto de um conjunto de garras, com mordentes para CPs planos. Este aperto irá ocasionar uma Força na célula de carga (transdutor de força) que deverá ser padronizada. A célula de carga utilizada na máquina, será com capacidade máxima de 100 kN, por atender aos limites de resistência na Tabela 3. A velocidade de ensaio utilizada, será conforme as especificações das normas da ASTM (*American Society for Testing and Materials*).

Durante a programação do equipamento, serão inseridos os dados da Tabela 5 no software TESC 3.04, que acompanha a máquina universal de ensaios. Cabe ressaltar, que esses dados de entrada são necessários, para que se obtenha os valores de tensão de resistência (σ_r) e de escoamento (σ_e) após a ruptura do CP.

Logo em seguida, será realizado o ensaio de tração nos nove grupos de corpo de provas estudados, obtendo-se dados como força máxima, tensão de resistência, tensão de escoamento e deformação específica. Os resultados serão registrados e classificados conforme Tabela 6.

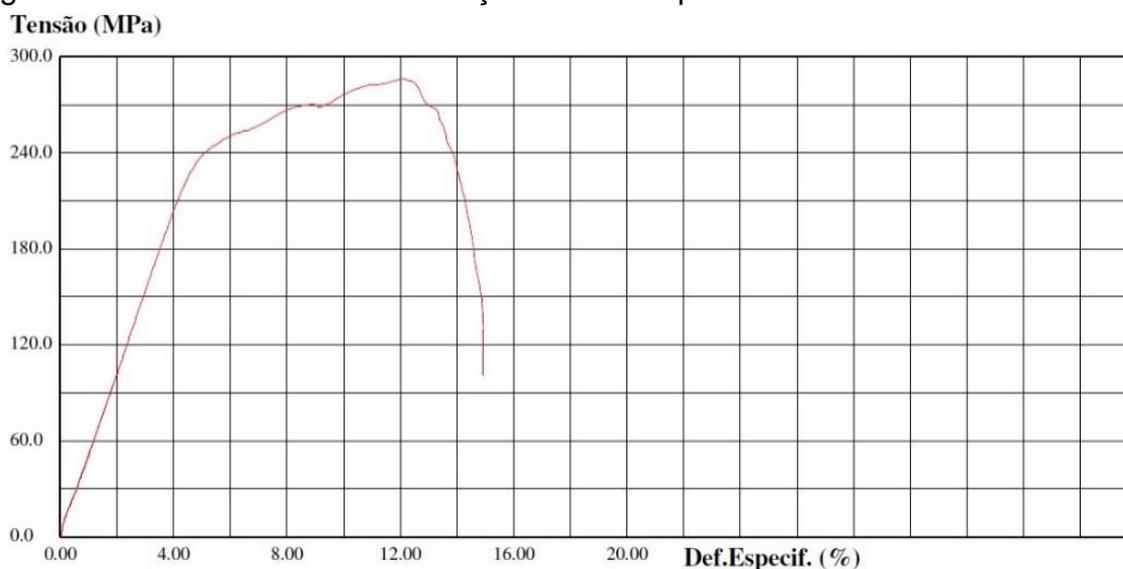
Tabela 6 - Dados dos ensaios em CPs

| | Nº do CP | Força Máxima (kN) | Tensão de Resistência (MPa) | Tensão de Escoamento (MPa) | Deformação (mm/mm) |
|-------------------|----------|-------------------|-----------------------------|----------------------------|--------------------|
| Grupo Nº: | 1 | | | | |
| | 2 | | | | |
| Eletrodo: | 3 | | | | |
| | 4 | | | | |
| | 5 | | | | |
| Posição de solda: | 6 | | | | |
| | 7 | | | | |
| | 8 | | | | |
| | 9 | | | | |
| | 10 | | | | |

Fonte: Autor, 2015.

Com as informações obtidas, serão gerados pelo software TESC 3.04 os gráficos tensão-deformação para análise da resistência a tração, limite de escoamento e deformação específica. Pode-se observar, na Figura 21, um exemplo de gráfico tensão-deformação, fornecido pelo software TESC 3.04.

Figura 21 - Gráfico tensão-deformação fornecido pelo software TESC 3.04



Fonte: Software TESC versão 3.04, LaMet, UNIPAMPA, 2015.

5.3.3 Análise e interpretação dos resultados

Os ensaios servirão para a determinação das propriedades mecânicas de corpos de prova soldados para que seja possível a determinação da resistência à tração. Será preenchida a Tabela 7, por meio das médias coletadas nos nove grupos estudados.

Tabela 7 - Médias das amostras coletadas dos 9 grupos

| Tipo de Eletrodo | Posições de soldagem | | |
|------------------|----------------------|----------------|----------------|
| | 1G (a) | 3G (b) | 4G (c) |
| AWS E6010 - | \bar{y}_{1a} | \bar{y}_{1b} | \bar{y}_{1c} |
| AWS E6011 - | \bar{y}_{2a} | \bar{y}_{2b} | \bar{y}_{2c} |
| AWS E6013 - | \bar{y}_{3a} | \bar{y}_{3b} | \bar{y}_{3c} |

Fonte: Autor, 2015.

Após o registro das médias, será verificada a hipótese nula da Equação 21, pelo método de Análise de variância de fator único. O que se pretende é inferir o comportamento das variáveis respostas em função das variáveis independentes.

Aplicando a ANOVA com fator único, nos dados da Tabela 6 obtém-se os valores a serem inseridos na Tabela 8.

Tabela 8- ANOVA para CPs

| Fonte de variação | Graus de liberdade | Soma dos quadrados | Quadrados da média aritmética | F | Valor-P | Fcrítico |
|-------------------|--------------------|--------------------|-------------------------------|---|---------|----------|
| Entre grupos | | | | | | |
| Dentro dos grupos | | | | | | |
| Total | | | | | | |

Fonte: Autor, 2015.

Analisando o resultado da ANOVA da Tabela 8, será possível verificar se o valor estatístico de F é inferior ao Fcrítico. Também, podemos analisar o valor de P em relação ao nível de significância $\alpha=0,05$. Por fim, podemos concluir se as médias das amostras possuem diferenças significativas, e afirmar se a hipótese da Equação 21 é verdadeira.

Com a aplicação da ANOVA será possível constatar se existem diferenças significativa na qualidade das soldas executadas em diferentes posições. Pode-se afirmar também, qual o melhor eletrodo para cada posição de soldagem.

5.4 Limitações do método

Neste item são determinados os fatores que podem interferir nos resultados do estudo. Um fator limitante do método é o fato de que as peças serão soldadas manualmente, podendo ocorrer influência da habilidade do soldador na qualidade das soldas.

No método proposto, será utilizado para efeitos de cálculo a área da secção transversal do corpo de prova e não a área da secção da solda. Porém, como foi apresentado na revisão teórica, os eletrodos apresentam taxas de deposição e penetração diferentes. O que pode ocasionar variação na resistência dos corpos de provas. Em materiais heterogêneos (soldados) a determinação da parte que sofre o escoamento é duvidosa. O alongamento é afetado pela solda e não se pode precisar de antemão a secção inicial (SOUZA, 1982). Portanto, optou-se por somente analisar a Força de ruptura, pois independe da área da secção do corpo de prova.

Outro fator limitante é a possibilidade do ensaio (máquina universal) não conseguir medir as diferenças devido a sensibilidade da célula de carga. As células de carga disponíveis no laboratório são as de 100 kN, 20 kN, 5 kN, 2 kN e 200N. Como a carga máxima para os eletrodos estudados podem ultrapassar 20 kN, a célula de

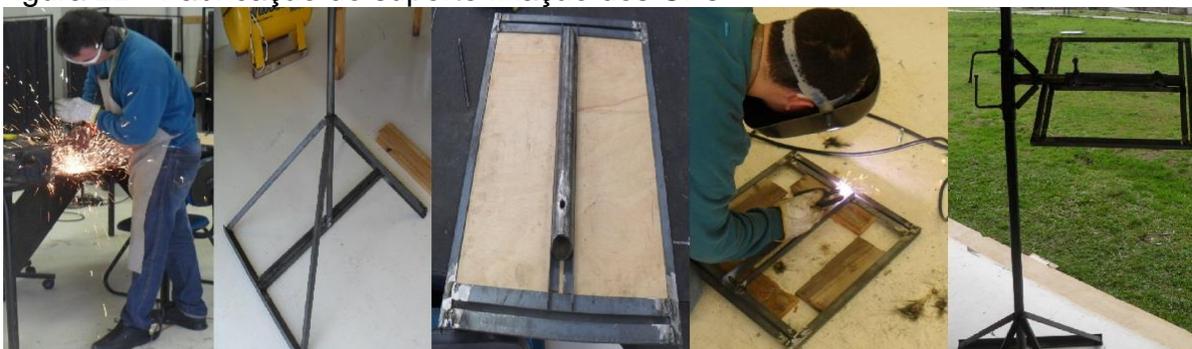
carga utilizada será a de 100 kN. Quanto maior a carga máxima da célula de carga, menor é a sensibilidade a pequenas variações de carga.

Para a realização dos ensaios nos materiais utilizados, além da preocupação com a aquisição do material que demande estudos aplicados, deve-se optar por materiais que possam ser utilizados nos equipamentos disponíveis e dentro dos prazos determinados para o termino deste estudo.

6 DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL

Neste capítulo, deu-se início a parte experimental do trabalho com a fabricação do suporte de fixação dos corpos de prova (CPs). O suporte possui uma bancada, com giro de 360 graus e regulagem de altura, com a finalidade de fixar as peças nas três posições estudadas. Esta fixação garante a padronização na execução das soldas, evitando assim variações indesejadas nos experimentos como distorções, falta de repetitividade, perda de tempo na fixação e na retirada dos CPs. A fabricação do suporte pode ser observada na Figura 22.

Figura 22 - Fabricação do suporte fixação dos CPs



Fonte: Autor, 2015.

Logo, foram adquiridas barras chatas de aço carbono SAE 1020, e marcadas 180 peças com dimensões de 31,75mm x 3,18mm x 50mm. As peças foram cortadas por meio de uma serra policorte marca Dewalt D28700-B2. Após foram esmerilhadas e escovadas em um moto esmeril marca Motomil MT 150. A Figura 23, ilustra a marcação, o corte e a limpeza das peças.

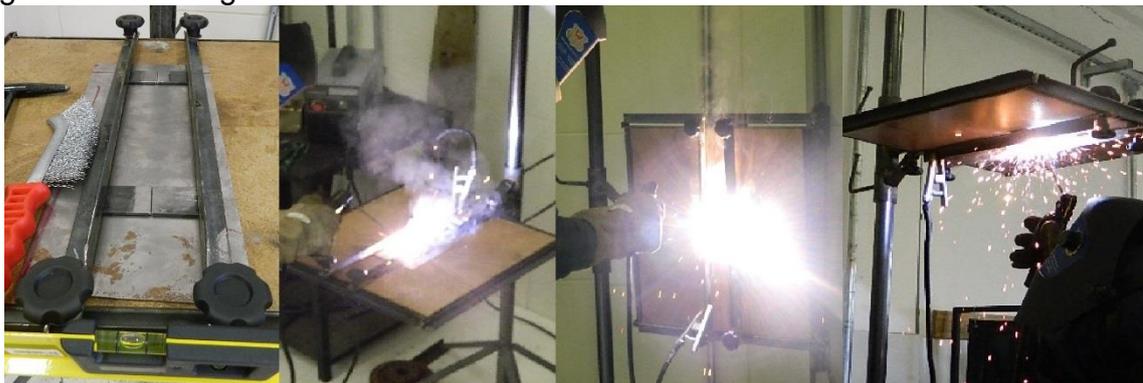
Figura 23 – Marcação, corte e limpeza das peças



Fonte: Autor, 2015.

Na sequência, as peças foram fixadas no suporte fabricado. Cada 2 peças constituiu um corpo de prova e foram fixadas em junta de topo, sem chanfro e sem abertura. Segundo Treiber (2015), para espessuras menores que 6,35 mm, não é necessário chanfro e abertura. A execução da solda é observada na Figura 24.

Figura 24 - Soldagem dos CPs



Fonte: Autor, 2015.

Para execução deste processo, a posição do eletrodo no porta eletrodo foi de 45° , e utilizado o equipamento de soldagem tipo fonte inversora INVERT MXI -180ED, marca Bambozzi, como mostra a Figura 25.

Figura 25 - Fonte inversora para soldagem



Fonte: Autor, 2015.

As soldas foram executadas nos laboratórios da UNIPAMPA. As 180 peças soldadas constituíram 90 CPs com dimensões aproximadas de 31,75mm x 3,18mm x 100mm. Os eletrodos utilizados no processo foram:

- a) AWS E6010 – marca ESAB, modelo OK 22.45P;
- b) AWS E6013 – marca ESAB, modelo OK 46.00; e
- c) AWS E7018 – marca ESAB, modelo OK 48.04.

Os eletrodos foram armazenados em estufas, a 45°C nas 12 horas antecedentes a execução da solda, para garantir que não estivessem úmidos. As condições de armazenagem recomendadas para os eletrodos revestidos, pode ser observada na Tabela 9 (FORTES, 2005).

Tabela 9 - Condições de armazenagem dos eletrodos revestidos

| | Umidade relativa | Temperatura |
|--------------|------------------|---------------|
| Celulósicos | 70% máximo | +18°C a +50°C |
| Demais tipos | 50% máximo | +18°C mínimo |

Fonte: Fortes (2005)

Como toda análise comparativa, os testes tiveram valores pré-definidos. Apesar dos eletrodos revestidos serem normatizados, podem ocorrer variações entre os fabricantes. Foram utilizados eletrodos somente da marca ESAB, com diâmetro de 2,5mm, recomendado para a espessura do material a ser soldado. As especificações de composição química, diâmetro, corrente e polaridade estão de acordo com o catálogo disponível do fornecedor. Pode se observar na Tabela 10, as especificações dos eletrodos utilizados.

Tabela 10- Especificações dos eletrodos utilizados

| Eletrodo | Composição (%) | Diâmetro (mm) | Comprimento (mm) | Corrente (A) | Tipo de Corrente |
|------------------------|-----------------------------|---------------|------------------|--------------|------------------|
| AWS E6010 OK 22.45P | C 0,09, Si 0,10, Mn 0,30 | 2,5 | 350 | 70 | CC+ |
| AWS E6013 OK 46.00 | C 0,07, Si 0,20, Mn 0,35 | 2,5 | 350 | 70 | CC+ |
| AWS E7018 OK 48.04 | C 0,07, Si 0,50, Mn 1,30 | 2,5 | 350 | 70 | CC+ |

Fonte: Adaptado de Fortes (2005)

Após a execução da soldagem, os corpos de prova foram classificados em nove grupos. Cada grupo com 10 unidades, com CPs que foram soldados na mesma posição e mesmo tipo de eletrodo. Todos os corpos de prova foram marcados com 3 (três) números, os 2 (dois) primeiros identificando o grupo (eletrodo e posição) e o terceiro com a identificação da ordem de soldagem (de 1 (um) à 10 (dez)). A classificação dos grupos é apresentada na Tabela 11.

Tabela 11 - Classificação dos grupos de CPs

| Grupo | Eletrodo | Posição | Nº de CPs |
|-------|-----------|---------|-----------|
| 1.1 | AWS E6010 | 1G | 10 |
| 1.3 | AWS E6010 | 3G | 10 |
| 1.4 | AWS E6010 | 4G | 10 |
| 2.1 | AWS E6013 | 1G | 10 |
| 2.3 | AWS E6013 | 3G | 10 |
| 2.4 | AWS E6013 | 4G | 10 |
| 3.1 | AWS E7018 | 1G | 10 |
| 3.3 | AWS E7018 | 3G | 10 |
| 3.4 | AWS E7018 | 4G | 10 |

Fonte: Autor, 2015.

Logo após, foi executado um entalhe com profundidade de aproximadamente 4 mm na solda, por meio da serra policorte. Na sequência, com auxílio de uma lamina de serra, foi realizada uma pequena entrada na parte inferior do entalhe (junta), a execução do entalhe pode ser observada na Figura 26.

Figura 26 - Execução do entalhe na solda



Fonte: Autor, 2015.

Os CPs tiveram suas dimensões de largura e espessura mensuradas com um paquímetro digital, resolução 0,01mm. Para medir a deformação próximo a região da solda, foram demarcados nos CPs o comprimento inicial de ensaio com aproximadamente 13mm. Esta medida serviu para fixar os mordentes no CP. Após o aperto dos mordentes foi utilizado o paquímetro para medir a distância dos mesmos, esta distância foi utilizada como comprimento base para a deformação. Na Figura 27, pode ser observada a marcação e medição dos CPs. Estes dados obtidos foram registrados no APÊNDICE A.

Figura 27 – Marcação e medição dos CPs



Fonte: Elaborado pelo autor.

Após o registro das principais medidas necessárias para os ensaios, partiu-se para a aplicação física dos mesmos. Para tanto, foi sorteada de forma manual e aleatória a ordem dos 9 (nove) grupos ensaiados. A ordem sorteada foi 1.3, 2.1, 3.1, 2.3, 1.1, 1.4, 3.3, 2.4 e 3.4. Logo, foi utilizada a máquina universal de ensaios, EMIC DL 10000, disponível no LaMet – UNIPAMPA. Cada CP foi fixado na máquina através de um conjunto de garras, com mordentes para CPs planos. A célula de carga (transdutor de força) utilizada na máquina, foi a de capacidade máxima de 100 kN. A velocidade de ensaio utilizada foi a de 5mm/min.

Os corpos de prova foram sendo fixados individualmente como pode ser visto na Figura 28. Porém, antes da execução do ensaio, foram inseridos os dados do APÊNDICE A no software TESC, que acompanha a máquina universal de ensaios. É válido ressaltar que a força de aperto das garras no CP origina uma Força (pré-carga) mostrada no indicador do software, este valor de aperto foi padronizado em aproximadamente 2 kN. Os dados de entrada são necessários, para que se obtenha os valores de Força de ruptura dos CPs. Todos estes valores foram registrados no APÊNDICE B.

Figura 28 - Fixação do CP na máquina de ensaio



Fonte: Autor, 2015.

Logo em seguida, foi realizado o ensaio de tração nos nove grupos de corpo de provas estudados, obtendo-se os dados da força de ruptura (força máxima), tensão de resistência, tensão de escoamento, deformação específica além dos gráficos gerados pelo software TESC. Os resultados foram registrados no APÊNDICE B, e os relatórios de ensaios gerados pelo software estão nos Anexos 1, 2, 3, 4, 5 e 6. Os dados obtidos foram exportados para uma planilha do software comercial Microsoft Excel (2013), onde partiu-se para a análise dos resultados.

7 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos dos ensaios e suas análises de acordo com a metodologia descrita no capítulo 5. Os ensaios serviram para a determinação da força de ruptura que corpos de prova soldados resistiram, em kN (kilo Newton). Por meio das médias coletadas nos nove grupos estudados, foi preenchida a Tabela 12.

Tabela 12 - Médias da Força (kN) de ruptura dos 9 grupos estudados

| Tipo de Eletrodo | Posições de soldagem | | |
|------------------|----------------------|---------|---------|
| | 1G (kN) | 3G (kN) | 4G (kN) |
| AWS E6010 | 25,29 | 22,62 | 17,33 |
| AWS E6013 | 22,60 | 17,23 | 20,33 |
| AWS E7018 | 26,66 | 20,37 | 21,92 |

Fonte: Autor, 2015.

Após o registro das médias, foi verificada a hipótese nula da Equação 21, que consiste em descobrir se três eletrodos revestidos distintos produzem médias aritméticas iguais para as posições estudadas. O nível de significância utilizado foi o de 5% ($\alpha = 0,05$).

Para as análises utilizou-se como ferramenta de apoio a metodologia estatística o suplemento *Action* versão 2.8 (2014), que trabalha de forma integrada com o Microsoft Excel. Todos os cálculos estatísticos do *Action* são baseados na plataforma R, um dos sistemas de estatística mais utilizados atualmente.

O suplemento *Action* fornece o gráfico de efeitos principais para examinar diferenças entre médias de níveis para um ou mais fatores. Existe um efeito principal quando diferentes níveis de um fator afetam a resposta de maneira diferente. Um gráfico de efeitos principais traça a média da resposta para cada nível de fator conectado por uma linha.

Além de fornecer o gráfico de efeitos, o *Action* gera gráficos de resíduos (erros). Estes são gráficos utilizados para examinar a qualidade do ajuste em regressão e ANOVA. Examinar gráficos de resíduos ajuda a determinar se os dados amostrados podem assumir uma função de distribuição. Os gráficos de resíduos fornecidos pelo *Action* são:

- Gráfico de papel de probabilidade - utiliza a estatística Anderson-Darling (AD) que mede o quanto os dados seguem uma determinada

distribuição. Se o valor-p do teste de AD for menor do que o nível de significância escolhido, conclui-se que os dados não seguem a distribuição especificada;

- b) Histograma de resíduos - para avaliar a dispersão e distribuição dos resíduos, e se os dados são assimétricos;
- c) Resíduos x Valores ajustados - com esse gráfico tem-se indícios se há dispersão grande ou irregular de resíduos entre os valores ajustados. Pode-se identificar erros que não são aleatórios;
- d) Resíduos x Ordem de coleta – com esse gráfico obtém-se os indícios da independência ou não entre os resíduos. Pode-se observar indícios de que alguma variável extra influenciou nos resultados do experimento.

Utilizando o *Action*, nos itens 7.1 à 7.6 foram realizadas análises da variância da Força de Ruptura dos CPs dos grupos analisados, a fim de comparar a influência dos 6 (seis) efeitos (3 eletrodos e 3 posições) no desempenho da soldagem. Também foram gerados os gráficos supracitados para avaliação dos efeitos e resíduos.

7.1 ANOVA para o Eletrodo AWS E6010

Aplicando a ANOVA com fator único, para as 3 posições (1G, 3G e 4G) para o eletrodo E6010, obteve-se os valores inseridos na Tabela 13.

Tabela 13 - ANOVA para o eletrodo E6010

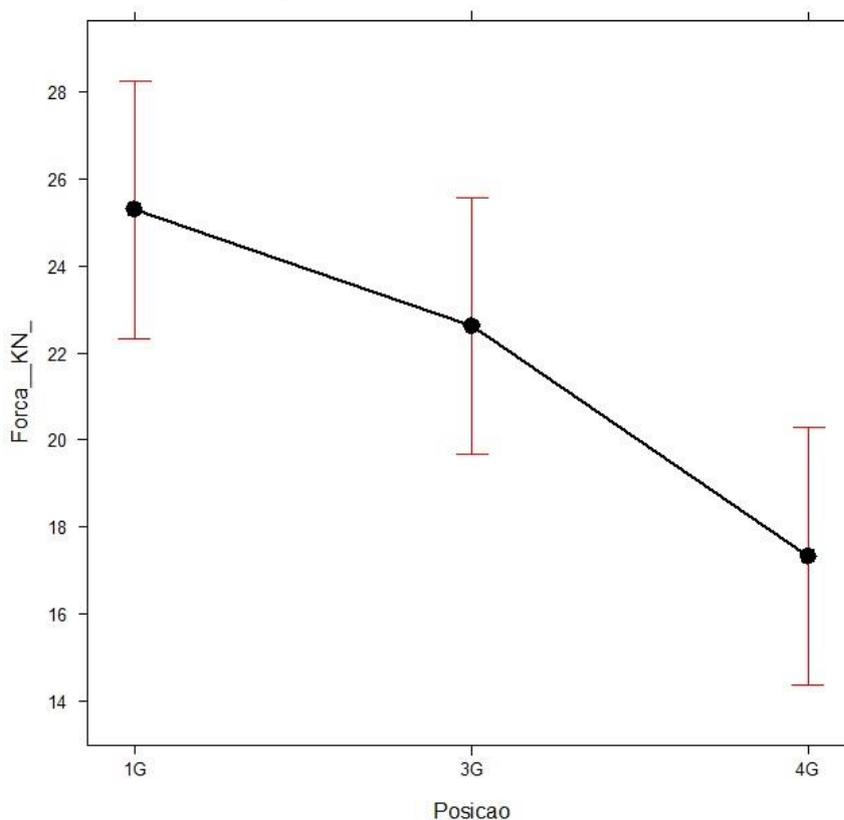
| Fonte de variação | Graus de liberdade | Soma dos quadrados | Quadrados da média aritmética | F | Valor-P | Fcrítico |
|-------------------|--------------------|--------------------|-------------------------------|--------|---------|----------|
| Entre grupos | 2 | 328,107 | 164,053 | 7,9201 | 0,0020 | 3,3541 |
| Dentro dos grupos | 27 | 559,26307 | 20,7134 | | | |
| Total | 29 | 887,37 | | | | |

Fonte: Autor, 2015.

Analisando o resultado da ANOVA da Tabela 13, é possível verificar que o valor estatístico de F é maior que o Fcrítico. Também, foi constatado que o valor de P é menor em relação ao nível de significância $\alpha=0,05$. Podemos concluir que as médias das amostras possuem diferenças significativas, e afirmar que para o eletrodo E6010 as médias são diferentes, portanto a hipótese da Equação 21 é rejeitada.

Ao analisar o gráfico de efeitos na Figura 29, gerado pelo *Action*, a posição 1G resistiu a maior Força, seguida pela posição 3G. Por último, a posição 4G foi a que resistiu a menor força com eletrodo E6010.

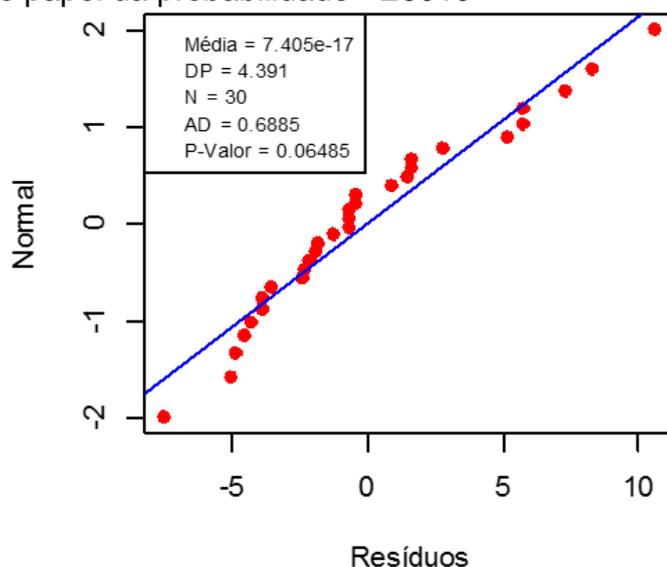
Figura 29 - Gráfico de efeitos - E6010



Fonte: Autor, 2015.

Avaliando a normalidade dos resíduos na Figura 30, por meio do gráfico "papel de probabilidade" foi tomada como hipótese nula a normalidade dos resíduos, e utilizada a estatística de Anderson-Darling para testar esta hipótese. Para a pesquisa, foi constatado que o P-valor é igual a 0,06485, maior que o nível de significância $\alpha=0,05$. Portanto, os dados seguem a distribuição especificada e não é rejeitada a hipótese de normalidade dos resíduos.

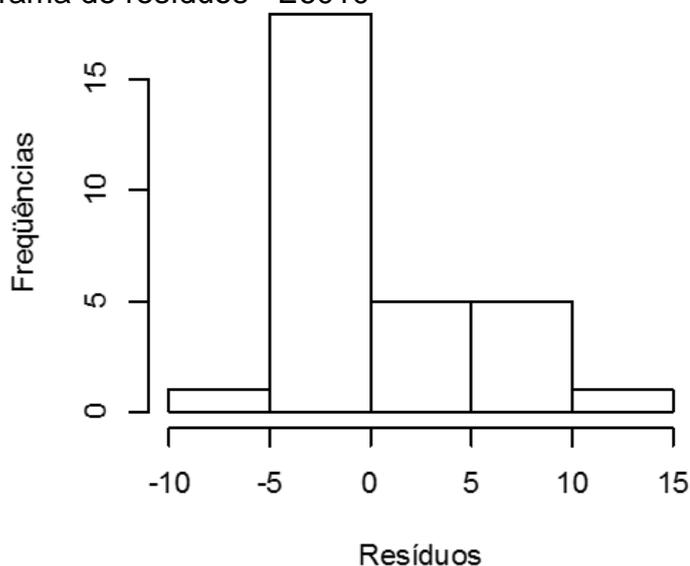
Figura 30 – Gráfico papel da probabilidade - E6010



Fonte: Autor, 2015.

Ao observar na Figura 31, o histograma de resíduos apresenta certa simetria, destacando-se dois intervalos, o primeiro com densidade entre (-10 à 0) e outro entre (0 à 10) com mais de 10 observações para cada um.

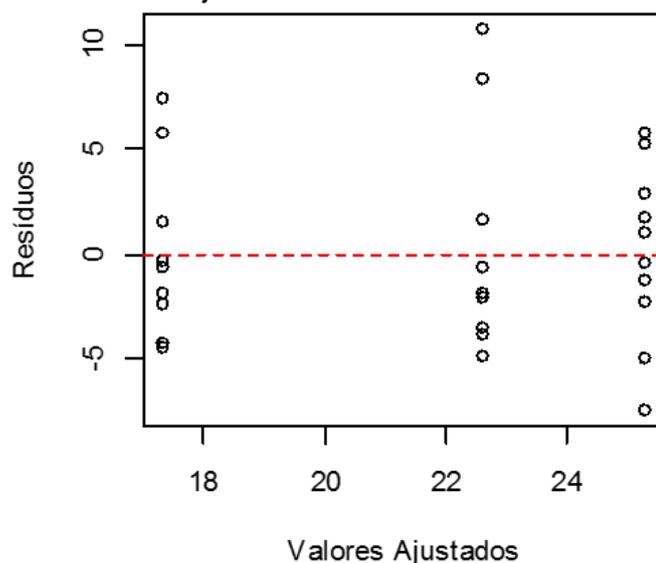
Figura 31 - Histograma de resíduos - E6010



Fonte: Autor, 2015.

Na Figura 32, é apresentado o gráfico de resíduos x valores ajustados. Os resíduos apresentam uma dispersão grande e irregular de resíduos entre valores ajustados. Desta forma este padrão pode ser considerado aceitável.

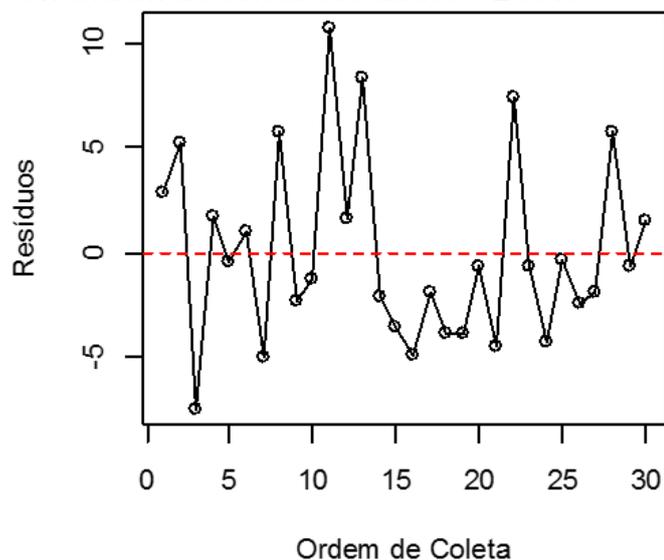
Figura 32 - Resíduos x Valores ajustados - E6010



Fonte: Autor, 2015.

A seguir foi elaborado o gráfico dos Resíduos x Ordem de Coleta dos dados, apresentado na Figura 33. Os resíduos no gráfico flutuaram em um padrão aleatório ao redor da linha central. Nenhum comportamento sistemático foi observado no gráfico, portanto, não se tem indícios de que alguma variável extra influenciou nos resultados do experimento.

Figura 33 - Resíduos x Ordem de coleta dos dados - E6010



Fonte: Autor, 2015.

Portanto, não há violação das premissas básicas da ANOVA que comprometam as conclusões destes resultados.

7.2 ANOVA para o Eletrodo AWS E6013

Aplicando a ANOVA com fator único, para as 3 posições (1G, 3G e 4G) para o eletrodo E6013, obteve-se os valores inseridos na Tabela 14.

Tabela 14 - ANOVA para o eletrodo E6013

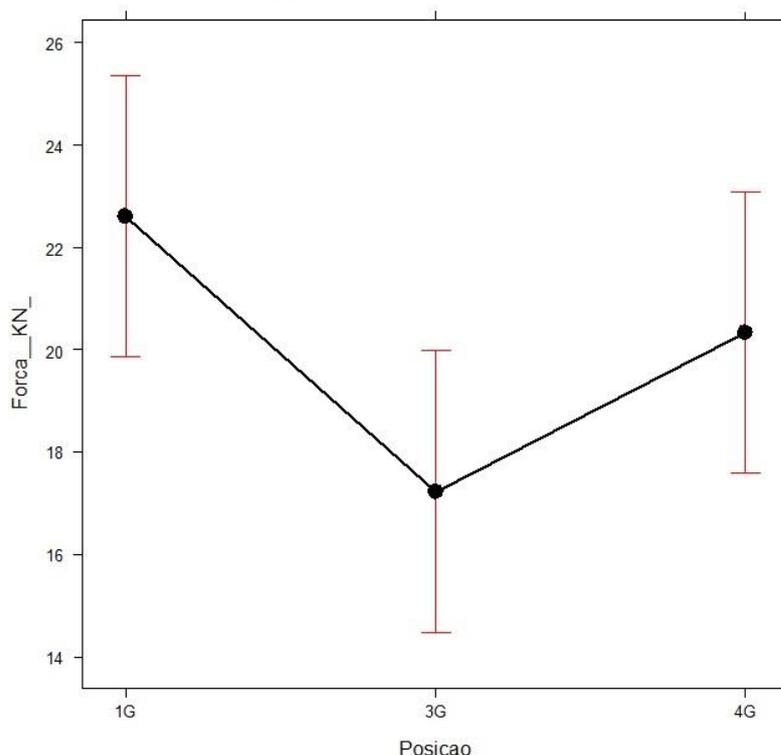
| Fonte de variação | Graus de liberdade | Soma dos quadrados | Quadrados da média aritmética | F | Valor-P | Fcrítico |
|-------------------|--------------------|--------------------|-------------------------------|--------|---------|----------|
| Entre grupos | 2 | 145,174 | 72,5872 | 4,0341 | 0,02931 | 3,3541 |
| Dentro dos grupos | 27 | 485,821 | 17,9934 | | | |
| Total | 29 | 630,995 | | | | |

Fonte: Autor, 2015.

Analisando o resultado da ANOVA da Tabela 14, é possível verificar que o valor estatístico de F é maior que o Fcrítico. Também, foi constatado que o valor de P é menor em relação ao nível de significância $\alpha=0,05$. Podemos concluir que as médias das amostras possuem diferenças significativas, e afirmar que para o eletrodo E6013 as médias são diferentes, portanto a hipótese da Equação 21 é rejeitada.

Ao analisar o gráfico de efeitos na Figura 34, gerado pelo *Action*, a posição 1G resistiu a maior Força, seguida pela posição 4G. Por último, a posição 3G foi a que resistiu a menor força com eletrodo E6013.

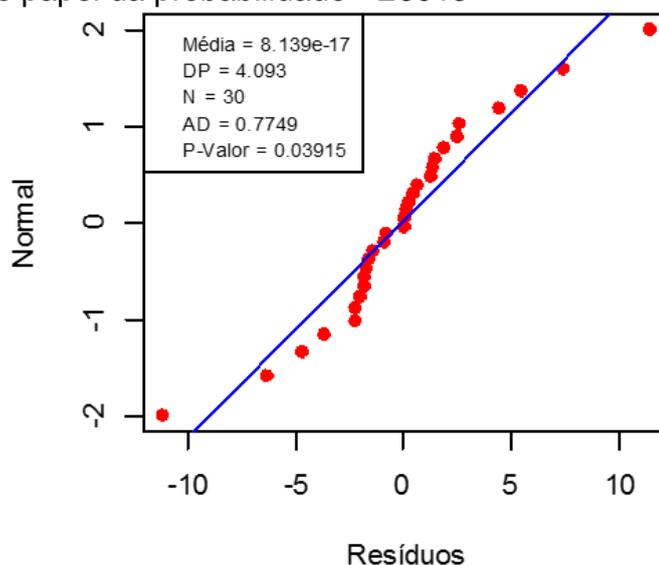
Figura 34 - Gráfico de efeitos - E6013



Fonte: Autor, 2015.

Avaliando a normalidade dos resíduos na Figura 35, por meio do gráfico "papel de probabilidade" foi tomada como hipótese nula a normalidade dos resíduos, e utilizada a estatística de Anderson-Darling para testar esta hipótese. Para a pesquisa, foi constatado que o P-valor é igual a 0,03915, menor que o nível de significância $\alpha=0,05$. Portanto, os dados não seguem a distribuição especificada e é rejeitada a hipótese de normalidade dos resíduos.

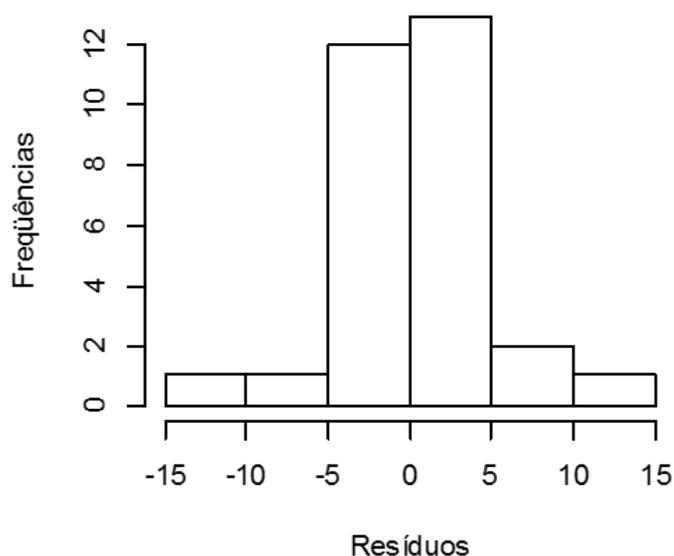
Figura 35 – Gráfico papel da probabilidade - E6013



Fonte: Autor, 2015.

Ao observar na Figura 36, o histograma de resíduos apresenta certa simetria, destacando-se dois intervalos, o primeiro com densidade entre (-5 à 0) e outro entre (0 à 5) com mais de 10 observações para cada um.

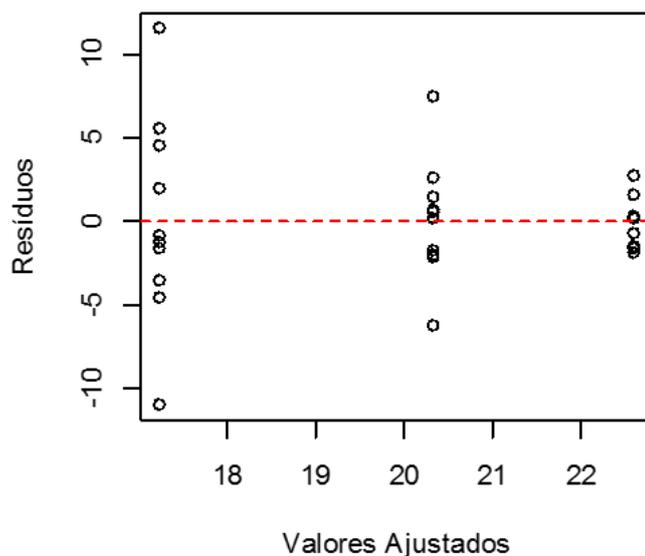
Figura 36 – Histograma de resíduos - E6013



Fonte: Autor, 2015.

Na Figura 37, pode-se observar que os resíduos no canto direito são muito menores do que todos os outros no gráfico. As demais observações apresentam um grande afastamento em relação a do canto direito. O resultado pode não ser aceitável, e deve-se investigar as medições para determinar a causa da variação.

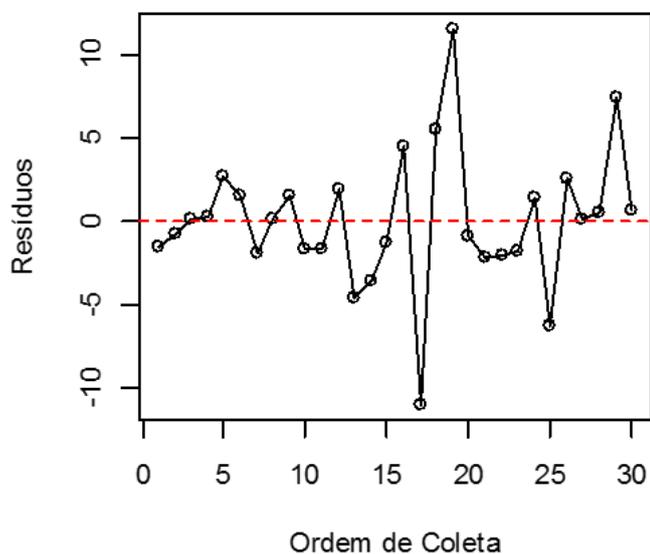
Figura 37 - Resíduos x Valores ajustados - E6013



Fonte: Autor, 2015.

A seguir foi elaborado o gráfico dos Resíduos x Ordem de Coleta dos dados, apresentado na Figura 38. Os resíduos no gráfico flutuaram em um padrão aleatório ao redor da linha central. Nenhum comportamento sistemático foi observado no gráfico, portanto, não se tem indícios de que alguma variável extra influenciou nos resultados do experimento.

Figura 38 - Resíduos x Ordem de coleta dos dados - E6013



Fonte: Autor, 2015.

Para que se possa verificar se há violação das premissas básicas da ANOVA que comprometa estes resultados, deve-se investigar os fatores que causaram padrões de resíduos nos gráficos de papel de probabilidade e resíduos x ordem de coleta, observados nas Figuras 35 e 37.

7.3 ANOVA para o Eletrodo AWS E7018

Aplicando a ANOVA com fator único, para as 3 posições (1G, 3G e 4G) para o eletrodo E7018, obteve-se os valores inseridos na Tabela 15.

Tabela 15 - ANOVA para o eletrodo E7018

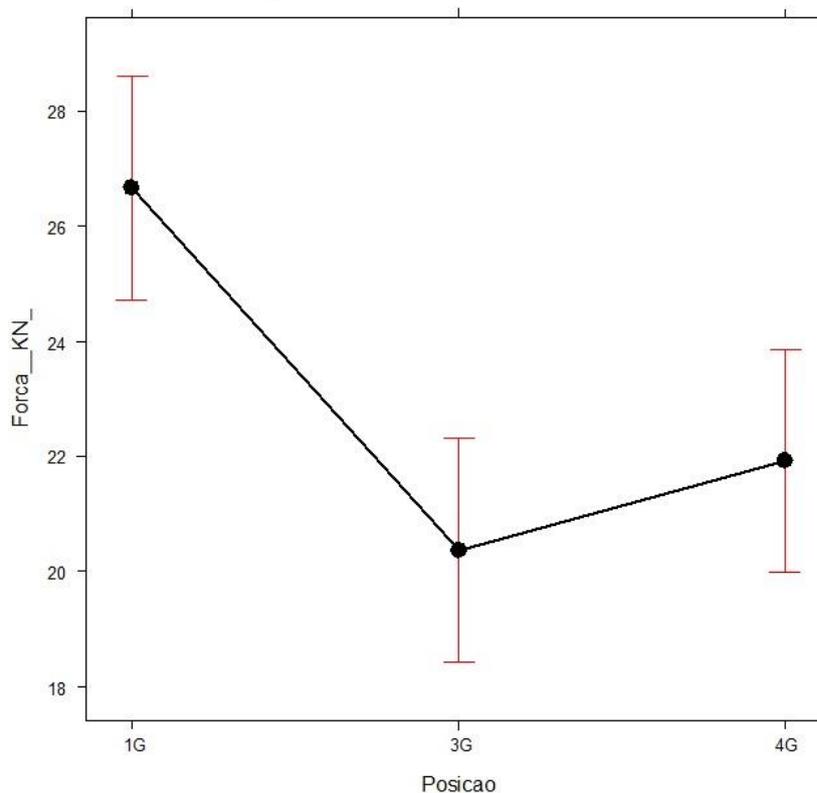
| Fonte de variação | Graus de liberdade | Soma dos quadrados | Quadrados da média aritmética | F | Valor-P | Fcrítico |
|-------------------|--------------------|--------------------|-------------------------------|-------|---------|----------|
| Entre grupos | 2 | 214,392 | 107,196 | 12,01 | 0,00018 | 3,3541 |
| Dentro dos grupos | 27 | 240,832 | 8,9197 | | | |
| Total | 29 | 455,224 | | | | |

Fonte: Autor, 2015.

Analisando o resultado da ANOVA da Tabela 15, é possível verificar que o valor estatístico de F é maior que o Fcrítico. Também, foi constatado que o valor de P é menor em relação ao nível de significância $\alpha=0,05$. Podemos concluir que as médias das amostras possuem diferenças significativas, e afirmar que para o eletrodo E7018 as médias são diferentes, portanto a hipótese da Equação 21 é rejeitada.

Ao analisar o gráfico de efeitos na Figura 39, gerado pelo *Action*, a posição 1G resistiu a maior força, seguida pela posição 4G. Por último, a posição 3G foi a que resistiu a menor força com eletrodo E7018.

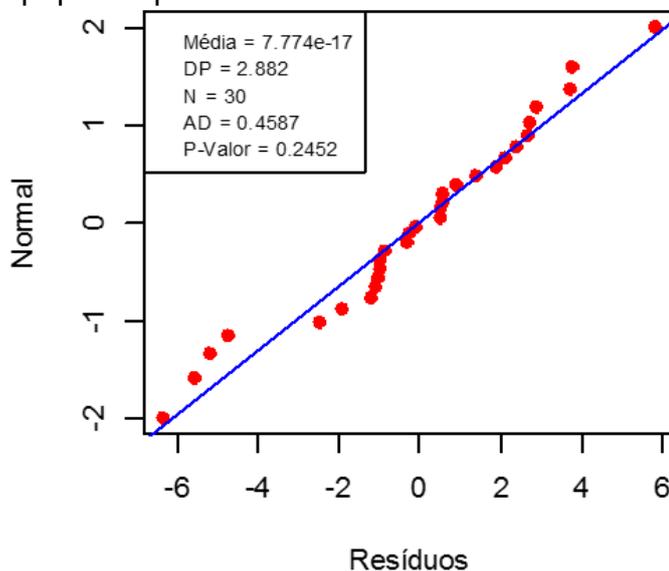
Figura 39 - Gráfico de efeitos - E7018



Fonte: Autor, 2015.

Avaliando a normalidade dos resíduos na Figura 40, por meio do gráfico papel de probabilidade foi tomada como hipótese nula a normalidade dos resíduos, e utilizada a estatística de Anderson-Darling para testar esta hipótese. Para a pesquisa, foi constatado que o P-valor é igual a 0,2452, maior que o nível de significância $\alpha=0,05$. Portanto, os dados seguem a distribuição especificada e não é rejeitada a hipótese de normalidade dos resíduos.

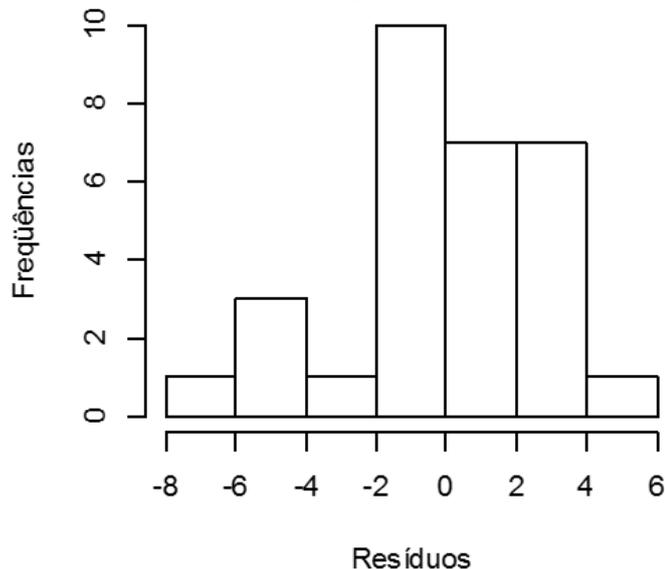
Figura 40 – Gráfico papel da probabilidade - E7018



Fonte: Autor, 2015.

Ao observar na Figura 41, o histograma de resíduos apresenta certa simetria, destacando-se dois intervalos, o primeiro com densidade entre (-4 à 0) e outro entre (0 à 4) com mais de 10 observações para cada um.

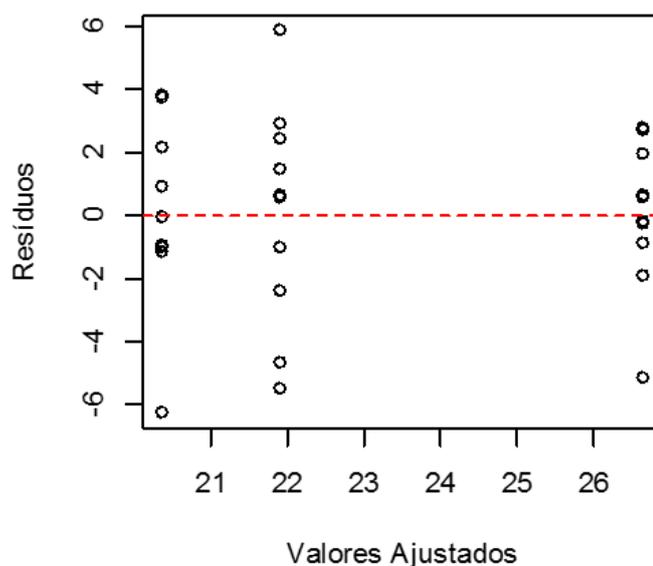
Figura 41 – Histograma de resíduos - E7018



Fonte: Autor, 2015.

Na Figura 42, é apresentado o gráfico de resíduos x valores ajustados. Os resíduos apresentam uma dispersão grande e irregular de resíduos entre valores ajustados. Desta forma este padrão pode ser considerado aceitável.

Figura 42 - Resíduos x Valores Ajustados - E7018

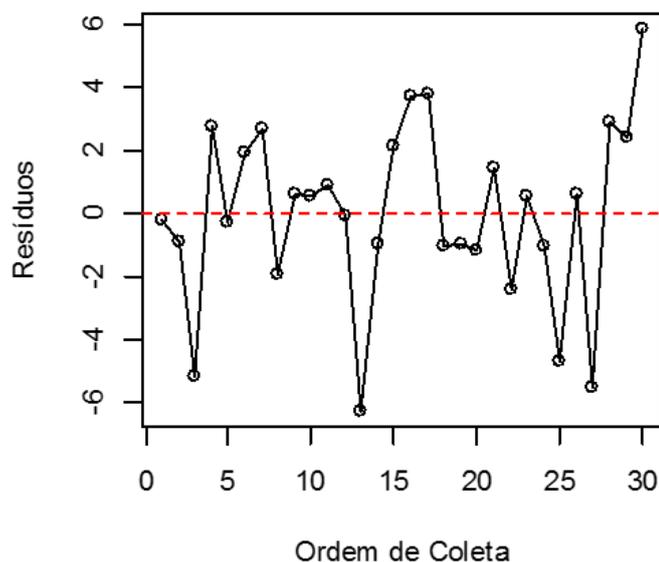


Fonte: Autor, 2015.

A seguir foi elaborado o gráfico dos Resíduos x Ordem de Coleta dos dados, apresentado na Figura 43. Os resíduos no gráfico flutuaram em um padrão aleatório ao redor da linha central. Nenhum comportamento sistemático foi observado no

gráfico, portanto, não se tem indícios de que alguma variável extra influenciou nos resultados do experimento.

Figura 43 - Resíduos x Ordem de coleta dos dados - E7018



Fonte: Autor, 2015.

Portanto, não há violação das premissas básicas da ANOVA que comprometam as conclusões destes resultados.

7.4 ANOVA para a posição 1G (Plana)

Aplicando a ANOVA com fator único, para os 3 eletrodos (E6010, E6013 e E7018) na posição 1G, obteve-se os valores inseridos na Tabela 16.

Tabela 16 - ANOVA para a posição 1G

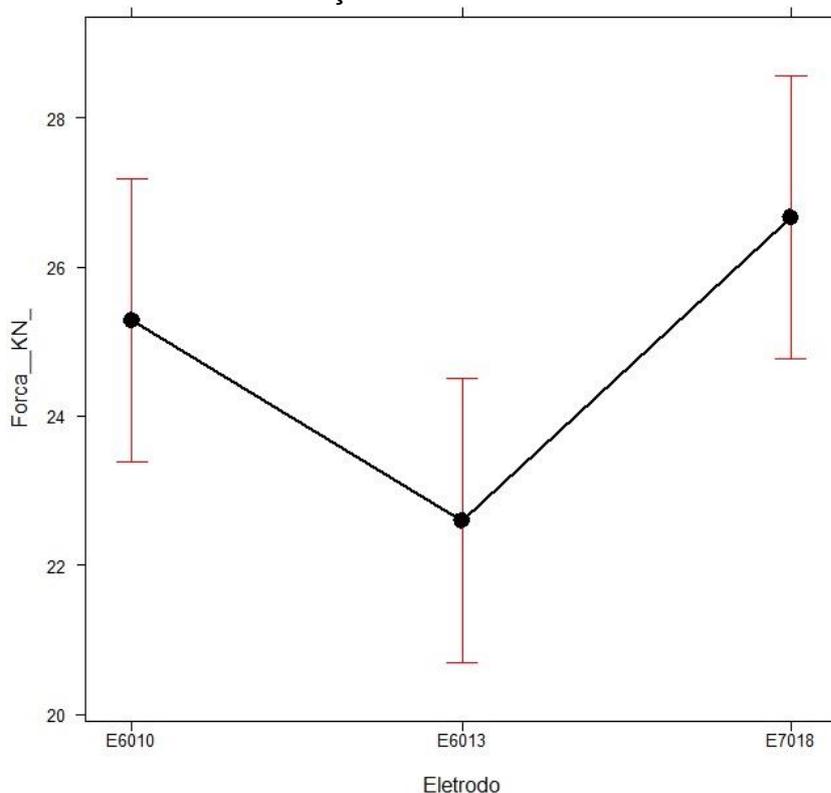
| Fonte de variação | Graus de liberdade | Soma dos quadrados | Quadrados da média aritmética | F | Valor-P | Fcrítico |
|-------------------|--------------------|--------------------|-------------------------------|--------|---------|----------|
| Entre grupos | 2 | 85,2057 | 42,6029 | 4,9491 | 0,01475 | 3,3541 |
| Dentro dos grupos | 27 | 232,421 | 8,60817 | | | |
| Total | 29 | 317,626 | | | | |

Fonte: Autor, 2015.

Analisando o resultado da ANOVA da Tabela 16, é possível verificar que o valor estatístico de F é maior que o Fcrítico. Também, foi constatado que o valor de P é menor em relação ao nível de significância $\alpha=0,05$. Podemos concluir que as médias das amostras possuem diferenças significativas, e afirmar que para a posição 1G as médias são diferentes, portanto a hipótese da Equação 10 é rejeitada.

Ao analisar o gráfico de efeitos na Figura 44, gerado pelo *Action*, o eletrodo E7018 resistiu a maior Força, seguido pelo E6010. Por último, o eletrodo E6013 resistiu a menor força na posição 1G.

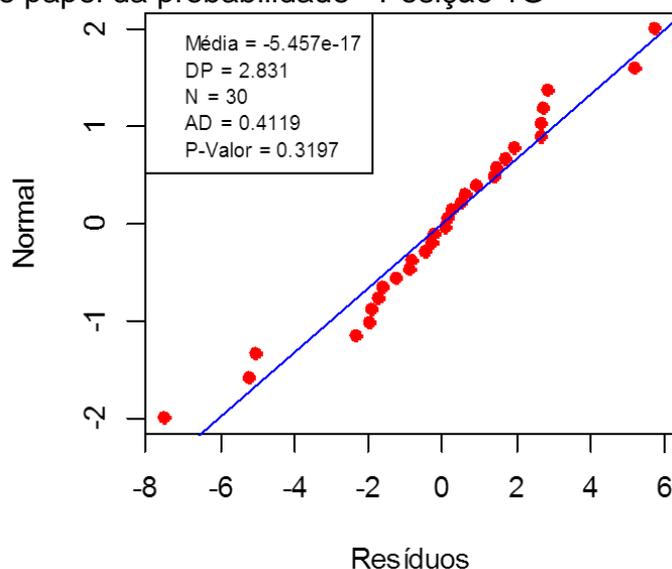
Figura 44 - Gráfico de efeitos - Posição 1G



Fonte: Autor, 2015.

Avaliando a normalidade dos resíduos na Figura 45, por meio do gráfico "papel de probabilidade" foi tomada como hipótese nula a normalidade dos resíduos, e utilizada a estatística de Anderson-Darling para testar esta hipótese. Para a pesquisa, foi constatado que o P-valor é igual a 0,3197, maior que o nível de significância $\alpha=0,05$. Portanto, os dados seguem a distribuição especificada e não é rejeitada a hipótese de normalidade dos resíduos.

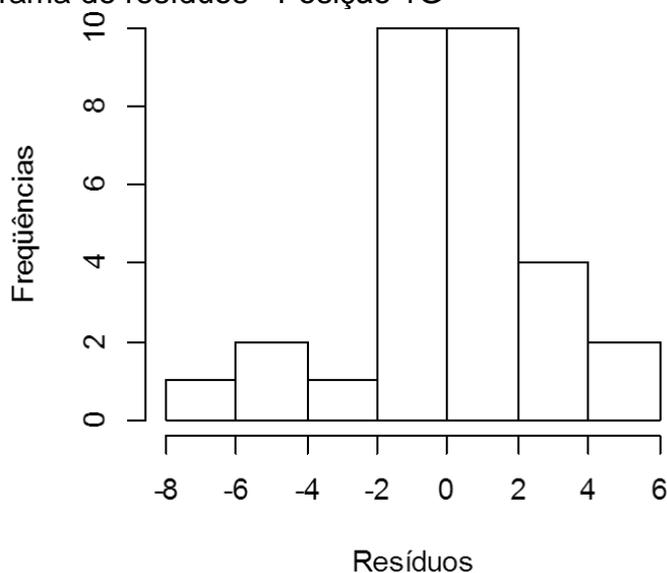
Figura 45 – Gráfico papel da probabilidade - Posição 1G



Fonte: Autor, 2015.

Ao observar na Figura 46, o histograma de resíduos apresenta certa simetria, destacando-se dois intervalos, o primeiro com densidade entre (-2 à 0) e outro entre (0 à 2) com 10 observações para cada um.

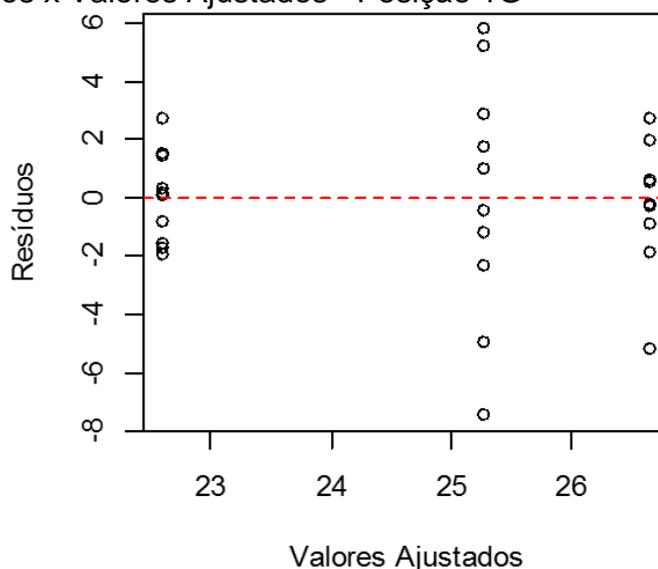
Figura 46 – Histograma de resíduos - Posição 1G



Fonte: Autor, 2015.

Na Figura 47, pode-se observar que os resíduos no canto esquerdo são menores do que todos os outros no gráfico. As demais observações apresentam afastamento em relação a do canto esquerdo. O resultado pode não ser aceitável, e deve-se investigar as medições para determinar a causa da variação.

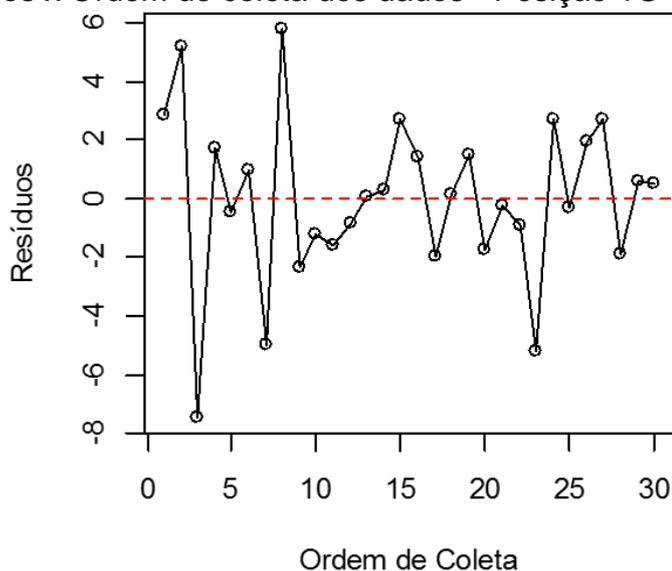
Figura 47 - Resíduos x Valores Ajustados - Posição 1G



Fonte: Autor, 2015.

A seguir foi elaborado o gráfico dos Resíduos x Ordem de Coleta dos dados, apresentado na Figura 48. Os resíduos no gráfico flutuaram em um padrão aleatório ao redor da linha central. Nenhum comportamento sistemático foi observado no gráfico, portanto, não se tem indícios de que alguma variável extra influenciou nos resultados do experimento.

Figura 48 - Resíduos x Ordem de coleta dos dados - Posição 1G



Fonte: Autor, 2015.

Portanto, deve-se investigar os fatores que causaram padrões de resíduos no gráfico de resíduos x valores ajustados, observado na Figura 47. Para que se possa verificar se há violação das premissas básicas da ANOVA que comprometa estes resultados.

7.5 ANOVA para a posição 3G (Vertical)

Aplicando a ANOVA com fator único, para os 3 eletrodos (E6010, E6013 e E7018) na posição 3G, obteve-se os valores inseridos na Tabela 17.

Tabela 17 - ANOVA para a posição 3G

| Fonte de variação | Graus de liberdade | Soma dos quadrados | Quadrados da média aritmética | F | Valor-P | Fcrítico |
|-------------------|--------------------|--------------------|-------------------------------|--------|---------|----------|
| Entre grupos | 2 | 146,275 | 73,1377 | 2,8800 | 0,0735 | 3,3541 |
| Dentro dos grupos | 27 | 685,664 | 25,395 | | | |
| Total | 29 | 831,94 | | | | |

Fonte: Autor, 2015.

Analisando o resultado da ANOVA da Tabela 13, é possível verificar que o valor estatístico de F é menor que o Fcrítico. Também, foi constatado que o valor de P é maior em relação ao nível de significância $\alpha=0,05$. Pode-se concluir que as médias das amostras não possuem diferenças significativas, e afirmar que a hipótese da Equação 10 é aceita.

Portanto, com a aplicação da ANOVA não foi possível constatar que existem diferenças significativas na qualidade das soldas executadas com os 3 (três) eletrodos na posição 3G.

7.6 ANOVA para a posição 4G (Sobre cabeça)

Aplicando a ANOVA com fator único, para os 3 eletrodos (E6010, E6013 e E7018) na posição 4G, obteve-se os valores inseridos na Tabela 18.

Tabela 18 - ANOVA para a posição 3G

| Fonte de variação | Graus de liberdade | Soma dos quadrados | Quadrados da média aritmética | F | Valor-P | Fcrítico |
|-------------------|--------------------|--------------------|-------------------------------|--------|---------|----------|
| Entre grupos | 2 | 108,99 | 54,4948 | 4,0001 | 0,03009 | 3,3541 |
| Dentro dos grupos | 27 | 367,831 | 13,6234 | | | |
| Total | 29 | 476,821 | | | | |

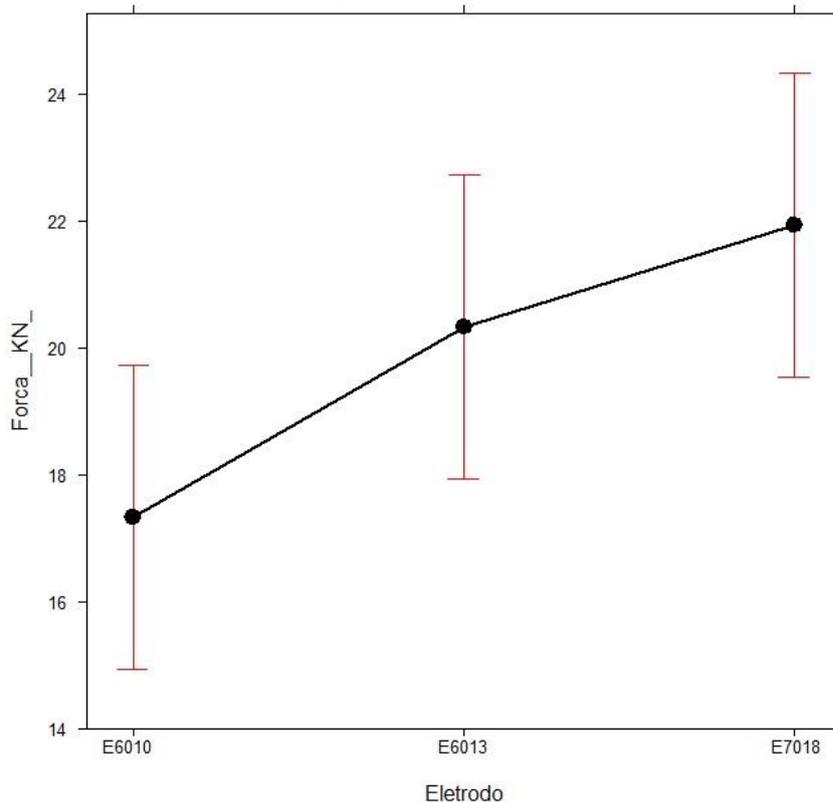
Fonte: Autor, 2015.

Analisando o resultado da ANOVA da Tabela 18, é possível verificar que o valor estatístico de F é maior que o Fcrítico. Também, foi constatado que o valor de P é menor em relação ao nível de significância $\alpha=0,05$. Podemos concluir que as médias das amostras possuem diferenças significativas, e afirmar que para a posição eletrodo

4G (sobre cabeça) as médias são diferentes, portanto a hipótese da Equação 10 é rejeitada.

Ao analisar o gráfico de efeitos na Figura 49, gerado pelo *Action*, o eletrodo E7018 resistiu a maior Força, seguido pelo E6013. Por último, o eletrodo E6010 resistiu a menor força na posição 4G.

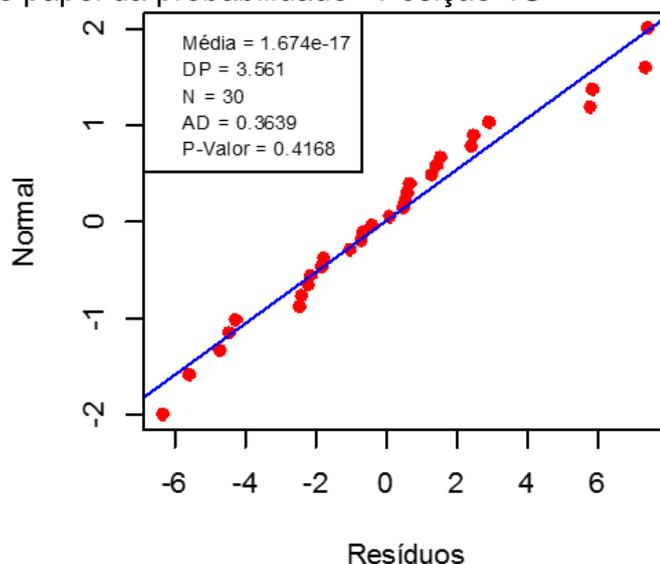
Figura 49 - Gráfico de efeitos - Posição 4G



Fonte: Autor, 2015.

Avaliando a normalidade dos resíduos na Figura 50, por meio do gráfico "papel de probabilidade" foi tomada como hipótese nula a normalidade dos resíduos, e utilizada a estatística de Anderson-Darling para testar esta hipótese. Para a pesquisa, foi constatado que o P-valor é igual a 0,4168, maior que o nível de significância $\alpha=0,05$. Portanto, os dados seguem a distribuição especificada e não é rejeitada a hipótese de normalidade dos resíduos.

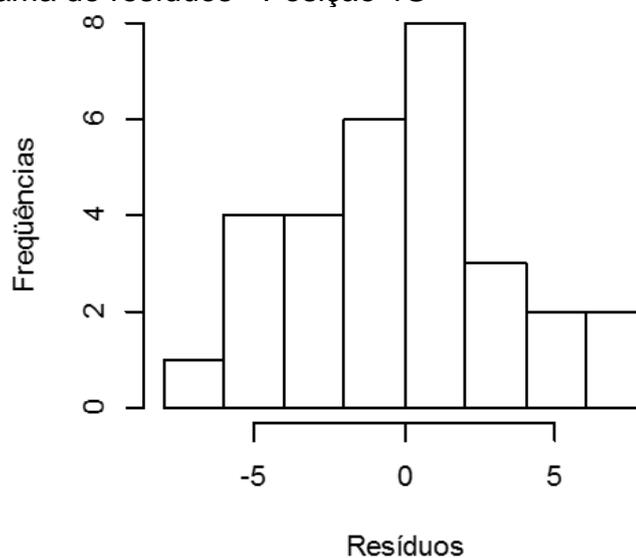
Figura 50 – Gráfico papel da probabilidade - Posição 4G



Fonte: Autor, 2015.

Ao observar na Figura 51, o histograma de resíduos apresenta certa simetria, destacando-se dois intervalos, o primeiro com densidade entre (-4 à 0) e outro entre (0 à 4) com mais de 10 observações para cada um.

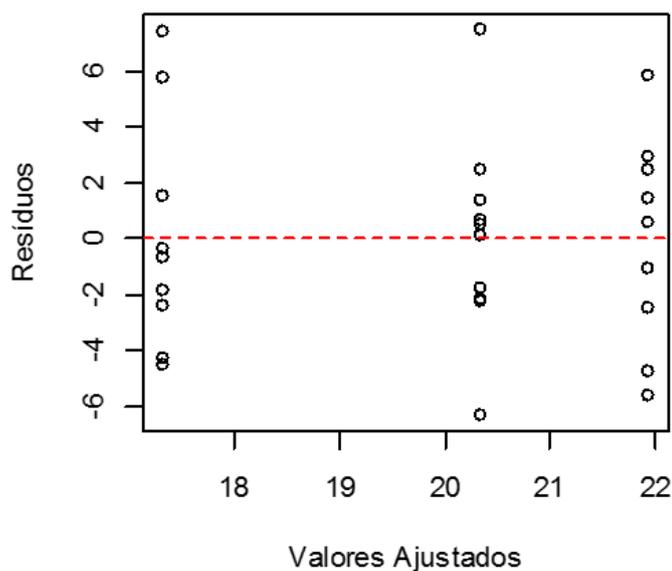
Figura 51 - Histograma de resíduos - Posição 4G



Fonte: Autor, 2015.

Na Figura 52, é apresentado o gráfico de resíduos x valores ajustados. Os resíduos apresentam uma dispersão grande e irregular de resíduos entre valores ajustados. Desta forma este padrão pode ser considerado aceitável.

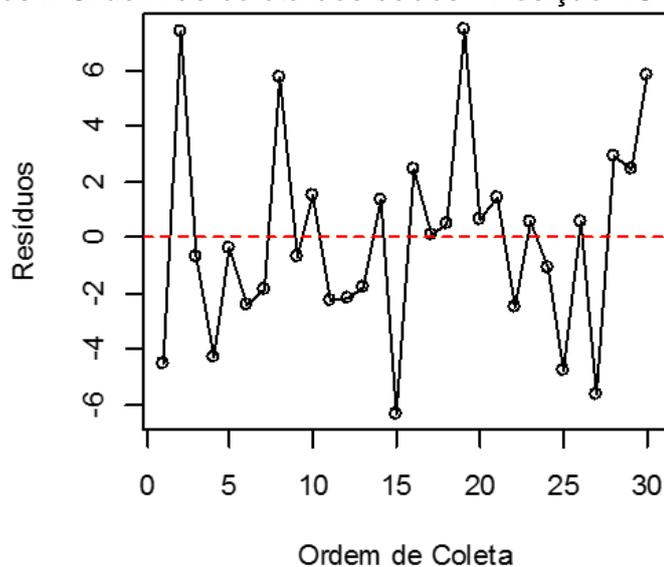
Figura 52 - Resíduos x Valores ajustados - Posição 4G



Fonte: Autor, 2015.

A seguir foi elaborado o gráfico dos Resíduos x Ordem de Coleta dos dados, apresentado na Figura 53. Os resíduos no gráfico flutuaram em um padrão aleatório ao redor da linha central. Nenhum comportamento sistemático foi observado no gráfico, portanto, não se tem indícios de que alguma variável extra influenciou nos resultados do experimento.

Figura 53 - Resíduos x Ordem de coleta dos dados - Posição 4G



Fonte: Autor, 2015.

Portanto, não há violação das premissas básicas da ANOVA que comprometam as conclusões destes resultados.

8 CONCLUSÕES

Neste capítulo é feita uma avaliação final comparativa entre os eletrodos sob a ótica do comportamento operacional das soldagens.

Pode-se observar, que as soldas dos CPs executadas na posição 1G (Plana), apresentaram maior Força de ruptura para todos os eletrodos estudados. Os CPs soldados na posição 4G apresentaram maior Força de ruptura do que na posição 3G, com exceção dos CPs soldados com eletrodo E6010, que romperam com maior Força na posição 3G.

No item 7.2 do capítulo anterior, avaliou-se a normalidade dos resíduos para as posições do eletrodo E6013, por meio do gráfico papel de probabilidade da Figura 35. Foi constatado que o P-valor é menor que o nível de significância $\alpha=0,05$. O que sugere a rejeição desta hipótese. O que explicaria este fato, é a experiência do soldador na posição 1G com este eletrodo, e baixa experiência em soldagens fora desta posição, o que ocasionou maior dispersão dos resíduos nas posições 3G e 4G. Esta dispersão também foi constatada nas análises das Figuras 37 e 47 dos itens 7.2 e 7.4 respectivamente.

A hipótese da igualdade das médias da ANOVA na Tabela 17 foi aceita, o que pode ser observado no item 7.5. Portanto, a comparação da força de ruptura dos CPs soldados com os diferentes eletrodos na posição 3G não apresentaram diferenças significativas. Desta forma, os resultados desta comparação não foram considerados.

Os CPs soldados com o eletrodo E7018 apresentaram maior Força de ruptura em comparação com os demais eletrodos. Para tanto, foram considerados somente as posições 1G e 4G, sendo que na posição 3G, os resultados comparativos não apresentaram diferenças significativas, como já mencionado anteriormente. Ao observar a Tabela 3, nota-se que o eletrodo E7018 possui maior resistência mecânica que os demais. Portanto, o resultado experimental vai de encontro com a bibliografia estudada.

Os CPs soldados com o eletrodo E7018 - básico apresentaram variâncias mais estáveis, já com o eletrodo E6010 - celulósico se situaram na posição intermediária, sem mostrar variações significativas. No entanto, os que foram soldados com eletrodo E6013 – rutílico, foram os menos estáveis, pois apresentaram dispersão diferentes nos resíduos das 3 posições.

Também foi possível concluir sobre a soldabilidade dos eletrodos. O eletrodo E6010, devido a sua característica própria, apresentou arco instável e relativa dificuldade em iniciar o arco. Isso torna a sua utilização restrita a operadores com mais experiência em soldagem. Os eletrodos E6013 e E7018 apresentaram arco fluido, de fácil início e pouco instável. Isso faz destes eletrodos os mais indicados para trabalhos básicos, para operadores com pouca experiência em soldagem.

9 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo do estudo foi alcançado, uma vez que com a fixação da hipótese de igualdade das médias obtidas nos ensaios, permitiu uma visão geral da influência das posições de soldagem (1G, 3G e 4G) na Força de ruptura dos CPs, quando empregados diferentes eletrodos revestidos.

Este trabalho apresentou sua importância por servir, primeiramente, para profissionais da área de processos de fabricação e que queriam complementar o conhecimento que possuem em relação à soldagem. Porém, a sua relevância está no fato de não existirem muitos trabalhos onde eletrodos revestidos tenham sido comparados para se chegar a uma conclusão de sua aplicação.

Com o desenvolvimento do trabalho, foi possível empregar os conhecimentos adquiridos em diversas áreas da trajetória acadêmica, além de contribuir para o crescimento profissional e a busca incessante de melhorias dos processos de soldagem.

Este estudo complementa os conhecimentos em processos de soldagem, e serve como parâmetro para uma futura análise comparativa entre eletrodos revestidos e posições de soldagem, e como base de apoio para trabalhos similares.

Uma sugestão de trabalho futuro, é a avaliação e comparação da qualificação do soldador através da metodologia apresentada, pois, sabe-se que no processo de soldagem manual, pode ocorrer influência da habilidade do soldador na qualidade das soldas.

Outra sugestão é a investigação da análise da influência dos parâmetros de soldagem, como a corrente e a polaridade, pois no estudo estes valores foram padronizados, mas sabe-se que estes parâmetros possuem influência na penetração da solda.

REFERÊNCIAS

- ÁQUILA, V. **Processo de Soldagem por Eletrodo Revestido**. Apostila L&A Soldagem. Salvador, 2012.
- CHAVES, J. B. P. **Planejamento Estatístico de Experimentos Científicos. Departamento de Tecnologia de Alimentos**, 2005. Disponível em: <<http://www.dta.ufv.br/artigos/planestat.htm>>. Acesso em: 22 fev. 2015
- CHIAVERINI, V. **Tecnologia mecânica vol I** 2.ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1986.
- COSTA, F. F. **Ensaio tecnológicos**, 3º Ciclo de Técnico em Mecânica, Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza, São Paulo, 2000.
- DALCIN, G. B. **Ensaio dos Materiais**. Santo Ângelo, 2007. Disponível em: <http://www.urisan.tche.br/~lemm/arquivos/ensaio_mecanicos.pdf>. Acesso em: 05 jun. 2015.
- DEVORE, J. L. **Probabilidade e estatística: para engenharia e ciências**. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2006.
- Equipe Estatcamp. **Software Action. Estatcamp- Consultoria em estatística e qualidade**, São Carlos - SP, Brasil. URL <http://www.portalaction.com.br/> 2014.
- FORTES, C. **Apostila de Eletrodos Revestidos**. ESAB, 2005.
- FREUND, J.E., SIMON, G.A. **Estatística Aplicada**. Porto Alegre: Bookman, 2000.
- FURTADO, D. **Arco elétrico**. Disponível em: <<http://professordiegof.webnode.com.br/arco-eletrico/>>. Acesso em: 19 jun. 2015.
- GARCIA, A.; SPIM, J. A.; SANTOS, C. A. **Ensaio dos materiais**. Rio de Janeiro: LTC, 2012
- GEARY, Don; MILLER, Rex. **Soldagem 2.ed.** – Porto Alegre: Bookman, 2013
- GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. São Paulo, 4. Ed, Editora Atlas S. A., 2002
- GRIGOLO, E. G; OLIVEIRA, G. A. **Análise de variância (ANOVA) em aplicações agroindustriais**. XVII SICITE. Curitiba, 2012.
- HIBBELER, R. C. **Resistência dos Materiais**. São Paulo, 5. Ed, Editora Pearson Prentice Hall, 2004.
- LAKATOS, E.M.; MARCONI, M. D. A. **Metodologia Científica**. São Paulo, 2. Ed, Editora Atlas S.A.,1992.
- LEVINE, D. M.; STEPHAN, D.; KREHBIEL, T. C.; BERENSON, M. L. **Estatística: teoria e aplicações-usando Microsoft Excel em português**. Rio de Janeiro, 3 Ed, Editora LTC, 2005.
- MACHADO, I. G. **Soldagem e técnicas conexas: processos**. Porto Alegre: Editado pelo autor, 1996.
- MADEIRA, R. P., MODENESI, P. J. **Utilização do Ensaio Erichsen para a Avaliação do Desempenho de Juntas Soldadas**. Soldagem Inspeção. São Paulo, v. 15, n.1, p.22-30, 2010.
- MANN, P. S. **Introdução à estatística**. Rio de Janeiro, 5 Ed., Editora LTC, 2006.

- MARCONDES, P. **Forjamento Conformação: TM262**. Disponível em: <<http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TM262-TM132/Material%20Aulas/10%20-%20Forjamento.pdf>>. Acesso em: 19 jun. 2015.
- MARINHO, F. R. **Mecânica: Ensaios de Materiais**. Telecurso 2000 Profissionalizante. São Paulo: Editora Globo, 1996. v. 1
- MARQUES, P. V., MODENESI, P. J., BRACARENSE, A. Q. **Soldagem: fundamentos e tecnologia**. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2009.
- MASCHIA, N. T. **Tração, compressão e lei de hooke**. Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2006.
- MODENESI, P. J., MARQUES, P. V., SANTOS, D. B. **Introdução à Metalurgia da Soldagem**. Belo Horizonte, 2012.
- MSPC, **Informações Técnicas**. Disponível em: <<http://www.mspc.eng.br/ciemat/ensaio110.shtm>>. Acesso em: 05 jun. 2015.
- NETO, B. B., SCARMINO, I. S., BRUNS, R. E. **Como fazer experimentos: pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria**. São Paulo: Editora UNICAMP, 2001.
- NEVES, A. C.; ARCANJO, E.; PAULO, E. D.; GOETTEN, J. D. P. **Análise comparativa dos eletrodos revestidos E6010 e E6013 em Aço SAE 1020**. Santo Antônio da Platina, SENAI, 2013.
- OKUMURA, T., TANIGUCHI, C. **Engenharia de Soldagem e Aplicações**. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S. A, 1982.
- PAESE, C., CATEM, C. T., RIBEIRO, J. L. D. **Aplicação da Análise de Variância na Implementação do CEP**. XIX Encontro Nacional de Engenharia de Produção ENEGEP, Rio de Janeiro, 1999.
- SANCHES, R. A. **Defeitos em solda detectáveis através de inspeção visual**. Manaus, 2010.
- SANTOS, J. F. O. **Ensaios Destrutivos**. Instituto do Emprego e Formação Profissional, 1 Ed., Lisboa, Portugal, 2000.
- SEBASTIÃO, C. R. **Noções básicas de Processos de Soldagem e Corte – Caldeiraria**. SENAI, 1996.
- SENAI, DR. PE. **Tecnologia de Solda: Processo Eletrodo Revestido**. Recife, 1998.
- SILVA, E. L.; MENEZES, E. M. **Metodologia da pesquisa e elaboração da dissertação**. 3. Ed. Ver. Atual. Laboratório de Ensino a distância da UFSC. Florianópolis, 2001.
- SOFTWARE TESC. **Versão 3.04**. Laboratório de Metrologia e Ensaios – LAMET, Universidade Federal do Pampa, Bagé, 2015.
- SOUZA, S. A. **Ensaios mecânicos de materiais metálicos: fundamentos teóricos e práticos**. São Paulo: Editora Blucher, 5ª edição, 1982.
- TIMOSHENKO, S. P.; GERE, J. E. **Mecânica dos sólidos**. Rio de Janeiro: LTC- Livros Técnicos e científicos, 1983.
- TREIBER, M.X.; BEZERRA, S.F.; COSTA, J.J.S.; BAHIA; J. **Tipos de chanfros para juntas soldadas**. NT Soldagem & Qualidade. Disponível em: <<http://www.infosolda.com.br/nucleo/downloads/ep.pdf>>. Acesso em: 21 jun. 2015.

TUSSET, A. M., CASTRO, E. C., FILHO, P. L. P., TESSARO, A. P. **Controle del proceso de Soldadura Mig a través de la Análisis de variancia.** XIV International Conference on Industrial Engineering and Operations Management - The integration of productive chain wit an approach to sustainable manufacturing. Rio de Janeiro, 2008.

VARGAS, J. E.; CABRAL, T. S.; MOYSÉS, E. R. A.; ALFARO, S. C. A.; VILARINHO, L. O. **Desenvolvimento de um suporte para soldagem automatizada em várias posições: aplicações e características.** 20º POSMEC. Uberlândia, 2010.

VIEIRA, S. **Análise de variância (ANOVA).** São Paulo: Atlas, 2006.

WAINER, E., BRANDI, S. D., MELLO, F. D. H. **Soldagem: Processo e Metalurgia.** São Paulo: Editora Blucher, 7ª reimpressão 2010.

WEBER, A. L. **Metrologia e instrumentação: extensometria.** UCS Departamento de Engenharia Mecânica, 2008.

WORLD'S, **QUALIFICAÇÃO PROFISSIONAL.** Técnicas em Soldagens Eletrodo Revestido, 2011.

APÊNDICE A – MEDIDAS DOS CORPOS DE PROVA

| Medidas - Corpos de Prova | | | | | | | | |
|---------------------------|-------------|----------------|------------------|--|--------|-------------|----------------|------------------|
| Código | Largura(mm) | Espessura (mm) | Compr. Base (mm) | | Código | Largura(mm) | Espessura (mm) | Compr. Base (mm) |
| 1.1.1 | 27.56 | 3.21 | 13.48 | | 2.4.1 | 27.58 | 3.22 | 13.75 |
| 1.1.2 | 27.35 | 3.20 | 13.46 | | 2.4.2 | 27.54 | 3.22 | 13.47 |
| 1.1.3 | 27.69 | 3.24 | 13.63 | | 2.4.3 | 27.40 | 3.21 | 13.94 |
| 1.1.4 | 27.23 | 3.20 | 13.42 | | 2.4.4 | 27.56 | 3.19 | 13.52 |
| 1.1.5 | 27.23 | 3.22 | 13.59 | | 2.4.5 | 26.73 | 3.21 | 13.52 |
| 1.1.6 | 28.08 | 3.20 | 13.40 | | 2.4.6 | 26.98 | 3.23 | 13.63 |
| 1.1.7 | 27.96 | 3.19 | 13.58 | | 2.4.7 | 28.07 | 3.20 | 13.80 |
| 1.1.8 | 27.91 | 3.19 | 13.42 | | 2.4.8 | 27.61 | 3.21 | 13.58 |
| 1.1.9 | 27.36 | 3.18 | 13.38 | | 2.4.9 | 27.62 | 3.22 | 13.68 |
| 1.1.10 | 27.77 | 3.20 | 13.59 | | 2.4.10 | 27.27 | 3.24 | 13.77 |
| 1.3.1 | 29.89 | 3.23 | 13.55 | | 3.1.1 | 28.69 | 3.20 | 12.50 |
| 1.3.2 | 29.97 | 3.21 | 13.80 | | 3.1.2 | 27.56 | 3.22 | 13.28 |
| 1.3.3 | 27.97 | 3.22 | 13.17 | | 3.1.3 | 26.64 | 3.20 | 13.59 |
| 1.3.4 | 28.04 | 3.19 | 12.93 | | 3.1.4 | 28.36 | 3.21 | 13.21 |
| 1.3.5 | 27.53 | 3.22 | 13.19 | | 3.1.5 | 27.78 | 3.22 | 13.60 |
| 1.3.6 | 28.46 | 3.21 | 13.70 | | 3.1.6 | 27.75 | 3.20 | 13.55 |
| 1.3.7 | 27.62 | 3.18 | 12.81 | | 3.1.7 | 28.68 | 3.20 | 13.47 |
| 1.3.8 | 27.30 | 3.21 | 13.52 | | 3.1.8 | 28.89 | 3.19 | 13.32 |
| 1.3.9 | 27.48 | 3.19 | 13.39 | | 3.1.9 | 28.04 | 3.20 | 12.91 |
| 1.3.10 | 27.05 | 3.20 | 13.32 | | 3.1.10 | 28.79 | 3.22 | 13.50 |
| 1.4.1 | 27.10 | 3.22 | 13.70 | | 3.3.1 | 28.09 | 3.19 | 13.27 |
| 1.4.2 | 27.42 | 3.20 | 13.67 | | 3.3.2 | 27.82 | 3.18 | 13.50 |
| 1.4.3 | 27.70 | 3.21 | 13.77 | | 3.3.3 | 27.53 | 3.23 | 13.71 |
| 1.4.4 | 27.34 | 3.24 | 13.60 | | 3.3.4 | 27.78 | 3.22 | 13.76 |
| 1.4.5 | 27.58 | 3.21 | 13.81 | | 3.3.5 | 26.44 | 3.21 | 13.70 |
| 1.4.6 | 27.47 | 3.22 | 13.70 | | 3.3.6 | 27.83 | 3.22 | 13.75 |
| 1.4.7 | 27.03 | 3.22 | 13.60 | | 3.3.7 | 27.14 | 3.20 | 13.69 |
| 1.4.8 | 28.41 | 3.19 | 13.76 | | 3.3.8 | 27.31 | 3.19 | 13.89 |
| 1.4.9 | 28.00 | 3.20 | 13.74 | | 3.3.9 | 26.84 | 3.19 | 13.66 |
| 1.4.10 | 28.33 | 3.19 | 13.48 | | 3.3.10 | 27.90 | 3.19 | 13.70 |
| 2.1.1 | 27.30 | 3.20 | 14.76 | | 3.4.1 | 27.76 | 3.21 | 13.53 |
| 2.1.2 | 27.62 | 3.20 | 13.12 | | 3.4.2 | 26.51 | 3.20 | 13.72 |
| 2.1.3 | 27.30 | 3.20 | 13.44 | | 3.4.3 | 26.56 | 3.20 | 13.84 |
| 2.1.4 | 28.45 | 3.22 | 13.48 | | 3.4.4 | 27.72 | 3.18 | 13.68 |
| 2.1.5 | 29.12 | 3.20 | 13.25 | | 3.4.5 | 26.77 | 3.22 | 13.20 |
| 2.1.6 | 28.06 | 3.19 | 13.42 | | 3.4.6 | 27.40 | 3.20 | 13.52 |
| 2.1.7 | 28.43 | 3.19 | 13.48 | | 3.4.7 | 26.93 | 3.20 | 13.79 |
| 2.1.8 | 28.46 | 3.20 | 13.50 | | 3.4.8 | 27.26 | 3.21 | 13.84 |
| 2.1.9 | 27.88 | 3.19 | 13.35 | | 3.4.9 | 26.59 | 3.18 | 13.70 |
| 2.1.10 | 27.82 | 3.22 | 13.57 | | 3.4.10 | 28.10 | 3.20 | 13.20 |
| 2.3.1 | 28.60 | 3.23 | 13.54 | | | | | |
| 2.3.2 | 28.00 | 3.19 | 13.62 | | | | | |
| 2.3.3 | 26.60 | 3.19 | 13.44 | | | | | |
| 2.3.4 | 28.08 | 3.21 | 13.46 | | | | | |
| 2.3.5 | 27.94 | 3.20 | 13.29 | | | | | |
| 2.3.6 | 28.30 | 3.24 | 13.50 | | | | | |
| 2.3.7 | 27.18 | 3.20 | 13.50 | | | | | |
| 2.3.8 | 28.14 | 3.24 | 13.46 | | | | | |
| 2.3.9 | 26.90 | 3.19 | 13.53 | | | | | |
| 2.3.10 | 28.04 | 3.23 | 13.51 | | | | | |

APÊNDICE B – DADOS DE ENSAIOS DOS CORPOS DE PROVA

| Dados de ensaios - Corpos de Prova | | | | | | | | | | | |
|------------------------------------|------------------|----------------|------------------|------------------|---------|--------|------------------|----------------|------------------|------------------|---------|
| Código | Pré - Carga (KN) | Força Máx (KN) | Tensão Máx (MPa) | Tensão Esc (MPa) | Def (%) | Código | Pré - Carga (KN) | Força Máx (KN) | Tensão Máx (MPa) | Tensão Esc (MPa) | Def (%) |
| 1.1.1 | 2.03 | 28.12 | 317.82 | 300.19 | 25.36 | 2.3.1 | 2.02 | 15.47 | 167.43 | 63.64 | 17.59 |
| 1.1.2 | 2.03 | 30.51 | 348.56 | 307.86 | 33.28 | 2.3.2 | 2.01 | 19.17 | 214.59 | | 19.46 |
| 1.1.3 | 1.99 | 17.81 | 198.56 | 181.95 | 18.74 | 2.3.3 | 2.03 | 12.62 | 148.73 | 34.64 | 12.69 |
| 1.1.4 | 2.00 | 26.98 | 309.68 | 264.95 | 26.59 | 2.3.4 | 2.02 | 13.63 | 151.18 | 44.51 | 16.60 |
| 1.1.5 | 2.02 | 24.85 | 283.39 | 261.19 | 23.81 | 2.3.5 | 2.03 | 15.91 | 177.90 | 34.04 | 15.52 |
| 1.1.6 | 1.99 | 26.24 | 292.07 | 277.12 | 26.43 | 2.3.6 | 2.04 | 21.65 | 236.13 | 211.35 | 21.14 |
| 1.1.7 | 2.02 | 20.29 | 227.53 | 219.98 | 19.14 | 2.3.7 | 2.00 | 6.14 | 70.57 | 24.79 | 6.86 |
| 1.1.8 | 1.99 | 31.05 | 348.76 | 303.05 | 33.72 | 2.3.8 | 2.04 | 22.69 | 248.90 | 236.92 | 20.35 |
| 1.1.9 | 1.99 | 22.95 | 263.81 | 247.80 | 24.90 | 2.3.9 | 2.02 | 28.69 | 334.32 | 300.72 | 26.95 |
| 1.1.10 | 2.01 | 24.05 | 270.67 | 255.96 | 26.23 | 2.3.10 | 2.01 | 16.36 | 180.67 | 177.65 | 14.84 |
| 1.3.1 | 1.99 | 33.28 | 344.69 | 303.27 | 40.30 | 2.4.1 | 2.01 | 18.10 | 203.84 | 185.89 | 18.47 |
| 1.3.2 | 1.98 | 24.28 | 252.38 | 250.81 | 20.71 | 2.4.2 | 2.01 | 18.18 | 205.02 | 196.47 | 18.44 |
| 1.3.3 | 1.98 | 30.97 | 343.91 | 324.94 | 32.87 | 2.4.3 | 2.03 | 18.55 | 210.88 | 199.08 | 15.64 |
| 1.3.4 | 1.99 | 20.48 | 228.95 | 223.77 | 20.39 | 2.4.4 | 2.01 | 21.66 | 246.34 | 229.57 | 20.11 |
| 1.3.5 | 2.00 | 19.11 | 215.60 | 0.14 | 18.64 | 2.4.5 | 2.03 | 14.00 | 163.16 | 133.30 | 12.54 |
| 1.3.6 | 1.98 | 17.75 | 194.25 | 192.15 | 17.23 | 2.4.6 | 2.00 | 22.81 | 261.70 | 244.99 | 20.91 |
| 1.3.7 | 1.98 | 20.76 | 236.41 | 224.32 | 21.79 | 2.4.7 | 2.03 | 20.43 | 227.48 | 177.28 | 17.88 |
| 1.3.8 | 2.03 | 18.79 | 214.39 | 199.36 | 19.52 | 2.4.8 | 2.04 | 20.82 | 234.91 | 221.57 | 17.74 |
| 1.3.9 | 2.05 | 18.76 | 213.99 | 213.97 | 22.62 | 2.4.9 | 2.01 | 27.78 | 312.39 | 289.35 | 23.23 |
| 1.3.10 | 2.01 | 21.99 | 254.10 | 241.86 | 21.11 | 2.4.10 | 2.01 | 20.99 | 237.59 | 207.18 | 19.75 |
| 1.4.1 | 1.99 | 12.84 | 147.16 | 30.73 | 14.67 | 3.1.1 | 2.03 | 26.44 | 287.98 | 244.89 | 32.43 |
| 1.4.2 | 1.99 | 24.71 | 281.56 | 254.82 | 23.13 | 3.1.2 | 2.00 | 25.78 | 290.46 | 268.73 | 32.17 |
| 1.4.3 | 1.99 | 16.67 | 187.49 | 174.75 | 20.37 | 3.1.3 | 1.99 | 21.48 | 251.92 | 216.23 | 24.10 |
| 1.4.4 | 2.01 | 13.07 | 147.60 | 28.75 | 12.48 | 3.1.4 | 2.03 | 29.40 | 322.90 | 306.42 | 35.14 |
| 1.4.5 | 1.99 | 16.95 | 191.43 | 0.15 | 15.49 | 3.1.5 | 2.02 | 26.37 | 294.84 | 264.54 | 27.21 |
| 1.4.6 | 2.02 | 14.92 | 168.70 | 0.24 | 14.28 | 3.1.6 | 2.03 | 28.59 | 322.00 | 304.43 | 35.11 |
| 1.4.7 | 2.00 | 15.49 | 178.01 | 172.54 | 14.98 | 3.1.7 | 2.04 | 29.33 | 319.59 | 294.60 | 35.94 |
| 1.4.8 | 2.00 | 23.11 | 255.05 | 238.09 | 20.42 | 3.1.8 | 2.01 | 24.74 | 268.49 | 238.91 | 35.65 |
| 1.4.9 | 2.02 | 16.65 | 185.78 | 185.25 | 14.83 | 3.1.9 | 2.01 | 27.27 | 303.88 | 271.00 | 32.64 |
| 1.4.10 | 2.01 | 18.86 | 208.72 | 206.89 | 16.81 | 3.1.10 | 2.01 | 27.18 | 293.14 | 248.24 | 27.94 |
| 2.1.1 | 2.04 | 20.99 | 240.29 | 232.62 | 18.40 | 3.3.1 | 2.00 | 21.29 | 237.60 | 216.64 | 21.14 |
| 2.1.2 | 2.02 | 21.79 | 246.58 | 235.34 | 20.78 | 3.3.2 | 2.03 | 20.30 | 229.43 | 209.80 | 19.63 |
| 2.1.3 | 2.01 | 22.69 | 259.69 | 240.24 | 23.62 | 3.3.3 | 2.01 | 14.05 | 157.99 | 0.15 | 15.51 |
| 2.1.4 | 2.05 | 22.87 | 249.63 | 234.05 | 23.71 | 3.3.4 | 2.03 | 19.40 | 216.89 | 177.87 | 19.93 |
| 2.1.5 | 2.05 | 25.27 | 271.22 | 258.68 | 24.88 | 3.3.5 | 2.03 | 22.52 | 265.35 | 237.88 | 21.83 |
| 2.1.6 | 2.00 | 24.04 | 268.53 | 250.10 | 23.81 | 3.3.6 | 2.00 | 24.12 | 269.17 | 238.00 | 23.60 |
| 2.1.7 | 1.99 | 20.63 | 227.49 | 217.87 | 19.06 | 3.3.7 | 2.01 | 24.16 | 278.19 | 219.99 | 26.26 |
| 2.1.8 | 2.03 | 22.74 | 249.71 | 231.40 | 21.92 | 3.3.8 | 2.02 | 19.31 | 221.66 | 216.02 | 16.90 |
| 2.1.9 | 2.04 | 24.10 | 271.03 | 259.15 | 25.61 | 3.3.9 | 2.02 | 19.41 | 226.71 | 205.80 | 20.53 |
| 2.1.10 | 1.99 | 20.88 | 233.10 | 220.20 | 21.31 | 3.3.10 | 2.02 | 19.17 | 215.44 | 199.97 | 16.66 |
| | | | | | | 3.4.1 | 2.02 | 23.34 | 261.87 | 226.15 | 22.25 |
| | | | | | | 3.4.2 | 2.01 | 19.48 | 229.66 | 216.39 | 16.77 |
| | | | | | | 3.4.3 | 2.01 | 22.48 | 264.48 | 225.93 | 20.88 |
| | | | | | | 3.4.4 | 2.01 | 20.89 | 237.00 | 210.48 | 20.23 |
| | | | | | | 3.4.5 | 2.02 | 17.18 | 199.28 | 132.11 | 18.57 |
| | | | | | | 3.4.6 | 1.99 | 22.52 | 256.89 | 240.59 | 23.44 |
| | | | | | | 3.4.7 | 2.02 | 16.35 | 189.73 | 142.20 | 15.75 |
| | | | | | | 3.4.8 | 2.03 | 24.86 | 284.15 | 251.33 | 25.38 |
| | | | | | | 3.4.9 | 2.04 | 24.36 | 288.07 | 241.66 | 23.84 |
| | | | | | | 3.4.10 | 2.02 | 27.78 | 308.97 | 264.05 | 27.12 |

