HEBERT ROBERTO DA SILVA

METODOLOGIA PARA ANÁLISE DE TRINCAS DE HIDROGÊNIO EM SOLDAS ATRAVÉS DE ENSAIOS DESTRUTIVOS E EMISSÃO ACÚSTICA

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
2010

HEBERT ROBERTO DA SILVA

METODOLOGIA PARA ANÁLISE DE TRINCAS DE HIDROGÊNIO EM SOLDAS ATRAVÉS DE ENSAIOS DESTRUTIVOS E EMISSÃO ACÚSTICA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para obtenção do título de **MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA**

Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação

Orientador: Prof. Dr. Valtair Antonio Ferraresi

UBERLÂNDIA – MG
2010

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

S586m Silva, Hebert Roberto da, 1982-
Metodologia para análise de trincas de hidrogênio em soldas através de ensaios destrutivos e emissão acústica [manuscrito] / Hebert Roberto da Silva. - 2010.
140 f. : il.

Orientador: Valtair Antonio Ferraresi.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.
Inclui bibliografia.

1. Soldagem - Teses. I. Ferraresi, Valtair Antonio. II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

CDU: 621.791

Elaborada pelo Sistema de Bibliotecas da UFU / Setor de Catalogação e Classificação

AGRADECIMENTOS

Ao LAPROSOLDA/UFU pela utilização dos equipamentos e suporte técnico e a FAPEMIG pela concessão de bolsa de estudo, ao CNPq e CAPES pela concessão de recursos financeiros.

À Coordenação do Curso de Pós Graduação em Engenharia Mecânica pela oportunidade da realização deste Mestrado proporcionando grande aprendizado. De forma especial cito o Prof. Dr. Márcio Bacci, Prof. Gilmar Guimarães e Prof. Dr. Valder Steffen Jr. pela coragem e dedicação na condução destes Cursos.

Ao Prof. Dr. Valtair Antonio Ferraresi por acreditar e ter firmeza na orientação, com excelentes momentos de convivência nestes 9 anos de amizade. Agradeço também aos Prof. Dr.Américo Scotti e ao Prof. Dr. Louriel Oliveira Vilarinho pelas sugestões e contribuições para este trabalho.

Aos alunos de Iniciação Científica e de Pós Graduação do LAPROSOLDA/UFU pela amizade, convivência e apoio. Em especial cita-se o aluno Tiago Veríssimo Campos pelo desenvolvimento do programa computacional Analisador de Emissão Acústica.

À toda equipe de suporte da Faculdade de Engenharia Mecânica em especial aos Técnicos da Oficina Mecânica pelo pronto atendimento e disposição para o trabalho.

À Usiminas Mecânica S.A. pela doação de material para confecção de Corpos de Prova e em especial ao Eng. Flávio Romualdo B. dos Santos e ao Gerente de Engenharia de Estruturas e Pontes Eng. Ricardo Motta.

À minha família pelo apoio e incentivo em todos os momentos da realização deste trabalho.

SILVA, H. R. **Metodologia para Análise de Trincas de Hidrogênio em Soldas através de Ensaios Destrutivos e Emissão Acústica**. 2010. 140 f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

Resumo

A evolução dos processos de soldagem, registrada nos últimos anos em todo mundo, tem ocorrido devido a este processo de fabricação estar relacionado com a maioria das aplicações industriais, seja na construção como na recuperação de componentes. Para isso procedimentos utilizados para avaliar a susceptibilidade a trincas em estruturas metálicas vêm sendo constantemente aperfeiçoados. Logo, o aprimoramento científico e tecnológico nestes seguimentos tornou-se não só uma necessidade, mas uma questão de sobrevivência. As trincas de hidrogênio são um dos mais graves e persistentes defeitos encontrados na soldagem dos aços, conforme demonstrado pela avaliação de custos e da perda de tempo e reparos de peças e estruturas soldadas, quando comparadas com outros defeitos originados pela utilização deste processo. Durante a soldagem, a ZAC é submetida a ciclos térmicos, com mudança em sua microestrutura e propriedades mecânicas sendo notória a possibilidade de trincamento nesta região. Neste sentido o objetivo deste trabalho foi apresentar uma metodologia para a determinação e avaliação da formação e propagação da trinca de hidrogênio utilizando um sistema de Emissão Acústica, nos ensaios de susceptibilidade a trinca (G-BOP e Tekken) em um aço de Alta Resistência e Baixa Liga. Foram ensaiados corpos de prova utilizando os processos eletrodo revestido e MIG/MAG, com aplicações em condições favoráveis ao surgimento de trincas bem como adotando procedimentos recomendados para sua prevenção. Nos ensaios G-BOP e Tekken notou-se uma relação direta entre a ocorrência de trincas no corpo de prova e o sinal característico apresentado pelo sensor de emissão acústica. Com isso, a metodologia de ensaio com o sistema de Emissão acústica utilizado nesta pesquisa demonstrou ser eficiente para o seu propósito.

Palavras-Chave: *Trinca à Frio, Trinca de Hidrogênio, Ensaio Tekken, Ensaio G-BOP.*

SILVA, H. R., **Methodology of Analysis of Hydrogen Cracking in Welding using Destructive Test and Acoustic Emission.** 2010 Monograph, 140 p, Federal University of Uberlândia, Uberlândia.

Abstract

The evolution of the processes of welding, registered in recent years in everybody, has occurred had to this process of manufacture to be related with the majority of the industrial applications, either in the construction as in the recovery of components. To this used procedures to evaluate the cracking sensibility in metallic structures comes being constantly perfected. With this, the scientific and technological improvement in these pursuings not only became a necessity, but a question of survival. Hydrogen induced cracking is one of the most serious and persistent defects found in the steels welding, as demonstrated by evolutions of costs and loss of time with repairs in welded parts. During welding, the heat-affected zone (HAZ) is subjected to thermal cycles, which produces a change in both its microstructure and mechanical properties. In this sense, the objective was to present a methodology for determining and evaluating the training and crack propagation of hydrogen induced cracking using a system of Acoustic Emission for the test of susceptibility to crack (G-BOP and Tekken) in a High Strength Steel and Low Alloy. We tested specimens of the processes shielded metal arc welding (SMAW) and gas shielded metal arc welding (GMAW) in a comparative analysis with applications under favorable conditions the appearance of cracks as well as adopting best practices for its prevention. In the G-BOP tests and Tekken was noted a direct relationship between the occurrence of cracks in the specimen and the signal characteristic presented by the acoustic emission sensor. Thus, the testing methodology with the acoustic emission system used in this study proved to be efficient for your purpose.

Keywords: *Cold Cracking, Hydrogen Induced Cracking, Tekken Test, G-BOP Test.*

LISTA DE SÍMBOLOS

A / D – Analógico / Digital

AEA – Analisador de Emissão Acústica

A_P – Área Penetrada

A_R – Área de Reforço

ARBL – Aço de Alta Resistência e Baixa Liga

A_T – Área Total

C- Mn – Carbono e Manganês

CE – Carbono Equivalente

CEA – Condicionador de Emissão Acústica

CMV – Dimples / Coalescência de Microvazios ou Alveolar

EA – Emissão Acústica

ER – Eletrodo Revestido

IG – Intergranular

MB – Metal Base;

MS – Metal de Solda

MIG – Metal Inert Gás;

RMS – Root Mean Square

TIG – Tugsten Inert Gas

QC – Quase Clivagem

ZAC – Zona Afetada pelo Calor

ZF – Zona Fundida

SUMÁRIO

Capítulo I – Introdução e Objetivos.....1

Capítulo II – Revisão Bibliográfica.....4

2.1. Introdução.....4

2.2. O Hidrogênio.....4

2.3. Fissuração pelo Hidrogênio na Soldagem.....5

2.3.1. Absorção de hidrogênio pela poça de fusão.....6

2.3.2. Tensões e deformações.....12

2.3.3. Microestruturas susceptíveis.....13

2.3.4. Temperatura de formação da trinca de Hidrogênio.....14

2.3.5. Influência da dureza na zona afetada pelo calor na trinca de hidrogênio.....15

2.4. Característica da Trinca de Hidrogênio.....16

2.4.1. Mecanismo de formação da trinca de hidrogênio.....16

2.4.2. Morfologia da trinca de hidrogênio.....18

2.4.3. Medidas para se minimizar a fissuração.....19

2.5. Ensaios de Fissuração.....23

2.5.1. Teste G-BOP.....25

2.5.2. Ensaio Tekken.....27

2.5.3. Ensaio Implante.....28

2.6. Fundamentos da Emissão Acústica (EA).....31

2.6.1. Característica do sinal de emissão acústica.....32

2.6.2. Utilização e aplicação da emissão acústica.....34

Capítulo III – Metodologia.....35

3.1. Metal de Base.....35

3.1.1. Determinação do Carbono Equivalente.....35

3.2. Metal de Adição.....37

3.2.1. Metal de adição para o processo MIG/MAG.....37
3.2.2. Metal de adição para o processo Eletrodo Revestido.....37
3.3. Equipamentos de Soldagem.....38
3.3.1. Fonte para o processo MIG/MAG.....38
3.3.2. Fonte para o processo Eletrodo Revestido.....40
3.4. Parâmetros de Soldagem.....41
3.4.1. Parâmetros para o processo MIG/MAG.....41
3.4.2. Parâmetros para o processo Eletrodo Revestido....41
3.5. Sistema de Emissão Acústica.....42
3.5.1. Programa Computacional do CEA.....46
3.6. Procedimento Experimental.....49
3.6.1. Metodologia do ensaio G-BOP.....49
3.6.2. Metodologia do ensaio Tekken.....53
3.6.3. Metodologia do ensaio de Implante.....56
3.7. Determinação da Microdureza.....59
3.8. Determinação da Diluição no Cordão de Solda.....60

Capítulo IV – Testes Preliminares 63
4.1. Verificação da funcionalidade do sistema de EA.....63
4.2. Ensaios preliminares com o teste G–BOP.....66
4.3. Ensaios com o Teste de Implante.....79
4.4. Avaliação Final dos Testes Preliminares.....83

Capítulo V – Ensaio G-BOP.....84
5.1. Resultados gerais dos ensaios.....84
5.2. Resultados dos ensaios com o processo MIG/MAG.....87
5.2.1. Análise do Teste 1.....87
5.2.2. Análise do Teste 2.....90
5.2.3. Análise do Teste 3.....92
5.2.4. Análise do Teste 4.....94
5.3. Resultados dos ensaios com o processo Eletrodo Revestido.....97

5.3.1. Análise do Teste 5.....97
5.3.2. Análise do Teste 6.....100
5.3.3. Análise do Teste 7.....101
5.3.4. Análise do Teste 8.....103
5.3.5. Análise do Teste 9.....105
5.4. Análise de microdureza e diluição.....106
5.5. Caracterização microestrutural.....108
5.6. Avaliação final do ensaio G-BOP.....111

Capítulo VI – Ensaio Tekken.....114
6.1. Resultados gerais dos ensaios.....114
6.2. Resultados para o processo MIG/MAG.....115
6.3. Resultados para o processo Eletrodo Revestido.....117
6.4. Microdureza e Diluição.....128
6.5. Avaliação final do ensaio Tekken.....130

Capítulo VII – Conclusões.....132

Capítulo IX – Trabalhos Futuros.....133

Capítulo VIII – Referências Bibliográficas.....134

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

A evolução dos processos de soldagem, é constante e tem ocorrido devido a este processo de fabricação estar relacionado com a maioria das aplicações industriais, seja na construção como na recuperação de componentes. Em determinados setores industriais, a exemplo da extração de petróleo e automobilístico, a utilização de processos de soldagem torna-se inevitável e vários estudos tem sido realizados para avaliar a influência da adição de elementos de liga na composição microestrutural dos metais de solda com Alta Resistência e Baixa Liga (ARBL). Sabe-se que pela adição destes elementos de liga a temperabilidade do metal de solda aumenta sensivelmente e diversas composições microestruturais podem ser obtidas.

A soldabilidade dos aços de ARBL pode se tornar bastante difícil ou comprometida se não forem evitadas as trincas de hidrogênio. Esse é sem dúvida, o grande problema na soldagem desses aços e tem sido um tema muito estudado nos últimos anos. Sempre que se determinam as condições para se evitar essas trincas, a indústria siderúrgica produz novos aços com ainda maiores limites de resistência e novamente todo um novo estudo se faz necessário. O surgimento desse defeito está condicionado, entre outros fatores, à microestrutura resultante na junta soldada após o resfriamento (MONTEIRO, 2004).

Os novos desenvolvimentos de aços de alta resistência e baixa liga (ARBL), com altos requisitos de resistência, nem sempre têm sido acompanhados totalmente pelo desenvolvimento dos metais de adição, como expressado por Widgery (2002). Essa situação faz com que, na soldagem desses aços, o uso de metais de adição com propriedades mecânicas diferentes do metal de base seja considerado, sempre procurando cumprir as normas ou códigos de construção específicos para cada projeto (MILLER; HIETPAS; DEPUE, 2002).

No que se refere ao processo de soldagem, a temperatura de pré-aquecimento e a energia de soldagem são os fatores que determinam as propriedades da junta através dos

ciclos térmicos e das taxas de resfriamento resultantes. A necessidade ou não da temperatura de pré-aquecimento para soldagem dos novos aços de baixo carbono é bastante controvertida (ORDÒÑES, 2004). Segundo Zhao e Yang (2002), a temperatura de pré-aquecimento necessária para soldagem dos aços ARBL pode ser determinada por vários métodos. Porém, esses métodos estão baseados em diferentes modelos de cálculo do carbono equivalente (CE), gerando divergências sobre a forma mais adequada e a necessidade de pré-aquecer o material.

Normalmente o arco de soldagem é responsável pela presença de gás hidrogênio na atmosfera do arco dentro do metal de solda solidificado, do qual o hidrogênio difusível pode propagar em várias regiões da solda em resfriamento. Dependendo da microestrutura do metal, da concentração de hidrogênio difusível na solda e do nível de tensão residual, o risco de trinca de hidrogênio em aços ferríticos origina-se quando o resfriamento da solda atinge a região de temperatura entre 150 e 100 ℃. Geralmente, a trinca de hidrogênio ocorre tardiamente, podendo aparecer fissuras vários dias após o término da soldagem. Usualmente, trincas de hidrogênio são situadas nas proximidades da zona afetada pelo calor do aço ou no cordão de solda. Uma das mais efetivas prevenções contra trinca de hidrogênio na solda é usar pré-aquecimento, para aquecer suficientemente um vasto volume da região do componente a ser soldada antes da execução ou, em caso de soldagem multipasse, aplicar elevadas temperaturas de interpasse durante a operação (NEVASMAA, 2003).

Desenvolvimentos recentes no sentido de processamento avançado dos aços proporcionaram melhorias consideráveis na qualidade destes materiais reduzindo carbono e impurezas, conseqüentemente aumentando a resistência da ZAC para trinca de hidrogênio. Pelo ponto de vista de usuário final, estas melhorias expandiram a aplicação dos aços para limites superiores como materiais soldados, desafiando as manufaturas de consumíveis a acompanhar o ritmo do desenvolvimento dos produtos de aço. Atualmente, os benefícios industriais trazidos pelo avanço dos aços são equivalentes ao aumento de problemas de trinca de hidrogênio no metal de solda. Consequentemente, com aumento da resistência de parte de peças e metal de solda, pode ser requerido pré-aquecimento determinado pela sensibilidade ao trincamento do metal soldado nas proximidades da ZAC (NEVASMAA, 2003).

Dentre os vários testes auto-restritivos utilizados para avaliar a ocorrência de trinca de hidrogênio destaca-se o teste G-BOP (Gapped Bead-on-Plate). Este teste possui um grande potencial para avaliar trincas de hidrogênio somente no metal de solda. Apresenta como principais vantagens: baixo custo quando comparado a outros testes simplicidade na execução e facilidade em avaliar a susceptibilidade ao trincamento por hidrogênio na zona

do metal de solda (FRAGA, 2005). Entre os ensaios de Auto Restrição, o Ensaio Tekken é o ensaio mais utilizado internacionalmente para a avaliação da susceptibilidade à formação de trincas de hidrogênio, tanto no metal de solda, como na ZAC, sendo definido pela Norma Industrial Japonesa JIS–Z–3158. As características que proporcionam ampla utilização desse ensaio são as facilidades de elaboração, baixo custo, versatilidade e boa reprodutibilidade.

O ensaio de Implante como a maioria dos ensaios de restrição externa é utilizado para avaliar a sensibilidade ao trincamento da região afetada pelo calor da junta soldada, obtida de forma real no implante do aço a ser estudado em uma placa de teste (FALS, 1999). Dentre as vantagens do uso deste ensaio destaca-se a possibilidade de utilização de corpos de prova de pequenas dimensões permitindo controle da tensão de restrição de soldagem conforme citado por Ferraresi (1996).

O uso da técnica de Emissão Acústica, aplicada aos processos de soldagem, tem alcançado, nas últimas décadas, grande utilização como técnica de ensaio não destrutivo. Com um sensor acoplado ao corpo de prova para detectar o instante de formação e propagação das trincas, tem demonstrado ser uma ferramenta adequada para uma melhor análise do fenômeno. Esta técnica foi adotada por Ferraresi (1996), aplicada ao estudo de trincas de reaquecimento em juntas soldadas e por Fals (1999) estudando a sensibilidade à trinca de hidrogênio de um aço ARBL em condições experimentais do ensaio G-BOP.

O objetivo deste trabalho é apresentar uma metodologia para a determinação e avaliação da formação e propagação da trinca de hidrogênio utilizando um sistema de Emissão Acústica, desenvolvido especificamente para esta finalidade, nos ensaios de susceptibilidade a trinca (G-BOP, Tekken e Implante) em um aço de Alta Resistência e Baixa Liga.

A seguir é apresentada a estrutura deste trabalho bem como os assuntos a serem abordados em cada capítulo:

- Capítulo II: é apresentado uma Revisão Bibliográfica;
- Capítulo III: a Metodologia proposta nesta dissertação;
- Capítulo IV: os Testes Preliminares;
- Capítulo V: Resultados para o Ensaio G-BOP;
- Capítulo VI: Resultados para o Ensaio Tekken;
- Capítulo VII: Conclusões;
- Capítulo VIII: Referências Bibliográficas;
- Capítulo IX: Trabalhos Futuros;

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Introdução

Esta revisão bibliográfica foi feita através de estudo de trabalhos disponíveis na literatura e abrange os principais aspectos relacionados à trinca de hidrogênio, testes de determinação de susceptibilidade e a utilização da emissão acústica para determinar os fenômenos de propagação de trincas. Este capítulo tem como finalidade servir de suporte técnico e científico para o desenvolvimento desta dissertação de mestrado.

2.2. O Hidrogênio

O hidrogênio é um átomo que consiste em um próton e um elétron. Ele pode se ionizar na forma H^+ ou aceitar um elétron e completar o subnível 1s. Com isso, o hidrogênio pode formar compostos com átomos de todos os elementos da tabela periódica e constituir hidretos salinos, metálicos e covalentes (VIEIRA, 1990).

A molécula de hidrogênio é o mais simples composto deste elemento e sob condições normais de pressão e temperatura o estado mais comum do hidrogênio gasoso é o molecular. A molécula de hidrogênio sofre dissociação quando é fornecida uma grande quantidade de calor (reação endotérmica) (VIEIRA, 1990).

A solubilidade do hidrogênio, particularmente no ferro, a temperatura ambiente, é muito pequena, mas cresce com o aumento da temperatura (Fig. 2.1). A aproximadamente $910^{O}C$, quando ocorre mudança da ferrita alfa para a austenita, a solubilidade aumenta drasticamente. Aumentando gradualmente a temperatura até o início da transformação da austenita em ferrita delta ocorre um aumento da solubilidade. Na transformação verifica-se um decréscimo acentuado e em seguida um aumento, e por fim, a ocorrência de um grande

salto. A solubilidade do hidrogênio no ferro líquido é muito maior que no sólido (GRONG, 1994).

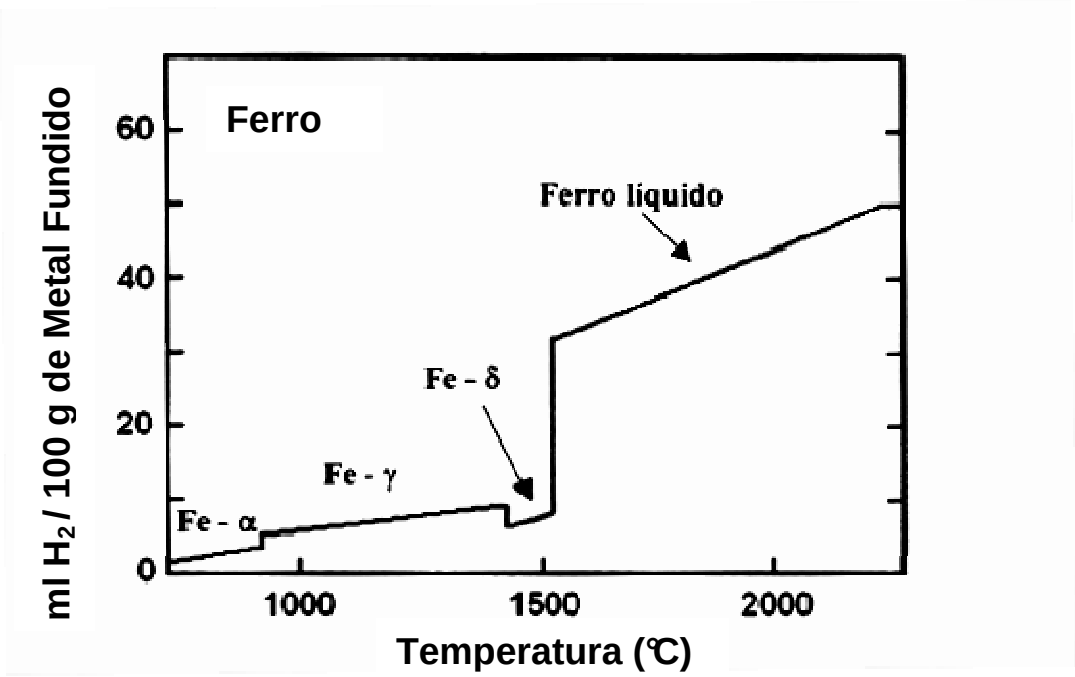


Figura 2.1: Solubilidade do hidrogênio no ferro puro (adaptado de Grong, 1994).

Vieira (1990) comenta que quantificar a solubilidade do hidrogênio, particularmente no ferro, apresenta muitas dificuldades, entre elas estão: (a) impossibilidade de usar o metal com pureza satisfatória para executar as medidas, existindo sempre a possibilidade de que as impurezas presentes possam mudar consideravelmente o comportamento da amostra em estudo; (b) a capacidade de absorção do metal é influenciada por discordâncias e outros defeitos estruturais, os quais estão sempre presentes em metais cristalinos e materiais policristalinos; e (c) o fato de a entrada do hidrogênio em amostras metálicas e sua remoção serem acompanhadas de mudanças na estrutura do metal, o que permitirá a observação de distintos efeitos de histerese.

2.3. Fissuração pelo Hidrogênio na Soldagem

Esta forma de fissuração pode originar trincas tanto na ZAC como na ZF (Zona Fundida), com diferentes orientações. O problema ocorre quando o material está a temperaturas entre cerca de 200 e -100 ℃, sendo co mumente denominado de fissuração a frio. A trinca começa a se formar após um período de incubação, que pode variar de alguns

minutos a várias horas. Após este período, ela cresce de uma forma lenta e descontínua até as suas dimensões finais. Em geral, pode-se considerar que a trinca está completamente formada somente cerca de 48 horas após a soldagem (MODENESI, 2002).

Esta forma de fissuração é um dos problemas mais graves de soldabilidade dos aços, particularmente com processos de baixa energia, como na soldagem a arco com eletrodos revestidos, sendo um dos assuntos mais estudados nesta área. Segundo dados de Coe (1973) apud Grong (1994), o custo dos reparos de soldas com este problema representava cerca de 15% do total gasto anualmente na Inglaterra devido a problemas de fabricação ligados diretamente com soldagem. A fissuração pelo hidrogênio tem sido associada muitas vezes com a falha prematura de componentes soldados, ajudando a iniciação de processos de fratura frágil ou fadiga. Este problema é ainda mais grave devido à dificuldade de se detectar as trincas por ensaios não destrutivos em certas condições, como pequenas trincas na raiz de soldas em juntas em T.

A fissuração pelo hidrogênio é muitas vezes citada na literatura técnica com diferentes nomes, como: “cold cracking” (fissuração a frio), “delayed cracking” (fissuração retardada), “underbead cracking” (fissuração sob o cordão) e “toe cracking” (fissuração na margem do cordão) (MODENESI, 2002).

Modenesi (2002) cita que a fissuração pelo hidrogênio resulta da ação simultânea de quatro fatores:

- ✓ presença de hidrogênio,
- ✓ tensões e deformações de tração,
- ✓ microestrutura sensível à fissuração, e
- ✓ uma temperatura adequada.

Os três primeiros fatores descritos (presença de hidrogênio, tensões e microestrutura sensível) são interdependentes. Se um deles estiver presente com alta intensidade, a fissuração pode ocorrer mesmo que o nível dos outros fatores não seja elevado. O quarto fator, ou seja, que o material esteja no intervalo de temperaturas de fragilização, é sempre necessário. Uma das formas principais de se controlar a fissuração pelo hidrogênio baseia-se exatamente neste fato.

2.3.1. Absorção de hidrogênio pela poça de fusão

A contaminação pelo hidrogênio da junta a ser soldada pode ocorrer através da presença de graxas, tintas, óxidos, entre outros. Também pode ser introduzido em operações de soldagem pela umidade atmosférica, umidade do revestimento ou fluxo do

eletrodo. Além da umidade poder ser introduzida através do gás de proteção nos processos que utilizam este tipo de proteção.

Segundo Grong (1994), a concentração de hidrogênio na poça de fusão pode ser fortemente influenciada pelo processo de soldagem. Os processos eletrodo revestido, arco submerso e arame tubular podem oferecer, tanto altos, como baixos teores de hidrogênio, dependendo da qualidade do fluxo e das condições de soldagem aplicadas. Os mais altos níveis de hidrogênio estão associados normalmente a eletrodos do tipo celulósicos, ácidos e rutílicos. Isto se deve à grande quantidade de asbesto, argila e rutilo presentes nos revestimentos ou fluxos. Os processos TIG e MIG/MAG, por sua vez, são classificados como processos de baixo hidrogênio, dependendo das condições e dos parâmetros de soldagem.

Na soldagem com Eletrodos Revestidos, uma mistura de minerais, matéria orgânica, ferro-ligas e pó metálico ligados, em geral, com silicato de sódio ou potássio é extrudada junto com vareta de metal de adição formando o revestimento. Quanto maior a temperatura do forno, menor deverá ser a quantidade final de umidade do revestimento. Entretanto a escolha desta temperatura depende também da composição do revestimento. Eletrodos rutílicos e celulósicos contêm material orgânico no revestimento e são enfornados a temperaturas em geral, inferiores a 200℃, pois temperaturas superiores podem danificar o material orgânico. Eletrodos básicos são enfornados a temperaturas mais elevadas, entre 400 e 450 ℃, permitindo a retirada mais completa da umidade do revestimento. No caso dos eletrodos rutílicos e celulósicos, tanto a celulose quanto a umidade residual geram hidrogênio no arco e o teor de hidrogênio no metal depositado, medido por testes padronizados, pode ficar entre 20 e 30 ppm. Eletrodos básicos, se armazenados e usados corretamente, apresentam um teor muito mais baixo no metal depositado (MODENESI, 2002).

Na soldagem a arco submerso, os fluxos podem ser fundidos ou aglomerados. Os primeiros não tendem a conter umidade, nem apresentam tendência de absorvê-la da atmosfera. Por outro lado, fluxos aglomerados, particularmente os básicos, assim como os revestimentos de eletrodos deste tipo, tendem a ser higroscópicos, podendo absorver umidade da atmosfera. A taxa de absorção de umidade depende das características de fabricação do eletrodo ou fluxo, como o tipo de ligante usado e a temperatura de secagem e, também, das condições do ambiente, principalmente a umidade relativa do ar e a temperatura (MODENESI, 2002).

Em um revestimento ou fluxo que não contém matéria orgânica, a quantidade de umidade contida neste é uma medida da quantidade de hidrogênio que, potencialmente, o consumível pode fornecer à solda, o hidrogênio potencial. Com base nesta idéia, algumas

normas de especificação de consumíveis para soldagem usam o teor de umidade para controlar o consumível quanto à sua capacidade de fornecer hidrogênio para a solda (Tab. 2.1). Em fluxos e revestimentos que contêm matéria orgânica, esta deve ser levada em consideração para a determinação do Hidrogênio Potencial (MODENESI, 2002).

Tabela 2.1: Exigências quanto ao teor de umidade no revestimento de eletrodos de aço baixa liga com controle de hidrogênio, segundo American Welding Society (MODENESI, 2002).

Limite de Resistência Mínimo do Depósito		Teor Máximo de Umidade
(Ksi)	(MPa)	(% em peso)
70	483	0,6
80	552	0,4
90	621	0,4
100	690	0,2
110	758	0,2
120	827	0,2

Durante a soldagem, o hidrogênio potencial é transferido para a solda com uma maior ou menor eficiência, dependendo do processo e dos detalhes do procedimento usado. Assim, processos de soldagem diferentes, quando testados em condições padronizadas, podem fornecer quantidades diferentes de hidrogênio à solda para o mesmo nível de hidrogênio potencial. A Fig. 2.2 apresenta a relação entre hidrogênio potencial e hidrogênio na solda para diferentes processos de soldagem (MODENESI, 2002).

Devido à sua elevada mobilidade atômica, a maior parte do hidrogênio absorvido durante a soldagem tende a se difundir rapidamente através da solda e do metal base, escapando desde um período de horas ou dias. A quantidade de hidrogênio que escapa desta forma, durante um período determinado de tempo, é chamada de Hidrogênio Difusível. Devido a estas características, a quantidade de hidrogênio é relativamente fácil de ser determinada em um corpo de prova soldado. Os diferentes métodos usados para este fim envolvem basicamente a têmpera (resfriamento rápido) de um corpo de prova após soldagem e a sua colocação em um ambiente fechado onde o hidrogênio é recolhido por um período de tempo a uma dada temperatura. Na sua forma mais comum, o recolhimento ocorre em um tubo coletor originalmente cheio de um líquido (geralmente glicerina ou mercúrio), medindo-se a quantidade de hidrogênio através do deslocamento pelo gás do líquido no alto do tubo. Mais recentemente, tem-se feito o recolhimento do hidrogênio em uma câmara fechada, medindo-se posteriormente o hidrogênio liberado por cromatografia

gasosa. O hidrogênio difusível é expresso usualmente em ml / 100g de metal depositado. Para processos de alta penetração, o peso de metal fundido, medido em seções transversais da solda, é mais usado. A Tabela 2.2 apresenta a designação do IIW para o potencial de hidrogênio de consumíveis para a soldagem (MODENESI, 2002).

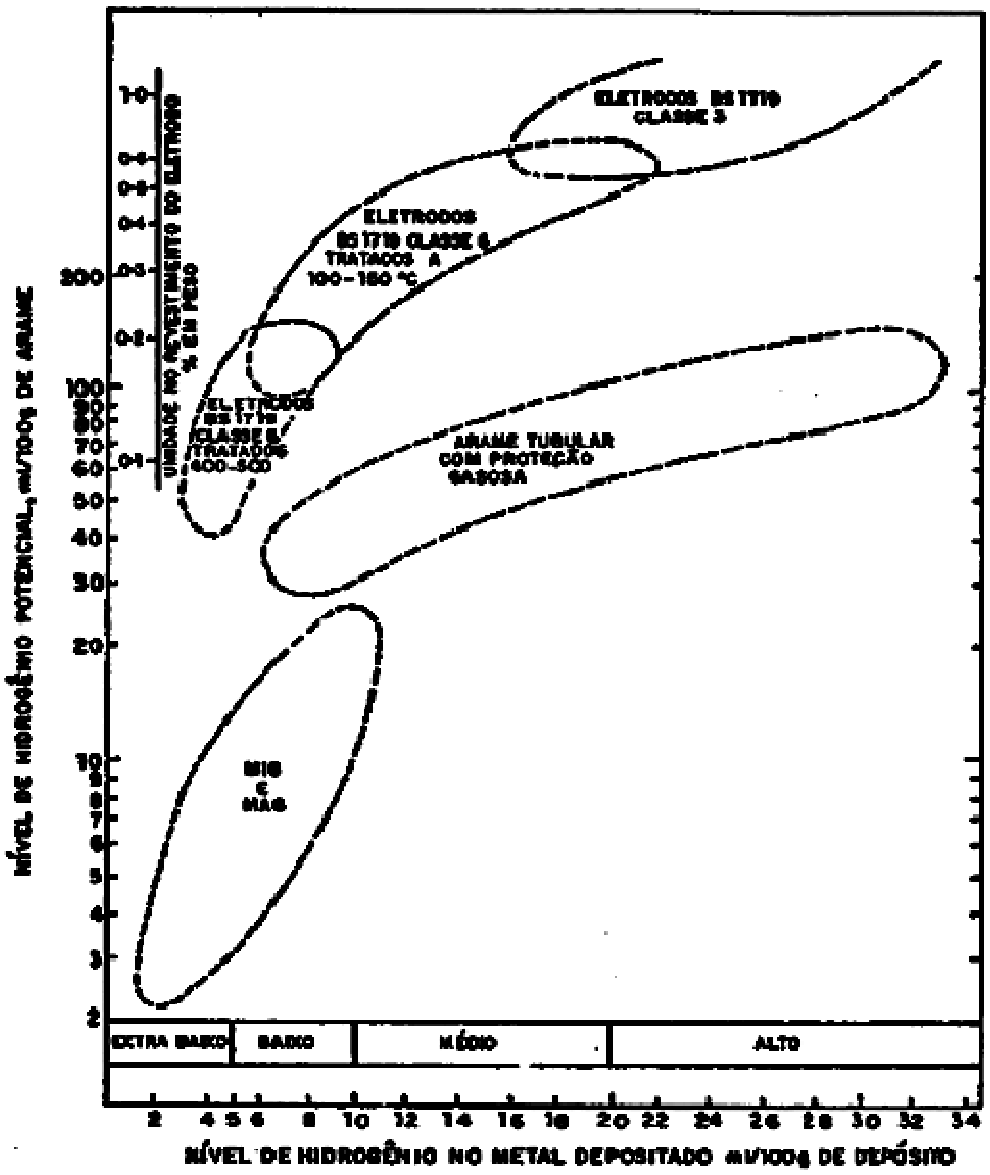


Figura 2.2: Relação entre hidrogênio potencial e hidrogênio na solda para diferentes processos (MODENESI, 2002).

O hidrogênio difusível não representa todo o hidrogênio que é absorvido pela poça de fusão durante a soldagem, já que parte deste é liberada durante a solidificação e outra permanece presa no material (hidrogênio residual) por longos períodos de tempo. A Tabela

2.3 mostra valores típicos de hidrogênio encontrados na soldagem com diferentes eletrodos revestidos e com o processo TIG com proteção de argônio (LINNERT, 1967).

Tabela 2.2: Potencial de hidrogênio de eletrodos para soldagem.

Designação	**Hidrogênio difusível**
Muito baixo	Abaixo de 5 ml/100g de metal depositado
Baixo	5 - 10 ml/100g de metal depositado
Médio	10 - 15 ml/100g de metal depositado
Alto	Acima de 15 ml/100g de metal depositado

Tabela 2.3: Teores típicos de hidrogênio na atmosfera do arco e no metal de solda para diferentes processos.

Processo / Eletrodo	**Hidrogênio (ml / 100g de metal depositado)**				
	Hidrogênio na atmosfera do arco (%Vol)	No metal líquido	Difusível liberado na primeiras 24 horas	Difusível liberado nos 20 dias seguintes	Residual
ER / E6010	40	28	10	3	15
ER / E6012	35	15	6	2	7
ER / E6015	5	8	2	1	5
TIG	0	4*	1	0	3

* Hidrogênio possivelmente vindo da superfície do metal de adição ou metal de base.

Os teores de hidrogênio difusível obtidos por métodos padronizados são comumente usados para a avaliação de consumíveis de soldagem e outras variáveis do processo quanto à sua capacidade de introduzir hidrogênio na região da solda. Contudo, estes teores não representam, necessariamente, a quantidade de hidrogênio difusível presente em uma solda real, pois esta depende de fatores como o tamanho da junta e as condições de resfriamento. Em particular, os ensaios tendem a usar condições de resfriamento muito

severas para minimizar a difusão de hidrogênio antes da colocação do corpo de prova na câmara de recolhimento deste gás (MODENESI, 2002).

Hooijmans e Ouden (1996) determinaram que o tempo de resfriamento, a partir da extinção do arco na solda em amostras de ferro puro, tem um papel fundamental na quantidade de hidrogênio residual. Eles mostraram que entre 40% e 60% da quantidade de hidrogênio absorvida pode ser liberada para a atmosfera durante o resfriamento.

Segundo Granjon (1991), em aços carbono e baixa liga comuns, a fissuração é mais comum na região de granulação grosseira da ZAC, embora o hidrogênio seja originalmente introduzido na poça de fusão, isto é, na zona fundida. A explicação para este comportamento considera que, na soldagem destes aços, utiliza-se metal de adição de teor de liga menor e, portanto, menor temperabilidade que o metal base. Assim, no resfriamento durante a soldagem, a austenita tende a se transformar antes que na ZAC. Como o hidrogênio apresenta menor solubilidade e maior difusibilidade na ferrita do que na austenita, esse tende a difundir para as regiões ainda não transformadas da ZAC, causando uma concentração deste elemento nesta região. Além disso, também em função da maior temperabilidade do metal base, a ZAC, particularmente a sua região de crescimento de grão, tende a apresentar estruturas de maior dureza e, portanto, mais sensíveis à fissuração. Este fenômeno se inverte para os aços ARBL, que apresentam baixos teores de carbono e elementos de liga. A Fig. 2.3 mostra de forma esquemática este fenômeno para os aços ARBL e aços ao carbono convencional.

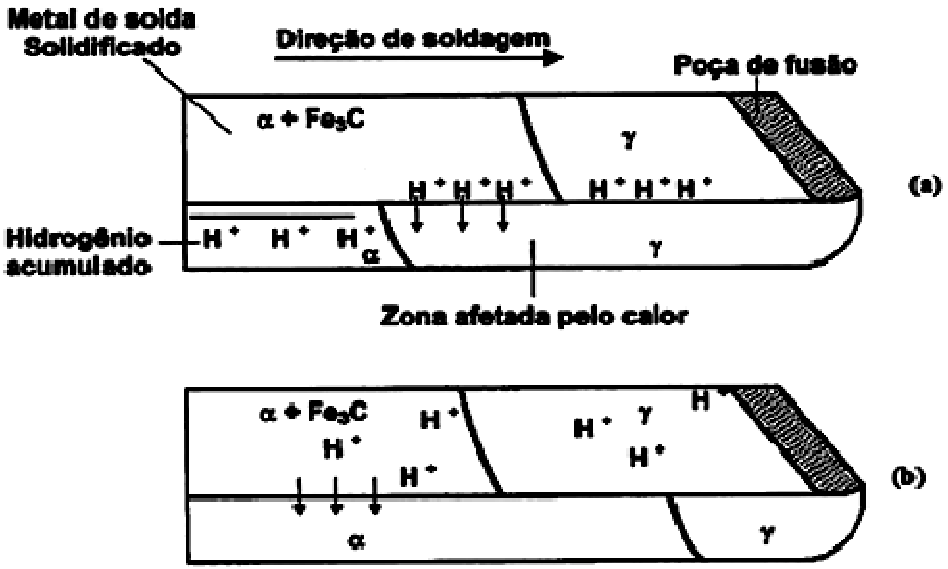


Figura 2.3: Fluxo de hidrogênio da ZF para a ZAC devido a concentração de solubilidade, (a) hidrogênio é absorvido pela poça de fusão e (b) hidrogênio fica retido no metal solidificado.

2.3.2. Tensões e deformações

Tensões de tração são desenvolvidas na região da solda devido à sua contração durante o resfriamento. Em estruturas rígidas, as tensões de contração são intensificadas pela falta de liberdade para acomodação (restrições) da região da solda. Concentradores de tensão, como entalhes formados pela raiz, a margem da solda, mordeduras, inclusões de escória e outras descontinuidades, causam um aumento local das tensões, facilitando a nucleação da trinca. A região da solda pode ainda estar sujeita a tensões de origem externa resultantes do próprio peso da estrutura, da contração de outras soldas, de operações de desempeno e da manipulação da estrutura para transporte.

Silva (2005) comenta que as transformações de fase, contração térmica e restrição mecânica que sofrem as juntas soldadas causam tensões que influenciam na ocorrência de trincas de hidrogênio. As transformações de fase provocam dilatação e o grau desta depende do pico de temperatura atingido durante o processo de soldagem e do tamanho de grão inicial na região. A maior dilatação é obtida na transformação austenita-martensita e corresponde a 4% do volume, o que significa 1,4% de deformação linear, e causa grande variação na tensão residual. A contração térmica se deve à solidificação e à contração do metal já solidificado e ocorre tanto na direção longitudinal como transversal, resultando na deformação da junta.

Segundo Kou (2002) a geometria do cordão de solda pode afetar principalmente na formação de trincas durante a solidificação. Quando um filete côncavo em passe único resfria e contrai, a superfície do metal base é tensionada. Entretanto ao tornar a superfície convexa minimiza este fator. Consequentemente a tração ao longo do metal base é reduzida, diminuindo a tendência de ocorrência de trincas de solidificação. A largura da solda e sua excessiva penetração também influenciam no surgimento de trincas de solidificação.

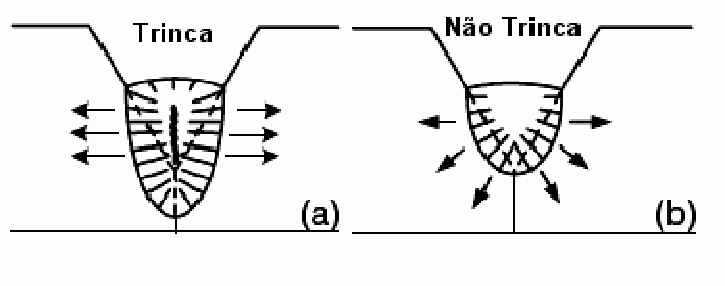


Figura 2.4: Efeito da relação entre penetração e profundidade. (a) relação elevada (b) proporção ideal. Adaptado Kou (2002).

Como apresentado na Fig. 2.4 soldas profundas e estreitas com baixa relação largura-profundidade podem ser susceptíveis ao trincamento no centro da solda.

2.3.3. Microestruturas susceptíveis

A formação de microestruturas susceptíveis à fragilização no metal de solda ocorre com facilidade devido à grande variação nas taxas de resfriamento. A microestrutura da ZAC e ZF pode influenciar significativamente na formação da trinca de hidrogênio. Microestruturas martensíticas, bainíticas, ferritas de contornos de grão e ferritas com segunda fase alinhada são as mais sensíveis a este fenômeno (Grong, 1994).

Em geral, uma microestrutura de elevada dureza na região da solda aumenta a chance de fissuração pelo hidrogênio. Além de sua menor ductilidade e tenacidade, esta microestrutura reduz a capacidade de acomodação das tensões na região da solda. Desta forma, uma microestrutura macia é capaz de tolerar, sem fissuras, uma maior quantidade de hidrogênio do que as mais duras. Para a ZAC de aços carbono e C-Mn, um valor de dureza superior a 325 ou 350 HV indica uma elevada sensibilidade à fissuração (MODENESI, 2002). O constituinte microestrutural mais sensível à fissuração é a martensita, particularmente a de maior teor de carbono e menor ductilidade.

A microestrutura da ZAC dependerá da taxa de resfriamento no intervalo de temperatura em que ocorre a transformação e da temperabilidade do aço. A dureza da ZAC pode ser medida em juntas soldadas atacadas macrograficamente na qualificação de procedimentos ou em estudos de soldabilidade. Alternativamente, ela pode ser avaliada através de fórmulas empíricas como (MODENESI, 2002):

$$H_V = (A - B).e^{-b.\Delta t_{8/5}} + B \qquad (2.1)$$

Onde: Hv é a dureza Vickers máxima da ZAC.

A = 939 (%C) + 284

B = 167 $(CEB)^{2,42}$ + 137

b = exp (-0,13 B + 0,8)

$\Delta t_{8/5}$ é o tempo de resfriamento entre 800 e 500 ℃ e

CEB é uma fórmula de carbono-equivalente devida a Beckert:

$$CEB = \%C + \frac{\%Si}{11} + \frac{\%Mn}{2,9} + \frac{\%Cu}{3,9} + \frac{\%Ni}{17} + \frac{\%Cr}{3,2} + \frac{\%Mo}{3,4} \tag{2.2}$$

Existem, na literatura, várias fórmulas para a estimativa de dureza e para o cálculo do carbono-equivalente para avaliar a influência da composição química do aço na sua temperabilidade ou na sensibilidade à fissuração. Deve-se lembrar que estas fórmulas são empíricas, tendo uma validade restrita para as composições e condições nas quais elas foram obtidas.

2.3.4. Temperatura de formação da trinca de Hidrogênio

A temperatura é outro fator que influência as trincas à frio, e seu efeito nos aços ferríticos ocorre somente em baixas temperaturas numa faixa que varia entre – 100℃ e +200 ℃ e têm seu ponto máximo de atenuação na temp eratura ambiente, motivo pelo qual se deriva o nome de trincamento à frio.

Segundo Modenesi (2002) a temperatura de formação de fissuras pela ação do hidrogênio é próxima da ambiente, pois é em torno desta temperatura que a fragilização causada nos aços pelo hidrogênio é máxima.

Um aumento de temperatura de um metal ou liga metálica no estado sólido implica numa maior vibração dos átomos em torno de sua posição de equilíbrio. Esta vibração facilita a movimentação atômica no estado sólido que é o que se denomina de difusão, e esta será maior quanto maior for a temperatura.

É possível minimizar ou mesmo evitar os efeitos das trincas de hidrogênio com tratamentos térmicos de pré e pós soldagem. Com estes tratamentos pode-se fazer um controle da taxa de resfriamento e manter a temperatura suficientemente alta, dando tempo para a difusão do hidrogênio para fora do Metal de Solda e da ZAC e, simultaneamente, propiciar microestrutura de baixa dureza diminuindo assim a possibilidade de trincas a frio na junta soldada.

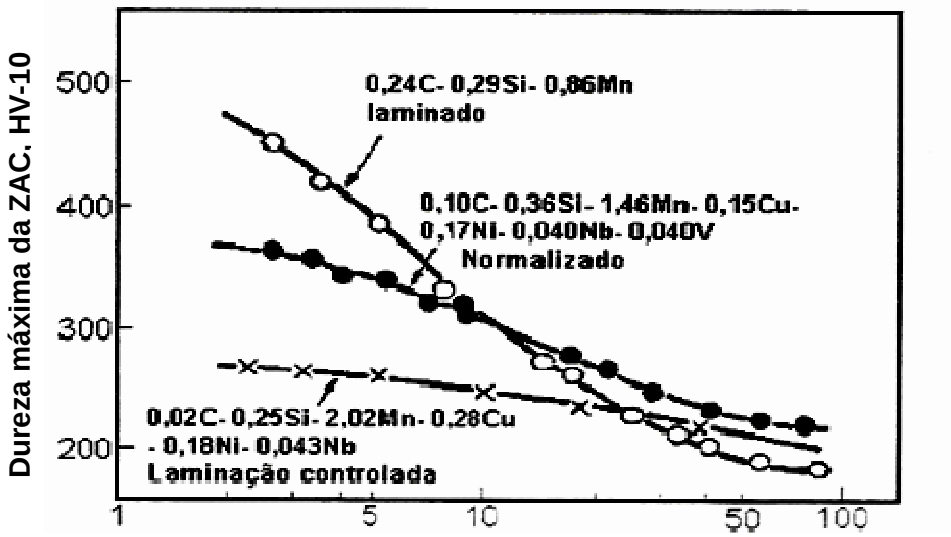
Deste modo, quando se aplica pré-aquecimento na soldagem o objetivo é reduzir a velocidade de resfriamento com a finalidade de modificar a microestrutura, promover a difusão do hidrogênio e modificar o nível de distribuição de tensões residuais. Fica evidente que o pré-aquecimento tem decisiva influência sobre as trincas de hidrogênio. Deve-se observar ainda que a taxa de resfriamento pode também ser controlada através de fatores tais como energia de soldagem aplicada ao processo, espessura, dimensões e propriedades térmicas do Metal de Base.

2.3.5. Influência da dureza na zona afetada pelo calor na trinca de hidrogênio

A microestrutura endurecida da ZAC em juntas soldadas favorece a trinca de hidrogênio. Yurioka e Suzuki (1990) explicam que a dureza da ZAC tem sido usada como um índice imperfeito para analisar a susceptibilidade a trinca de hidrogênio em juntas soldadas.

Existem alguns valores críticos de dureza, citados na literatura, para evitar a trinca de hidrogênio e estes se encontram geralmente entre os 248 HV e 350 HV. Esta dureza da ZAC está diretamente relacionada com o tempo de resfriamento da junta soldada e também com o tipo de material e o histórico dos processos de fabricação do aço base da junta (FALS, 1999).

A Figura 2.5 mostra mudanças na dureza máxima da ZAC de aços com limite de escoamento de 360 MN/m^2 produzidos por diferentes processos, dependendo do tempo de resfriamento entre os 800 e 500 ℃.



Tempo de resfriamento entre 800 e 500 °C.

Figura 2.5: Mudanças na dureza da ZAC de aços com limite de escoamento de 360 MN/m^2, desenvolvidos por diferentes processos: laminado, normalizado e laminação controlada (FALS, 1999).

Observa-se que, no material tratado por laminação e com maior teor de carbono, existe uma grande variabilidade na dureza máxima da ZAC, dependendo do tempo de resfriamento entre 800 e 500 ℃. Para os menores tempos de resfriamento existe uma transformação total em martensita e maior dureza, para os maiores tempos de resfriamento

a microestrutura é geralmente bainítica. As diferenças entre os valores de dureza máxima para cada material se deve ao teor de carbono da martensita transformada.

Existem várias fórmulas na literatura que servem para estimar a dureza da ZAC e todas estão relacionadas com o cálculo do carbono equivalente, um índice que pode servir para descrever o efeito da composição na ocorrência de trincas induzidas pelo hidrogênio analisado posteriormente.

Experiências recentes têm mostrado que na soldagem dos aços modernos (ARBL) existe tendência a trinca de hidrogênio para aços com menores valores de dureza, à medida que o teor de carbono e o carbono equivalente diminuem (FALS, 1999).

2.4. Característica da Trinca de Hidrogênio

As trincas podem ser longitudinais, transversais, superficiais ou sub-superficiais e se propagam tanto inter como intragranularmente em relação aos grãos austeníticios. Trincas sub-superficiais não podem ser detectadas por inspeção visual, necessitando-se, em geral, recorrer, por exemplo, à inspeção por ultra-som. A trinca, frequentemente, se origina a partir de concentradores de tensão, como a margem ou a raiz da solda. Podem ser micro ou macroscópicas, com vários centímetros de comprimento. A fissuração pelo hidrogênio ocorre principalmente na ZAC, na região de crescimento de grão, mas pode também ocorrer na ZF. Fissuração nesta última região tem sido observada mais recentemente, com a utilização de aços com menor carbono-equivalente, mas com alta resistência mecânica, superior a 590 MPa (60 kgf/mm^2) (MODENESI, 2002).

Embora a fragilização pelo hidrogênio tenha sido observada em vários materiais, inclusive em aços inoxidáveis austeníticos, esta forma de fissuração é comum na soldagem de aços transformáveis, particularmente aqueles cujo teor de carbono e de outros elementos de liga é suficientemente elevado para causar o aparecimento de estruturas de elevada dureza como resultado da operação de soldagem (MODENESI, 2002).

2.4.1. Mecanismo de formação da trinca de hidrogênio

Um aspecto característico da trinca de hidrogênio é a sua natureza retardada, isto é, a iniciação e propagação da trinca, que pode acontecer alguns minutos, horas, ou algumas vezes dias após a soldagem ter sido executada. Diferentes mecanismos foram propostos para explicar a formação de trincas de hidrogênio. As teorias mais utilizadas tem sido a da condensação, a da adsorção, a da decoesão e a do amaciamento (MODENESI, 2002).

✓ Segundo a teoria da condensação, os átomos de hidrogênio tendem a se difundir para micro-cavidades e outras descontinuidades microscópicas e sub-microscópicas no aço, onde eles se recombinam na forma molecular. A formação de moléculas de hidrogênio nestes pequenos espaços tende a gerar pressões extremamente elevadas, que podem causar a formação de trincas. À medida que mais hidrogênio se difunde para as micro-trincas, a pressão novamente se eleva e a trinca cresce. Assim, o crescimento da trinca é dependente do tempo, pois é necessário que decorra um certo intervalo para que ocorra a difusão de hidrogênio para as trincas. Este mecanismo não prevê uma fragilização real do material, mas uma solicitação muito localizada e elevada no material nos locais de condensação do hidrogênio. Ele deve estar presente, possivelmente junto com outro mecanismo capaz de causar fragilização, em processos capazes de fornecer hidrogênio continuamente ao material como, por exemplo, durante o processo de empolhamento ("blistering") que pode ocorrer ao aço em contato com soluções de H_2S.

✓ Segundo o mecanismo da adsorção, o hidrogênio se difunde para micro-cavidades no material onde é adsorvido, reduzindo o valor da energia de suas superfícies. Como a propagação de uma trinca é controlada pelo balanço entre a energia disponível no sistema e a necessária para a criação de um novo trecho da trinca, Critério de Griffith (Broek, 1986) e, no caso de uma trinca frágil, esta última é proporcional à energia superficial, a propagação de uma trinca fica facilitada pela presença de hidrogênio. Como no caso anterior, mais hidrogênio precisa se difundir para a trinca para continuar a sua propagação.

✓ A teoria da decoesão supõe que o hidrogênio atômico em solução sólida tenderá a se difundir para regiões onde ocorram tensões triaxiais de tração como na região à frente da ponta de uma trinca ou outro concentrador de tensão e regiões de empilhamento de deslocações. A difusão para estas regiões seria causada por uma melhor acomodação do hidrogênio nestas devido à interação entre o campo de tensão existente à frente do concentrador de tensão e o causado pelo átomo intersticial de hidrogênio. O hidrogênio interage com os átomos de ferro reduzindo a sua energia de ligação e, quando a concentração de hidrogênio na região supera um valor crítico, esta região se torna fragilizada e uma trinca poderá se formar e propagar através dela. Assim, a região de concentração de tensão é deslocada para uma outra posição e os átomos de hidrogênio têm de se difundir novamente. O ciclo de difusão até a ponta da trinca, fragilização e propagação, se repete até que a quantidade de hidrogênio se torne insuficiente ou que a ponta da trinca atinja uma região de maior ductilidade na qual a propagação da trinca é impedida.

✓ A teoria do amaciamento, baseada em trabalho desenvolvido por Beachem, propõe que o hidrogênio se difunde para regiões de concentração de tensão de forma similar a colocada anteriormente, onde este elemento causa uma maior facilidade para a ocorrência de deformação plástica. Como resultado, uma intensa deformação plástica ocorre em uma região muito limitada do material levando a sua falha, cujo mecanismo pode ser tanto dúctil ou frágil. Com a propagação da trinca, um novo ciclo de difusão ocorre, como apresentado no caso anterior.

2.4.2. Morfologia da Trinca de Hidrogênio

De acordo com Ferrandini (1997) o aspecto superficial da trinca de hidrogênio pode existir nos seguintes modos de fratura, coalescência de microvazios ou alveolar (Dimples - CMV), quase clivagem (QC) e intergranular (IG).

O modo de fratura CMV ocorre em grande variedade de metais e ligas e é caracterizado pela nucleação de microvazios que crescem e coalescem com a propagação da trinca. Os microvazios são nucleados em precipitados e inclusões, mais precisamente em carbonetos, nitretos, carbonitretos e inclusões não metálicas (FERRANDINI, 1997).

Segundo Yurioka e Suzuki (1990) o modo de fratura QC é característico da fragilidade por hidrogênio. É observado que a orientação cristalográfica da fratura fragilizada por esse elemento é o plano {110}, similar à fratura frágil ou por clivagem. A fratura por QC apresenta facetas que têm ao redor dimples, o que mostra a existência de deformação plástica na propagação da trinca.

A fratura IG ocorre em alguns casos específicos, quando a força de coesão intergranular diminui ou quando o material é solicitado de forma a propiciar a ocorrência de fluência. O primeiro caso, em geral pode ser resultado da ação de uma atmosfera reativa, da presença de constituintes de baixo ponto de fusão como chumbo, estanho, cádmio, entre outros, ou altos teores de elementos como o enxofre e fósforo na presença de hidrogênio nos contornos de grãos (FERRANDINI, 1997).

Segundo Fals (1999), a cinética e morfologia de crescimento das trincas de hidrogênio são sensivelmente influenciadas pelas características microestruturais e outros fatores como o nível de hidrogênio, temperatura e intensidade de tensões.

Exames de fractografia revelam que trinca de hidrogênio não está associada com um micro-mecanismo único, mas que trincas podem ocorrer por vários modos, clivagem, quase-clivagem, microcavidades coalescentes ou de forma intergranular ao longo dos limites de grãos da austenita. De acordo com a teoria da microplasticidade, hidrogênio nas junções à frente da trinca ajuda a promover quaisquer deformações microscópicas e processos de

crescimento de trinca em microestrutura própria. O tipo de fratura em questão dependerá então da (i) microestrutura da solda, (ii) do nível e intensidade da tensão à frente da trinca e (iii) da concentração de hidrogênio (NEVASMAA, 2003).

Uma característica típica da trinca de hidrogênio é que a fase de propagação da trinca usualmente inclui morfologia de fratura ambas transgranular e intragranular. A maior susceptibilidade para trinca de hidrogênio é tradicionalmente associada com trinca intergranular, e menores com microcavidades coalescentes e formação de cavidades. Com o acréscimo da intensidade de tensão, a transição para clivagem/quase-clivagem intergranular para microcavidades coalescentes ocorrem nos primeiros estágios da fratura, uma transição para o mecanismo de falha envolvem plasticidades desprezíveis associadas com elevados níveis de deformação plástica. Investigações na superfície de peças soldadas trincadas revelam que parte da área cristalina (assemelhando a fratura por clivagem e quase-clivagem) aumenta com o carbono equivalente do metal de solda e, conseqüentemente, com sua resistência (NEVASMAA, 2003).

Trincas de Hidrogênio podem variar seu comprimento, usualmente de poucos mícrons até vários milímetros. Pequenas trincas escapam facilmente da detecção normal por Métodos Não-Destrutivos, como Inspeção por Radiografia, Partícula Magnética ou Ultrassônica. No caso de aço de elevada resistência e metais de solda, micro trincas próximas de alguns décimos de milímetros facilmente crescem para poucos milímetros tornando-se críticas sob o ponto de vista de integridade estrutural do componente (NEVASMAA, 2003).

2.4.3. Medidas para se minimizar a fissuração

De acordo com Nevaasma (2003), os principais fatores causadores da trinca de hidrogênio no metal de solda são os seguintes:

(i) Concentração de hidrogênio suficientemente elevada no metal de solda, usualmente descrita e expressada na solda em termos de conteúdo de hidrogênio difusível.

(ii) Micro-estrutura susceptível, perceptível em termos de fase micro-estruturais, e/ou dureza do metal de solda ou limite de resistência à tração.

(iii) Nível de tensão residual da solda (e também tensões tri-axiais), freqüentemente expresso pelo limite atual de resistência do metal de solda.

O aparecimento das trincas (ou micro trincas) de hidrogênio em soldas multipasses quando o conteúdo de hidrogênio da solda excede certo limite crítico dependente da

resistência do metal de solda, peça, espessura da solda, e/ou tensão residual de soldagem. Estas micro-trincas tendem a localizar principalmente sobre a camada final do metal de solda, no segundo ou terceiro passe quando o hidrogênio da solda é provavelmente permanentemente acumulado. Estas micro-cavidades podem gradualmente aumentar seu comprimento e adiante crescer com característica de macro-trincas transversais no metal de solda (NEVASMAA, 2003).

A presença de trincas é inaceitável ou indesejável em grande número de componentes soldados. No caso da trinca de hidrogênio, o problema é ainda complicado pela ocorrência de um período de tempo entre a soldagem e o aparecimento da trinca e pela dificuldade, em várias situações, de se detectar a sua presença. O risco de fissuração pelo hidrogênio é minimizado atuando-se em um ou mais dos fatores que favorecem sua formação (MODENESI, 2002). De uma forma resumida, estas medidas podem ser agrupadas em:

- ✓ Seleção de um material menos sensível;
- ✓ Redução no nível de tensões;
- ✓ Seleção do processo de soldagem;
- ✓ Controle das condições de resfriamento, e
- ✓ Realização de um pós-aquecimento ou tratamento térmico após a soldagem.

Segundo Kou (2002) soluções para os problemas de trinca de hidrogênio associados com a zona afetada pelo calor podem ser agrupadas em quatro categorias: susceptibilidade do metal de solda, nível de energia de soldagem, grau de restrição e metal base.

Para Modenesi (2002) a seleção de um metal base, em termos da prevenção da fissuração pelo hidrogênio, baseia-se na escolha de um material que apresente uma menor temperabilidade. Logicamente, esta seleção é limitada por fatores como o custo do material e a resistência mecânica mínima exigida para a aplicação. A soldabilidade, e em particular a resistência à fissuração pelo hidrogênio, pode ser melhorada pela redução do teor de carbono e do carbono-equivalente do material e pela utilização de aços com um baixo limite de escoamento e alta ductilidade.

Um baixo teor de enxofre também é recomendável para melhorar a soldabilidade geral do aço. Contudo, existem indícios de que níveis muito baixos (< 0,015%) aumentam a sensibilidade à fissuração, embora alguns trabalhos não confirmem esta suposição (SUZUKI, 1982). Fórmulas de carbono equivalente são usadas comumente para estimar a sensibilidade à fissuração pelo hidrogênio de um aço. Nestas, a influência relativa dos diferentes elementos de liga do aço é colocada em termos de equivalentes de carbono, de modo que, quanto maior o valor do carbono-equivalente de um aço, maior a sua

sensibilidade à fissuração. Uma fórmula muito usada é a recomendada pelo IIW (MODENESI, 2002):

$$CE(IIW) = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%Ni + \%Cu}{15} + \frac{\%Cr + \%Mo + \%V}{5} \qquad (2.3)$$

Segundo Yurioka (1982 apud MODENESI, 2002), esta fórmula, sendo mais antiga, é adequada para aços carbono e carbono-manganês cujo teor de carbono é superior a 0,16%. Para aços com menores teores de carbono, uma fórmula devida a Ito seria mais adequada:

$$CE(Ito) = \%C + \frac{\%Si}{30} + \frac{\%Nn + \%Cu + \%Cr}{20} + \frac{\%Ni}{60} + \frac{\%Mo}{15} + \frac{\%V}{10} + 5\%B \qquad (2.4)$$

Existem na literatura diversas expressões de carbono equivalente, desenvolvidas para diferentes aplicações e faixas de composição química dos aços. Maiores informações podem ser obtidas em Marques et al. (1995).

Modenesi (2002) afirma que o nível de tensões residuais pode ser reduzido pela adoção de diferentes medidas, inclusive no projeto do componente, para evitar condições com uma restrição elevada na solda. Deve-se evitar a presença de soldas muito próximas umas das outras ou seqüências de montagem que causem tensões elevadas de origem externa. Na execução das soldas, a adoção de seqüências especiais de deposição e cuidados para se evitar a presença de concentradores de tensão como mordeduras, reforço excessivo e falta de penetração na raiz também ajuda a minimizar o nível de tensões localizadas na solda e, portanto a fissuração.

Além disso, a sensibilidade do aço a uma trinca pode ser influenciada por outros fatores como energia de soldagem e espessura e não somente sua composição. Outros fatores que podem ter influência importante sobre a trinca de hidrogênio são a dureza e a susceptibilidade do aço, projeto da estrutura, hidrogênio contido no metal de solda e a quantidade de hidrogênio difusível no metal base (HAKANSSON, 2002).

A capacidade de seleção de processos de soldagem é muitas vezes limitada por considerações práticas e econômicas. Exigências de propriedades mecânicas, particularmente tenacidade, podem forçar, por exemplo, a utilização de soldagem manual em lugar de soldagem a arco submerso. De uma maneira geral, processos de soldagem que trabalham com um elevado aporte térmico (como a soldagens a arco submerso e por eletroescória) apresentam menores risco de fissuração pelo hidrogênio. Na soldagem de aço de baixo carbono, particularmente para chapas de pequena espessura, eletrodos

revestidos celulósicos e rutílicos podem ser usados. Contudo, para aços ligados e de alta resistência e para peças de grande espessura, eletrodos básicos devem ser utilizados (MODENESI, 2002).

Para Vieira (1990), o hidrogênio potencial é o total de hidrogênio presente nas mais variadas formas em consumíveis de soldagem e que pode potencialmente entrar, na solda, via poça de fusão. De forma geral quanto maior o teor potencial de hidrogênio, mais pronunciado o teor real de hidrogênio na solda.

O controle do nível de hidrogênio potencial é muito importante para evitar problemas de fissuração na soldagem com eletrodos e fluxos básicos. Este controle envolve cuidados na armazenagem e utilização destes consumíveis. Material em embalagem fechada deve ser armazenado em ambiente quente e seco para minimizar a absorção de umidade. Uma vez que a embalagem é aberta, os consumíveis devem ser guardados em estufa até o seu uso. Falta destes cuidados leva à absorção de umidade e, desta forma, a um maior nível de hidrogênio potencial. Este pode ser novamente reduzido, submetendo-se os consumíveis a um tratamento de ressecagem a temperaturas entre 250 a 450 ℃ de acordo com instruções do seu fabricante. Além da absorção de umidade, contaminação do metal de adição ou da peça por óleo e graxa é outra causa comum de uma maior presença de hidrogênio na solda (MODENESI, 2002).

Outra forma de reduzir o teor de hidrogênio é pelo controle das condições de resfriamento do cordão durante a soldagem, por exemplo, utilizar pré-aquecimento ou um maior aporte térmico de soldagem.

O pré-aquecimento consiste em aquecer parte ou toda a estrutura até uma temperatura adequada antes do início de sua soldagem. Este procedimento diminui os gradientes térmicos, causando uma redução da velocidade de resfriamento, possibilitando a formação de uma estrutura mais macia na ZAC. Além disso, este procedimento diminui a umidade superficial da peça, que pode ser uma fonte de hidrogênio. Na soldagem multipasses, a temperatura entre passes também deve ser controlada, evitando-se que atinja valores tanto elevados, o que pode causar problemas de tenacidade, com valores baixos, por causa da fissuração. Pode-se aquecer uniformemente toda a peça ou, mais comumente, apenas a região da junta. Neste caso, deve-se garantir que uma faixa suficientemente larga do material seja aquecida até uma temperatura adequada (por exemplo, 75 mm de cada lado da junta) (MODENESI, 2002).

A escolha da temperatura correta de pré-aquecimento não é simples devido ao grande número de variáveis envolvidas (custo, composição do aço, espessura e tipo de junta, teor de hidrogênio, nível de restrição, forma de pré-aquecimento, etc.). De uma maneira geral,

esta temperatura é escolhida com base em normas técnicas, testes de fissuração, experiência prévia ou, simplesmente, adotando-se regras conservadoras.

O uso de um maior aporte térmico diminui as velocidades de resfriamento durante a soldagem, podendo ser suficiente para reduzir a chance de formação de trincas, além de, em geral, resultar em uma redução no tempo de soldagem. Vários fatores, contudo, podem limitar a capacidade de se aumentar o aporte térmico em uma dada aplicação como a posição de soldagem, o tipo de processo e consumível de soldagem usado, a espessura da peça e as propriedades requeridas para a junta.

O pós-aquecimento é usado em casos particularmente sensíveis à fissuração e consiste em manter aquecido a junta ou toda a peça por um período de tempo após a soldagem, para permitir a evolução do hidrogênio, sendo somente depois resfriada à temperatura ambiente. Em casos extremos, a peça pode ser submetida a um tratamento térmico imediatamente após o pós-aquecimento de modo a eliminar os fatores causadores de fissuração antes que a peça atinja a temperatura ambiente (MODENESI, 2002).

2.5. Ensaios de Fissuração

Um grande número de trabalhos tem sido realizado há várias décadas para a compreensão e a caracterização das diversas formas de fissuração que podem ocorrer em uma solda. Aspectos como a influência da composição química da solda ou do metal base, dos parâmetros de soldagem e dos níveis de tensão têm sido estudados. Por outro lado, a tendência de uma trinca se formar em um dado componente soldado é um evento complexo que depende de inúmeros fatores, vários deles de difícil caracterização. Como conseqüência, um grande número de ensaios de fissuração (ou de soldabilidade) tem sido desenvolvido por diferentes autores.

Alguns ensaios foram desenvolvidos para avaliar uma forma de fissuração em uma dada aplicação bem específica. Estes ensaios tentam reproduzir com uma montagem, em geral, de pequenas dimensões, as condições existentes na estrutura soldada de interesse. Vários ensaios fornecem resultados apenas qualitativos (do tipo “trinca/não trinca”). Outros ensaios fornecem resultados quantitativos, contudo, na maioria dos casos, estes resultados não podem ser usados diretamente para prever se trincas poderão se formar durante a soldagem de uma estrutura real (FALS, 1999). Apesar destas limitações, ensaios de fissuração são usados em diferentes aplicações, por procedimento de soldagem, a homologação de consumíveis de soldagem e estudos mais acadêmicos dos mecanismos que controlam certa forma de fissuração.

Alguns ensaios são bastante simples, podendo ser realizados em qualquer oficina e com equipamentos ou ferramentas de baixo custo. Consistem em realizar uma solda em uma junta simples e, depois, rompe-la de alguma forma e examinar a superfície de fratura para se determinar a presença de descontinuidades de soldagem, inclusive trincas. Devido à sua simplicidade, os ensaios em juntas simples são comumente requeridos em normas de fabricação ou em especificações de consumíveis de soldagem.

Outros ensaios utilizam uma junta especial capaz de gerar, na solda, tensões transientes e residuais que podem levar à formação de trincas. Como estas tensões se originam da própria montagem, este tipo de ensaio é comumente chamado de ensaio auto-restringido. Finalmente, existem ensaios nos qual a solicitação é imposta por um dispositivo externo que aplica uma carga ou deformação controlada ao corpo de prova, durante ou após a soldagem. São conhecidos como testes com restrição externa. A Tab. 2.4 apresenta um sumário dos principais testes de susceptibilidade a trinca citado na literatura. Maiores detalhes sobre a forma de realização dos testes podem ser encontrados nos trabalhos de Fals (1999) e Silva (2005).

Tabela 2.4: Exemplos de testes de trinca de hidrogênio em soldagem (Silva, 2005)

Teste	**Localização da trinca**
Augmented strain cracking - ASC	ZAC/ZF
Constant load rupture - CLR	ZAC
Controlled thermal severity - CTS	ZAC
Gapped bead on plate - G-BOP	ZF
Implant test	ZAC/ZF
Lehigh restraint test	ZAC/ZF
Longitudinal bend-tensile cracking - LB-TRC	ZF
Longitudinal bend cracking - LBC	ZF
Rigid restraint cracking - RRC	ZAC/ZF
Tensile restraint cracking - TRC	ZAC/ZF
Y-Groove - Tekken	ZAC/ZF

Na soldagem em passe único, a abertura da raiz ou a preparação da face prevêem uma concentração de tensão no que diz respeito a tensões transversais na solda. Isto leva a fissuras longitudinais pelo hidrogênio no metal de solda que é muitas vezes a forma predominante de trincas em aços de alta resistência e baixa liga onde é possível encontrar não somente soldagens em passe único, mas também soldas multipasses no passe de raiz. Muitos dos testes de trincamento de hidrogênio, como o ensaio Tekken em Y-Oblíquo e

Teste de Implante se destinam a avaliar predominantemente trincas na ZAC e não somente no metal de solda (NEVASMAA, 2003).

A revisão dos testes para determinar à susceptibilidade a trinca de hidrogênio será limitado aos ensaios utilizados para o desenvolvimento desta pesquisa, os quais são Teste G-BOP, Teste Tekken e o Teste de Implante.

2.5.1. Teste G-BOP

Dentre os vários testes de soldabilidade utilizados para avaliar a susceptibilidade de juntas soldadas quanto à trincas de hidrogênio, o teste G-BOP (Gapped Bead-on-Plate) apresenta-se com um grande potencial para avaliar trincas de hidrogênio no metal de solda. O teste G-BOP foi desenvolvido em 1974 por Graville e McParlan (1974), consiste de dois blocos, um dos quais tem um entalhe usinado. Em adição ao entalhe, as faces a serem unidas dos dois blocos são, também, usinadas para dar maior sustentação. Os blocos são fixados um ao outro para prevenir que não ocorra a rotação de um deles e um cordão de solda é depositado sobre os blocos na região do entalhe, conforme é mostrado na Fig. 2.6 (COOPER et al., 2004).

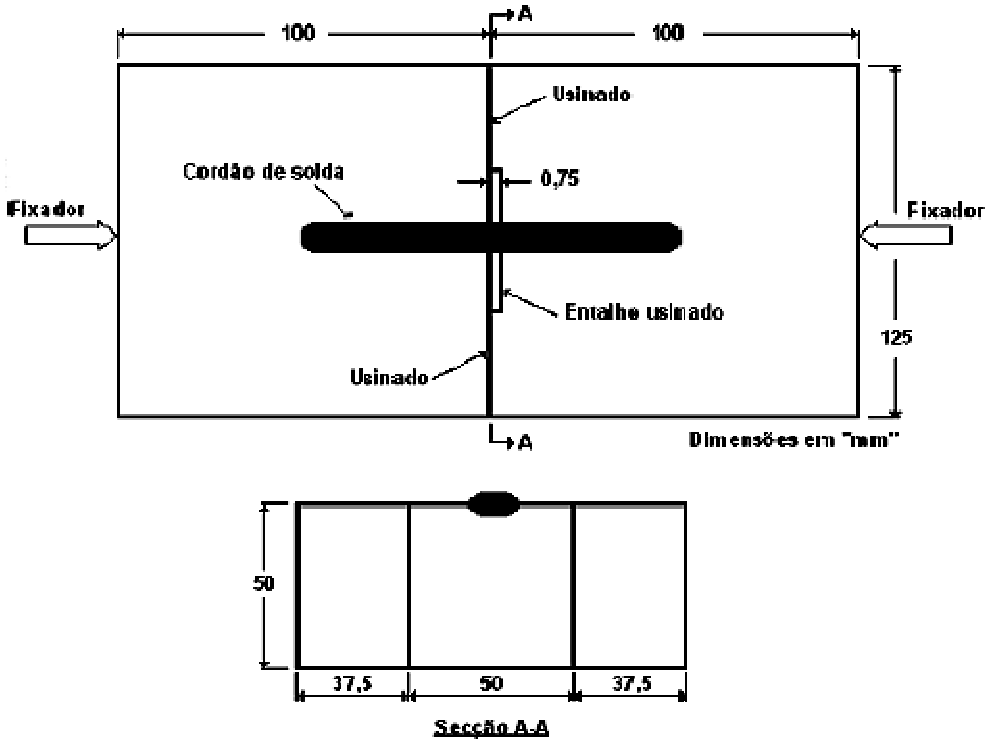


Figura 2.6: Esquema representativo do teste Gapped Bead-on-Plate (G-BOP) mostrando o cordão de solda depositado (McParlan & Graville, 1975).

Após a soldagem os blocos são mantidos fixos por 24 horas. Em seguida o fixador é retirado e a porção de solda sobre o entalhe usinado é aquecido por uma tocha de oxigás, até o rubro. O corpo de prova é deixado em repouso até o seu resfriamento e em seguida aberto. O aquecimento tem a função exclusiva de revelar a região trincada. Quando a seção transversal (região da quebra) do cordão de solda apresentar duas superfícies, uma colorida (oxidada) que corresponde à trinca de hidrogênio e outra mostrando uma fratura recente, resultante da abertura do corpo de prova, significam que uma trinca estava presente no cordão de solda antes do aquecimento (SILVA, 2005).

O teste G-BOP é auto-restritivo, pois a grande espessura dos blocos aplica uma alta taxa de resfriamento no cordão de solda ensaiado, que é responsável pela magnitude da tensão residual na raiz do cordão de solda (ADONYI, 2003).

Adonyi (2003) e Silva (2005) citam que o teste G-BOP tem sido escolhido dentre os testes de soldabilidade por apresentar um grande potencial para avaliar trincas de hidrogênio no metal de solda, tendo como vantagens: baixo custo; simplicidade e confiabilidade na quantificação da susceptibilidade ao trincamento na ZF e aplicação onde se deseja obter níveis de temperatura de pré-aquecimento.

Existem na literatura (McParlan e Graville, 1974; Silva, 2005; Adonyi, 2003) ensaios com o G-BOP com diferentes dimensões dos blocos de testes, tanto em largura como em espessura, não ficando claro a influência de pequenas dimensões na largura e espessura para os testes realizados. Além disso, não foi possível observar na literatura porque um entalhe de 0,75 mm é escolhido.

Uma outra questão que pode ser levantada é quanto à influência do calor usado para a coloração da trinca sobre os resultados dos testes. McParlan e Graville, (1974) realizaram experimentos para medir a resistência elétrica na seção transversal de cordões de solda ensaiadas antes e após a aplicação de calor para colorir a trinca. Eles concluíram que o calor de coloração não alterou o tamanho da trinca e nem induziu a ocorrência de novas trincas.

Os resultados do teste G-BOP são quantificados como a porcentagem do total da área da seção transversal do cordão de solda que apresenta a trinca de hidrogênio, representado por uma região colorida.

Silva (2005) comenta as várias vantagens do teste G-BOP para avaliar a susceptibilidade à trinca de hidrogênio, entre elas está: baixo custo, quando comparado a outros testes; simplicidade e confiabilidade na quantificação da susceptibilidade à trinca na ZF; e a sua aplicação para determinar um nível mínimo de temperatura de pré-aquecimento em junta soldada. Silva (2005) cita também a existência de vários modelos empíricos

especificamente desenvolvidos para determinar a temperatura de pré-aquecimento em junta soldada utilizando o teste G-BOP.

2.5.2. Ensaio Tekken

O Ensaio Tekken foi desenvolvido no Japão, tendo se tornado um dos mais utilizados para a avaliação de problemas de fissuração pelo hidrogênio em aços estruturais de alta resistência, tanto na ZF como na ZAC, sendo definido pela Norma Industrial Japonesa JIS – Z – 3158. Esta popularidade se justifica por ser este ensaio considerado um dos mais sensíveis à fissuração pelo hidrogênio, por permitir a avaliação e medição de seus resultados de uma forma relativamente simples e por apresentar uma razoável repetibilidade de resultados. A Figura 2.7 ilustra a região de teste do corpo de prova de cerca de 80 mm. Decorrido um período de tempo após a soldagem, usualmente 24 horas, amostras metalográficas são retiradas de seção transversal da solda de teste e a presença ou não de trincas é observada. As trincas são observadas principalmente na raiz da solda, tanto na ZAC como na ZF.

As características que proporcionam ampla utilização desse ensaio são: facilidade de elaboração, baixo custo, versatilidade e boa reprodutibilidade. É aplicado no estudo de trincas de hidrogênio em aços estruturais e de alta resistência, bem como na relação dos procedimentos de soldagem. Seu sucesso de aplicação é estendido para aplicações especificas, tais como em aços para tubulação de gás ou petróleo ou, ainda para avaliação de estruturas submarinas. Pode-se considerar que a maior limitação deste ensaio é o fato de não avaliar os níveis de tensão imposta à solda como descreveu Alcântara (1982) e Suzuki (1986).

Este ensaio apresenta uma variação na geometria dos corpos de prova que está relacionada com a localização do inicio e propagação das trincas de hidrogênio, isto é, o ensaio com Y oblíquo apresentado na Figura 2.7, de acordo com Alcântara (1987), é mais adequado a ser aplicado para estudos das trincas de hidrogênio na ZAC, avaliando assim o metal de base (MB), enquanto que no Y simétrico é aplicado para avaliar essas trincas no metal de solda (ZF).

Estudos realizados variando o formato do chanfro, posição de abertura da raiz e temperatura de pré-aquecimento demonstraram a dependência da ocorrência de trincas de hidrogênio com esses fatores. Entretanto, constatou-se que, nos ensaios, a trinca iniciava-se na raiz da solda, devido a uma severa deformação plástica imposta pelo efeito de entalhe na raiz e por uma possível concentração de hidrogênio que ocorre na direção de zonas altamente deformadas de acordo com Granjon (1975).

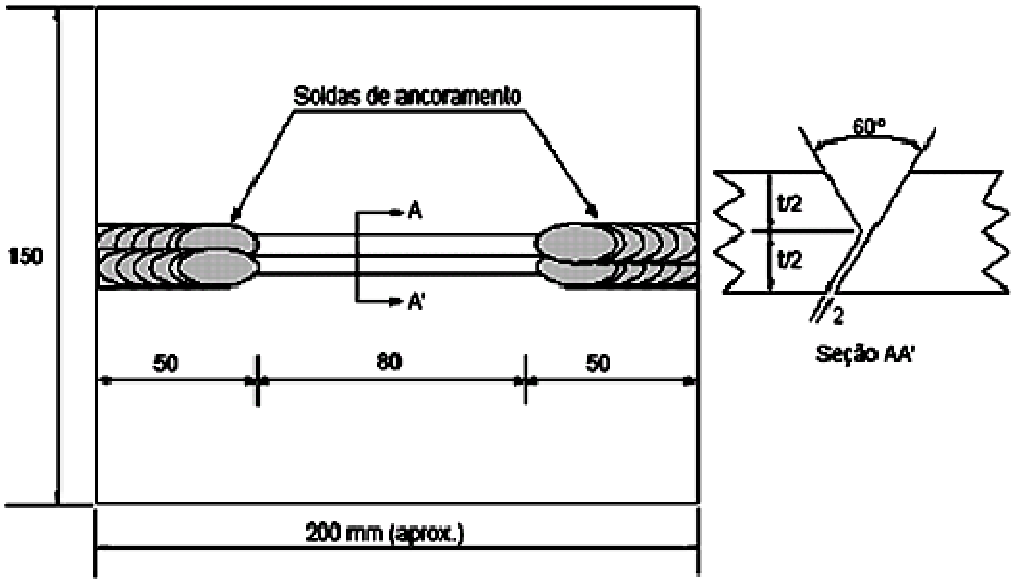


Figura 2.7: Corpo de prova do ensaio Tekken (esquemático). t - espessura.

2.5.3. Ensaio de Implante

O ensaio de implante foi desenvolvido pelo Institut de Soudure (França) como um método para se obter informações quantitativas sobre a sensibilidade à fissuração pelo hidrogênio do metal de base, mais especificamente da ZAC. Não é um teste auto-restritivo, ou seja, as tensões impostas ao corpo de prova provêm de uma fonte externa. Este tipo de ensaio é bastante utilizado pela facilidade de operação e precisão nos resultados. Tamaki e Suzuki (1983) citam alguns méritos desta técnica de teste: a ZAC é obtida pela condição de soldagem real; vários valores de tensão residual podem ser simulados pela aplicação de cargas externas; e o ensaio é considerado representativo com poucos corpos de prova.

O equipamento do teste, de uma forma geral, é composto por dois sistemas interativos: sistema de tração, composto por um sistema hidráulico e pela estrutura metálica do equipamento, com a função de tracionar o corpo de prova, simulando um estado de tensões internas tal como se verifica em juntas soldadas; sistema de monitoramento, com a função de monitorar o alívio de tensões, assim como a eventual ocorrência de trincas (MARTINS, 1995).

O procedimento desse teste resume-se basicamente na utilização de corpo de prova cilíndrico entalhado, com uma de suas extremidades implantada em uma placa de teste, de mesmo material, através de um furo com ajuste folgado, onde é efetuada a soldagem (Fig. 2.8). A outra extremidade do corpo de prova é fixada à estrutura do equipamento de teste, onde após a soldagem é aplicada uma carga inicial pré-determinada, medida pela célula de carga que fica entre o corpo de prova e a estrutura, conectada através de uma porca. A

carga é somente aplicada ao corpo de prova (por um sistema hidráulico) quando o termopar, instalado próximo a ZAC (Fig. 2.8), estiver indicando 150°C, de forma a simular um estado de tensão análogo ao verificado em juntas soldadas na região da ZAC em que ocorre a trinca de hidrogênio.

O corpo de prova do implante tem um diâmetro de 6 a 8 mm e um entalhe de 1 mm de profundidade colocado em posição tal que este fique localizado na ZAC, na região de crescimento de grão, após a soldagem do conjunto (Fig. 2.9). Para facilitar o posicionamento do entalhe nesta região, pode-se usinar alternativamente uma rosca na extremidade do implante que será colocada no furo (Fig. 2.10). As dimensões dos corpos de prova são, em geral, baseadas na Norma Francesa para o Teste de Trinca de Hidrogênio (NF A 89-100).

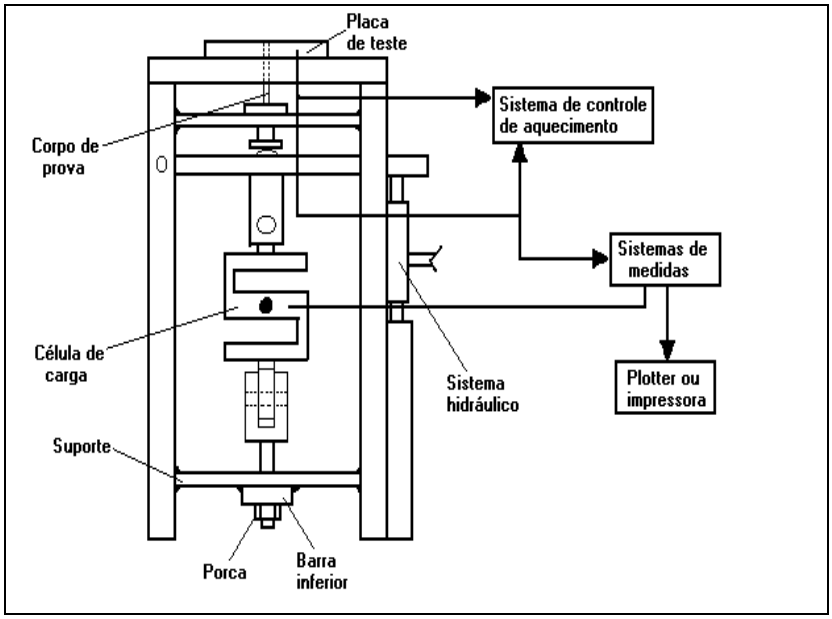


Figura 2.8: Equipamento de teste de implante do LAPROSOLDA/UFU.

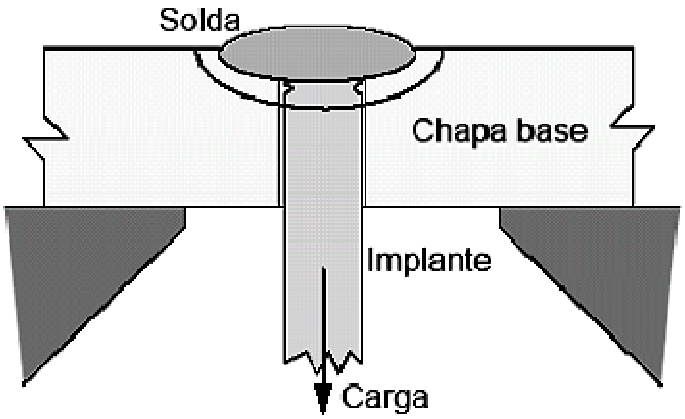


Figura 2.9: Esquema do Ensaio de Implante.

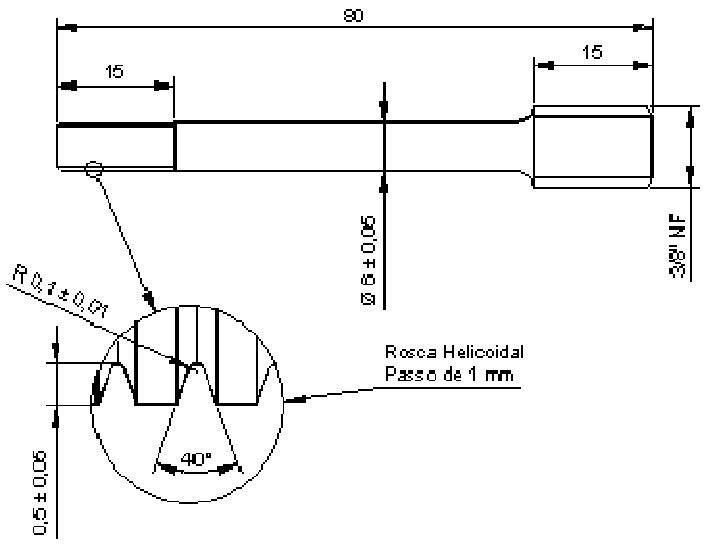


Figura 2.10: Corpo de prova com rosca para o teste de implante.

Apesar do equipamento de teste apresentar variações em termos de dimensões estruturais, a placa de teste não tem sido substancialmente alterada. Em geral esta placa é projetada para obter o máximo de aproveitamento, tendo como característica básica um furo de 6,0 mm para o corpo de prova e um furo de menor diâmetro (2,5 mm) para o termopar, conforme esquema mostrado na Fig. 2.11.

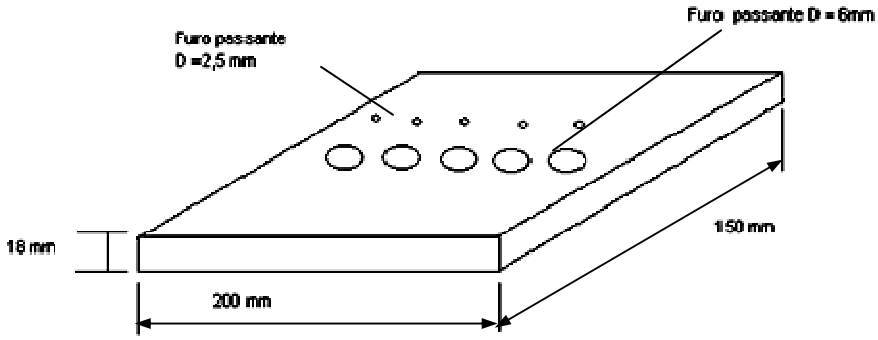


Figura 2.11: Ilustração Placa de aço com furos passantes.

Os resultados do teste de implante podem ser expressos na forma de gráficos de carga aplicada no corpo de prova com o tempo de ruptura ou de ensaio. Quanto maior a carga aplicada no corpo de prova sem a ocorrência de ruptura menor é a susceptibilidade do material a trinca de hidrogênio.

O teste de implante demonstra ser uma ferramenta adequada para avaliar a susceptibilidade de um material à trinca de hidrogênio, principalmente por fornecer dados quantitativos de cargas (tensão aplicada no corpo de prova). Entretanto, apesar da soldagem poder ser realizada com as mesmas condições da prática, existe ainda fatores importantes que não são levados em conta, como por exemplo, a geometria da junta e o número de passes na soldagem. Com isso, os valores de tensão obtidos devem ser considerados como valores relativos, úteis para a comparação da susceptibilidade à trinca de hidrogênio entre os materiais submetidos ao mesmo teste e condição de soldagem.

2.6. Fundamentos da Emissão Acústica (EA)

A técnica de Emissão Acústica vem sendo estudada desde os anos 60, utilizada principalmente como ferramenta de monitoramento de estruturas mecânicas em ensaios não destrutivos (crescimento de trincas). Nesta área, várias pesquisas têm sido realizadas para detectar a formação e crescimento da trinca durante ou após a soldagem, ou mesmo em serviço. Na área da ciência dos materiais, Liu e Asibu (1990) citam que a EA é utilizada para detectar a formação da martensita, nucleação e crescimento de grãos, transformação de fase. Outra área de grande utilização é a técnica de monitoramento de operações de usinagem (BALDO, 1994).

O termo EA é definido tanto para onda elástica gerada dentro de um sólido, devido ao processo de deformação e fratura, como para a técnica empregada em sua medida. Liu e Asibu (1990) refere-se à EA como ondas de tensões elásticas geradas pela liberação de energia de deslocamento proveniente de fontes localizadas dentro do material.

Ondas de EA podem ser geradas por uma grande quantidade de mecanismos, como citado anteriormente. A onda de EA gerada devido à fratura é atribuída à formação e propagação de trincas na estrutura cristalina. Com isso, espera-se que a análise do sinal de EA proporcione informações sobre o evento. A onda de EA propaga-se nos materiais com a mesma velocidade de uma onda acústica (velocidade do som). Tais ondas não são audíveis, pois sua faixa de freqüência varia de 50 kHz a 1200 kHz. A propagação destas ondas em um material pode ser captada por sensores adequadamente posicionados, chamados de sensores de EA (BEATTIE, 1983).

O sensor de EA é um dispositivo (“transducer”) que gera um sinal elétrico quando estimulado por movimentos da superfície em forma de onda produzida pela fonte de EA. Este sinal elétrico pode então ser amplificado e processado para proporcionar as

informações sobre o evento. O sensor de EA é composto basicamente de um cristal (trandutor piezoelétrico) colocado em uma base de epóxi (placa de contato).

Beattie (1983) comenta que a sensibilidade do sensor é governada pela sensibilidade intrínseca do material do piezoelétrico e pela dimensão (formato) do elemento piezoelétrico. Os cristais piezoelétricos mais usados são os quartzos, sal rochelle e o dihidrogenofodfato de amônia.

2.6.1. Característica do sinal de emissão acústica

A característica do sinal de Emissão Acústica (sinal elétrico produzido pelo sensor) depende do mecanismo que a gerou, do material através do qual ela se propagou e do sensor que transformou a onda em sinal (FERRARESI, 1996).

Dois importantes problemas com relação à Emissão Acústica são mencionados. Primeiro é a dificuldade no desenvolvimento de modelos teóricos adequados, devido às várias fontes geradoras de Emissão Acústica e sua natureza aleatória com relação aos sinais de pico. A segunda complicação está na onda de Emissão Acústica que se movimenta através de um corpo físico, sendo que, sempre que tiver alguma interface da geração até o sensor, pode haver interferência no sinal (FERRARESI, 1996).

Uma das principais vantagens da utilização do sinal de EA na formação da trinca está relacionada a alta faixa de freqüência do sinal, de aproximadamente 50 a 1200 KHz, que fica bem acima das freqüência de vibração mecânica ou de outros ruídos que envolvem a maioria dos ambientes de teste. Entretanto, este sinal de alta freqüência é alternado e a sua análise direta é geralmente pouco informativo dado à dificuldade de se interpretar um sinal de tal natureza. Além disso, para a aquisição e armazenamento do sinal de Emissão Acústica bruto, necessita-se de um aparato computacional que tenha uma alta freqüência de aquisição e com grande capacidade de memória. Desta forma, torna-se necessário efetuar um tratamento deste sinal através de outro método (FERRARESI, 1996).

Uma forma de contornar o problema de armazenamento do sinal de alta freqüência é a utilização da faixa de baixa freqüência presente na ampla faixa de freqüências de sinal bruto da Emissão Acústica. Por exemplo, pela passagem do sinal de Emissão Acústica bruto por um circuito retificador passa-baixa ou por um voltímetro RMS (Root Mean Square). Desta forma, o sinal de saída tem uma freqüência menor que o sinal bruto (BALDO, 1994).

A forma mais simples de tratamento do sinal de EA é através da amplificação e filtragem desse sinal, seguido de processamento em voltímetro RMS para o armazenamento em computador com placa de conversão A/D. Esta forma de aquisição do sinal é uma das mais utilizada no monitoramento de operação de usinagem dos metais. O voltímetro RMS

determina a raiz quadrada da média quadrática do sinal de EA. A Figura 2.12 mostra o efeito do processo RMS sobre o sinal bruto (FERRARESI, 1996).

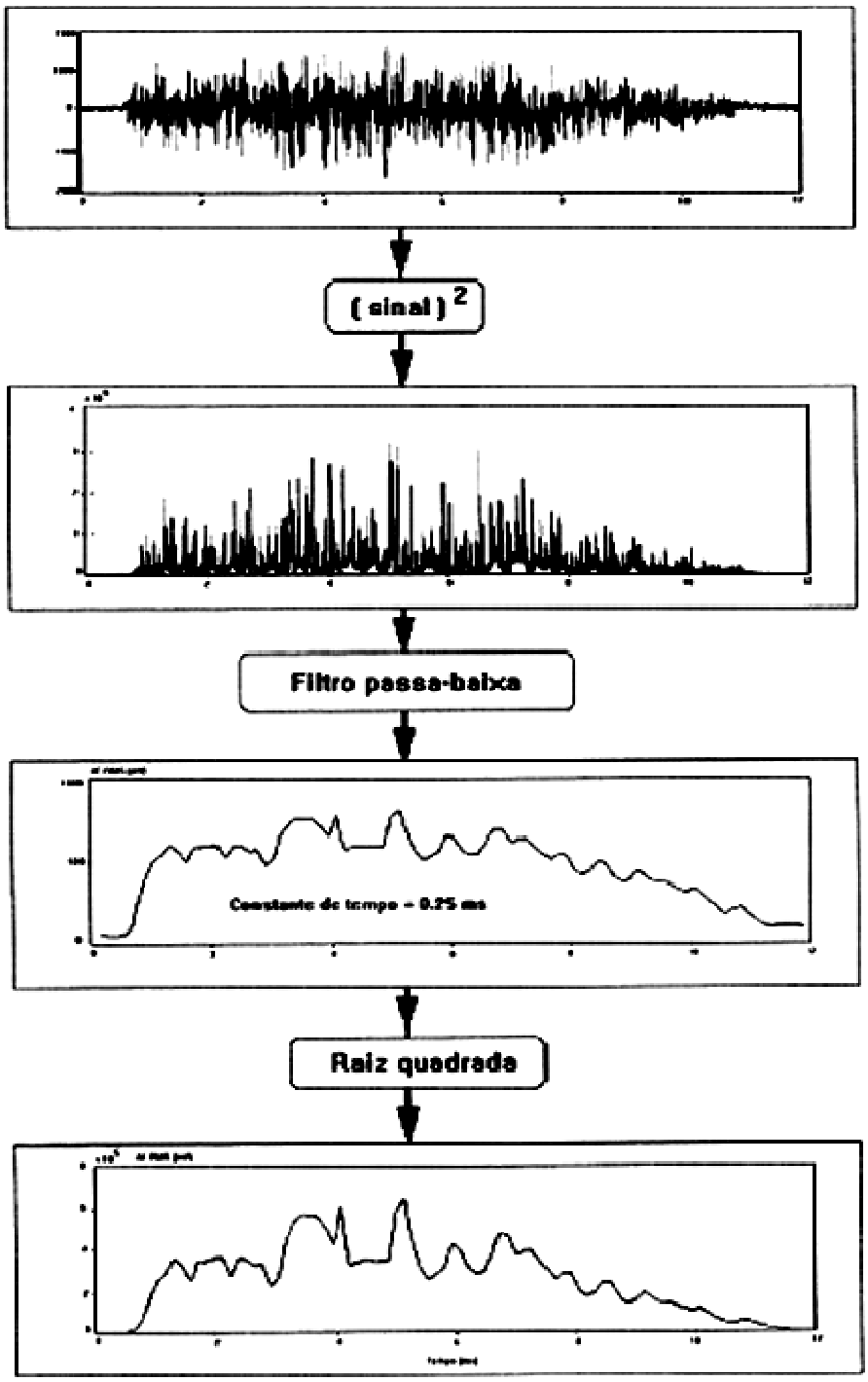


Figura 2.12: Efeito do processo RMS sobre um sinal bruto de Emissão Acústica (Fonte: Ferraresi, 1996).

2.6.2. Utilização e aplicação da Emissão Acústica

Baldo (1994) comenta que a técnica de monitoramento de eventos via EA apresenta um grande potencial de aplicação no campo industrial, devido às várias vantagens, tais como o baixo custo, alta sensibilidade, flexibilidade de montagem, robustez, pequeno tamanho do sensor, simples instalação e processamento de sinal.

Os resultados do ensaio por Emissão Acústica não são convencionais. Na realidade este método não deve ser utilizado para determinar o tipo ou tamanho das descontinuidades em uma estrutura, mas sim, para se registrar a evolução das descontinuidades durante a aplicação de tensões para as quais a estrutura estará sujeita, desde que as cargas sejam suficientes para gerar deformações localizadas, crescimento do defeito, destacamento de escória, fricção, ou outros fenômenos físicos.

Aplica-se a emissão acústica quando se quer analisar ou estudar o comportamento dinâmico de defeitos em peças ou em estruturas metálicas complexas, assim como registrar sua localização. É o caso da monitoração de cilindros contendo gás sob pressão para abastecimento, do teste hidrostático e pneumático em vasos de pressão, teste de fadiga, controle de processos de soldagem, e ainda da caracterização de materiais.

CAPÍTULO III

MATERIAIS, EQUIPAMENTOS E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Neste capítulo é apresentada uma descrição do material de base, dos consumíveis de soldagem e dos equipamentos utilizados. Será descrito também a metodologia utilizada para as etapas que foram realizadas durante o desenvolvimento do trabalho.

3.1. Metal de Base

Para os ensaios G-BOP e Tekken empregou-se como Metal Base uma chapa de aço DNV E40 Z 25, com espessura de 37,50 mm. A composição química desse material é descrita na Tab. 3.1, sendo que as propriedades mecânicas apresentadas a seguir foram fornecidos pelo fabricante do material.

Tabela 3.1: Composição Química do Aço DNV E40 Z 25.

C	**Mn**	**P**	**S**	**Si**	**Al**	**Cu**	**Cr**	**Ni**	**Nb**	**V**	**Ti**
0,16	1,48	0,015	0,005	0,464	0,020	0,006	0,021	0,006	0,045	0,061	0,012

- ✓ Tensão Limite de Escoamento: 427,51 MPa;
- ✓ Tensão Limite de Resistência: 571,83 MPa;
- ✓ Alongamento: 29 %;

3.1.1. Determinação do Carbono Equivalente

Para a determinação do Carbono Equivalente tomou-se como referência a Norma AWS D 1.1, 2004 para aços estruturais utilizando-se da fórmula demonstrada a seguir:

$$C_{eq} = C + \frac{Mn + Si}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} \qquad (3.1)$$

Segundo a Norma AWS referida valores acima de 0,55 para aços de alta resistência e baixa liga indicam materias susceptíveis ao trincamento pelo hidrogênio. Entretanto, a literatura corrente cita que de acordo com a fórmula do IIW valores acima de 0,4 pode ou não ocorrer este tipo de trincamento. Logo sendo o valor de C_{eq} calculado para o aço DNVE40Z25 de 0,50, este se apresenta como um aço com provável susceptibilidade ao trincamento pelo hidrogênio.

Outros valores obtidos pelos critérios apresentados no Capítulo II juntamente com o valor AWS são mostrados na Tab. 3.2.

Tabela 3.2: Valores de Carbono Equivalente obtidos para os diferentes critérios.

Critério	**Carbono Equivalente**
AWS	0,5051
IIW	0,4278
Ito	0,2589
Yur	0,4319

Especificamente para o Teste de Implante o material utilizado foi um aço designado pela empresa fornecedora por SAR 80 de espessura 3/8”, sendo sua composição química (% em peso) apresentada na Tab. 3.3, e a seguir as propriedades mecânicas.

Tabela 3.3: Composição Química do Aço SAR 80.

C	**Mn**	**P**	**S**	**Si**	**Al**	**Cu**	**Mo**	**Cr**	**Ni**	**V**	**Ti**
0,13	0,98	0,029	0,0063	0,22	0,058	0,27	0,33	0,55	0,027	0,028	0,016

- ✓ Tensão Limite de Escoamento: 700 MPa;
- ✓ Tensão Limite de Resistência: 800 MPa;
- ✓ Alongamento: 16 %;

O carbono equivalente para o aço SAR 80 foi determinado pela equação 3.1 e seu valor foi de 0,53 de acordo com o critério AWS, o que indica assim como no caso do aço DNVE40Z25, susceptibilidade à ocorrência de trincas pelo hidrogênio.

3.2. Metal de Adição

3.2.1. Metal de adição para o processo MIG / MAG

Como arame eletrodo utilizou-se o AWS ER70S-6 de diâmetro de 1,2 mm. A composição química (faixa de valores) é apresentado na Tab. 3.4. Pelas informações do fabricante este arame é destinado à soldagem MIG/MAG, como por exemplo os aços de construção em geral com uma tensão de ruptura mínima de 560 MPa, tal como os aços carbono manganês de grão fino com um limite elástico mínimo de 470 MPa. As características mecânicas mencionadas são obtidas utilizando a mistura Ar/CO_2 como gás de proteção conforme Tab. 3.5 (dados fornecidos pelo fabricante do arame).

Tabela 3.4: Faixa permitida de composição química do Metal de Adição AWS ER70S-6.

C	Mn	Si	S	P
0,07 – 0,15	1,40 – 1,80	0,80 – 1,15	$\leq$0,035	$\leq$0,025

De acordo com a Equação 3.1 e a Tab. 3.4 tem-se o carbono equivalente para este arame eletrodo na faixa entre 0,43 e 0,64. Isto demonstra que o arame eletrodo pode estar na faixa de materiais susceptíveis à trinca de hidrogênio como anteriormente visto para o metal de base.

Tabela 3.5: Propriedades Mecânicas do Arame AWS ER70S-6 *

Ensaios	**Norma ABS, DNV, AWS**	**Típico**
Limite de Resistência	485 MPa min.	560 MPa
Limite de Escoamento	400 MPa min.	470 MPa
Alongamento	22 % min.	25 %
Impacto	27 J min (-29 ℃)	70 J

(*) AWS ER70S-6 como Soldado: 75-80% Ar + 20-25% CO_2

3.2.2. Metal de adição para o processo Eletrodo Revestido

Para este processo durante os ensaios G-BOP e Tekken utilizou-se o eletrodo básico E11018G de 4,0 mm de diâmetro. A composição química básica fornecida pelo fabricante é apresentada na Tab. 3.6.

Tabela 3.6: Composição Química do Metal de Adição AWS E11018G.

C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo
0,06	1,70	0,25	0,35	1,70	0,40

Dentre as aplicações deste eletrodo destaca-se soldagem de grande responsabilidade em aços de altíssima resistência e baixa liga, com ou sem pré-aquecimento sendo suas propriedades principais descritas a seguir.

- Limite de Resistência: 760 à 840 MPa;
- Alongamento: 17 à 22 %;
- Tensão: 20 – 24 V CA $\geq$ 70 V CC+;
- Faixa de Corrente: 140 à 190 A;

De acordo com a Equação 3.1 o carbono equivalente para o eletrodo revestido E11018G é de 0,58 dentro da faixa de materiais com probabilidade de ocorrência de trincas de hidrogênio ou seja valor acima de 0,4 de acordo com o IIW.

Para o Ensaio de Implante durante os Testes Preliminares utilizou-se o arame eletrodo rutílico E6013 de diâmetro 2,5 mm com composição conforme Tab. 3.7. Para este eletrodo baseado na composição química (Tab. 3.7) tem-se um material com baixa susceptibilidade à trinca de hidrogênio com Carbono Equivalente igual à 0,16 de acordo com a Equação 3.1.

Tabela 3.7: Composição Química do Metal de Adição AWS E 6013.

C	Mn	Si
0,07	0,35	0,20

- Limite de Resistência: 480 à 520 MPa;
- Alongamento: 22 à 24 %;
- Tensão: 18 – 28 V CA; > 50 V CC + ou -;
- Faixa de Corrente: 60 à 100 A;

3.3. Equipamentos de Soldagem

3.3.1. Fonte para processo MIG/MAG

Para a realização dos testes, foi utilizada uma fonte eletrônica multiprocessos,

mostrada na Fig. 3.1, selecionada para operar no processo MIG/MAG no modo tensão constante, cujas principais características são:

- Corrente contínua ou alternada (convencional ou pulsada);
- Corrente nominal de 300 A para fator de serviço de 100 %;
- Corrente máxima de 450 A;
- Tensão em vazio de 56 V;

Figura 3.1: Ilustração da Fonte MTE Digitec 300 e do Alimentador IMC STA-120.

As soldagens foram realizadas de forma automática com a ajuda de uma mesa de coordenada. A Figura 3.2 mostra em detalhe a soldagem em execução para o teste G-BOP pelo processo MIG/MAG.

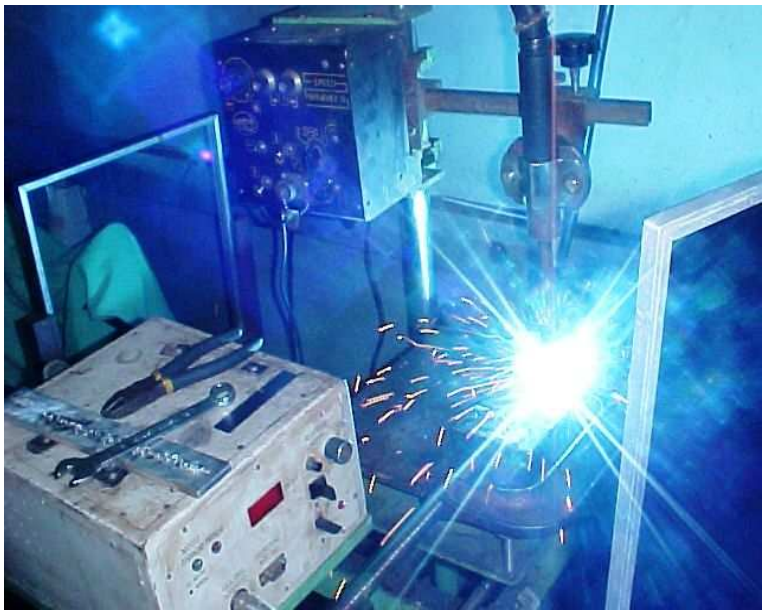


Figura 3.2: Ilustração da Soldagem MIG em corpo de prova para o ensaio G-BOP.

3.3.2. Fonte para o processo Eletrodo Revestido

A fonte para o processo eletrodo revestido com característica estática de corrente constante é mostrado na Fig. 3.3, cujas principais características são:

- Faixa de corrente: 55 a 425 A;
- Corrente nominal: 300 A a 60%;
- Tensão em vazio: 76 V.

Figura 3.3: Ilustração da Fonte ESAB LHG 425 em montagem experimental.

A Figura 3.4 ilustra o sistema de soldagem automática para o processo ER, composto basicamente pela alimentação automática do eletrodo e carro de movimentação. Neste caso ajusta-se a velocidade de soldagem através de um botão parametrizado na parte frontal do equipamento e sua Tensão de Referência.

Figura 3.4: Montagem do Teste G-BOP para o Sistema de Alimentação de Eletrodo Revestido.

3.4. Parâmetros de Soldagem

3.4.1. Parâmetros para o processo MIG/MAG

Os parâmetros de soldagem do processo MIG/MAG ajustado após alguns ensaios preliminares para o ensaio G-BOP foram:

- ✓ Velocidade de Soldagem: 20 cm / min;
- ✓ Vazão de Gás de Proteção: 12 L / min (Ar + 25 % CO_2);
- ✓ Velocidade de Alimentação: 4,5 m / min;
- ✓ Tensão de Referência: 21 V;
- ✓ Distância do Bico de Contato Peça: 16 mm;
- ✓ Indutância de Subida e Descida (Ks e Kd): 20;

Alguns parâmetros foram modificados no decorrer dos ensaios com o objetivo de obter melhores resultados com relação a trinca de hidrogênio.

3.4.2. Parâmetros para o processo Eletrodo Revestido

Iniciamente realizou-se nos Testes Preliminares a soldagem manual para deposição do cordão de solda no processo ER. Entretanto exigiu-se muita perícia, habilidade e treinamento do soldador para execução de um cordão de boa qualidade e de forma

contínua. Por isso devido o fator repetibilidade ser um requisito indispensável para perfeita análise da respostas dos ensaios o procedimento de soldagem para os Testes Tekken e G-BOP com ER foram executados de forma automática conforme Fig. 3.4. Com isso, ajustando devidamente os parâmetros no sistema de soldagem automática obtem-se respostas similares em todos os testes, reduzindo a interferência do fator humano nos resultados.

O ajuste para uma velocidade de soldagem de 20 cm/min conforme calibração efetuada é na posição 3. Para esta velocidade de soldagem ajusta-se a Tensão de Referência de 5,74 V equivalente a Tensão do Arco obtida durante a soldagem do corpo de prova entre 24 e 25 Volts.

Após ajustar os devidos parâmetros de velocidade de soldagem e tensão de referência aciona-se o botão habilita ligando todo o circuito do equipamento para a soldagem. Com a chave seletora posicionada em automático o sistema movimentará o eletrodo em direção à peça instantaneamente realizando a abertura do arco (vide Fig. 3.4). Neste mecanismo o carro com a peça se movimenta horizontalmente enquanto o eletrodo é alimentado continuamente na posição vertical através de mecanismo de um parafuso com rosca sem fim de acordo como exemplificado na Fig. 3.4. As soldagens foram realizadas com o eletrodo inclinado em torno de 15° em relação à peç a na posição puxando.

Resumidamente para o procedimento de soldagem com ER nos ensaios G-BOP e Tekken tem-se o ajuste manual na manivela da fonte de soldagem em 140 A e no carro de movimentação e alimentação automática do eletrodo dos seguintes parâmetros:

- ✓ Velocidade de Movimentação = Posição 3;
- ✓ Tensão de Referência = 5,74 Volts;
- ✓ Acionar Botões: Habilita e Automático

No Ensaio de Implante utilizando o Eletrodo E6013 segue-se o mesmo procedimento anterior modificando apenas a corrente de soldagem para 100 A.

3.5. Sistema de Emissão Acústica

Para utilizar a técnica de EA foi necessário desenvolver um dispositivo para armazenar o sinal de EA, chamado de Condicionador de Emissão Acústica (CEA), composto de três partes: 1 - A fonte responsável pela alimentação do sensor e de todo o circuito que compõe o CEA, 2 - A interface eletrônica responsável pela aquisição e condicionamento do sinal e 3 - O programa computacional denominado “Analisador EA” onde os dados sofrem os últimos tratamentos e são analisados.

O sensor EA conforme Fig. 3.5 é baseado no princípio de piezeletricidade. Juntamente com o sensor tem-se um amplificador modelo “1220A Preamplifier” 40/60dB, Single BNC for Power (+28V) e output sig, para faixa de freqüência de 100 a 300 KHz. Este amplificador se faz necessário para elevar o nível do sinal.

Figura 3.5. (a) Sensor de Emissão Acústica, (b) Amplificador e Filtro.

A alimentação do amplificador do sensor e dos circuitos que compõe o CEA pode ser feita de duas maneiras: a primeira é através de uma fonte projetada para ser alimentada com uma tensão de 127/220 VAC tendo como saída 15/-15/30 V DC, a segunda é por meio de baterias. As baterias são utilizadas quando se deseja ter o sistema totalmente desacoplado da rede de energia, em caso onde os ensaios são realizados em ambientes extremamente ruidosos. A Figura 3.6 apresenta um fluxograma completo do sistema projetado, condicionador de EA e a interface de aquisição do sinal de EA. Antes que a tensão de alimentação seja conectada ao amplificador do sensor, esta passa por um regulador de tensão de precisão que ajusta a tensão em 28V DC.

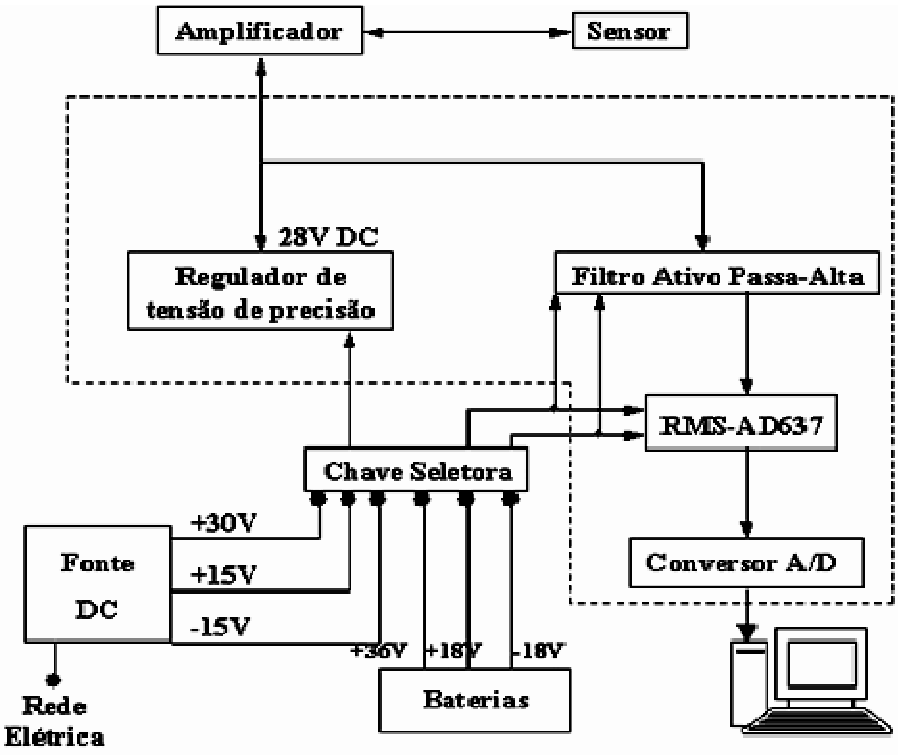


Figura 3.6: Fluxograma detalhado do Condicionador de Emissão Acústica

O cabo que alimenta o amplificador é também o cabo que transmite o sinal EA. Desta forma, necessitou-se da implementação de um filtro de tal forma que evite que o sinal EA entre no circuito regulador de tensão e também não permita que a tensão de alimentação entre no circuito de condicionamento de sinal. Sendo assim, desenvolveu-se um filtro passa-alta entre o circuito alimentador e o circuito condicionador. Trata-se de um filtro ativo de apenas um pólo, onde é possível ajustar um ganho em seu sinal de saída caso se faça necessário.

Após o sinal do sensor ser amplificado e filtrado o mesmo passa por um estágio, chamado de circuito RMS do CEA, onde a saída é a média do sinal de entrada em RMS. A utilização deste circuito é indispensável para a aquisição e tratamento do sinal de EA para aplicações de longos períodos. A Figura 3.7 mostra o equipamento CEA, parte frontal e traseira.

Para o condicionador de EA, foi usada uma constante de tempo de 0,025 ms, já que a freqüência de aquisição do conversor analógico/digital é de 40 kHz.

Figura 3.7. Foto da parte frontal e traseira do CEA.

Para que o sinal de saída do circuito RMS seja armazenado pelo computador é necessário que este seja convertido de sua forma analógica para digital. Para isso utilizou-se um circuito conversor análogo-digital. O conversor utilizado possui uma entrada analógica que pode receber um sinal na faixa de 0 a 10V o que é perfeitamente compatível com o sinal de saída do circuito RMS. A saída do conversor possui uma interface direta com a porta paralela do computador, fazendo com que os dados sejam transmitidos ao computador por meio desta porta. Este apresenta uma taxa de conversão de 40 kHz e sua resolução é de 12 Bits.

Apesar de tratado o sinal de EA ainda não pode ser totalmente armazenado devido à limitação de memória do computador. Devido aos longos tempos de duração dos ensaios grande quantidade de ruído é armazenada além do sinal de interesse. Entretanto, o que é importante são as ondas geradas apenas pela formação e propagação de trincas na estrutura dos materiais. Sabe-se que o sinal de EA provocado pela propagação de uma trinca é facilmente distinguível dos ruídos devido sua maior amplitude. Desta forma, foi desenvolvido um software, denominado de Analisador EA, que permite captar e armazenar os dados com um limite de corte pré-estabelecido. De modo que o microcomputador só armazena os dados relacionados à propagação da trinca, desprezando os ruídos e os valores próximos a zero. O sistema trabalha na faixa de 0 a 10 V e o corte de ruído, após os ensaios preliminares, foi de 0,5 V.

O programa computacional, parte integrante do CEA, denominado Analisador de Emissão Acústica (AEA), recebe o sinal proveniente da interface eletrônica através da porta paralela do microcomputador. O Analisador de Emissão Acústica possui uma interface bastante simples, e comum à dos softwares que funcionam em ambiente windows.

Com isso, o CEA destina-se à aquisição e condicionamento do sinal gerado por um sensor de Emissão Acústica, durante testes de detecção da formação e propagação de micro-trincas em uma estrutura metálica. O mesmo pode ser dividido em duas partes, o

dispositivo onde se conecta o sensor e o programa computacional. A Figura 3.8 ilustra este sistema global em funcionamento durante o ensaio G-BOP.

Figura 3.8: Montagem Experimental do Sistema de Emissão Acústica.

3.5.1. Programa computacional do CEA

O programa computacional, parte integrante do CEA, denominado Analisador de Emissão Acústica (AEA), recebe o sinal proveniente da interface eletrônica através da porta paralela do microcomputador.

O Analisador de Emissão Acústica possui uma interface bastante simples, e comum à dos softwares que funcionam em ambiente Windows®. Na Figura 3.9 é possível visualizar a tela principal do AEA.

Para iniciar a aquisição deve-se ativar a porta de entrada de dados para o programa através do menu 'Ferramentas' e sub-menu 'Ativar Porta Paralela'. Dessa forma será aberta uma nova janela conforme Fig. 3.10. Clique em ativar e em seguida confirme.

Antes de se realizar uma aquisição é necessário configurar dois parâmetros: o tempo de aquisição e a constante de corte. Esses parâmetros são informados pelo usuário. Para isso, deve-se entrar no menu "*Ações*" e clique no sub-menu "*Editar Aquisição*" onde aparecerá a janela mostrada na Fig. 3.11.

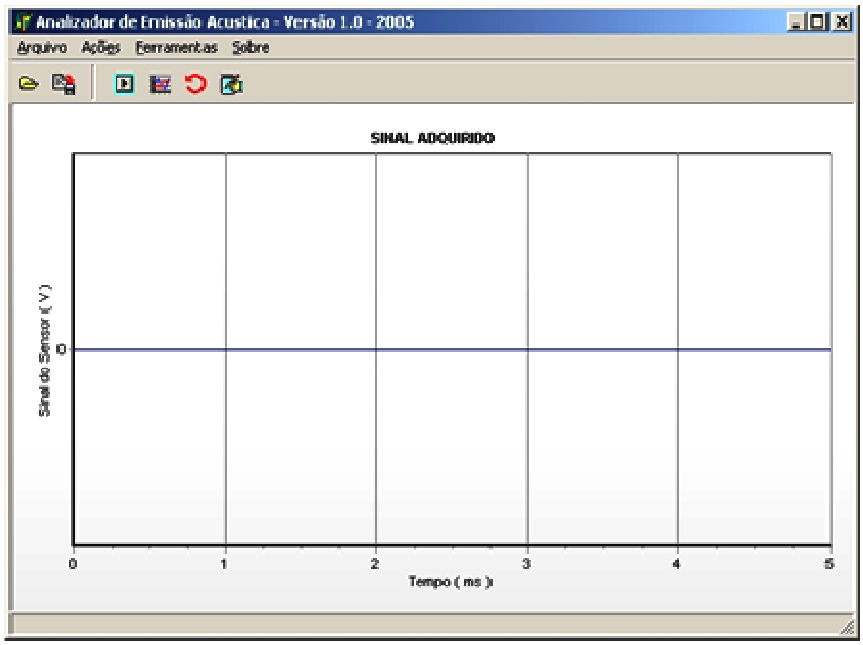


Figura 3.9: Tela principal do Programa do Condicionador de Emissão Acústica.

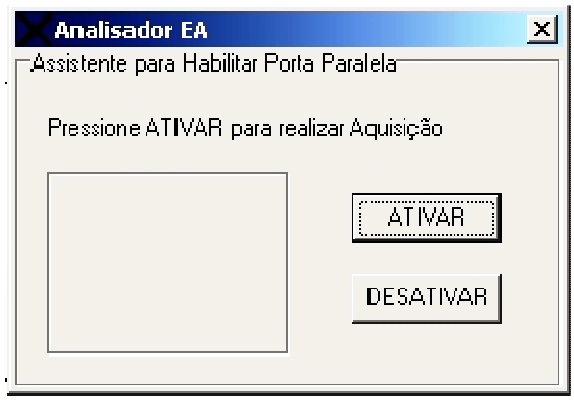


Figura 3.10: Janela de ativação da Porta Paralela.

O tempo de aquisição determina o período em que o programa passará adquirindo os dados e a constante de corte determina que somente valores acima desta constante sejam adquiridos pelo programa. Para determinar a constante de corte, o usuário antes da aquisição, deve ter o conhecimento do valor limite entre os dados que lhe interessa e os que não lhe é importante. Com isso baseando-se nas análises realizadas no Capítulo IV defini-se o tempo de aquisição em 24 horas e a constante de corte em 0,5 Volts.

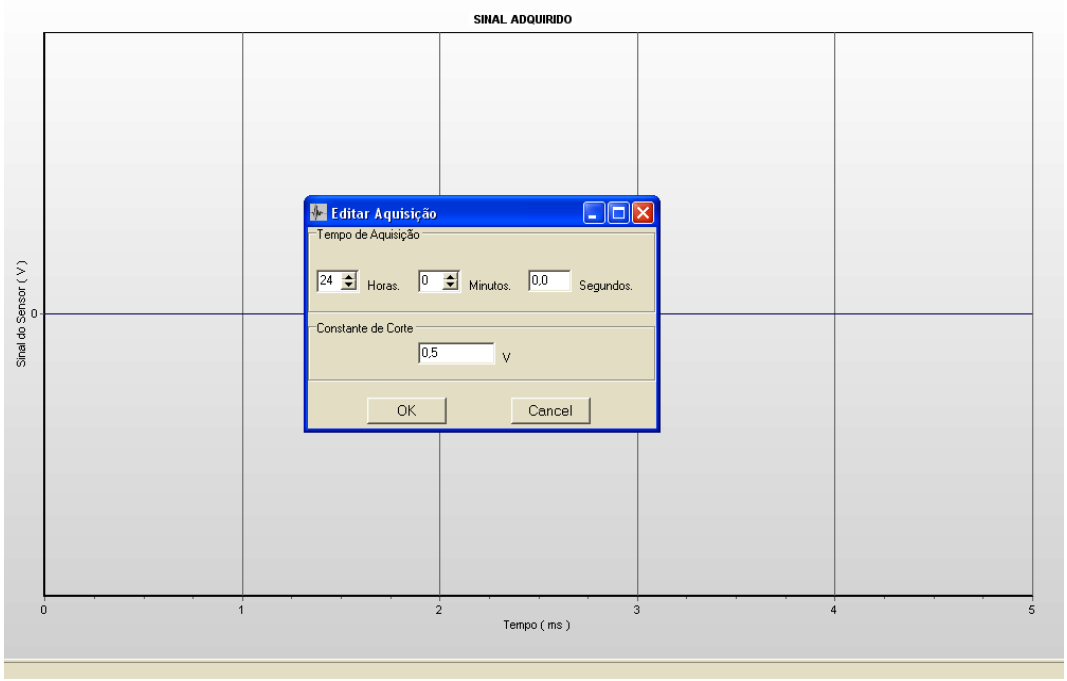


Figura 3.11: Janela de edição da aquisição no Programa Condicionador de EA.

Depois de completadas todas as configurações para se obter uma aquisição basta ir ao menu "*Ações*" e clicar no sub-menu "*Iniciar Aquisição*", ou clicar no botão "*Iniciar Aquisição*" na barra de ferramentas. Surgirá então a tela mostrada na Fig. 3.12.

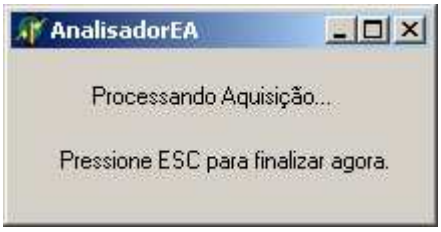


Figura 3.12: Tela durante as 24 horas de aquisição.

A aquisição será processada no tempo pré-determinado neste trabalho em 24 horas e ao seu final o programa exibirá a tela da Fig. 3.13.

Figura 3.13: Tela apresentada ao final das 24 horas de aquisição.

A visualização dos dados é feita através do oscilograma apresentado pelo programa. Para isso, clique sobre botão da barra de ferramentas (Fig. 3.14). Assim obtém-se um oscilograma conforme Figura 3.15

Figura 3.14: Botão Plotar Aquisição.

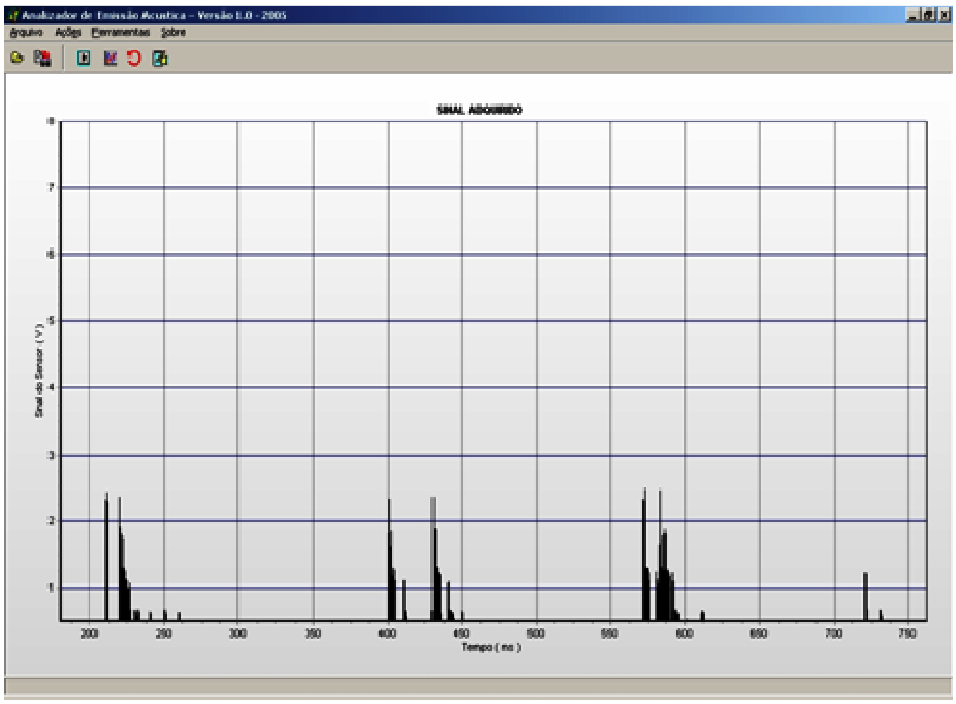


Figura 3.15: Exemplo de sinal caracteristico do Programa Analisador de EA.

Os dados adquiridos são salvos em um arquivo numérico (extensão .txt). O formato é o usual em programas matemáticos, formado por duas colunas de dados: a primeira é o tempo e a segunda é um valor referente à amplitude do sinal.

3.6. Procedimento Experimental

Em todos os ensaios conectou-se o sensor de Emissão Acústica imediatamente após a soldagem com corpo de prova ainda bastante aquecido, aproximadamente entre 30 a 60 segundos após o término da soldagem, garantindo uma alta temperatura (entre 200 e 150℃

no cordão de solda) no início da aquisição. Este valor de temperatura foi obtida utilizando termopares colocados na superfície do cordão de solda após o término da soldagem. A aquisição para o Teste G-BOP e Tekken foi de 24 horas a partir da conexão do sensor à peça e acionamento do programa de aquisição de sinal. Para o ensaio de Implante foi utilizado 20 horas ou até rompimento do corpo de prova, pois o teste de implante foi realizado inicialmente para comprovar a funcionalidade do sistema de EA projeto e construído no LAPROSOLDA.

3.6.1. Metodologia do ensaio G-BOP

O teste G-BOP consiste de dois blocos, um dos quais tem um entalhe usinado. Em adição ao entalhe, as faces a serem unidas dos dois blocos são, também, usinadas para dar maior sustentação. Os blocos são fixados um ao outro para prevenir que não ocorra a rotação de um deles e um cordão de solda de 10 cm é depositado sobre os blocos na região do entalhe, conforme é mostrado na Fig. 3.16.

Após a soldagem, os blocos são mantidos fixos por no mínimo 48 horas. Para avaliar as trincas, a área da solda sobre o entalhe usinado é aquecida por uma fonte de calor até o rubro (aquecimento a uma temperatura não definida na literatura), sendo em seguida deixado resfriando até a temperatura ambiente, e então o corpo de prova é quebrado e aberto. Quando a secção transversal (região da quebra) do metal de solda apresenta duas superfícies, uma oxidada que corresponde à trinca de hidrogênio e outra resultante da fratura.

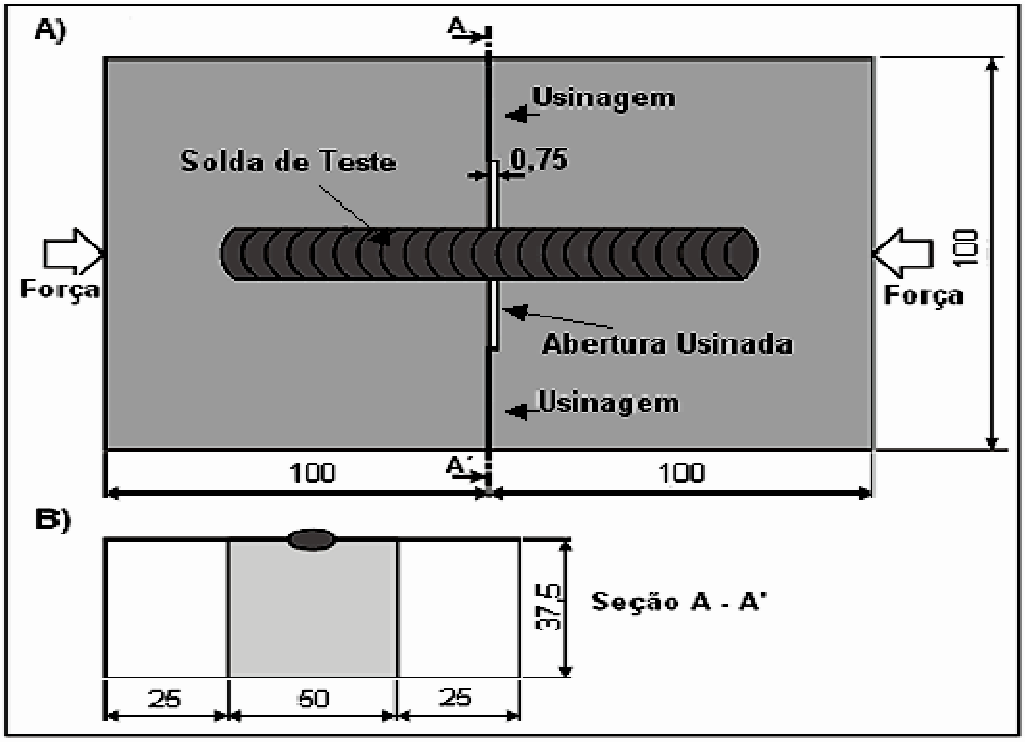


Figura 3.16: Ilustração Esquemática do Ensaio G-BOP. A) Vista Superior; B) Vista Lateral do Bloco Usinado;

Os corpos de prova para o ensaio G-BOP foram compostos por um par de blocos, sendo cada bloco usinado nas dimensões de 100 mm x 100 mm x 37,5 mm e com um rebaixo de profundidade 0,75 mm com largura de 50 mm em uma das faces perpendiculares ao sentido de laminação. Para o máximo de aproveitamento do corpo de prova este rebaixo é realizado nas quatro faces do corpo de prova permitindo a realização de quatro testes com um único par de blocos.

A Figura 3.17 ilustra o Corpo de Prova devidamente usinado e limpo para o Ensaio G-BOP no qual será depositado sobre a superfície um cordão de 10 cm.

Antes de realizar os experimentos, os corpos de prova foram limpos com uso de escova metálica, água e sabão, retirando-se a camada de óxido, óleos ou outras impurezas prováveis presentes na superfície. Este procedimento foi adotado em todos os ensaios visando eliminar quaisquer fontes de sujeira que pudessem contaminar o metal de solda e influenciar nos resultados. Para a montagem dos corpos de prova foram utilizados grampos de fixação para prender os blocos um contra o outro. O torque de aperto é o necessário para impedir qualquer movimentação entre os corpos de prova sendo aplicado manualmente. Com o objetivo de avaliar a sensibilidade do sensor de Emissão Acústica realizou-se vários testes com e sem presença de óleo. Estes foram divididos em cordão realizado na presença

de óleo lubrificante, com forte presença de hidrocarbonetos, e com chapa extremamente limpa.

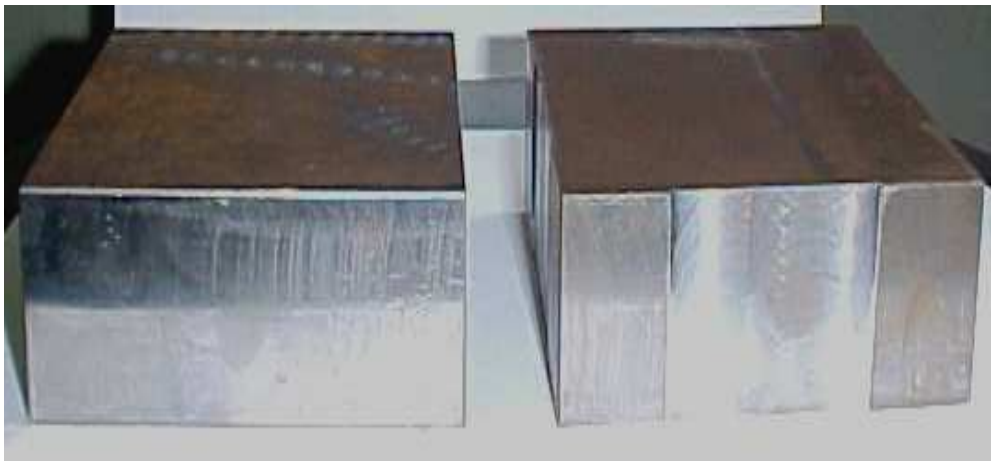


Figura 3.17: Ilustração dos Corpos de Prova para o Ensaio G-BOP.

Para a realização de cordão de solda no ensaio G-BOP ajustou-se os parâmetros de soldagem na fonte conforme descrito acima e depositou um cordão de solda de 100 mm de comprimento. Em seguida, conectou-se ao corpo de prova soldado o sensor de Emissão Acústica (Figura 3.18), inicializando a leitura através do programa analisador de EA para aquisição de sinal.

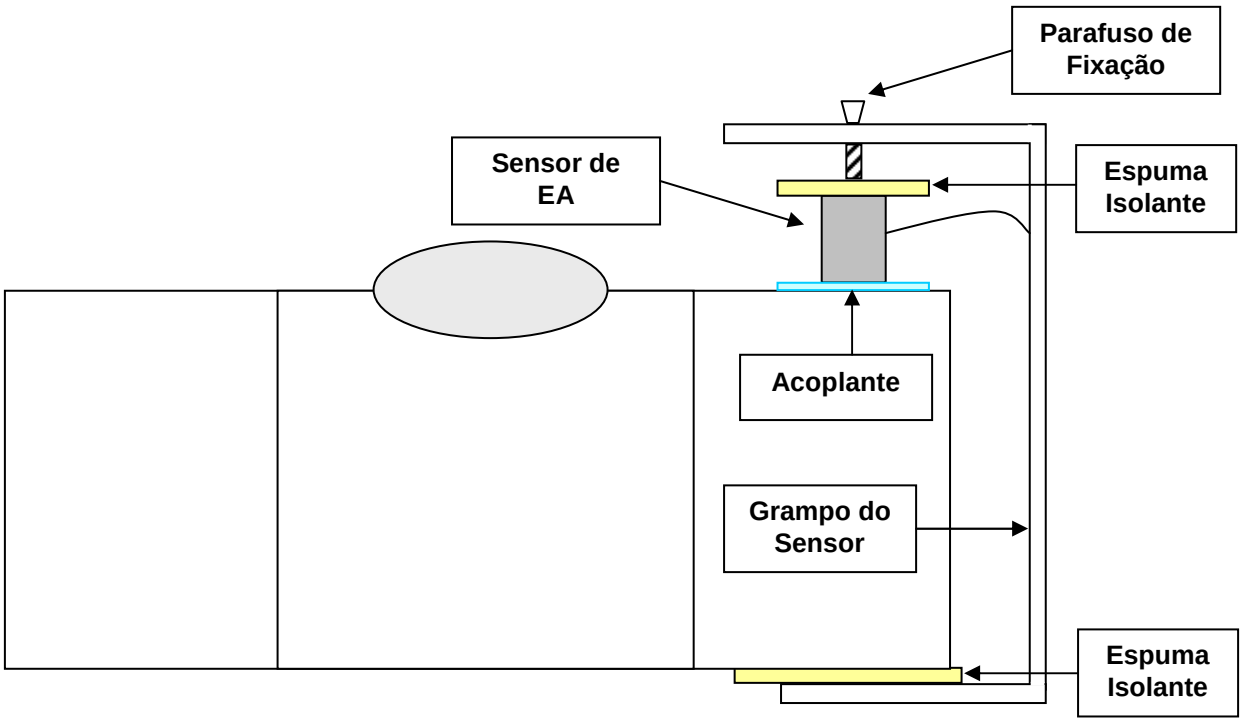


Figura 3.18: Ilustração da conexão entre sensor de EA e peça.

Durante o tempo total das 24 horas de aquisição necessitou-se manter o isolamento deste sistema de vibrações ou ruídos locais. Isto foi possível com a utilização de um material esponjoso de espuma de poliuretano (utilizada em mouse pad) com espessura de 2 mm conforme Fig. 3.18 e 3.19. Após realização de testes preliminares (Capítulo IV) adotou-se o procedimento ideal que consiste em isolar o sistema de vibrações com a espuma, espalhar o acoplante (vaselina) na interface entre o sensor e o corpo de prova, colocar o grampo do sensor prendendo a peça e o sensor e aplicar um torque de aperto no parafuso até atingir a estabilidade dos componentes. Este procedimento tem um tempo total entre 30 à 60 segundos sendo adotado de forma identica em todos os ensaios com o teste G-BOP e Tekken.

Figura 3.19: Detalhe do isolamento entre o sensor e o corpo de prova.

Com isso aguarda-se a finalização da aquisição para então aquecer o corpo de prova até o rubro (equipamento de corte oxiacetilênico) promovendo a oxidação da região do metal de solda que eventualmente possa apresentar trincas. Em seguida, após o resfriamento, os grampos de fixação são retirados sendo realizada a separação dos blocos que compõem o corpo de prova para a análise da região fraturada.

3.6.2. Metodologia do Ensaio Tekken

O ensaio de auto-restrição Tekken é largamente usado para a avaliação da susceptibilidade à formação de trincas a frio, tanto no metal de solda (MS), como na zona afetada pelo calor (ZAC), sendo a referência principal sobre a construção e montagem dos

Corpos de Prova a Norma Industrial Japonesa JIS – Z – 3158. O Corpo de Prova para este ensaio conforme Fig. 3.20 apresenta um chanfro em Y oblíquo com as duas chapas unidas previamente através de soldagens nas suas extremidades.

Com a realização das soldas de ancoramento executa-se a soldagem sobre o chanfro em V do Corpo de Prova. Este cordão de solda apresenta um comprimento de 100 mm em passe único conforme Fig. 3.20. O Ensaio Tekken com chanfro em Y apresenta uma variação na geometria do corpo de prova relacionada com o objetivo de ocorrer o início e propagação da trinca no corpo de prova entre a região da Zona Afetada pelo Calor e o Metal de Solda enquanto no Y simétrico a trinca ocorre somente no Material Depositado.

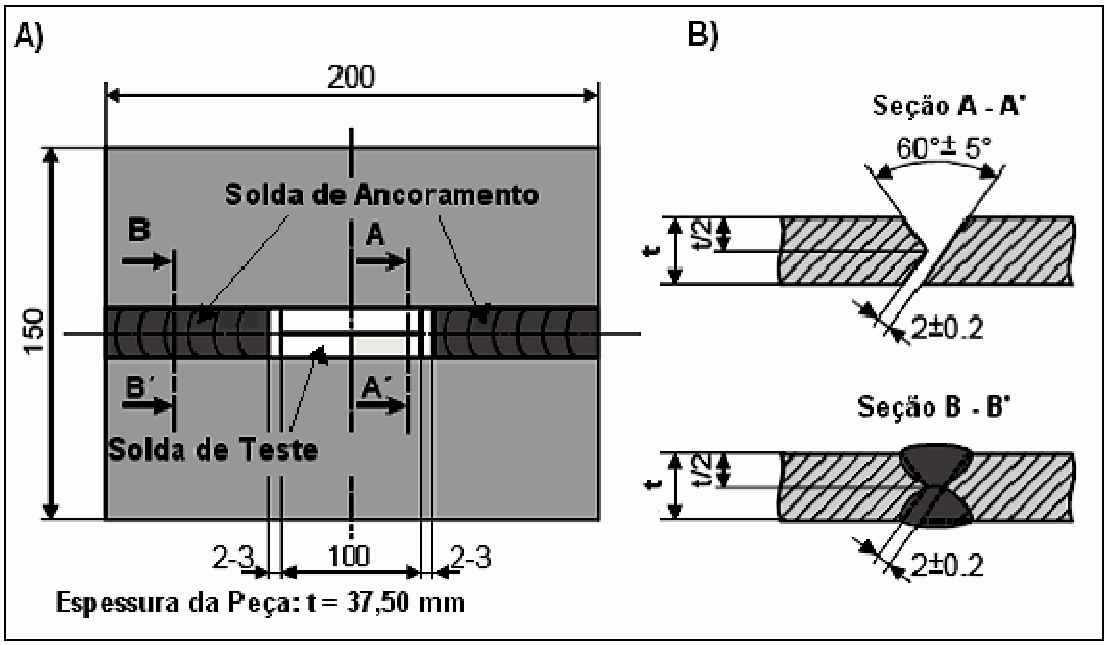


Figura 3.20: Ilustração Esquemática do Ensaio Tekken. A) Vista da Peça; B) Preparação da Solda de Teste e Solda de Ancoramento.

Os corpos de prova para o Ensaio Tekken foram compostos por um par de chapas, com dimensões de 200 mm x 75 mm x 37,5 mm e outra de 200 mm x 85,5 mm x 37,5 mm conforme Fig. 3.21.

Para o teste uniu-se as duas peças confeccionadas formando um chanfro em Y Oblíquo nas dimensões de 200 x 150 x 37,5 mm após montagem. Na realização do teste fixou-se as duas chapas através de soldas de ancoramento de 50 mm nas extremidades dos corpos de prova permitindo um espaçamento máximo de 2,0 mm entre os chanfros da

peça conforme Fig. 3.21 e 3.22. O Corpo de Prova Tekken preparado para execução do ensaio com soldagem MIG/MAG é mostrado na Fig. 3.23.

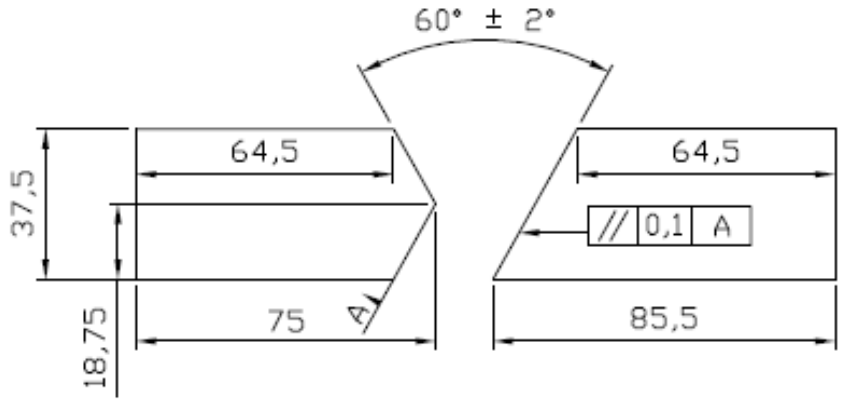


Figura 3.21: Vista Lateral dos Corpos de Prova para Ensaio Tekken com Chanfro em Y Oblíquo. Blocos para Montagem.

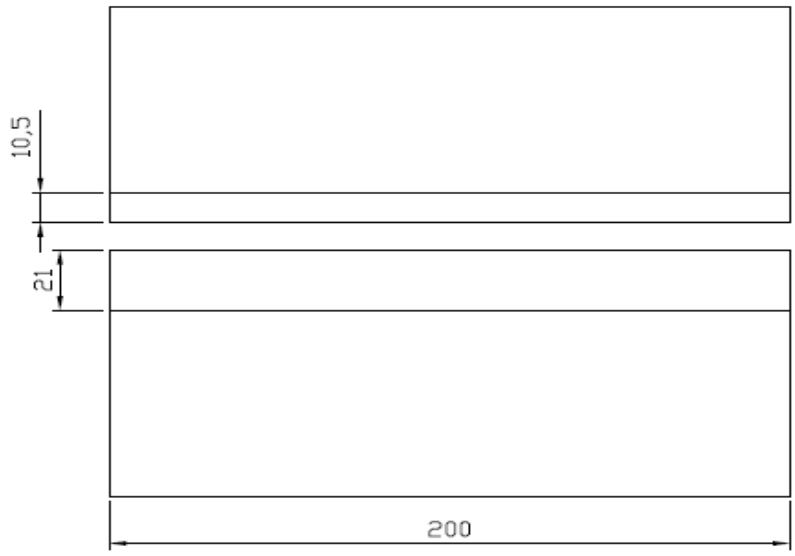


Figura 3.22: Vista Superior dos Corpos de Prova para Ensaio Tekken. Blocos para Montagem.

Figura 3.23: Ilustração dos Corpos de Prova para Ensaio Tekken com as soldas de ancoramento.

Durante a fase inicial foram confeccionados corpos de prova Tekken, com chanfro obliquo, conforme apresentado na Figura 3.21, com o objetivo de avaliar o sistema de EA para detectar a formação e propagação da trinca de hidrogênio neste tipo de ensaio. Inicialmente as chapas foram cortados pelo processo de corte oxiacetileno e, em seguida chanfradas de acordo com as recomendações da norma JIS – Z3158, que estabelece uma precisão na abertura da raiz de 2 ± 0,2mm e o ângulo de chanfro de 60°.

Na montagem dos corpos de prova e execução das soldas de restrição, foram utilizados gabaritos de fixação de modo a evitar que as distorções de soldagem alterassem as dimensões da abertura de raiz e do chanfro. Em seguida uniu-se as peças chanfradas através das soldas de ancoramento.

O procedimento experimental consiste basicamente em realizar um cordão de solda de comprimento 100 mm entre as soldas de ancoramento de forma similar para os processos MIG/MAG e Eletrodo Revestido. A seguir é feita a conexão do sensor de Emissão Acústica na peça soldada (Fig. 3.18 similar ao ensaio G-BOP) iniciando-se a aquisição de sinal. Todo este procedimento de conexão após a soldagem e início da aquisição de sinal era realizada em aproximadamente 30 segundos. O corpo de prova soldado encontrava-se em temperatura entre 200 e 150℃ (medido através de um termopar colocado na superfície do cordão de solda). Após resfriamento do corpo de prova a região da peça entre as soldas de ancoramento é retirada com um comprimento de 100 mm sendo feita a avaliação da região da ZAC e metal de solda.

3.6.3. Metodologia do ensaio de Implante

O laboratório de soldagem da FEMEC/UFU conta um equipamento de ensaio de implante para avaliar a susceptibilidade ao trincamento pelo hidrogênio. O equipamento de teste, de uma forma geral, é composto por dois sistemas interativos:

- um sistema de tração, composto por um sistema hidráulico e pela estrutura metálica do equipamento, com a função de tracionar o corpo de prova, simulando um estado de tensões internas tal como se verifica em juntas soldadas;
- um sistema de monitoramento, com a função de monitorar o alívio de tensões, assim como a eventual ocorrência de trincas. (rompimento do corpo de prova);

A Figura 3.24 ilustra de forma esquemática o equipamento de teste de Implante do laboratório de soldagem (LAPROSOLDA) da FEMEC/UFU. As principais partes do sistema de tração podem ser identificadas da seguinte forma: - 1 Placa teste; - 2 Alavanca; - 3 Gancho superior; - 4 Cilindro Hidráulico; - 5 Célula de Carga; - 6 Perna frontal; - 7 Gancho inferior; - 8 Placa Base; - 9 Perna traseira; - 10 Molas prato.

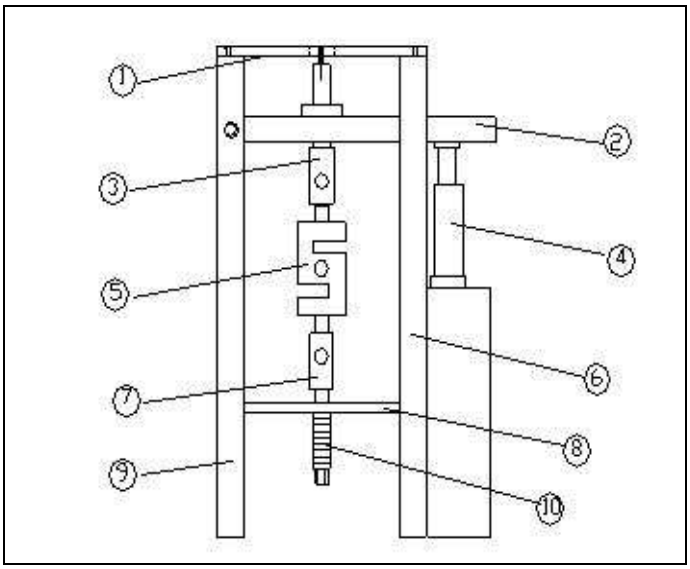


Figura 3.24: Visão geral do aparato para o Ensaio de Implante.

A placa teste é responsável pelo suporte dos corpos de prova para a soldagem, essa placa (Fig. 3.25) foi projetada para obter o máximo de aproveitamento, tendo como características básicas em todas que os furos se distanciam cerca de 30 mm e os furos para a fixação do termopar fica aproximadamente a 35 mm do furo.

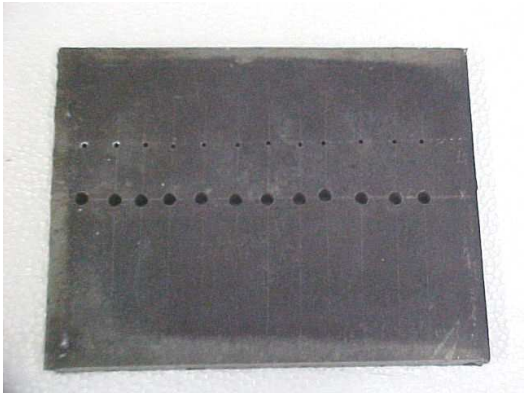


Figura 3.25: Placa de aço para o teste de Implante.

O corpo de prova confeccionado conforme Figura 2.10, tem um diâmetro de 6 mm, formato do entalhe helicoidal em “V”, ângulo de 40°, passo de 1 mm, profundidade do entalhe de 0,5 mm, raio da ponta do entalhe de 0,1 mm e comprimento da região entalhada de 15 mm. Deve-se ter uma tolerância mínima de ± 0,1 mm em relação à placa de testes para garantir que a posição do corpo de prova não sofra alterações durante os ensaios conforme Fig. 2.10 (Capítulo II).

O monitoramento da tração consiste de uma célula de carga do modelo Z-5T (Fig. 3.26), que é um equipamento sensível a variações de força aplicada, dotada de um Strain Gage, que tem a capacidade de transformar solicitações mecânicas em sinais elétricos, com potencial para medir até cinco toneladas; um transmissor de pesagem, que é um equipamento que recebe o sinal da célula de carga e o transmite para a interface analógico/digital. Tem também a função de mostrar a intensidade da solicitação num dado instante por meio de um indicador digital; e um microcomputador, com a função de operar a placa A/D, armazenar e processar os dados obtidos. A Figura 3.27 mostra o transmissor analógico de pesagem, responsável pela leitura da carga aplicada sobre o corpo de prova. O termopar utilizado nos ensaios foi do tipo S com o sistema de leitura de temperatura no cordão de solda após a soldagem mostrada na Fig. 3.28.

O procedimento de ensaio consiste na limpeza do corpo de prova. Conectar o corpo de prova entre a placa de teste e o equipamento através do furo passante. Em seguida aplica uma carga no sistema hidráulico (verificar no transmissor analógico o valor da carga desejada). Verifica-se também, se a extremidade do corpo de prova está totalmente rente à placa de aço, ou seja, de forma que durante a soldagem, se obtenha a união entre corpo de prova e a chapa de aço, através do cordão de solda, conforme Fig. 2.9 apresentada no Capítulo II.

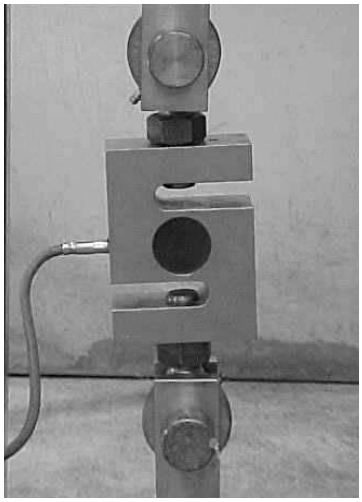


Figura 3.26: Célula de carga Z-5T.

Figura 3.27: Transmissor Analógico de pesagem.

Figura 3.28: Sistema de monitoramento do termopar tipo S.

Ao final do processo de soldagem, observa-se a temperatura no termopar até que a mesma atinja o valor de 150ºC. Em seguida, é retirada a carga do sistema hidráulico, sendo então a tração gradativamente aplicada sobre o corpo de prova. Depois de todo esse procedimento, o corpo de prova está submetido a um esforço puro de tração, constante durante todo o ensaio. Coloca-se na placa de teste o sensor de EA e inicia-se a aquisição do sinal por 20 horas ou até que ocorra a ruptura do corpo de prova.

Para o teste de Implante utilizou-se o aço SAR 80 para a confecção dos corpos de prova e o processo de soldagem utilizado foi o Eletrodo Revestido, soldagem manual. O eletrodo utilizado nestes ensaios foi o E6013 (eletrodo rutílico) de diâmetro 2,5 mm. Corrente de soldagem de 100 A e velocidade de soldagem 200 mm/min. Estas condições foram utilizadas com o objetivo de provocar a indução de hidrogênio no cordão de solda, pois o objetivo principal deste procedimento é validar o sistema de EA para detectar a formação e propagação da trinca de hidrogênio utilizando o ensaio de Implante.

3.7. Determinação de Microdureza

Para avaliação da microdureza do material utilizou-se um Microdurômetro Digital de Bancada modelo HVS 1000 conforme Fig. 3.29.

Este equipamento foi utilizado para determinação da microdureza Vickers (HV) no Metal de Base, Zona Afetada pelo Calor e Cordão de Solda levando em consideração a soldagem pelo processo MIG/MAG e Eletrodo Revestido. Para as medições utilizou-se um identador piramidal de diamante e a carga aplicada foi de 19 N.

Figura 3.29: Microdurômetro de bancada utilizado na medição de Dureza Vickers.

3.8. Determinação da Diluição no Cordão de Solda

Um sistema de aquisição e tratamento de imagens foi utilizado para medição das características geométricas dos cordões de solda, tais como área fundida e área total do cordão de solda. O sistema é composto por um computador com processador AMD K6 450 MHz, uma placa de aquisição Vizion-EZ DT-55 e dois "softwares" para aquisição e o tratamento das imagens, o GLOBAL LAB Acquire e o GLOBAL LAB Image, respectivamente. A placa de aquisição foi conectada e uma câmera de vídeo Hitachi CCD, modelo KP-110, através da qual as imagens foram adquiridas.

Para determinação das medidas de diluição definiu-se:

- ✓ Área Penetrada (A_P): área compreendida pela região do cordão de solda diluída no metal base;
- ✓ Área de Reforço (A_R): área acima do metal base acima do cordão de solda;
- ✓ Área Total (A_T): é área do cordão de solda composta pela Área Penetrada e a Área de Reforço $A_T = A_P + A_R$;

Logo a Diluição é determinada de acordo com a expressão:

$$\text{Diluição}(\%) = \left(\frac{A_P}{A_T}\right) x100 \qquad (3.2)$$

Para o Ensaio G-BOP utilizou-se como avaliação para área de reforço, a região em tom mais escuro e para área penetrada a região em tom mais claro conforme ilustrado na Fig. 3.30. Com a soma destes termos determina-se a área total referente a toda extensão da região colorida.

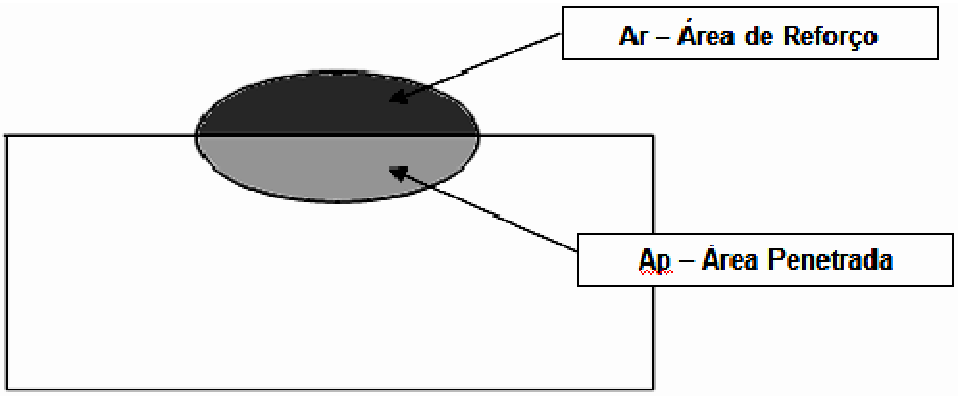


Figura 3.30: Determinação da Diluição no Cordão de Solda para o Teste G-BOP com demostração da Área de Reforço (Ar) e Área Penetrada (Ap).

Para o Ensaio Tekken utilizou-se avaliação similar para área do cordão de solda (em tom mais escuro) e área penetrada (em tom mais claro) conforme Fig. 3.31. Com a soma destes termos determina-se a Área Total referente a toda extensão da região colorida.

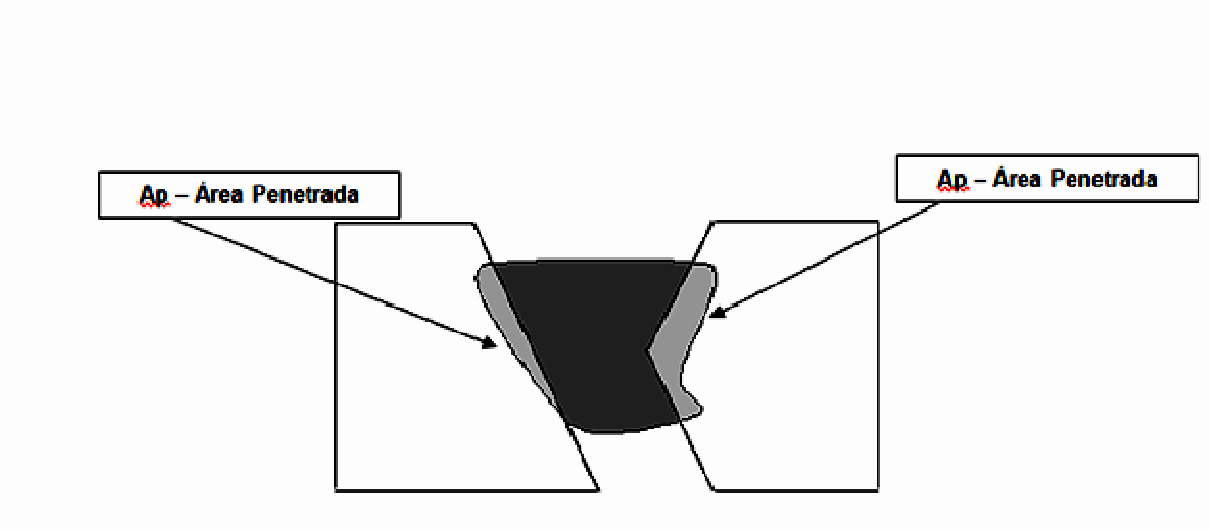


Figura 3.31: Determinação da Diluição no Cordão de Solda para o Teste Tekken com demostração da Área Total (Colorida) e Área Penetrada.

CAPÍTULO IV

TESTES PRELIMINARES

Os testes preliminares tiveram o objetivo de avaliar o sistema de emissão acústica, verificar a sua funcionalidade e sensibilidade para detectar a formação e propagação de trinca de hidrogênio nos ensaios G-BOP e Implante.

4.1. Verificação da funcionalidade do sistema de EA

Com o objetivo de avaliar a funcionalidade, sensibilidade do sensor e a robustez de todo o sistema EA (projetado e construído para esta dissertação) realizou-se inicialmente os ensaios com o sensor conectado em chapa de aço. Após o início da aquisição foi aplicada uma vibração na chapa em forma de batida com barra metálica. A Figura 4.1 mostra o sinal de EA obtido pelo sistema projetado. Apesar da intensidade da vibração na chapa, verificou-se que o sinal de EA era de baixa amplitude (próximo a 1 mV), pois o projeto inicial era que a amplitude máxima fosse de 10 V, necessitando de alterações relacionadas à sensibilidade do sistema. Verificou também um intervalo sem sinal (com tempo em torno de 4 ms). Este tempo foi relacionado com a interrupção do computador (Windows) que paralisa o programa para executar outra tarefa do sistema operacional. Tentou-se minimizar este problema com mudanças no projeto (programa de aquisição). A utilização de um computador dedicado apenas a estes ensaios, dando prioridade a execução do programa, melhorou em muito o problema da interrupção do computador. Entretanto, conviveu-se com este problema mesmo nos ensaios definitivos.

Após modificações no sistema eletrônico visando melhorias na sensibilidade de todo o sistema, um novo ensaio foi realizado com duas vibrações na chapa. Verificou neste ensaio uma grande quantidade de ruídos. A Figura 4.2 mostra o perfil do sinal obtido pelo sistema de EA. Novamente revisões no sistema eletrônico foram necessárias com o objetivo de minimizar este problema. Entretanto, este nível de ruído não foi adequadamente sanado. A

forma utilizada para evitar a grande quantidade de ruído de baixo nível de intensidade foi eliminar através do corte do sinal em 0,5 V (todos os pontos adquiridos abaixo deste valor não foram armazenados pelo sistema de aquisição), conforme visto na Fig. 4.3. Este valor foi determinado após vários ensaios preliminares. Esta técnica foi também utilizada nos trabalhos de Ferraresi (1996) e de Fals (1999).

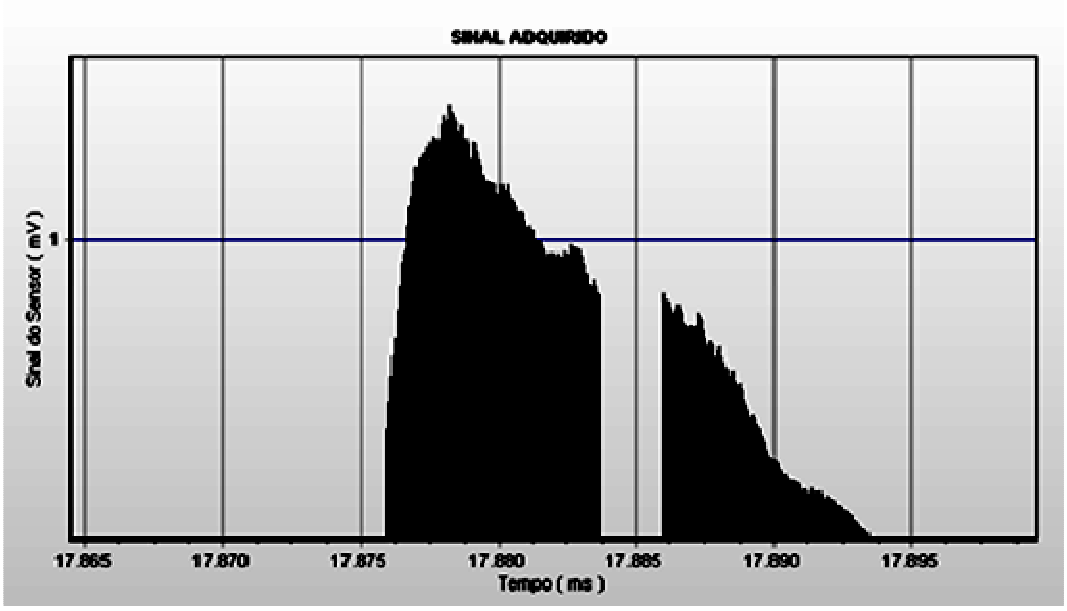


Figura 4.1: Primeiro ensaio com o sistema de EA.

Outro fato adotado neste trabalho com base na Figura 4.2 é que o ruído do sistema apresenta no máximo 5 pontos consecutivos (para a freqüência de 36 kHz), isto é, um ruído com no máximo um tempo de 0,139 ms, bem abaixo de um sinal de formação ou propagação de trinca citado pela literatura. Desta forma, adotou-se neste trabalho que a quantidade de pontos para uma análise de trinca será de 0,2 ms, o que significa ter no mínimo 7 pontos consecutivos de aquisição. A Figura 4.3 mostra o mesmo sinal da Fig. 4.2 com o corte de tensão em 0,5 V e com o filtro de ruído.

Com a condição de corte em 0,5 V e eliminando os picos de ruídos realizou-se um novo ensaio de aquisição com o Sensor conectado em chapa de aço. Após o início da aquisição aplicaram-se duas vibrações na chapa em forma de batida com barra metálica. O resultado deste ensaio está mostrado na Fig. 4.4, com um sinal do sistema de EA de alta amplitude (10 V) devido a forte intensidade do impacto realizado sobre a chapa. A Figura 4.5 mostra o perfil do sinal para a primeira excitação.

Com isso, acredita-se que o sistema de EA está apto a detectar a formação e propagação de trincas de hidrogênio. Em todos os ensaios a partir de então utilizou uma

tensão de corte no sinal de EA de 0,5 V e também filtros nos sinais para uma análise de formação e propagação de trincas.

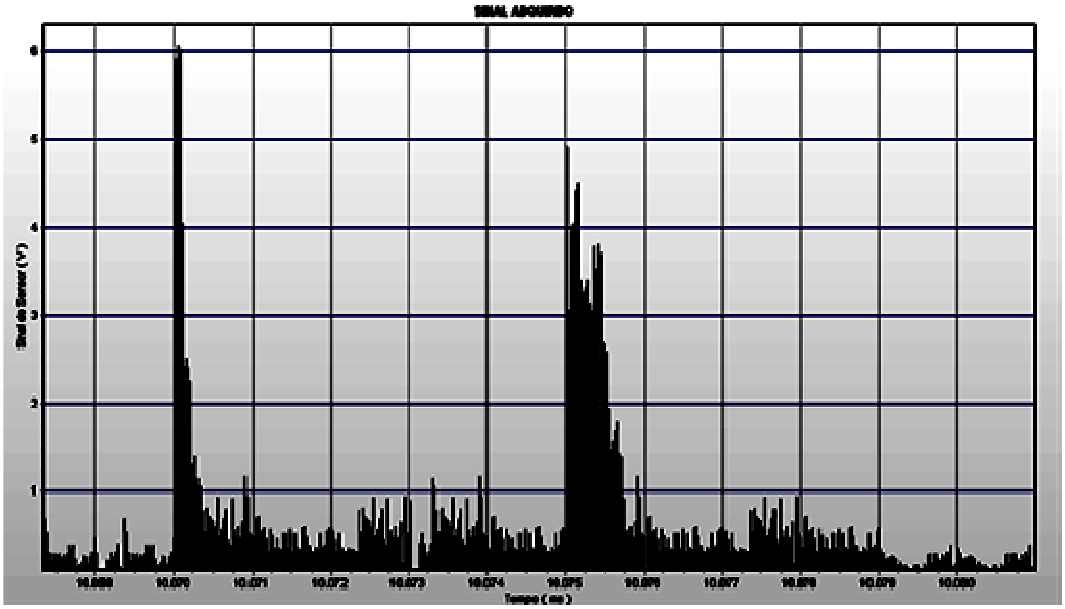


Figura 4.2: Sinal do sensor completo, sem o corte nos níveis de ruído.

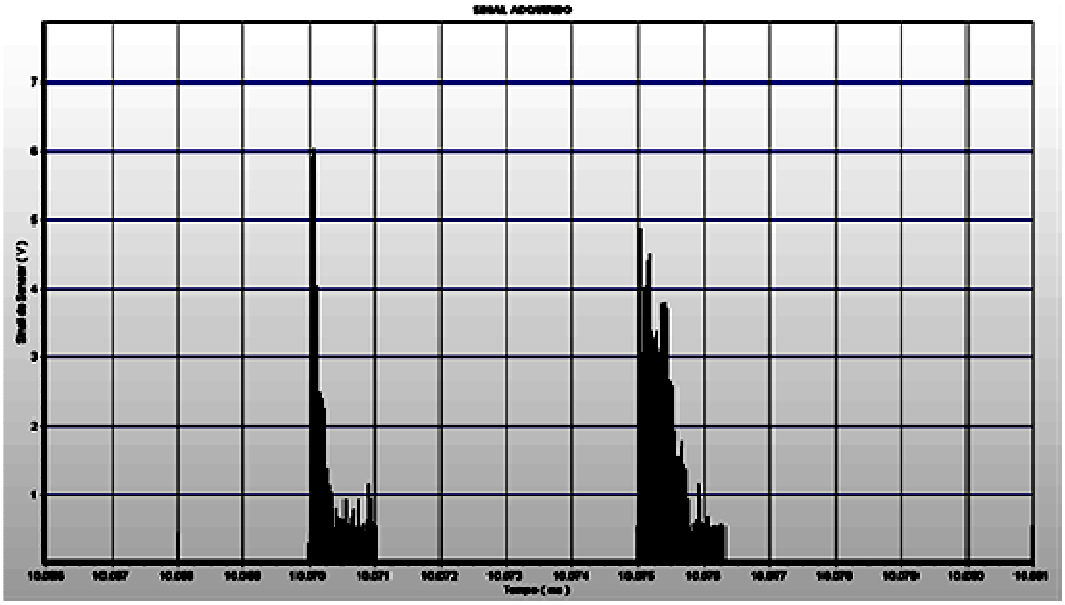


Figura 4.3: Sinal do sensor com corte de 0,5 V e filtro de ruído.

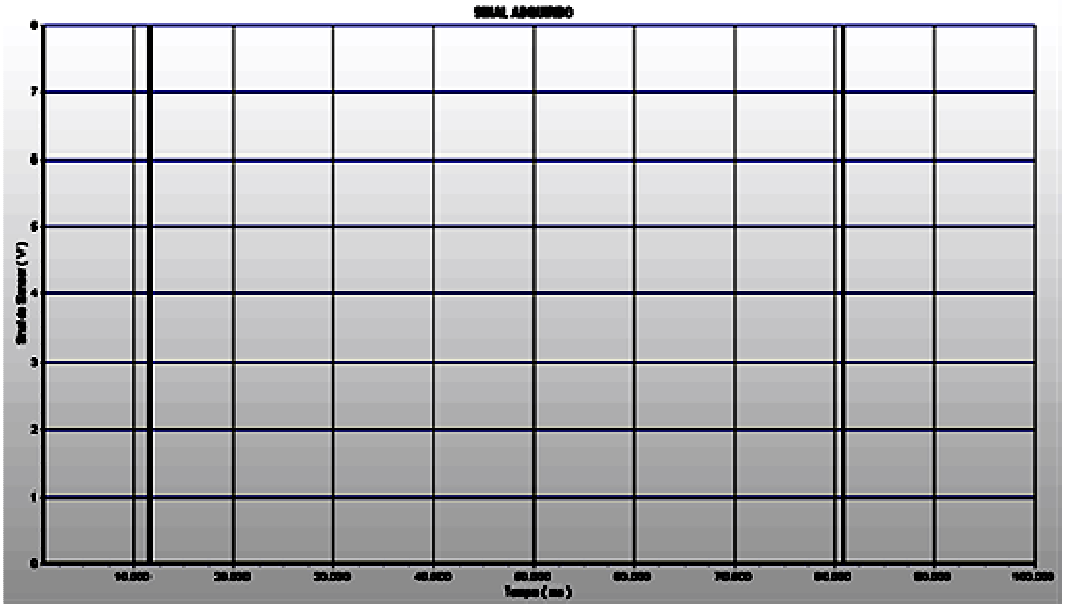


Figura 4.4: Ensaio com o sensor conectado a uma chapa de aço.

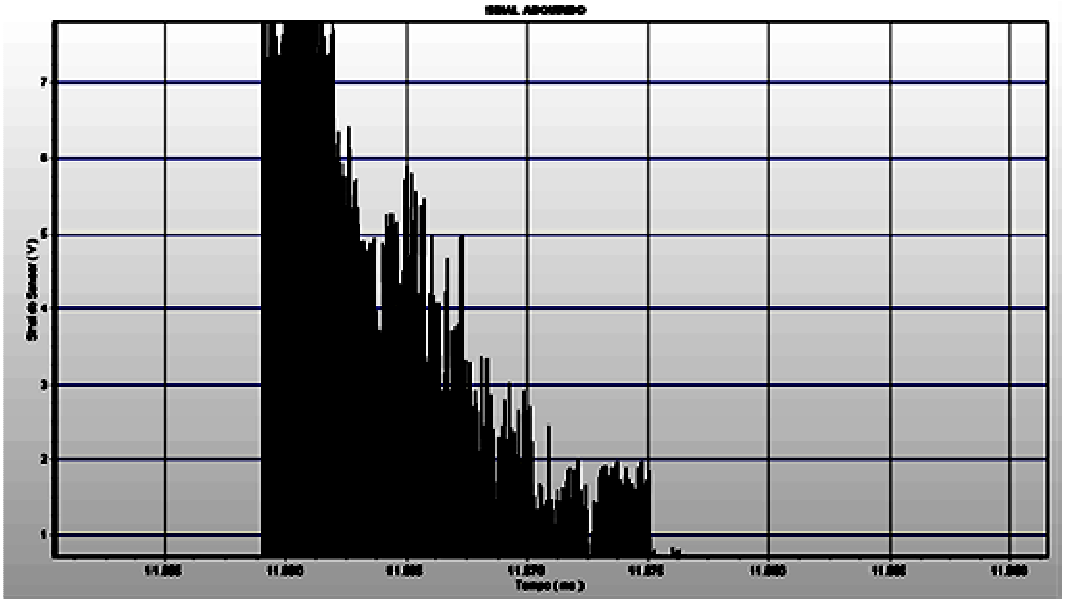


Figura 4.5: Detalhes do sinal de EA conectado a uma chapa de aço.

4.2. Ensaios preliminares com o Teste G-BOP

Com o objetivo de aprimoramento do procedimento sobre a técnica de ensaio G-BOP, juntamente com o sistema de EA, foram realizados cinco testes preliminares (P1 à P5 conforme Tab. 4.1) com adição de óleo mineral na junção dos corpos de prova para induzir hidrogênio na região do cordão de solda e provocar a formação e propagação da trinca.

Foram utilizados dois processos, ER e MIG/MAG. Para o processo ER (testes P1 a P4) a corrente de soldagem ajustada na fonte de soldagem foi de 140 A, soldado manualmente conforme Fig. 4.6. Para o processo MIG/MAG (teste P5) ajustou-se a tensão em 22 Volts, indutância Ks e Kd em 20 e velocidade de alimentação em 4,5 m/min. Os valores reais dos parâmetros utilizados são mostrados na Tab. 4.1.

Tabela 4.1: Valores obtidos com a realização do Cordão de Solda.

Teste	**Processo**	**Corrente (A)**	**Tensão (V)**	**Velocidade de soldagem (cm/min)**
P-1	ER	142	24,0	21,66
P-2	ER	143	23,6	19,49
P-3	ER	140	25,2	19,70
P-4	ER	143	25,8	20,50
P-5	MIG/MAG	159	22,0	20,00

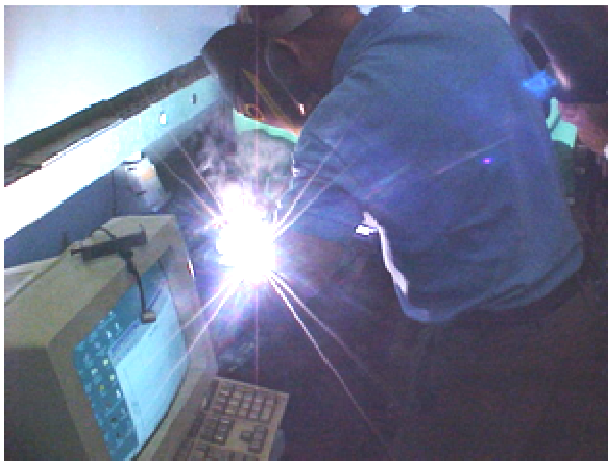


Figura 4.6: Soldagem manual para o Teste Preliminar do ensaio G-BOP.

A Figura 4.7 ilustra a montagem do corpo de prova G-BOP soldado manualmente com o sensor acoplado a peça para os testes preliminares. Notar que neste ensaio ainda não se adotou o devido isolamento entre o sensor e a peça conforme descrito no Capítulo III.

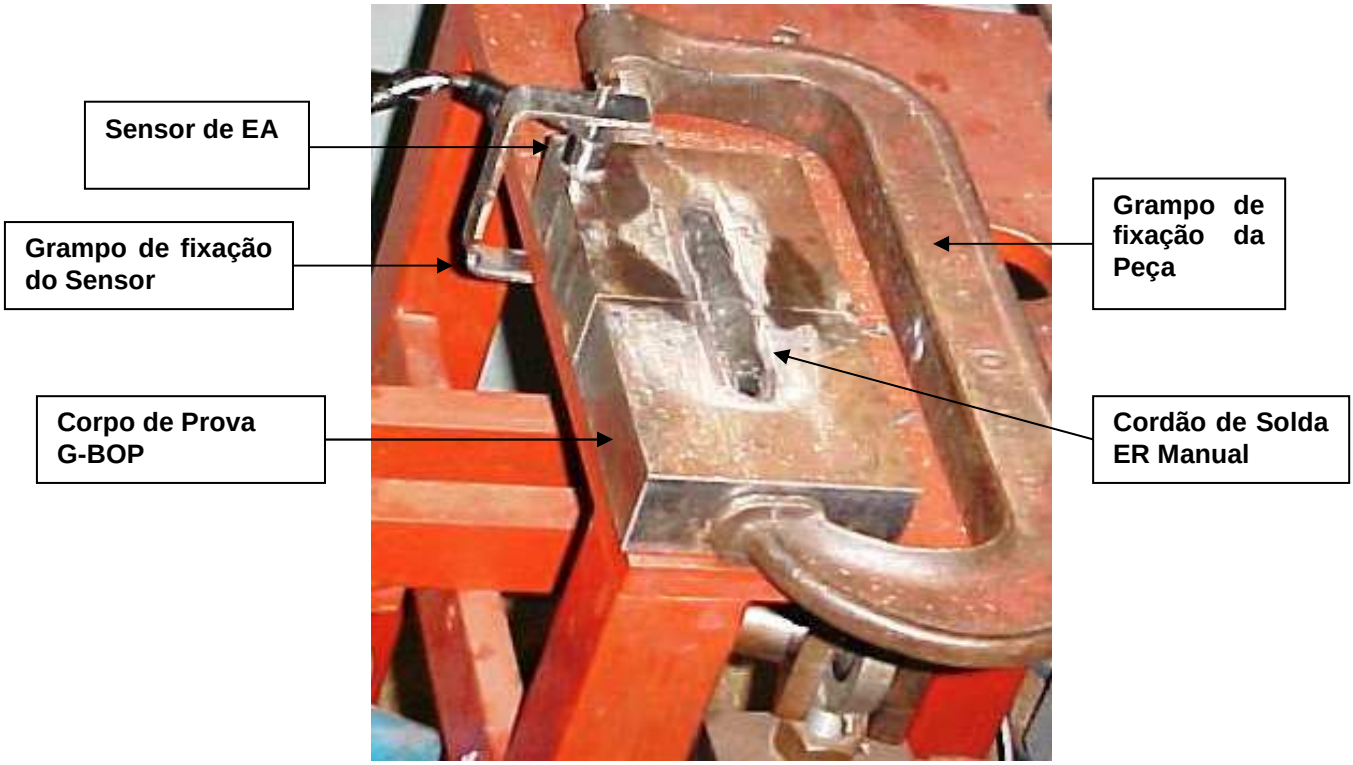


Figura 4.7: Montagem inicial entre o sensor e a peça para os testes preliminares do ensaio G-BOP.

Para o Teste P-1 o tempo total de aquisição de dados foi de 3 horas devido a necessidade de uma análise preliminar sobre o comportamento do sensor conectado à peça durante o ensaio. A Tabela 4.2 apresenta a quantidade de picos observadosos e os principais parâmetros relacionados ao pico.

Tabela 4.2: Resultados obtidos para o Teste P-1 com Eletrodo Revestido.

Pico	U máx (V)	t i (ms)	t f (ms)	Δ t (ms)
1	6,44	1.670,02	1.676,33	6,31
2	6,05	10.070,05	10.075,00	4,95
3	6,57	23.700,03	23.707,26	7,23
4	7,62	41.220,03	41.225,19	5,16
5	6,06	46.470,00	46.472,39	2,39
6	7,22	78.975,00	78.983,28	8,28
7	5,33	329.605,10	329.640,70	35,60
8	6,39	2.917.180,00	2.917.191,00	11,00

Onde: 1) $U_{máx}$: é o pico máximo de tensão para o período de aquisição avaliado (em Volts) para a trinca de maior intensidade. 2) t_i: representa o primeiro instante de excitação do sensor ao ocorrer a trinca de maior intensidade. 3) t_f: é o último instante de propagação da

trinca em que se atinge a constante de corte de 0,5 V. 4) Δt: é a diferença entre o tempo inicial e final de pico indicando a duração da propagação da trinca.

O perfil do sinal adquirido durante o ensaio é mostrado na Fig. 4.8 revelando seu comportamento durante as 3 horas de teste.

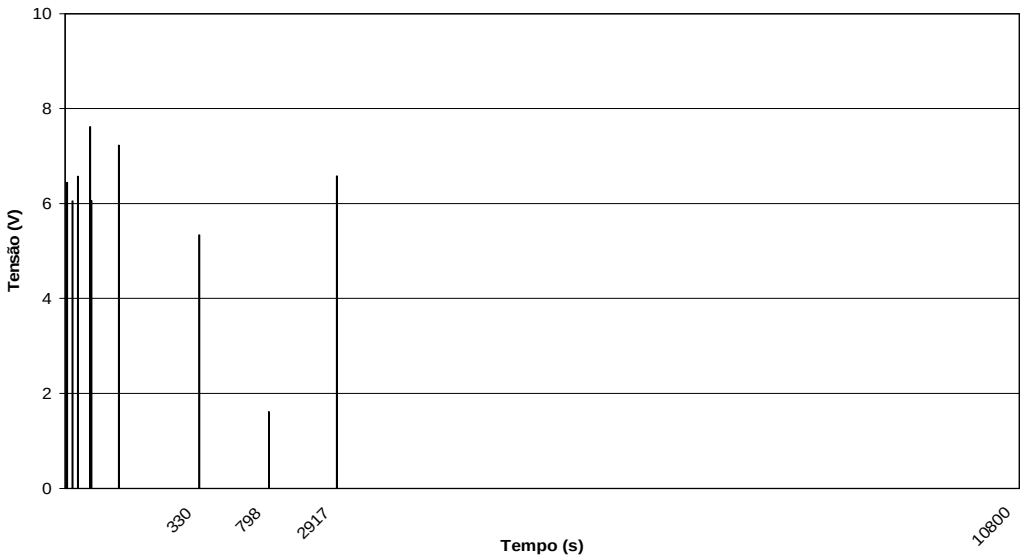


Figura 4.8: Ilustração do Teste P 1 soldagem ER com óleo.

Os detalhes do sinal estão apresentados nas Fig. 4.9 e 4.10. O pico 4 apresenta a maior intensidade de sinal com valor de 7,62 V e o Pico 7 o maior período de propagação em torno de 35 mili-segundos. Neste teste o último sinal coletado pelo sensor ocorreu 48 minutos após a realização do cordão de solda com a conexão do sistema de aquisição de Emissão Acústica ao corpo de prova. Os perfis do sinal de EA estão semelhantes aos obtidos por Ferraresi (1996) e Fals (1999), mostrando que o sistema está detectando sinal acústico advindo do corpo de prova.

É importante destacar que o primeiro pico ocorreu imediatamente após o início da aquisição (1,6 segundos). Sendo um teste preliminar não se teve o cuidado necessário quanto ao controle da temperatura para o início do ensaio. Isto demonstra que o primeiro pico pode não ser o início de formação da trinca e sim a sua propagação.

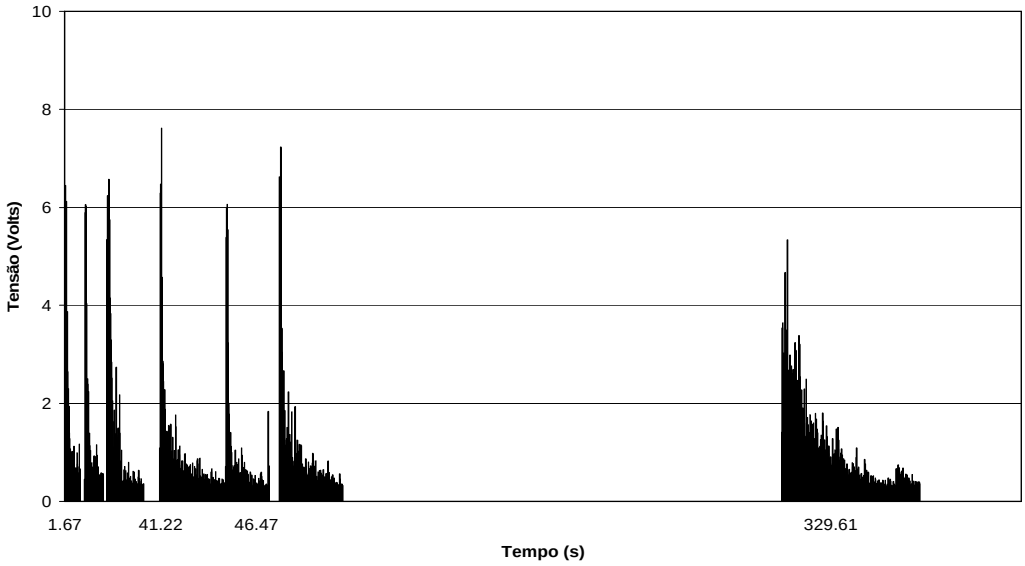


Figura 4.9: Ilustração do sinal entre 0 e 350 segundos para o Teste P-1.

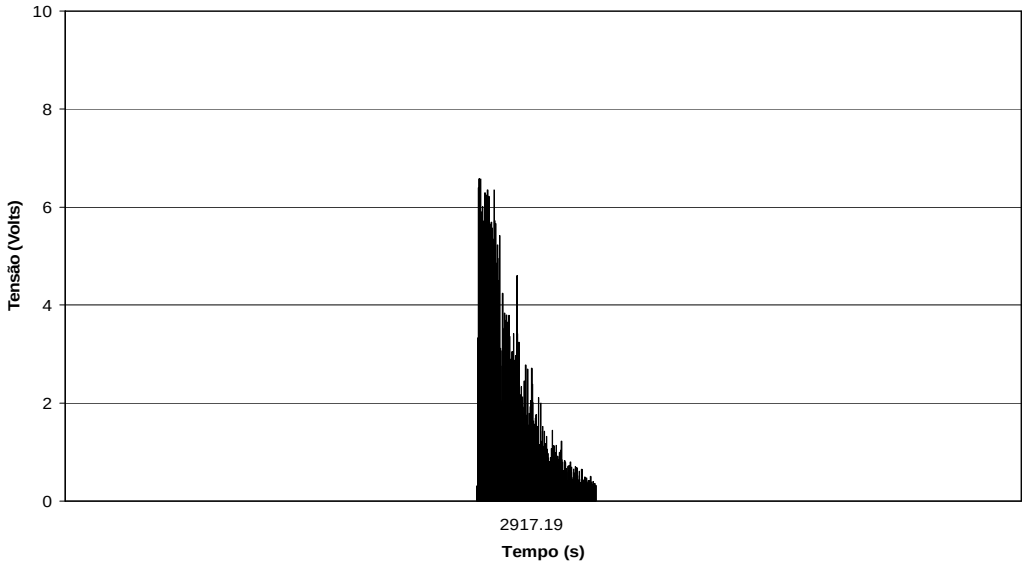


Figura 4.10: Ilustração do sinal entre 2.900 e 2.950 segundos para o Teste P-1.

A Figura 4.11 mostra o detalhe da região oxidada do cordão de solda após aquecimento com chama e rompimento do corpo de prova para o teste P-1. Neste caso observa-se a presença de duas regiões distintas, uma representando a ruptura do cordão de solda após o aquecimento para oxidar a região da trinca e outra colorida (região onde provavelmente ocorreu a trinca de hidrogênio).

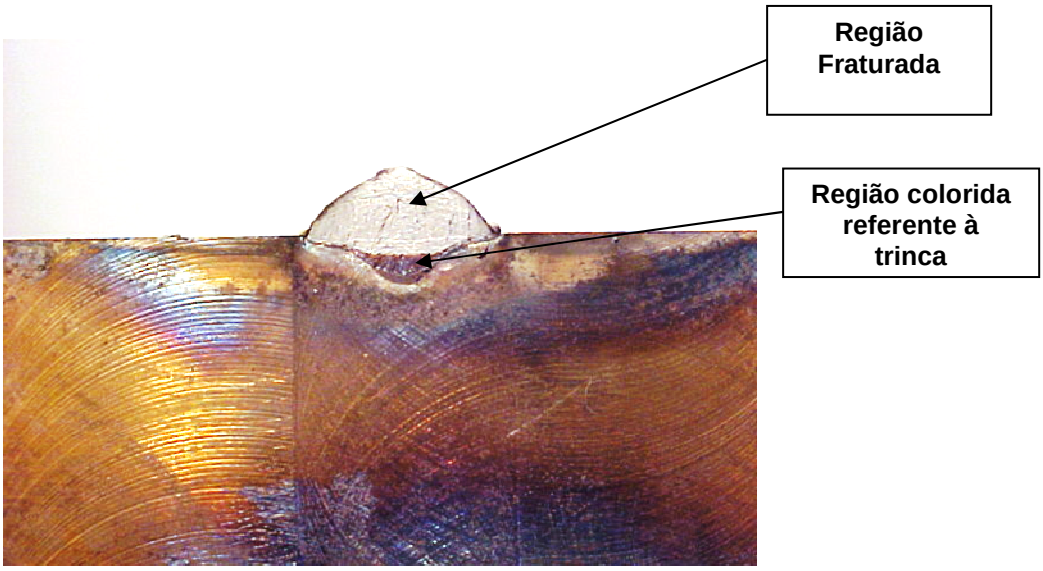


Figura 4.11: Corpo de Prova oxidado para o teste P-1.

Com o objetivo de avaliar e testar de forma gradativa o sistema de aquisição repetiu-se o teste soldado manualmente pelo processo ER com óleo, porém agora com o tempo de 8 horas de aquisição e constante de corte em 0,5 Volts. Os resultados estão apresentados na Tab. 4.3.

Tabela 4.3: Resultados obtidos para o Teste P-2 Eletrodo Revestido com Óleo.

Pico	U máx (V)	t i (ms)	t f (ms)	Δ t (ms)
1	7,04	3.890,16	3.897,19	7,03
2	6,61	11.380,11	11.386,51	6,40
3	6,34	16.000,03	16.005,85	5,82
4	6,61	19.015,11	19.018,85	3,74
5	6,68	28.525,05	28.530,16	5,11
6	6,63	30.930,05	30.935,05	5,00
7	6,85	38.530,03	38.535,66	5,63
8	6,53	46.016,00	46.019,16	3,16
9	6,53	50.585,27	50.592,66	7,39
10	6,64	55.415,05	55.422,28	7,23
11	7,07	65.660,11	65.665,00	4,89
12	6,78	83.930,05	83.933,79	3,74
13	6,69	87.050,05	87.055,00	4,95
14	6,73	97.365,14	97.370,63	5,49
15	6,93	4.983.415,05	4.983.42,30	7,94
16	2,01	6.649.210,00	6.649.215,63	5,63

A Figura 4.12 ilustra o sinal obtido para as 8 horas de aquisição deste ensaio sendo notável a grande quantidade de picos nos dois primeiros minutos de aquisição. A Figura 4.13 traz de forma ampliada o sinal entre 0 e 110 segundos de aquisição com os 14 primeiros picos de excitação do sensor.

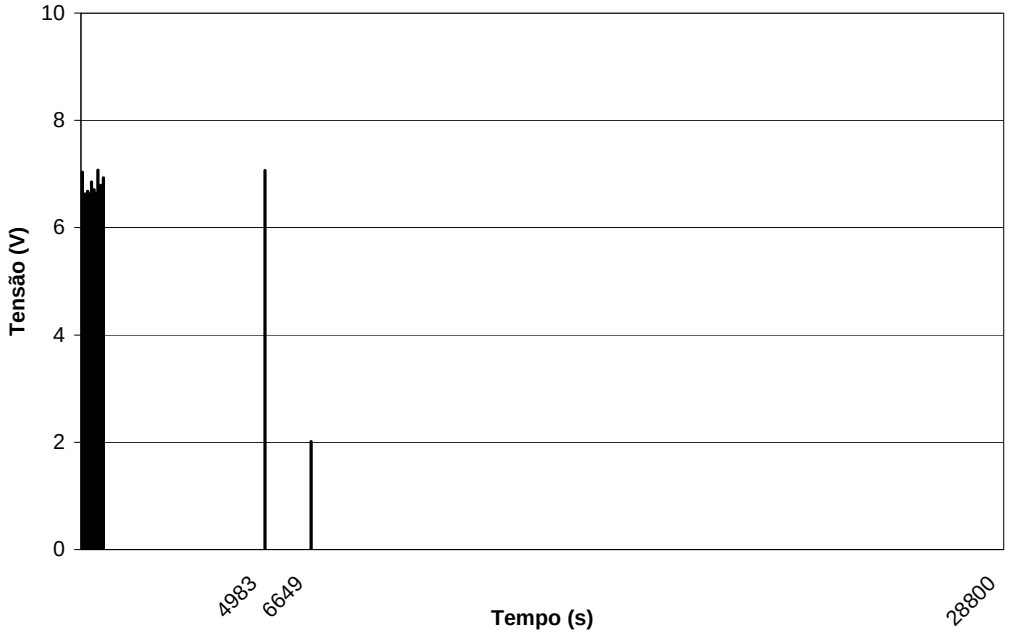


Figura 4.12: Ilustração do sinal de 8 horas de aquisição para o Teste P 2 soldagem ER com óleo.

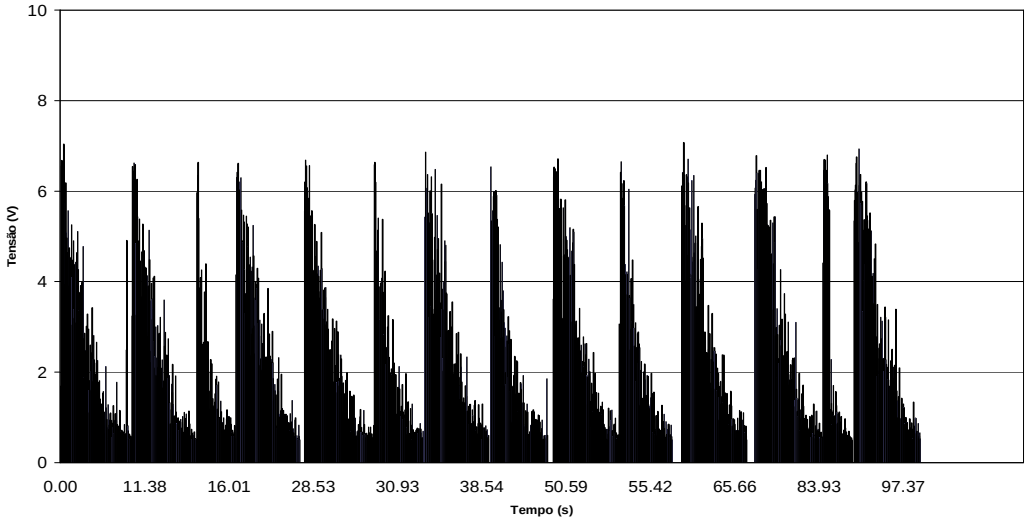


Figura 4.13: Ilustração do sinal entre 0 e 110 segundos para o Teste P-2.

Na Figura 4.14 são mostradas as duas últimas intensidades de pico adquiridas durante o ensaio. O último registro no Sensor de Emissão Acústica ocorre a 1 hora e 23 minutos após fixação do sensor ao corpo de prova. Mais uma vez no início do ensaio ocorreu uma grande quantidade de pico, o primeiro ocorreu a 3,8 segundos podendo ou não ser a formação da trinca.

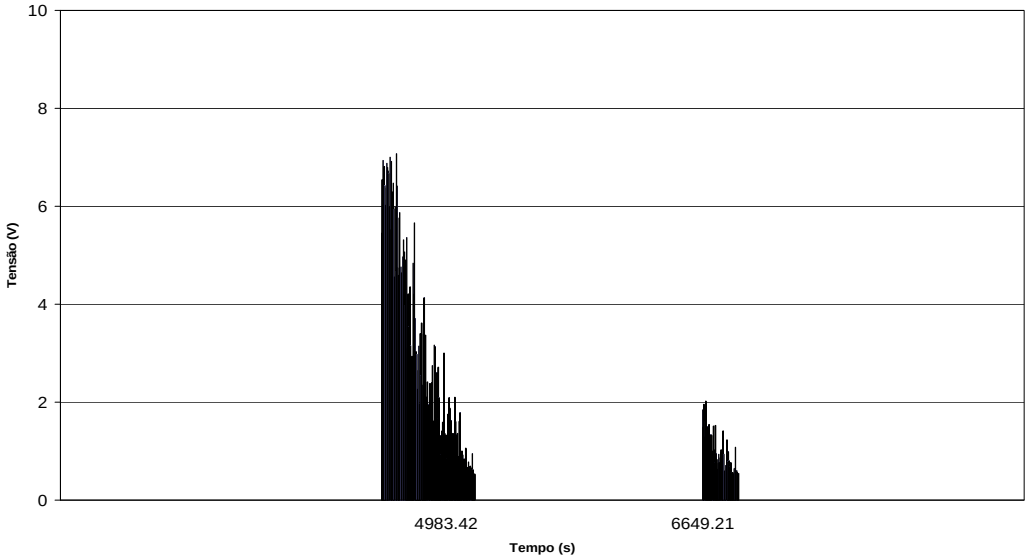


Figura 4.14: Ilustração do sinal entre 4.000 e 7.000 segundos para o Teste P-2.

Com o objetivo de ampliar o tempo de aquisição para as 24 horas fez-se a repetição do teste preliminar P-1 e P-2 denominando-se teste preliminar P-3. Novamente realizou-se soldagem ER manual com presença de óleo ajustando-se os mesmos parâmetros já citados anteriormente. Entretanto este ensaio contou com a ajuda de um termopar colocado sobre o cordão de solda e o seu início de aquisição com uma temperatura um pouco abaixo de 200°C. A Tabela 4.4 mostra os valores obtidos para a repetição deste ensaio.

Novamente nota-se uma grande quantidade de picos captados pelo sensor na faixa de tempo até 1 minuto conforme Fig. 4.15. O detalhe deste sinal na faixa de maior ocorrência de picos é mostrado na Fig. 4.16.

Novamente verificou que os picos ocorrem em grandes quantidades e no início do ensaio, dificultando uma análise precisa dos resultados. Após uma discussão mais ampla com os membros da equipe, chegou a conclusão que o fato de prender o corpo de prova com a ajuda de um grampo (ver Fig. 3.18 do Capítulo 3) e que a diferença de temperatura entre o corpo de prova e o grampo poderia estar gerando atrito de forma a emitir ondas elásticas de mesma freqüência e amplitude similar a uma propagação de trinca.

Tabela 4.4: Resultados obtidos para o Teste P-3 Eletrodo Revestido com Óleo.

Pico	U máx (V)	U f (V)	t i (ms)	t f (ms)	Δ U (V)	Δ t (ms)
1	3,36	0,51	6.399,35	6.405,48	2,83	6,13
2	3,76	0,50	6.514,35	6.521,08	3,25	6,73
3	3,59	0,50	6.529,27	6.535,89	3,09	6,62
4	3,88	0,54	6.959,49	6.965,43	3,34	5,93
5	6,80	1,36	7.244,35	7.250,32	5,44	5,96
6	7,12	0,86	7.250,70	7.257,76	6,26	7,06
7	6,67	0,52	7.258,61	7.269,00	6,15	10,39
8	6,86	0,74	7.389,02	7.397,59	6,12	8,57
9	4,54	0,54	7.398,34	7.402,29	3,99	3,95
10	7,02	0,53	7.404,79	7.414,03	6,49	9,23
11	3,26	0,52	7.564,05	7.571,64	2,74	7,58
12	6,60	0,50	7.579,93	7.589,52	6,09	9,58
13	3,81	0,50	7.759,08	7.765,62	3,30	6,54
14	6,39	0,50	8.084,38	8.092,57	5,88	8,19
15	3,40	0,51	8.172,07	8.175,48	2,88	3,41
16	6,59	3,23	8.175,86	8.179,84	3,35	3,97
17	6,99	0,52	8.178,34	8.189,00	6,46	10,66
18	4,12	0,56	8.509,35	8.516,58	3,56	7,22
19	5,76	0,55	15.919,38	15.924,55	5,21	5,17
20	6,84	0,51	16.539,03	16.547,68	6,33	8,65
21	6,88	0,51	32.199,33	32.205,32	6,37	5,99
22	6,30	0,51	32.579,00	32.585,73	5,79	6,73
23	6,31	0,57	41.404,33	41.410,98	5,74	6,65

Desta forma, passou a utilizar um material isolante entre as bordas do grampo e o corpo de prova. O mesmo procedimento foi feito com relação a forma de prender o sensor ao corpo de prova (ver Fig. 3.19 do Capítulo 3). Outro ponto importante foi a monitoração da temperatura do cordão de solda para o início do ensaio. O ensaio iniciava quando a temperatura do termopar indicava valores um pouco acima de 150°C (entre 200 e 150^{0}C).

Com o sistema modificado realizou-se mais um teste (Teste P-4). O resultado para este teste é ilustrado na Tab. 4.5 e Fig. 4.17. Neste caso, mesmo com as mudanças realizadas as excitações do sensor continuaram concentradas em tempos abaixo de 2 minutos, assim como nos demais teste anteriores com eletrodo revestido soldados na presença de óleo. É importante observar a redução em quantidade de picos captados pelo sensor de EA demonstrando a necessidade de modificações na forma de prender os grampos e o sensor à peça.

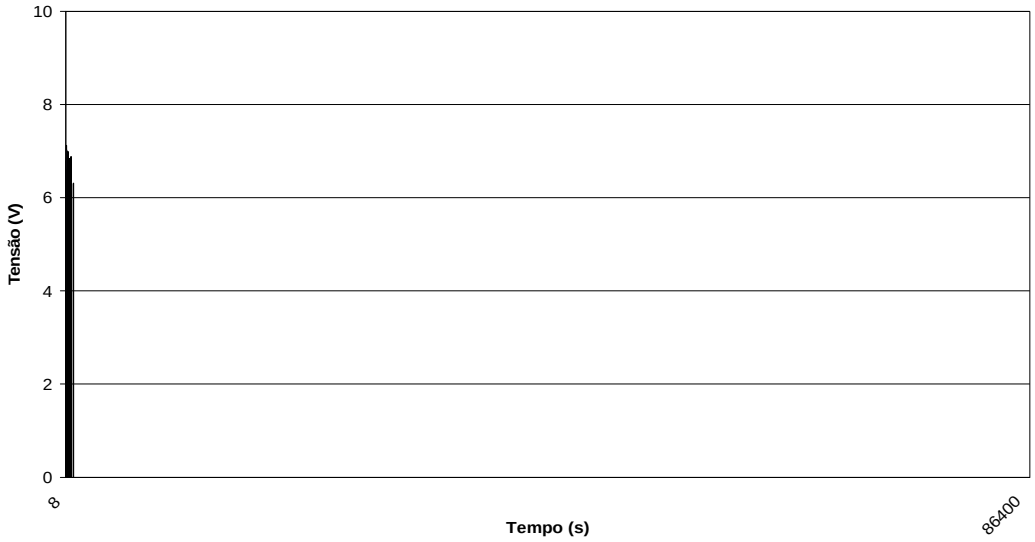


Figura 4.15: Ilustração do sinal de 24 horas de aquisição para o Teste P 3 soldagem ER com óleo.

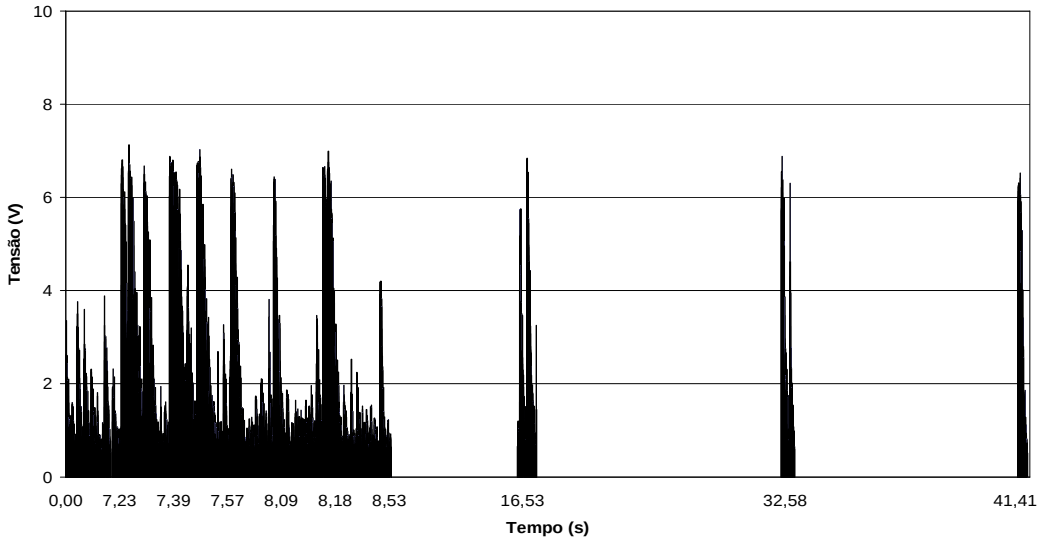


Figura 4.16: Ilustração do sinal entre 0 e 60 segundos para o Teste P-3.

Conforme Tabela 4.5 o primeiro pico ocorreu no início do ensaio, provavelmente devido a formação da trinca hidrogênio (temperatura abaixo de 200°C) e os outros dois picos foram devido a propagação da trinca. Isto demonstra a viabilidade do sensor de EA acoplado ao teste G-BOP para estudar a formação e propagação da trinca de hidrogênio.

Tabela 4.5: Resultados obtidos para o Teste P-4 soldado com eletrodo revestido com óleo.

Pico	U máx (V)	U f (V)	t i (ms)	t f (ms)	Δ U (V)	Δ t (ms)
1	6,51	0,53	13.143,38	13.163,11	5,96	19,73
2	6,56	0,56	80.898,91	80.918,58	5,99	19,67
3	6,87	0,53	118.043,70	118.060,60	6,34	16,04

A evolução deste sinal na região de maior freqüência de excitações é mostrado na Fig. 4.18.

Figura 4.17: Ilustração do sinal de 24 horas de aquisição para o Teste P-4 soldagem ER limpo.

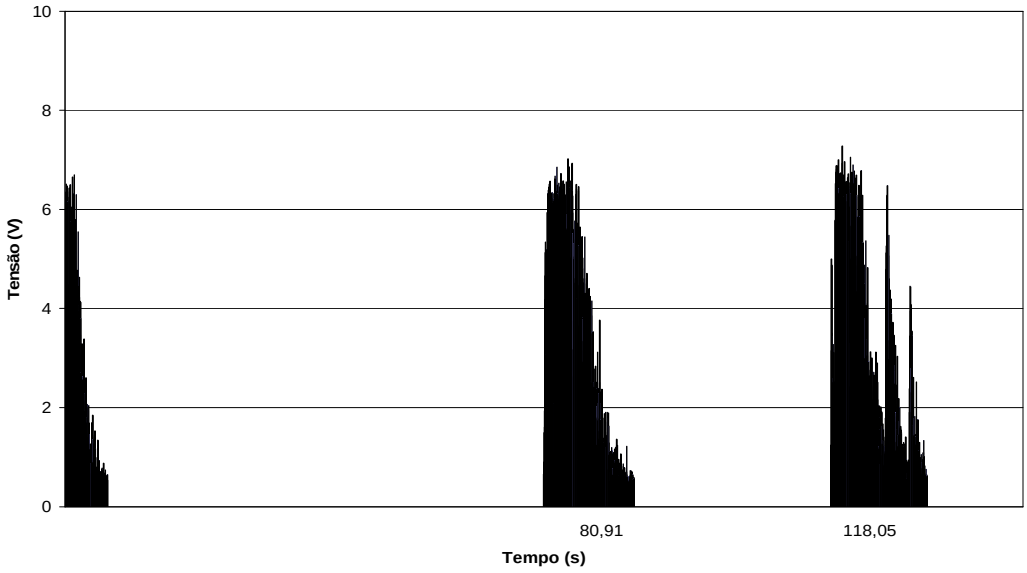


Figura 4.18: Ilustração do sinal entre 0 e 120 segundos para o Teste P-4.

Visando melhor avaliação comparativa com os resultados anteriores optou-se agora em realizar o Teste P-5 pelo processo MIG/MAG de forma automática com corpo de prova com óleo. Com isso eliminam-se possíveis variações causadas pelo processo de soldagem manual além de permitir uma avaliação comparativa entre os processos de soldagem ER e MIG/MAG.

A Figura 4.19 ilustra o sinal obtido na tela do computador após a soldagem. Nota-se novamente uma grande quantidade de excitações em tempos abaixo de 2 minutos, porém agora se tem um pico acima de 12 horas de ensaio. A Tabela 4.6 mostra o resultado obtido para soldagem MIG/MAG com óleo no Teste P-5

Tabela 4.6: Resultados obtidos para o Teste P-5 soldado pelo processo MIG/MAG com óleo.

Pico	U máx (V)	t i (ms)	t f (ms)	Δ t (ms)
1	6,23	5.175,08	5.186,09	11,02
2	6,23	7.615,03	7.621,09	6,07
3	6,70	35.455,00	35.463,41	8,41
4	6,84	37.640,03	37.650,41	10,38
5	2,79	62.465,36	62.690,03	5,60
6	1,55	124.385,30	124.387,10	1,84
7	5,52	46.269.820,00	46.269.840,00	20,00

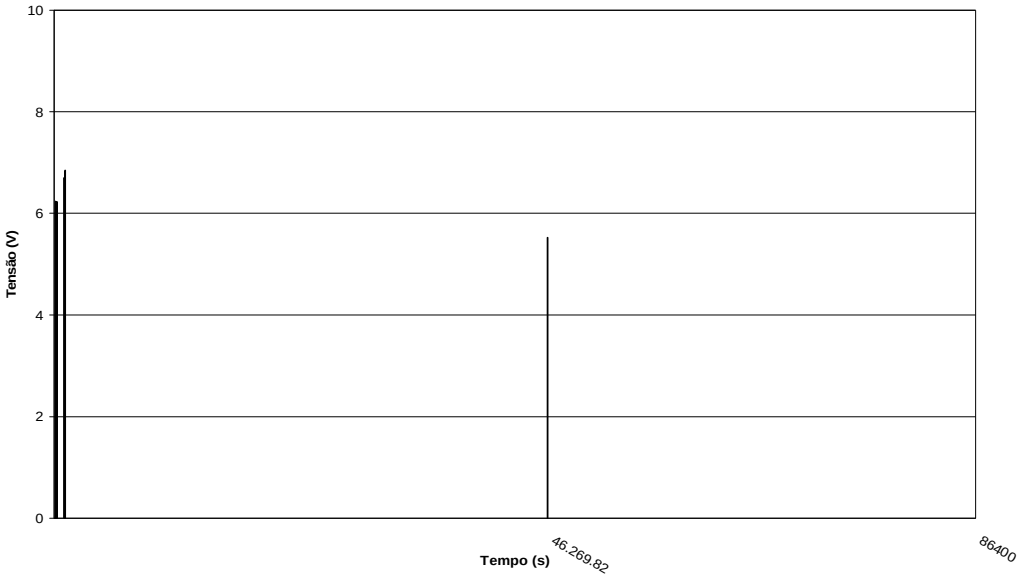


Figura 4.19: Ilustração do sinal de 24 horas de aquisição para o Teste P-5.

A região de maior incidência de sinais de aquisição de Emissão Acústica é mostrada nas Figuras 4.20 e 4.21.

Com os ensaios realizados com o teste G-BOP o sistema de EA mostrou ser adequado para a determinação da formação e propagação da trinca de hidrogênio. Com o objetivo de comprovar ainda esta confiabilidade foram realizados novos ensaios, agora com o equipamento de Teste de Implante (existente no LAPROSOLDA). O objetivo é demonstrar e comparar com a literatura que o sistema de EA desenvolvido é adequado para a finalidade proposta nesta dissertação.

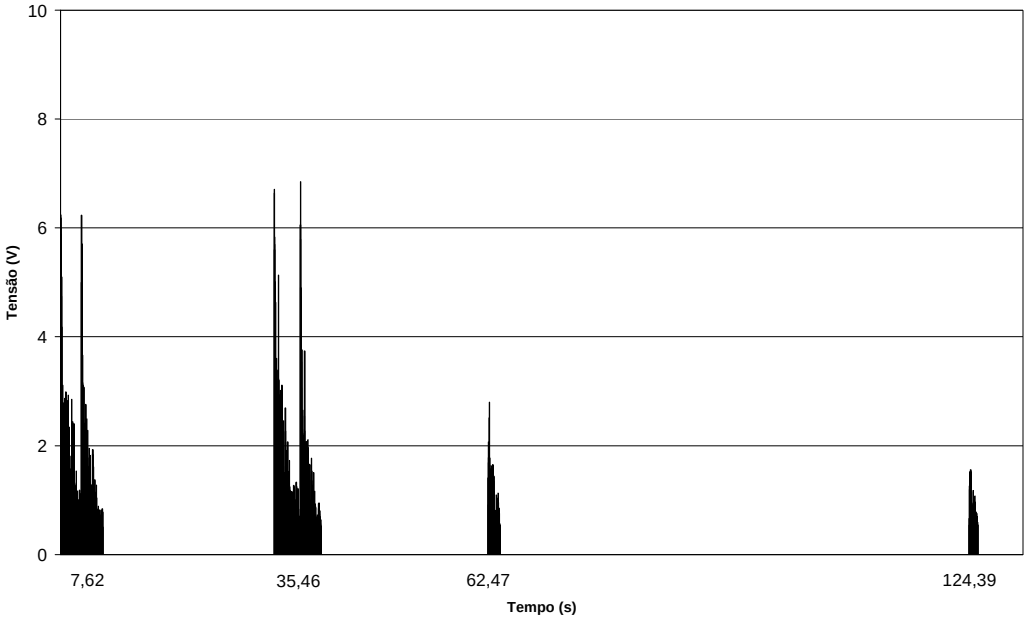


Figura 4.20: Ilustração do sinal entre 0 e 130 segundos para o Teste P-5.

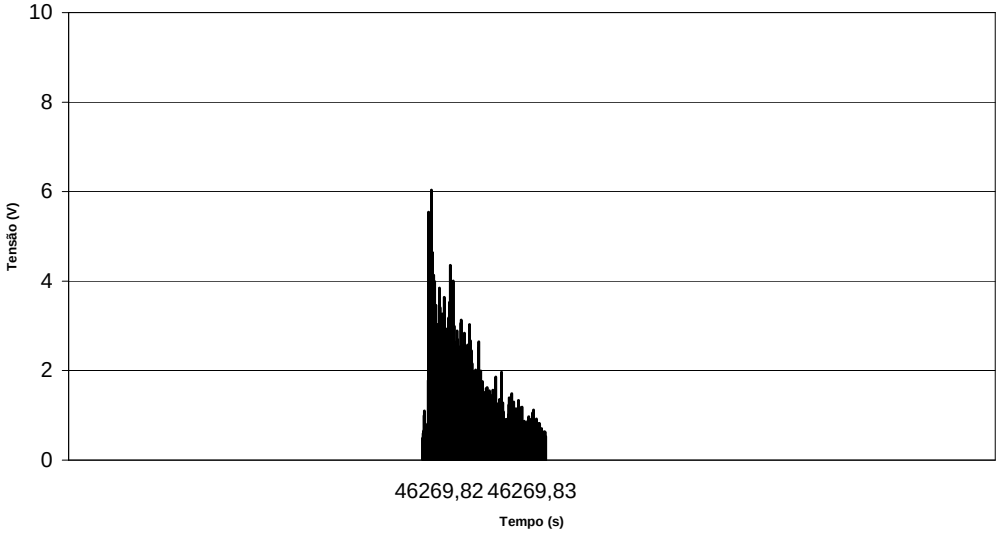


Figura 4.21: Ilustração do sinal a partir de 46.000 segundos para o Teste P-5.

4.3. Ensaios com o Teste de Implante

Nesta fase são apresentados e discutidos os resultados dos testes realizados com o sensor de Emissão Acústica acoplado ao Teste de Implante, visando comprovar a confiabilidade de todo Sistema e ter um parâmetro de comparação com a literatura com relação à propagação de trinca de hidrogênio utilizando o sensor de EA (FALS, 1999). Os testes foram realizados de acordo como descrito na metodologia (Capítulo 3 item 3.6.3 Ensaio de Implante) usando um aço estrutural nacional comercialmente produzido (SAR 80). A escolha desse material ocorreu em função de seu alto grau de susceptibilidade a trinca de hidrogênio (conforme FERRARESI, GONÇALVEZ e SCOTTI, 1993) e similaridade com o aço utilizado no Teste G-BOP (ver Capítulo 3 item 3.1.1).

Os resultados dos testes realizados para o Ensaio de Implante estão apresentados na Tab. 4.7. Verifica-se que o rompimento ocorreu apenas para cargas iguais ou superiores a 800 kgf. A Figura 4.22 ilustra um dos corpos de prova que apresentou rompimento. O tempo total de ensaio é de 20 horas ou até que o corpo de prova seja rompido.

Tabela 4.7: Resultados dos ensaios preliminares para o Teste de Implante.

Teste	Peso (kgf)	Tempo do 1°pico (ms)	Tempo de Rompimento (ms)	Número de picos	Observações
I 1	1.000	4.360	169.264	24	Rompeu o CP
I 2	900	9.330	82.410	19	Rompeu o CP
I 3	800	9.806	40.361	13	Rompeu o CP
I 4	750	-	-		Não rompeu o CP
I 5	600	-	-		Não rompeu o CP

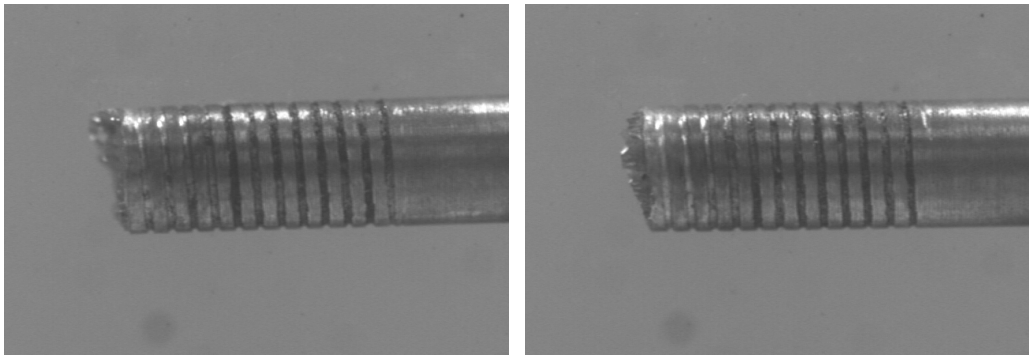


Figura 4.22: Corpo de prova de um aço susceptível à trinca de hidrogênio.

Para o Teste I1 conforme Tabela 4.7 a carga aplicada foi de 1.000 Kgf adotando-se de forma similar ao teste G-BOP a constante de corte do sinal de EA em 0,5 Volts. A Figura 4.23 mostra a evolução do sinal de trincamento conforme identificado na tela do programa de aquisição durante o ensaio de 0 à 180 s contemplando o valor de 169.264 ms no qual ocorreu o rompimento.

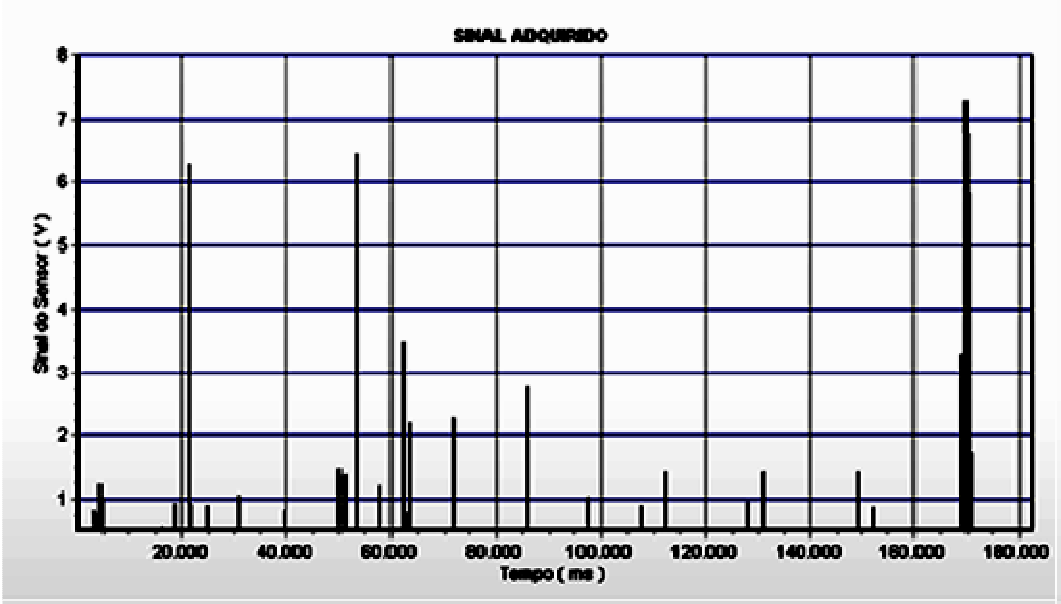


Figura 4.23: Ilustração do sinal para o Teste I1 de 0 à 180.000 ms.

Para a primeira excitação captada pelo sistema de EA tem-se uma intensidade próxima à 1,25 V aos 4.360 ms. O perfil deste sinal é mostrado na Figura 4.24 reforçando o fato de que este teste apresentou maior carga aplicada (1.000 Kgf) e conseqüentemente o primeiro sinal acontece repentinamente aos 4,3 s.

No Teste I2 conforme Tab. 4.7 a carga aplicada foi reduzida para 900 Kgf. A aquisição para o ensaio é ilustrada na Fig. 4.25. Visando melhor avaliação dos resultados deste sinal ampliou-se a região de maior interesse entre 0 e 95.000 ms com rompimento do corpo de prova em 82.410 ms.

Pela verificação da Fig. 4.25 é possível notar três picos de intensidade acima de 6 V próximo aos 15.000, 31.000 e 82.000 ms. Neste último pico aos 82.000 ms com intensidade acima de 7 Volts ocorreu o rompimento da peça. Tem-se também o surgimento do primeiro pico após 9.300 ms de início do ensaio.

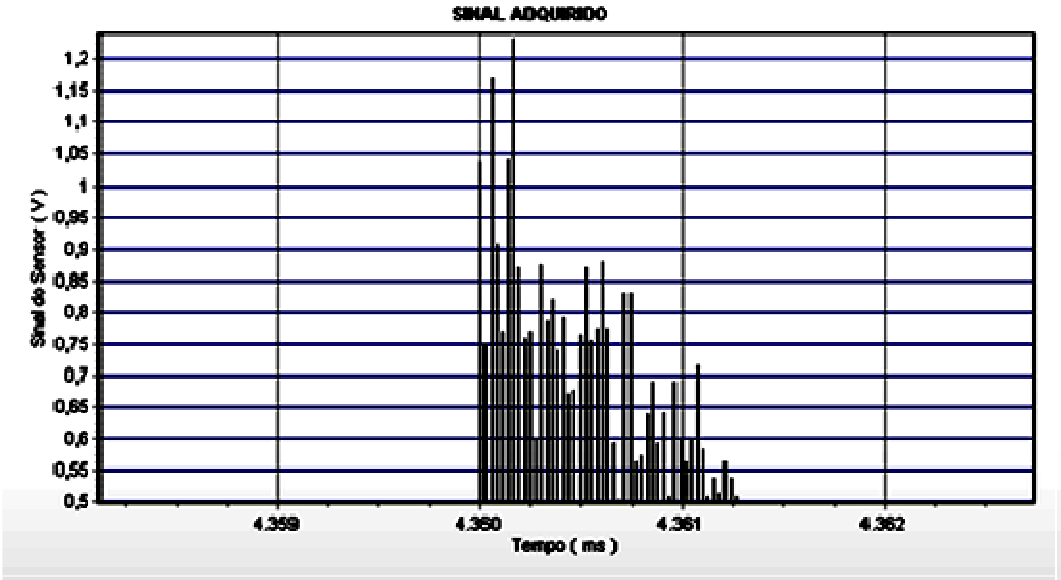


Figura 4.24: Sinal do 1º Pico para o teste I1.

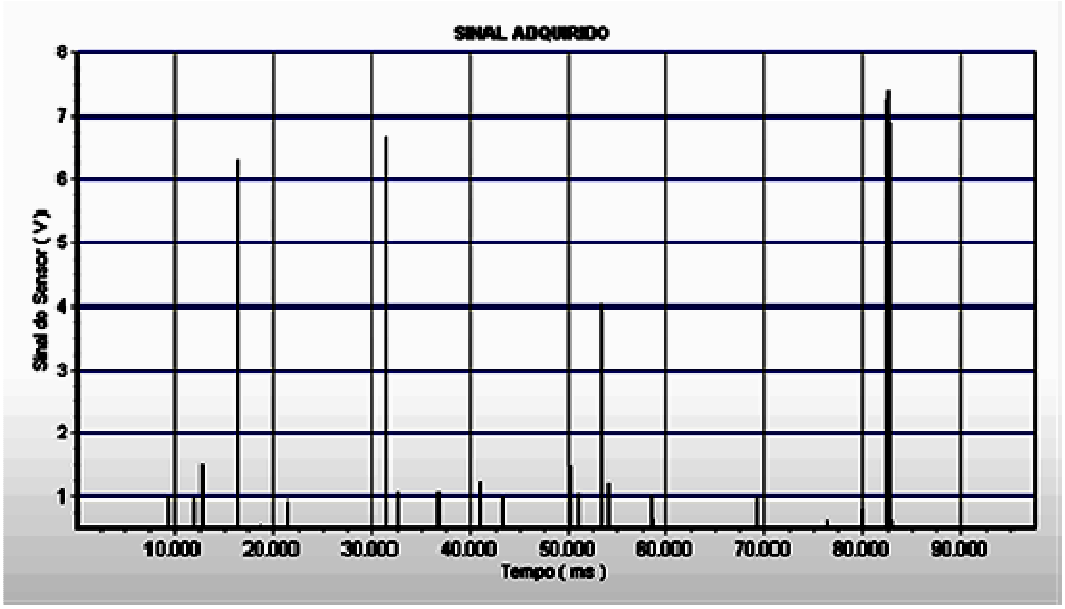


Figura 4.25: Ilustração do sinal para o Teste I2 de 0 à 95.000 ms.

No Teste I3 a carga aplicada foi de 800 Kgf sendo este valor verificado como carregamento limite para o surgimento da trinca, pois os testes de 750 e 600 Kgf não apresentaram trincas. A Figura 4.26 apresenta a evolução do sinal deste ensaio para a região principal de ocorrência de picos.

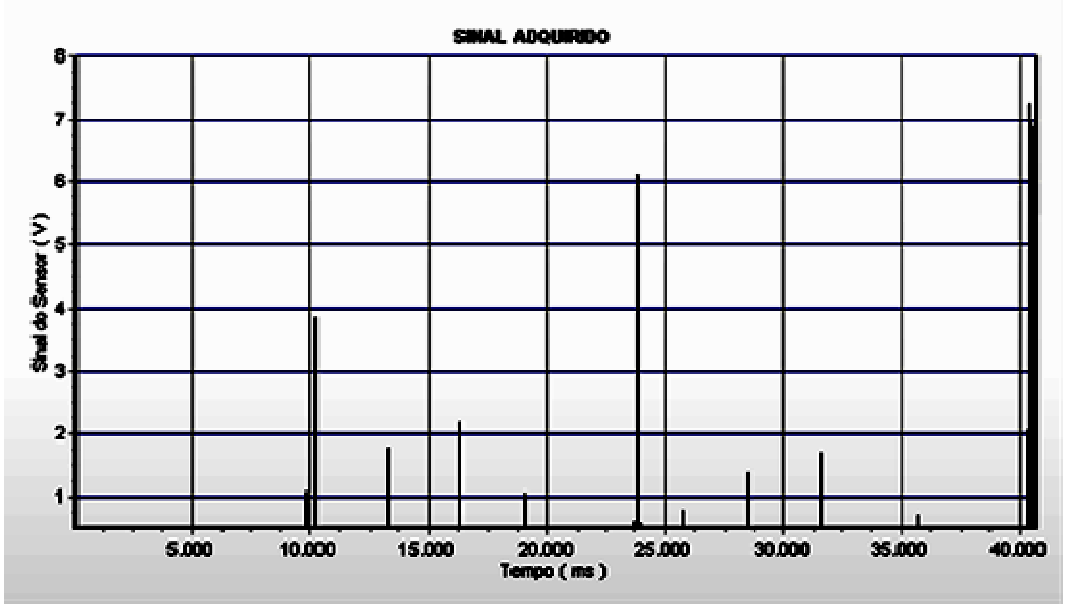


Figura 4.26: Ilustração do sinal para o Teste I3 de 0 à 40.000 ms.

Na Figura 4.27 é ilustrada a região do primeiro pico com tempo de aquisição em torno de 10 s. No sinal observado nota-se um espaçamento entre os picos iniciais e finais (com tempo em torno de 4 ms) sendo esta pausa referente ao tempo de interrupção do Windows que paralisa o programa para executar outra tarefa do sistema operacional (conforme descrito no item 4.1 deste capítulo).

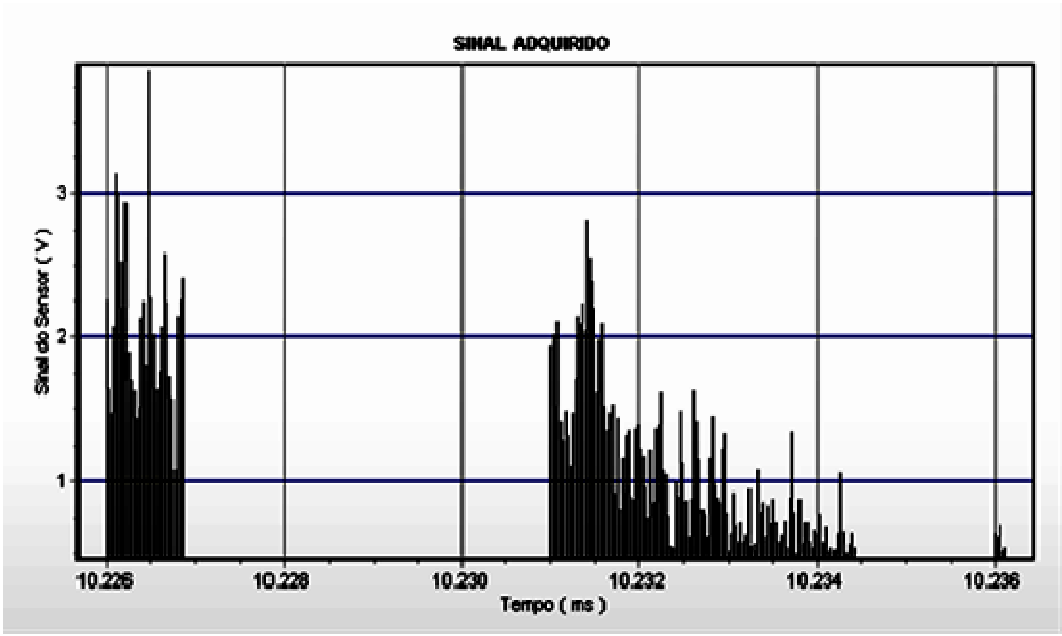


Figura 4.27: Sinal do 1º Pico expressivo para o teste I3.

Analisando de forma geral os ensaios I1, I2 e I3 o primeiro pico sempre ocorreu logo no início da aquisição em temperatura próximo à ambiente, mostrando que a trinca é realmente devido à presença de hidrogênio. Os resultados mostram também que a EA detecta a formação da trinca de hidrogênio, bem como a sua propagação até o rompimento do corpo de prova, ficando evidente a eficiência do sistema de teste de Implante em conjunto com o sensor de Emissão Acústica.

4.4. Avaliação Final dos Testes Preliminares

Segundo Fals (1999) a faixa de freqüência útil do filtro corresponde a freqüência gerada no fenômeno de trincas de hidrogênio concentrada entre 100 e 200 kHz. Tem-se também que a duração do pico característico do fenômeno de trincas de hidrogênio é da ordem de 6 ms. Entretanto a literatura corrente avalia como trincas valores obtidos na casa dos mili-segundos (ms) enquanto os ruídos são da ordem de micro-segundos (μs) conforme Beattie (1983 apud Fals, 1999).

Portanto, conforme resultados expressos para o trincamento observado nos testes G-BOP e Implante nos ensaios preliminares, nota-se grande similaridade com os valores citados pela literatura (ver Tab. 4.2 à 4.6) estando coerente toda avaliação realizada com base na analogia entre o rompimento do corpo de prova e característica do sinal.

O critério adotado para caracterizar como ruído o sinal com duração abaixo de 0,139 ms também se encaixa perfeitamente com a definição realizada por Fals (1999) valendo-se desta para classificá-lo como característico de trincas de hidrogênio. Este mesmo tratamento é adotado ao longo deste trabalho para os resultados obtidos com os ensaios G-BOP e Tekken.

CAPÍTULO V

ENSAIO G-BOP

5.1. Resultados gerais dos ensaios

As condições para o Ensaio G-BOP foram obtidas com base em Testes Preliminares de soldabilidade do material (ver Capítulo 3 e 4). A Tabela 5.1 apresenta os parâmetros de soldagem adotados para os processos MIG/MAG e Eletrodo Revestido (ER). Para o MIG/MAG utilizou o arame eletrodo E70S-6 de diâmetro 1,2 mm, velocidade de alimentação do arame eletrodo de 4,5 m/min e gás de proteção Ar + 25%CO_2 com vazão de 12 l/min. Para o eletrodo revestido utilizou o eletrodo E11018G de diâmetro 4,0 mm.

Tabela 5.1: Parâmetro de soldagem para o Ensaio G-BOP Soldagem MIG/MAG e ER.

Teste	Processo	Condição	Corrente (A)	Tensão (V)	Vel. de Soldagem (cm/min)	Energia de Soldagem (kJ/cm)
1	MIG/MAG	Com Óleo	198	21,0	20	0,208
2	MIG/MAG	Com Óleo	194	21,0	20	0,204
3	MIG/MAG	Limpo	191	21,0	20	0,201
4	MIG/MAG	Limpo	188	21,0	20	0,197
5	ER	Limpo	152	25,2	15	0,257
6	ER	Limpo	154	24,5	15	0,252
7	ER	Com Óleo	161	27,7	15	0,297
8	ER	Com Óleo	165	25,0	15	0,275
9	ER	Limpo Gás de Purga	167	24,7	15	0,278

A condição limpa implica que os corpos de prova do ensaio estão livres de sujeiras bem como passaram por remoção de graxa, resíduos e poeiras com utilização de detergente líquido. Em seguida utilizou-se lixadeira rotativa e escova de aço para retirar alguma camada de óxido remanescente. Para o corpo de prova com óleo utilizou-se lubrificante convencional a base de hidrocarbonetos.

Os valores de Corrente e Tensão foram coletados diretamente no visor da fonte de soldagem para o processo MIG/MAG e com o auxilio de dois multímetros para a soldagem com eletrodo revestido.

Pequenas variações nos níveis de corrente obtidos no processo ER ocorreram em função da dificuldade em ajustar corretamente este valor na fonte de soldagem. Isto não foi bem detalhado, pois o objetivo do trabalho é verificar a funcionalidade do sistema Emissão Acústica detectando o instante de formação e propagação da trinca.

Para relacionar o sinal do sensor de Emissão Acústica com a trinca formada no cordão de solda realizou-se a medição da área trincada e da área total fundida. A Tabela 5.2 mostra as medidas das áreas de trincas nos corpos de prova, onde foi possível verificar a influência da presença ou não de contaminantes sobre a formação da trinca. Realizou-se medições de área nas duas faces do corpo de prova obtendo-se os valores médios de área total fundida e área trincada. Em seguida determinou-se a porcentagem de área trincada a partir dos resultados obtidos.

Tabela 5.2: Resultados obtidos para o Ensaio G-BOP para o Processo MIG/MAG e ER.

Teste	**Processo**	**Condição**	**Àrea Total Fundida (mm^2)**	**Área Trincada**	**Porcentagem de Área trincada**
1	MIG/MAG	Com Óleo	45,21	11,66	25,79
2	MIG/MAG	Com Óleo	38,64	20,19	52,25
3	MIG/MAG	Limpo	55,94	9,32	16,66
4	MIG/MAG	Limpo	43,11	6,52	15,12
5	ER	Limpo	28,02	9,69	34,58
6	ER	Limpo	17,65	5,73	32,46
7	ER	Com Óleo	29,89	9,48	31,71
8	ER	Com Óleo	*	*	*
9	ER	Limpo Gás Purga	-	-	-

*****Este ensaio ocorreu uma área grande de trinca, mas não ficou claro a fronteira entre a região da trinca e a região deformada (rompida após o ensaio).

De forma geral tem-se para os testes 1 a 7 a formação de trincas independente do processo e limpeza (com ou sem a presença de óleo) utilizado. Para o processo MIG/MAG todos os ensaios mostraram a formação da trinca e os ensaios com a presença de óleo apresentaram uma porcentagem de área de trinca maior. Entretanto, para o eletrodo revestido esta observação não foi perceptível. O teste 8 também apresentou o fenômeno da trinca e será discutido mais a adiante.

Para o ensaio 9 (processo eletrodo revestido) soldado com gás de purga não se verificou a presença de trinca no cordão de solda. Este fato demonstra que a presença do ar atmosférico na raiz da solda pode ter influenciado os resultados com os corpos de prova limpo. Baseado em fórmulas empírica da literatura corrente é importante lembrar que o aço utilizado fica com valores de carbono equivalente em uma faixa de suceptibilidade a trinca de hidrogênio, intermediária, podendo ou não ocorrer a trinca, conforme apresentado no capítulo 3, item 3.1.

A Tabela 5.3 apresenta os resultados dos ensaios realizados com o sistema de Emissão Acústica (EA). Os ensaios com valores zero indicam que não ocorreu nenhum pico durante as 24 horas de ensaios. Para melhor entendimento da tabela segue a definição de cada termo:

- ✓ Presença de Trinca: indica se houve ou não trinca durante o ensaio.
- ✓ Tensão Máxima de Pico: é o pico máximo de tensão fornecido pelo sistema de EA (em Volts) ocorrido no primeiro pico.
- ✓ Tempo Inicial de Pico: representa o instante inicial de excitação do sensor EA ao ocorrer o primeiro pico (valores maiores que a tensão de corte).
- ✓ Tempo Final de Pico: representa o instante final de excitação do sensor EA ao ocorrer o primeiro pico (valores maiores que a tensão de corte).
- ✓ Δt: é a diferença entre o tempo inicial e final do primeiro pico, indicando a duração da propagação da trinca.
- ✓ Quantidade de Picos: representa o número de picos observados durante o teste.

Com o objetivo de correlacionar os valores de área trincada com o sinal de emissão acústica obtido apresentaremos a seguir cada um dos testes com os respectivos resultados detalhadamente.

Tabela 5.3: Resultados obtidos para o ensaio G-BOP soldagem MIG/MAG e ER.

Teste	Presença de Trinca	Tensão Máxima de Pico (V)	Tempo Inicial de Pico (ms)	Tempo Final de Pico (ms)	Δt (ms)	Quantidade de Picos
1	Sim	6,19	191.147,20	191.153,10	5,90	4
2	Sim	1,86	56.822,03	56.822.74	0,71	3
3	Sim	6,11	49.117,11	49.118,50	1,39	3
4	Sim	5,92	2.539,05	2.544,13	5,08	3
5	Sim	1,09	72.225,06	72.225,91	0,85	4
6	Sim	0,67	138.861,23	138.862,12	0,63	4
7	Sim	1,55	4.399,08	4.400,01	0,93	3
8	Sim	0,74	29.260,29	29.261,23	0,94	1
9	Não	0	0	0	0	0

5.2. Resultados dos ensaios com o processo MIG/MAG

5.2.1. Análise do Teste 1

A Figura 5.1 ilustra a região rompida do cordão de solda após aplicação de chama. Neste caso observam-se duas regiões distintas, uma colorida (escura) referente a região da trinca e outra da fratura resultante da quebra efetuada durante rompimento da amostra.

Os dados de tensão e tempo de propagação de sinal para os quatro picos são mostrados na Tabela 5.4., onde as respostas são:

- ✓ U_m: tensão máxima do pico.
- ✓ t_i: instante inicial de propagação da trinca.
- ✓ t_f: instante final de propagação da trinca.
- ✓ Δt: variação entre o tempo inicial de pico e o tempo final de pico ($\Delta t = t_f - t_i$).

O sinal adquirido durante 24 horas de aquisição para o Teste 1 é representado na Fig. 5.2, onde verifica-se a presença de 4 picos resultantes do trincamento do cordão de solda. É bom lembrar que o início da aquisição ocorreu sempre a temperatura entre 200 e 150 ^{o}C, baseado na colocação de um termopar sobre o cordão de solda logo após o término da soldagem.

Tabela 5.4: Resultados obtidos para o Teste 1 Soldagem MIG/MAG com Óleo.

Pico	Um (V)	t i (ms)	t f (ms)	Δ t (ms)
1	6,19	191.147,2	191.153,1	5,90
2	2,58	3.400.232,12	3.400.237,89	5,77
3	2,90	3.457.663,18	3.457.668,44	5,26
4	3,67	5.481.612,80	5.481.614,91	2,11

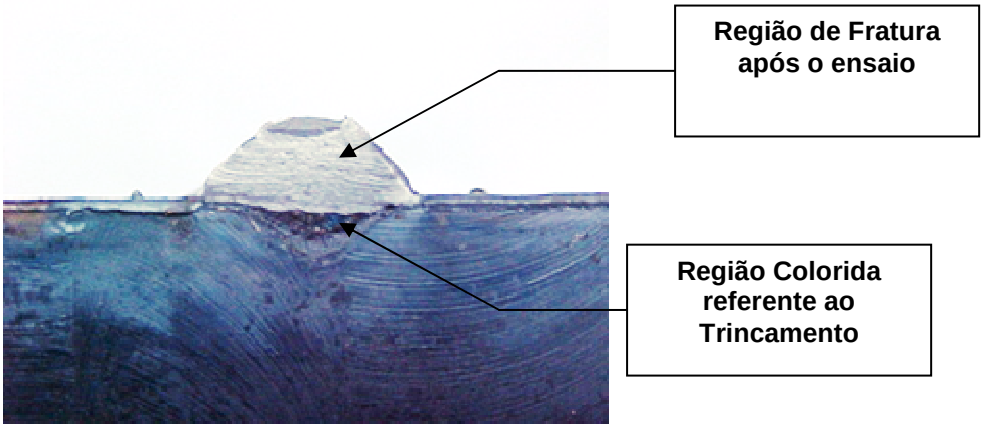


Figura 5.1: Ilustração do cordão de solda para o processo MIG/MAG com óleo após aplicaçao de chama (teste 1).

O primeiro pico ocorreu logo no início do ensaio de EA (191 s) com tempo de duração acima limite de corte, no valor de 5,90 ms, mostrando ser a formação da trinca, provavelmente ocasionada pela presença de hidrogênio. Após um determinado tempo ocorreram mais 3 picos com tempo de duração próximo do primeiro pico, referentes a propagação da trinca. É interessante observar que o quarto pico ocorreu após um período longo (1 hora e 30 minutos) com intensidade menor que o primeiro pico, indicando a propagação da trinca, aliviando completamente as tensões devido ao fenômeno da trinca de hidrogênio.

A Figura 5.3 mostra a evolução destes sinais ao longo do ensaio na região de ocorrência das trincas entre 190 e 5.500 s (aproximadamente 1 hora e 30 minutos). Nota-se que os Picos 2, 3 e 4 evoluem em tempos muito próximos sendo possível supor que são provenientes de uma única trinca de hidrogênio evoluindo ao longo do resfriamento. Estes tempos de duração e tensão do sinal de EA estão com valores similares ao citado pela literatura onde se utilizou o mesmo tipo de ensaio de EA (FERRARESI, 1996 e FALS 1999). Isto demonstra a funcionalidade do sistema para detectar o instante de formação e propagação da trinca de hidrogênio no teste G-BOP.

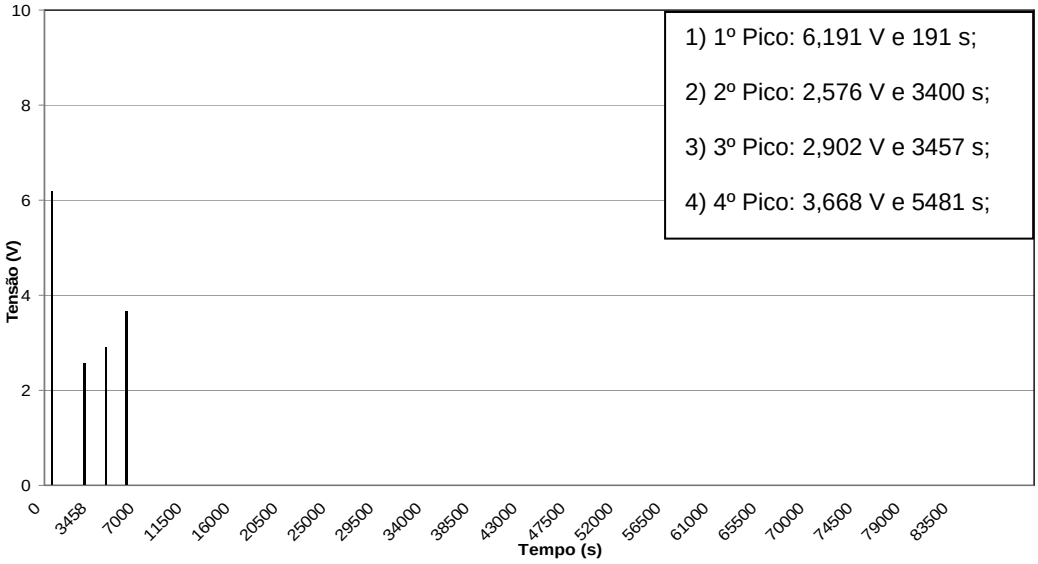


Figura 5.2: Representação do sinal de emissão acústica para o cordão de solda com a presença de óleo (teste 1).

Um ponto interessante que deve ser citado está relacionado ao primeiro pico, o tempo de sinal adquirido foi de 5,9 ms. Entretanto observa-se no perfil do sinal que após esse tempo de aquisição a tensão do sensor era ainda alta, não ocorrendo uma queda suave como nos outros picos até a tensão de corte. Fato este similar ao acontecido durante o teste I3 nos ensaios preliminares. (Capítulo 4 item 4.2) no qual se tentou resolver este problema (melhorando o programa de aquisição). Entretanto conforme Fig. 5.3 para o 1º Pico ainda há evidencias da ocorrência deste fato.

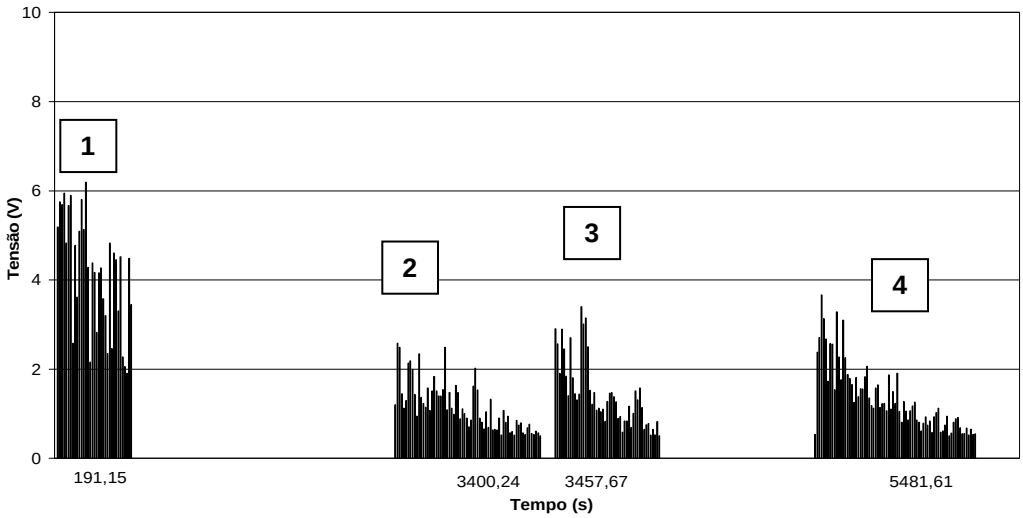


Figura 5.3: Representação do sinal de emissão acústica entre 190 e 5.500 s para o cordão de solda com a presença de óleo (Teste 1).

5.2.2. Análise do Teste 2

A Figura 5.4 traz a região rompida do cordão de solda após aplicação de chama para o teste 2. Para este caso observamos um cordão de solda estreito e com razoável penetração contendo duas regiões distintas, uma colorida referente à trinca e outra da fratura resultante da quebra efetuada durante rompimento da amostra.

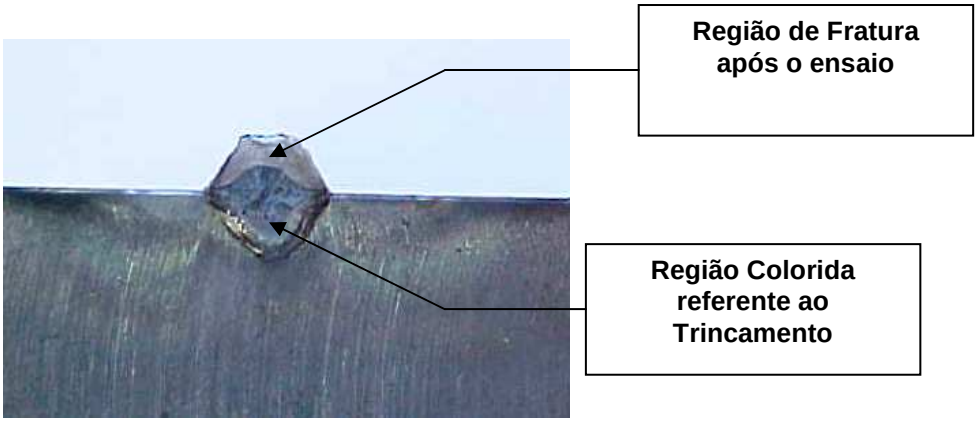


Figura 5.4: Ilustração do Cordão de Solda para o Processo MIG com Óleo (Teste 2).

Os dados de Tensão e Tempo de propagação de sinal são mostrados na Tabela 5.4 bem como sua variação durante o desenvolvimento do ensaio.

Tabela 5.4: Resultados obtidos para o teste 2 soldagem MIG/MAG com óleo.

Pico	Um (V)	t i (ms)	t f (ms)	Δ t (ms)
1	0,99	53.467,04	53.467,76	0,72
2	1,81	56.820,01	56.822,03	1,02
3	1,33	545.827,98	545.829,77	1,79

Os três picos ocorreram a partir de 53 s do início do ensaio de EA (Fig. 5.5). O pico de maior intensidade ocorreu com um tempo a partir de 56 segundos, mostrando novamente a propagação da trinca de hidrogênio. Comparando a intensidade do sinal (tensão) e o tempo de duração do sinal de EA com o primeiro ensaio, verifica-se que estes foram muito inferiores. Este fato pode estar relacionado provavelmente aos seguintes fatores:

1 – Posição do sensor em relação à direção principal de propagação das ondas elásticas. A propagação das ondas ocorre em todas as direções a partir do ponto gerado,

mas dependendo da posição do sensor e principalmente da intensidade do sinal gerado pela propagação da trinca que chega ao sensor pode ser de baixa energia, gerando com isso um sinal de baixa tensão.

2 – Rugosidade da superfície do corpo de prova no ponto onde prendeu o sensor de EA. A alta rugosidade da superfície interfere no acoplamento sensor/corpo de prova, podendo diminuir a intensidade do sinal de EA, consequentemente o tempo do sinal acima do valor de corte.

3 – O acoplamento entre o sensor e o corpo de prova foi feito através de vaselina, que a temperatura elevada (200°C) torna-se líquida, diminuindo a intensidade de sinal que vai para o sensor de EA. A escolha do acoplante é função da rugosidade superficial da peça, quanto mais rugosa for a peça, mais viscoso deve ser o acoplante.

4 – Outro ponto que pode ter contribuído para a menor intensidade do sinal (consequentemente menor tempo do sinal) está relacionado a pressão necessária exercida entre o sensor e o corpo de prova para um bom acoplamento sensor/corpo de prova. Esta pressão foi feita manualmente através de um parafuso colocado sobre o sensor, conforme Fig. 3.20 do Capítulo 3.

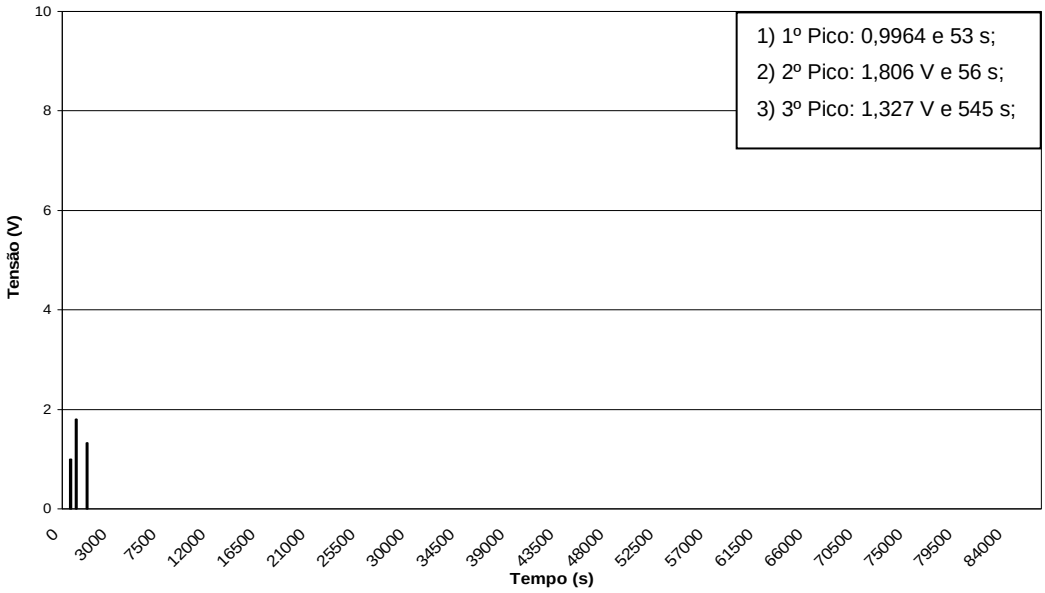


Figura 5.5: Representação do sinal de emissão acústica para o cordão de solda com a presença de óleo (teste 2).

Os tempos de propagação foram em geral próximo de 1 ms. Entretanto, este teste apresentou a maior área de trinca conforme demonstrado na Tabela 5.2 para o processo MIG/MAG. A Figura 5.6 ilustra estes três picos na faixa de tempo entre 0 e 600 s.

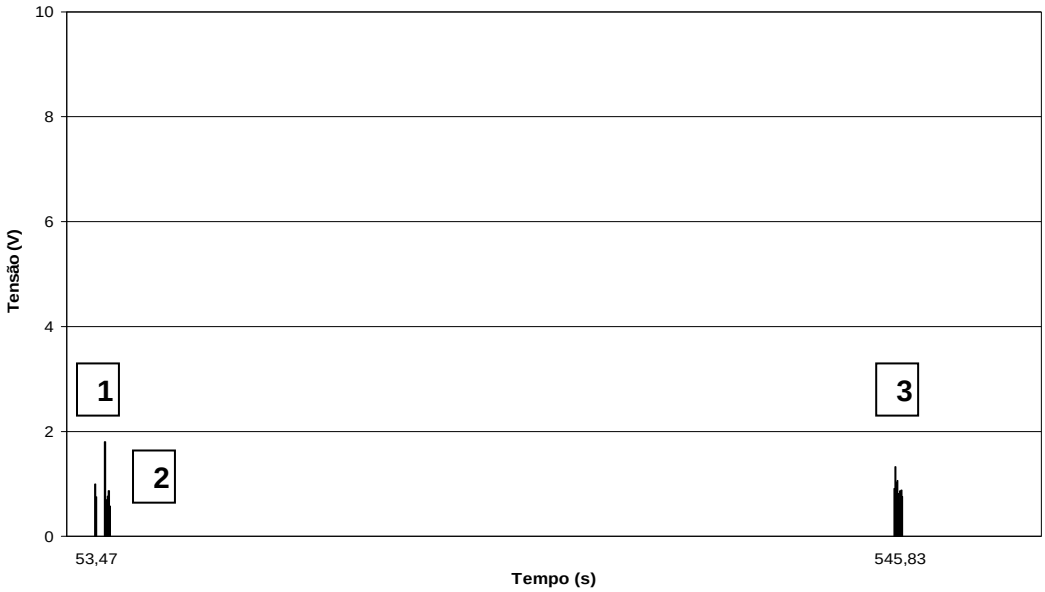


Figura 5.6: Representação do sinal de emissão acústica entre 0 e 600 s para o cordão de solda com a presença de óleo (teste 2).

5.2.3. Análise do Teste 3

O corpo de prova rompido para o ensaio G-BOP com chapa limpa é ilustrado na Fig. 5.7. Observa-se também neste caso duas regiões distintas, uma colorida referente à trinca de hidrogênio e outra da fratura resultante da quebra efetuada durante rompimento da amostra.

Para os três picos avaliados nota-se um período de propagação curto próximo a 1 ms conforme Tab. 5.5. A área da trinca referente a presença de hidrogênio foi menor do que para o caso com presença de óleo (ver Tab. 5.2).

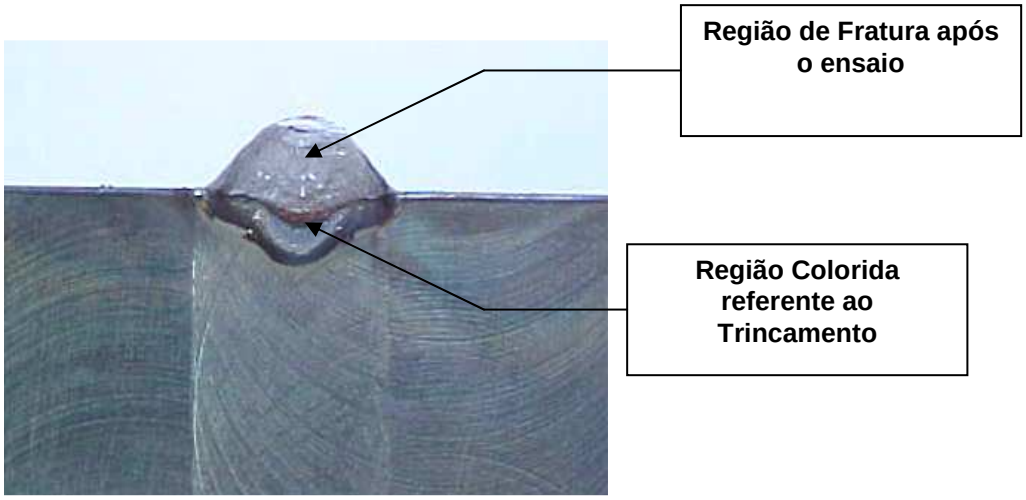


Figura 5.7: Ilustração do cordão de solda para o processo MIG/MAG limpo (teste 3).

Tabela 5.5: Resultados obtidos para o Teste 3 Soldagem MIG com Corpo de Prova Limpo.

Pico	Um (V)	t i (ms)	t f (ms)	Δ t (ms)
1	6,11	49.117,11	49.118,50	1,39
2	1,18	70.422,03	70.422,84	0,81
3	0,87	152.792,10	152.792,87	0,77

Conforme se observa na Figura 5.8 e Tabela 5.5 a trinca surge em aproximadamente 49 segundos após fixação do sensor na peça. Sua propagação se desenvolve até aproximadamente 152 s encerrando a evolução do trincamento. Para este caso é evidente a analogia da excitação do sensor com uma ocorrência provável de trinca de hidrogênio, pois o fenômeno ocorre a temperatura abaixo de 200°C.

A Figura 5.9 traz o sinal obtido para a aquisição em 24 horas, sendo expressivo o pico de alta intensidade 6,11 V logo após a conexão do sensor. Neste caso percebe-se um pico de elevada intensidade, outro médio e um de baixa intensidade como se a trinca fosse sendo aliviada ao longo do ensaio. Apesar do alto valor de tensão do primeiro pico, nota-se ainda que provavelmente o acoplamento sensor/corpo de prova não foi o mais adequado. Em todos os ensaio realizados para o G-BOP o acoplamento foi realizado sempre da mesma forma, conforme demonstrado no item 3.6.1 do Capítulo 3.

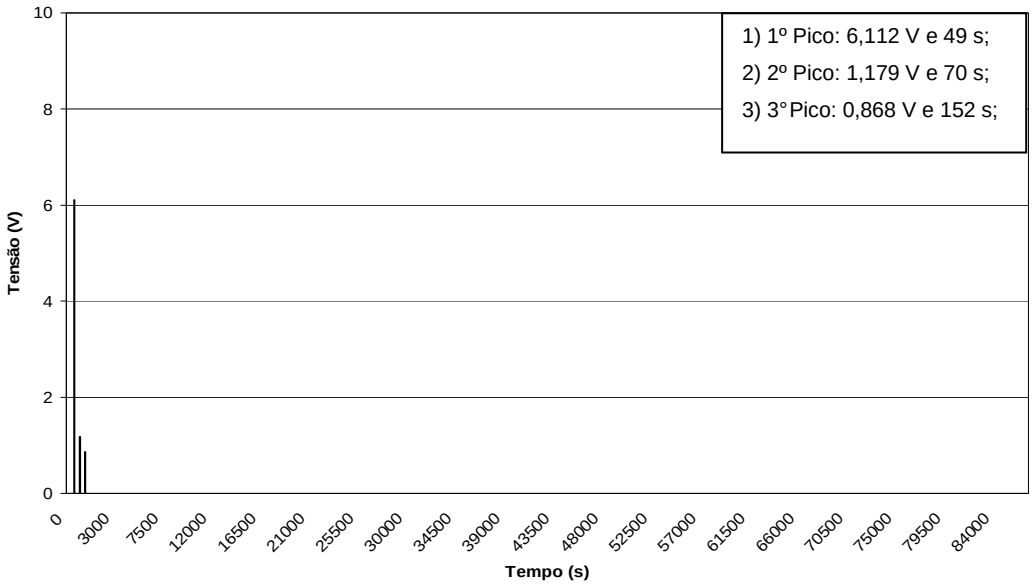


Figura 5.8: Representação do sinal de emissão acústica para o cordão de solda limpo e sem a presença de óleo (teste 3).

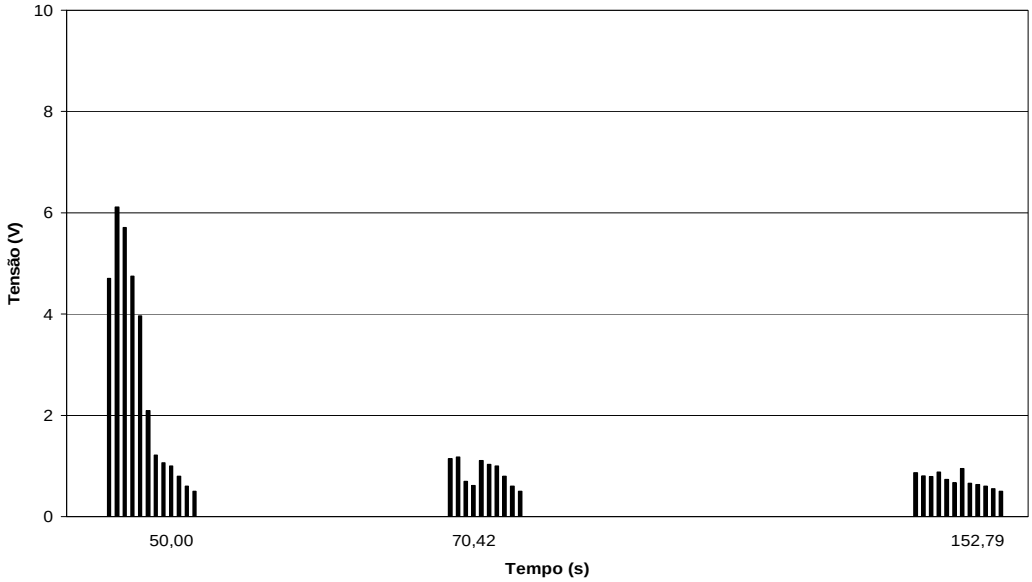


Figura 5.9: Representação do sinal de emissão acústica entre 0 e 175 s para o cordão de solda limpo (teste 3).

5.2.4. Analise do Teste 4

A Figura 5.10 ilustra a região rompida do cordão de solda após aplicação de chama do teste 4. Observa-se duas regiões distintas sendo uma colorida referente ao trincamento e outra a fratura resultante da quebra efetuada durante rompimento da amostra.

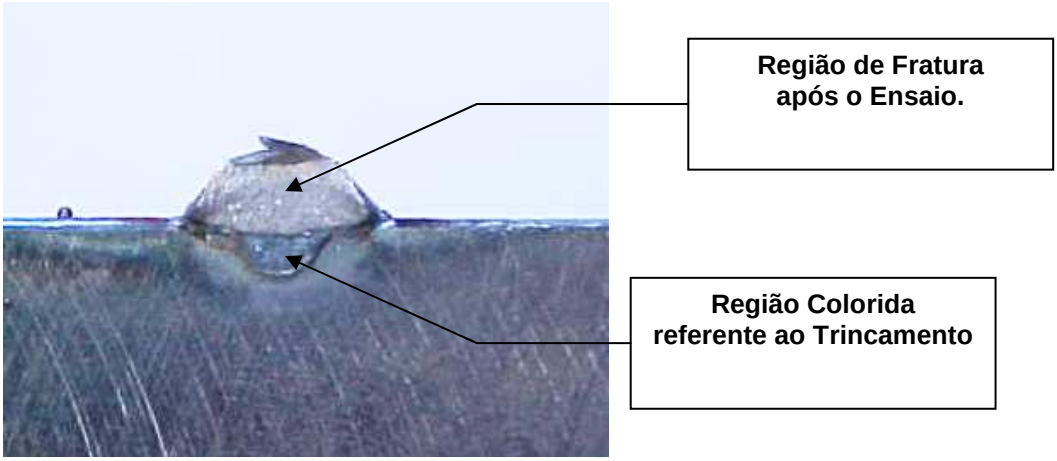


Figura 5.10: Ilustração do cordão de solda para o processo MIG/MAG limpo (teste 4).

Os dados para tensão de pico e instante de ocorrência do sinal são ilustrados na Tab. 5.6 e Fig. 5.11. Para este teste nota-se a ocorrência de trincas nos primeiros 65 s, sendo o primeiro a 2,5 s do início do ensaio, com temperatura do cordão de solda por volta de 150

^{o}C. Porém neste caso os três picos são de intensidade elevada e duração acima de 5 ms. Nota-se a ocorrência destes trincamentos em tempos similares aos testes anteriores, ou seja, nos dois primeiros minutos de ensaios. Na Figura 5.12 e 5.13 tem-se o perfil dos picos em detalhes.

Tabela 5.6: Resultados obtidos para o teste 4 corpo de prova limpo.

Pico	Um (V)	t i (ms)	t f (ms)	Δ t (ms)
1	5,92	2.539,05	2.544,13	5,08
2	5,81	4.384,03	4.390,13	6,10
3	5,58	62.829,13	62.835,28	6,15

Como os picos de tensão do sinal de EA ocorreram a tempartura abaixo de 200^{0}C (temperatura citada na literatura para o início de formação e propagação da trinca de hidrogênio) pode-se afirmar que o sinal de EA está relacionado a formação e propagação da trinca de hidrogênio, mostrando mais uma vez a eficiência do sistema projetado para detectar este fenômeno.

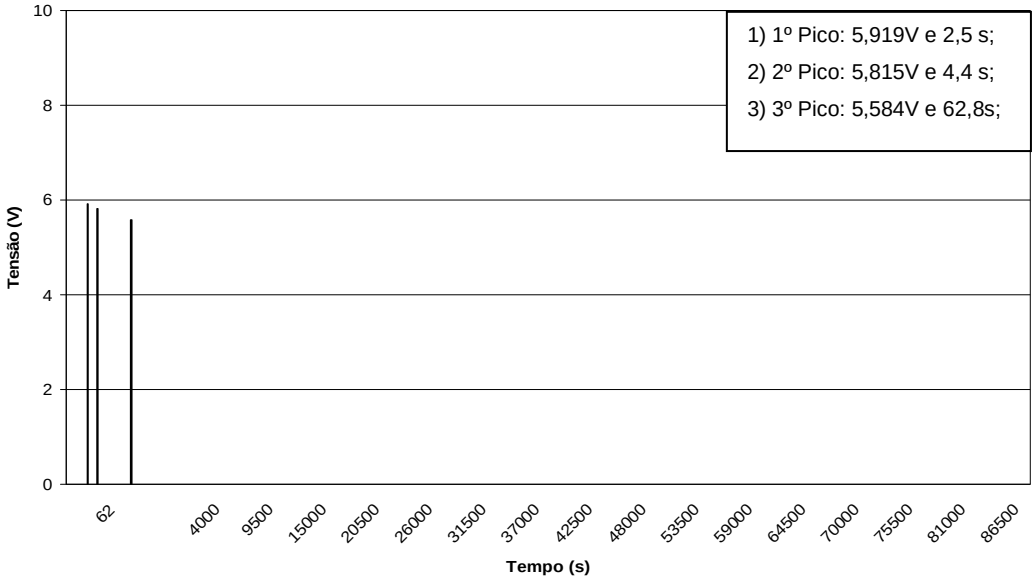


Figura 5.11: Representação do sinal de emissão acústica para o cordão de solda limpo e sem a presença de óleo (teste 4).

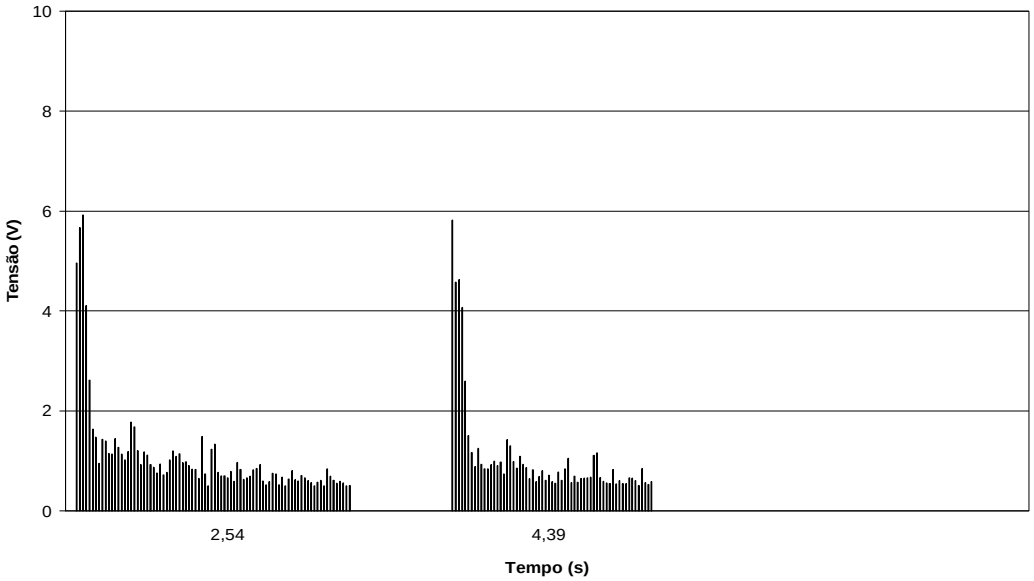


Figura 5.12: Representação do sinal de emissão acústica entre 0 e 10 s para o cordão de solda limpo (teste 4).

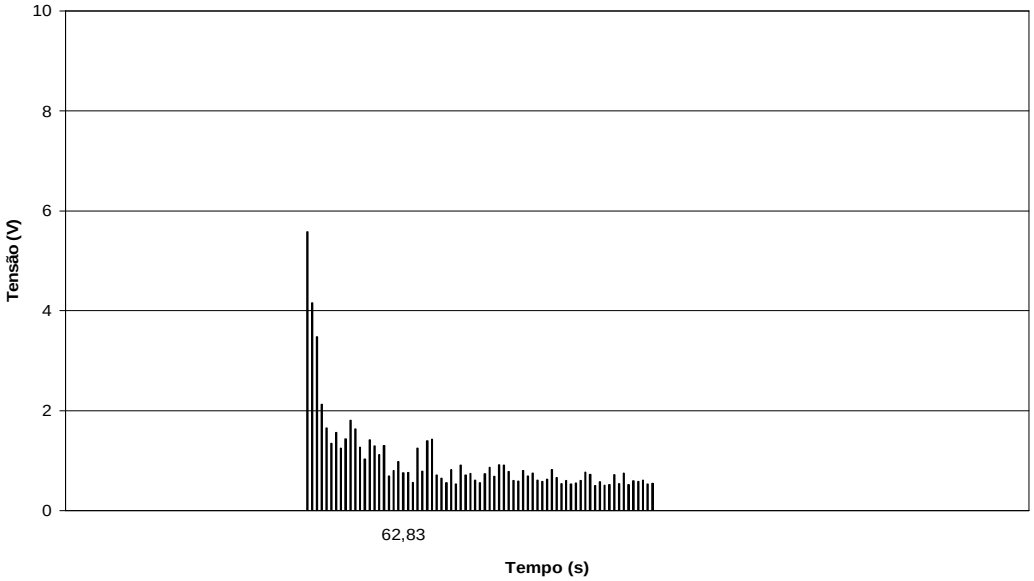


Figura 5.13: Representação do sinal de emissão acústica entre 50 e 70 s para o cordão de solda limpo (teste 4).

Os quatro ensaios realizados com a soldagem MIG/MAG com o material de base utilizado mostraram ser susceptíveis a trinca de hidrogênio para as condições de soldagem e tipo de ensaio utilizado (G-BOP). O ensaio G-BOP é indicado, pela literatura, para verificar a susceptibilidade a trinca de hidrogênio no cordão de solda.

O arame utilizado em todos os ensaios foi o E70S-6 com gás de proteção Ar+ 25%CO_2 (para maiores detalhes vide Capítulo 3 item 3.2.1). Considerando somente a

composição química do arame eletrodo em seus valores máximos e mínimos, o valor do carbono equivalente varia de 0,44 a 0,64, ficando dentro da faixa de susceptibilidade a trinca de hidrogênio considerando a fórmula do IIW. O material de base fica também dentro da faixa de susceptibilidade, Ceq = 0,50. O ideal como regra geral citado pela literatura é ter um Ceq < 0,4, valores entre 0,4 e 0,55 pode ou não ser susceptível, dependendo das condições de soldagem (EASTERLING, 1983).

Outro ponto a ser discutido é que mesmo os corpos de prova limpos, sem a presença de material que pudesse introduzir hidrogênio, o teste indicou a trinca de hidrogênio. Nestes testes (teste 3 e 4 da Tab. 5.1) a introdução do hidrogênio pode ter ocorrido pela abertura da raiz, pois não foi utilizado gás de purga. Além disso, este tipo de ensaio é considerado de alta restrição.

Para trabalhos futuros é importante analisar com detalhes o grau de restrição apresentado por este tipo de ensaio, pois seus valores elevados (alta tensões introduzidas no cordão de solda) pode também ter influenciado os resultados destes testes. Outro fato importante a ser analisado em trabalhos futuros é uma análise fractográfica da superfície da trinca no MEV (Microscópio Eletrônico de Varredura) com o objetivo de comprovar a presença da trinca de hidrogênio.

5.3. Resultados dos ensaios com o processo ER

5.3.1. Análise do Teste 5

A Figura 5.14 ilustra a região rompida do cordão de solda para o teste com eletrodo revestido após aplicação de chama. Nota-se para este caso uma certa homogeinidade na região fraturada com a presença de uma região colorida em tom azulado.

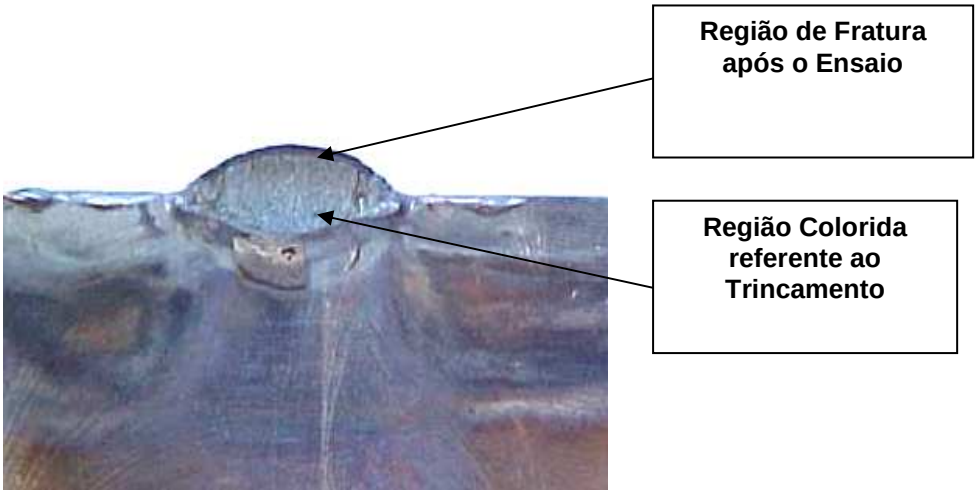


Figura 5.14: Ilustração do Cordão de solda para o teste limpo e sem óleo (teste 5).

A Tabela 5.7 apresenta os valores de tensão e tempo de aquisição dos quatro sinais de EA. Verifica-se neste ensaio uma intensidade de pico pequena mantida em torno de 1 V no início do ensaio. Novamente evidencia-se o início da trinca instante após conexão do sensor à peça.

Tabela 5.7: Resultados obtidos para o teste 5 corpo de prova limpo.

Pico	Um (V)	t i (ms)	t f (ms)	Δ t (ms)
1	1,09	72.225,06	72.225,91	0,85
2	1,43	75.385,50	75.387,12	1,62
3	1,09	82.310,06	82.325,19	15,13
4	0,66	957.990,28	957.990,46	0,18

Entretanto para o terceiro pico provavelmente houve uma propagação de forma intensa com duração do pico de 15,13 ms, porém com baixa intensidade do sinal de EA. Este fato é coerente também com o aspecto da fratura visto na Fig. 5.14. Na Figura 5.15 tem-se ilustrado de forma geral as informações contidas na Tab. 5.7. Os detalhes dos sinais de EA estão apresentadas nas Fig. 5.16 e 5.17.

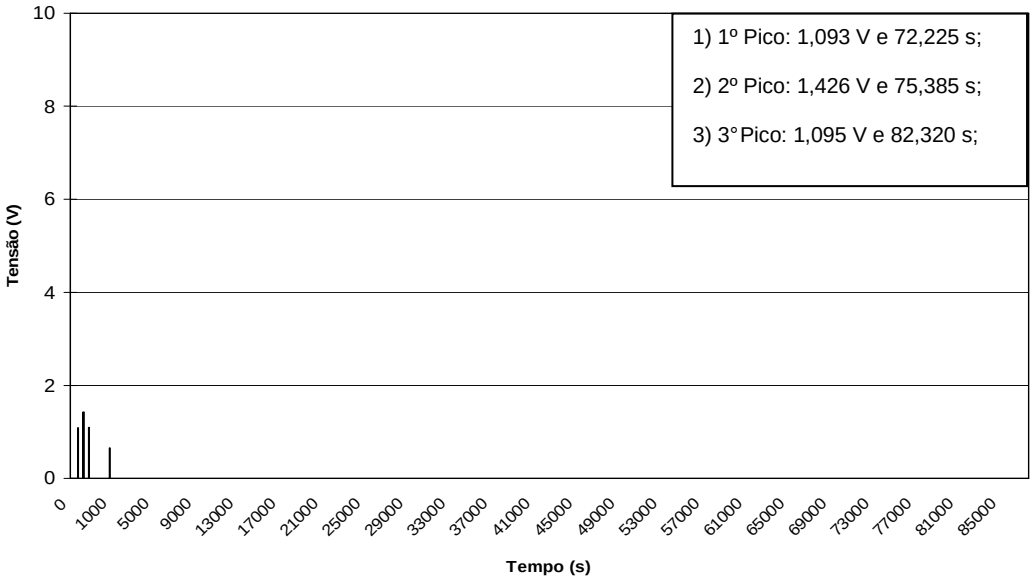


Figura 5.15: Representação do sinal de emissão acústica para o cordão de solda limpo e sem a presença de óleo para soldagem com ER (teste 5).

Este resultado mostra que a utilização do processo ER com o eletrodo E11018G o fenômeno trinca de hidrogênio também ocorre para o material base e eletrodo utilizados. Este teste também evidencia que a forma de prender o sensor de EA no corpo de prova,

e/ou rugosidade da superfície e/ou tipo de acoplante pode ter influenciado no nível do sinal de EA obtido. Os mesmos problemas citados com o processo MIG/MAG também ocorreu neste teste.

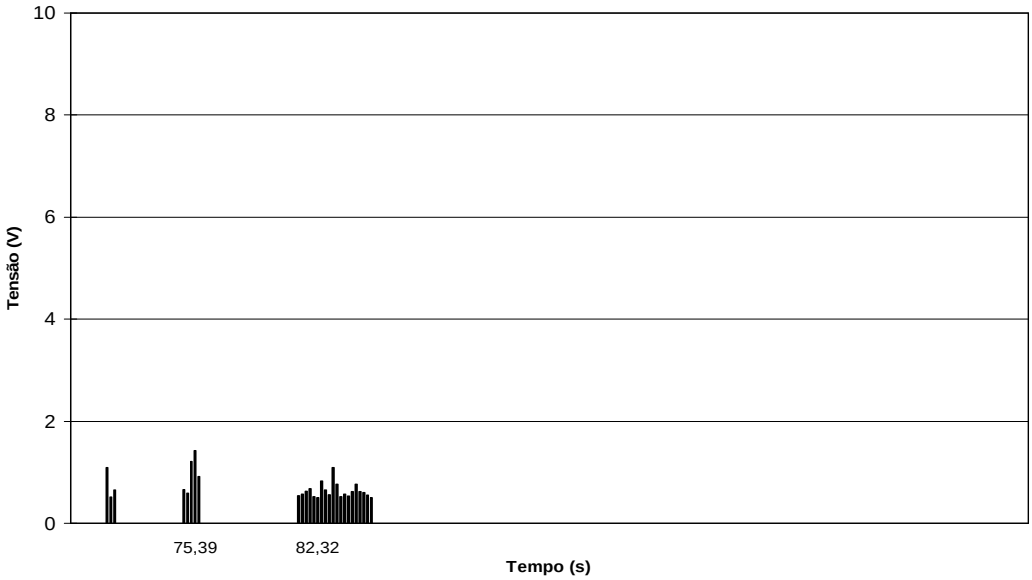


Figura 5.16: Representação do sinal de emissão acústica entre 0 e 250 s para o cordão de solda limpo (teste 5).

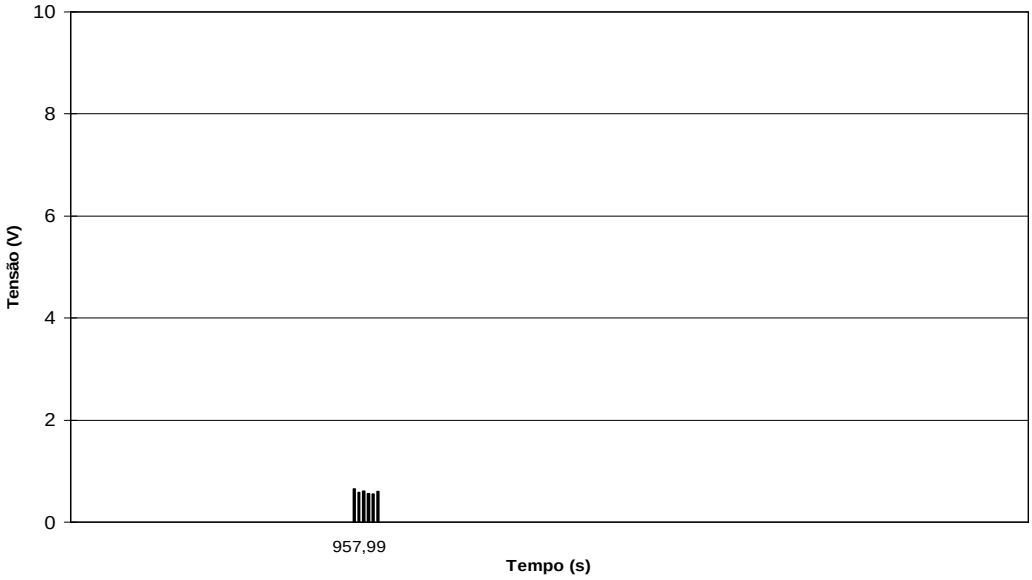


Figura 5.17: Representação do sinal de emissão acústica entre 900 e 1.000 s para o cordão de solda limpo (teste 5).

O carbono equivalente para o eletrodo E11018G de acordo com a fórmula da AWS é de 0,58. De um modo geral se C_{eq} for maior que 0,4 de acordo com IIW a chance de

ocorrência de trincas de hidrogênio aumentam consideravelmente. Tem-se portanto um eletrodo na faixa de material extremamente susceptível ao hidrogênio o que de certa forma está de acordo para o teste 5, no qual mesmo utilizando um procedimento de criteriosa limpeza ainda sim ocorreu o trincamento.

5.3.2. Análise do Teste 6

Este teste também apresentou o fenômeno trinca de hidrogênio, com presença de uma região colorida no cordão de solda após a aplicação da chama. A Tabela 5.8 traz as quatro excitações do sensor de EA provocadas pelo trincamento do corpo de prova. A Figura 5.18 mostra a evolução do sinal para o cordão de solda com soldagem pelo processo ER no corpo de prova limpo.

Tabela 5.8: Resultados obtidos para o Teste 6 Corpo de Prova Limpo.

Pico	Um (V)	t i (ms)	t f (ms)	Δ t (ms)
1	0,63	138.861,23	138.862,12	0,89
2	0,67	217.360,07	217.360,34	0,27
3	0,61	229.571,47	229.571,65	0,18
4	0,64	17.299.056,08	17.299,056,90	0,82

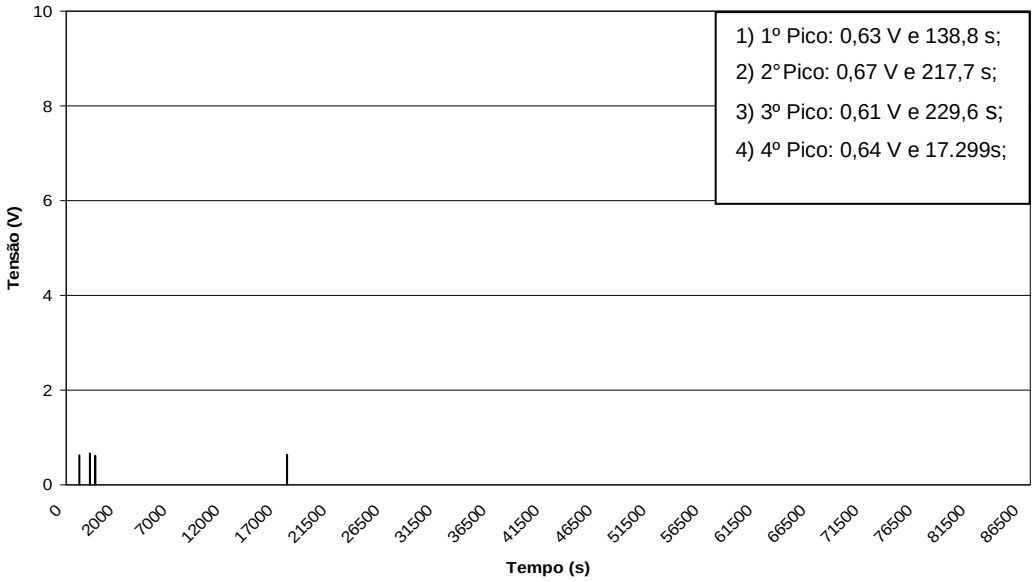


Figura 5.18: Representação do Sinal de Emissão Acústica para o Cordão de Solda Limpo e sem a presença de Óleo para soldagem com Eletrodo Revestido (Teste 6).

Verifica-se quatro excitações no Sensor de período de tempo curto de propagação e uma intensidade máxima de tensão muito pequena. Este resultado mostra mais uma vez a necessidade de cuidados específicos para a colocação do sensor de EA no corpo de prova, principalmente a necessidade de uma pressão e acoplante adequado para o ensaio.

Para o Teste 6 assim como já evidenciado para o Teste 5 a presença de um eletrodo revestido susceptível ao hidrogênio mesmo como criteriosa limpeza do corpo de prova não evitou o trincamento.

5.3.3. Análise do Teste 7

Este teste com óleo apresentou o fenômeno trinca de hidrogênio, com uma região azulada no cordão de solda após a aplicação da chama, idêntico aos casos anteriores para o corpo de prova limpo.

A Tabela 5.9 mostra as variáveis de análises dos três sinais de tensão ocorridos durante a realização do ensaio. A Figura 5.19 mostra a ocorrência de três sinais no sensor durante as 24 horas de aquisição. Para este ensaio, com processo de soldagem eletrodo revestido com presença de óleo nota-se uma intensidade maior do sinal do sensor de EA quando comparado com o ensaio anterior (teste 6). Isto indica que a conexão sensor/corpo de prova estava ideal sendo o acoplante depositado de forma satisfatória nesta interface.

É possível notar também (Tabela 5.9) que os sinais de EA ocorreram logo no início do ensaio, como nos casos anteriores. Entretanto, a intensidade do sinal foi aumentando com o aparecimento de elevados picos (propagação da trinca).

Tabela 5.9: Resultados obtidos para o Teste 7 corpo de prova com óleo.

Pico	**Um (V)**	**t i (ms)**	**t f (ms)**	**Δ t (ms)**
1	1,55	4.399,08	4.400,01	0,93
2	1,80	10.679,33	10.684,38	5,05
3	4,21	133.560,39	133.565,16	4,77

O perfil de evolução dos sinais são ilustrados nas Fig. 5.20 e 5.21 na qual nota-se um tempo de propagação pequeno para o sinal nº 1 a 4,4 segundos do início do ensaio e logo em seguida um segundo sinal a 10,7 s do início da aquisição. Em termos de intensidade nota-se que o primeiro sinal apresenta 1,55 V e o segundo 1,80 V e o terceiro com intensidade de 4,21 V. Isto demonstra que apesar de ocorrer logo no início do ensaio, é provavelmente a propagação de uma trinca de hidrogênio, pois ocorreu a temperatura abaixo de 200°C.

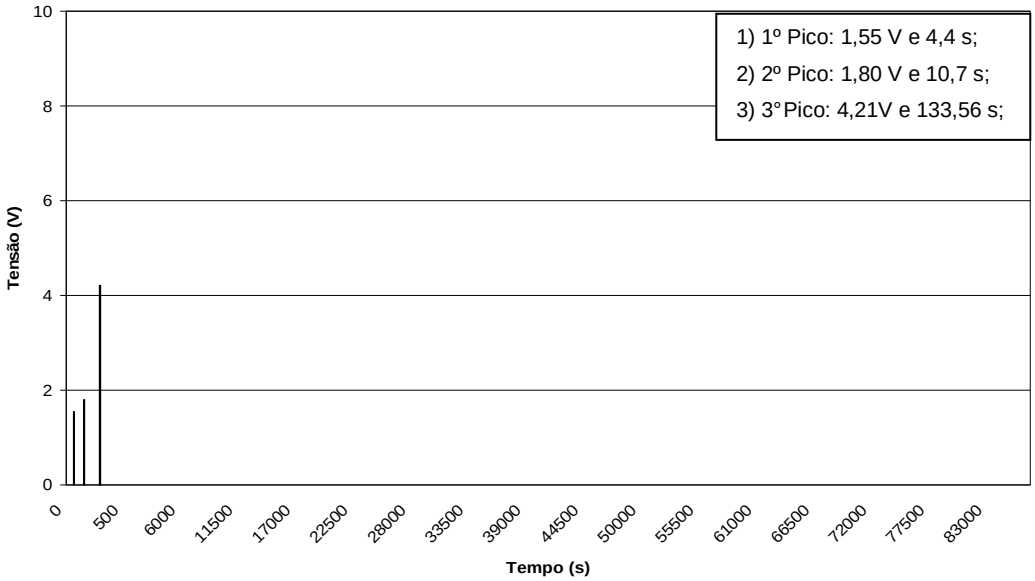


Figura 5.19: Representação do Sinal de Emissão Acústica para o Cordão de Solda com a presença de Óleo para Soldagem com Eletrodo Revestido (Teste 7).

Um fato importante a ser analisado está relacionado ao tempo em que ocorreu o primeiro pico após o início do ensaio. O teste 7 (primeiro pico a 4,4 segundos), assim como no teste 4 (2,5 segundos), o pico inicial do sinal de EA ocorreu logo no princípio do ensaio. Fato este preocupante, pois o primeiro pico pode não ser a formação da trinca de hidrogênio e sim a sua propagação.

É importante destacar que o procedimento utilizado neste trabalho foi realizado de forma sequencial, primeiro era realizado a soldagem, em seguida conectado o sensor ao corpo de prova e no momento seguinte, quando a temperatura do termopar colocado no final do cordão de solda indicava uma temperatura abaixo de 200°C, mas acima de 150°C, iniciava-se a aquisição do sinal de EA.

Este procedimento foi utilizado para preservar o sistema de EA, evitar possível fuga de corrente para o sistema de EA durante a soldagem, caso o sensor fosse acoplado antes do tecimento do cordão de solda. Se isto ocorresse, seria um desastre total, danificando todo o equipamento. Entretanto, este procedimento (seqüência de realização do ensaio) pode não ter sido o mais adequado, necessitando se desenvolver uma nova metodologia de forma a controlar em termos de medidas de temperatura da ZF (principalmente na raiz do cordão de solda) para o início de aquisição do sinal de EA. Trabalho este que pode ser realizado no futuro.

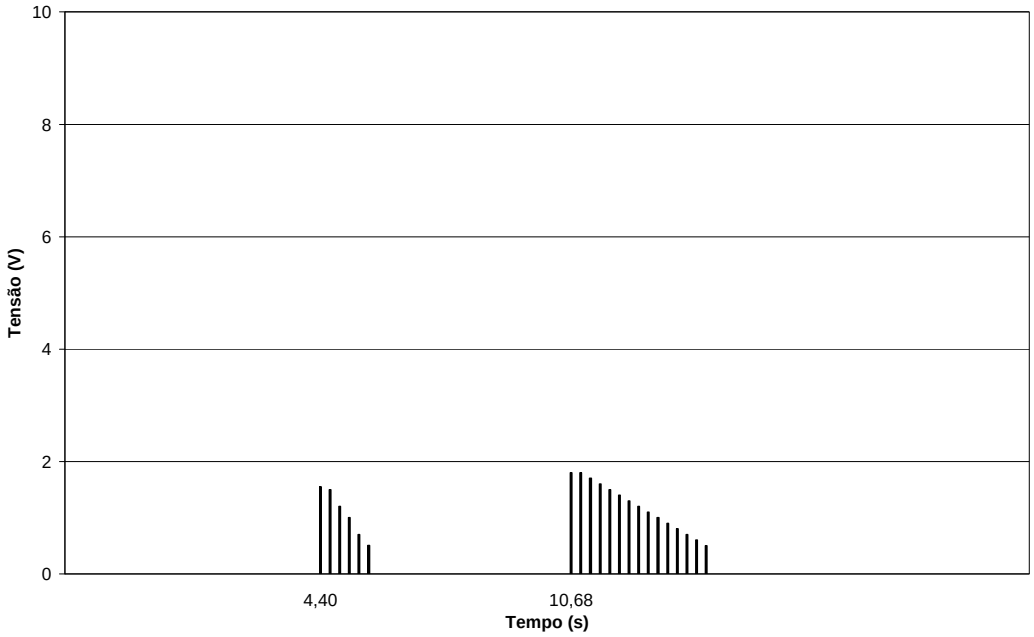


Figura 5.20: Representação do sinal de emissão acústica entre 0 e 20 s para o cordão de solda com óleo (teste 7).

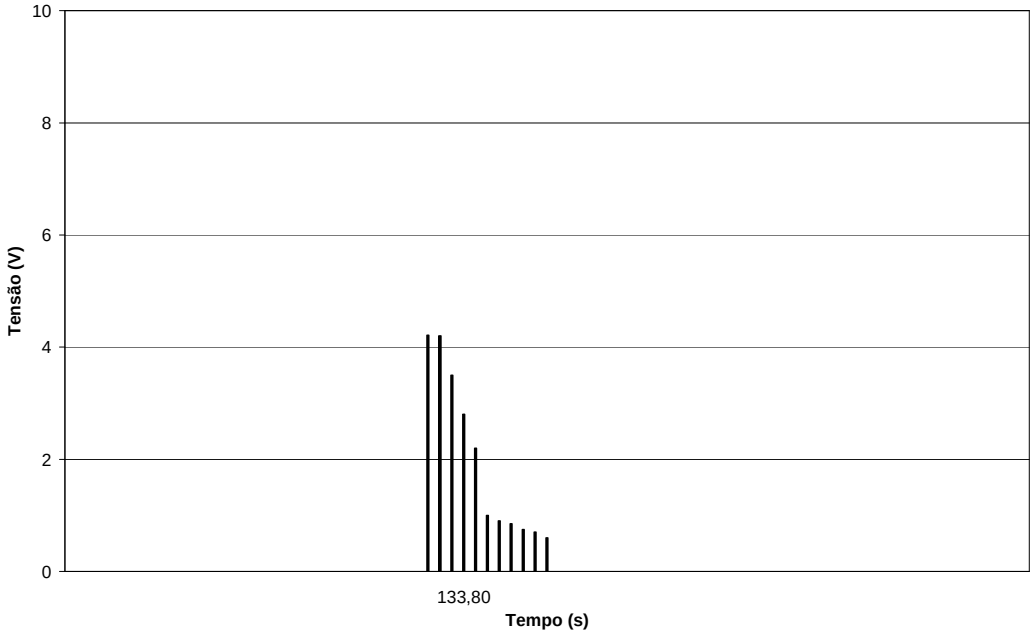


Figura 5.21: Representação do sinal de emissão acústica entre 120 e 140 s para o cordão de solda com óleo (teste 7).

5.3.4. Análise do Teste 8

A Figura 5.22 ilustra a região rompida do cordão de solda para o teste 8 com eletrodo revestido após aplicação de chama. Nota-se para este caso uma certa homogeinidade na

região fraturada com uma grande área azulada. Não foi possível diferenciar com clareza a região trincada (escura) e a região da fratura após o aquecimento do corpo de prova.

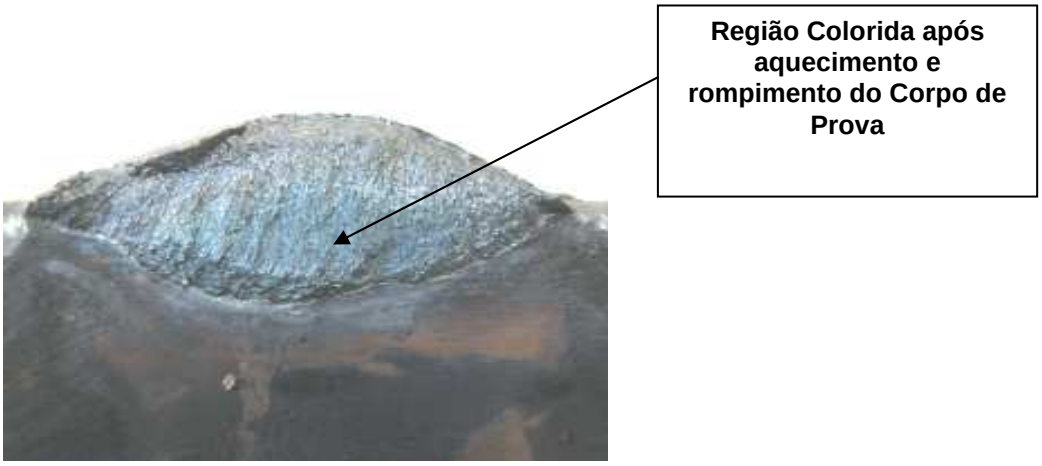


Figura 5.22: Ilustração do Cordão de solda para o teste 8 (corpo de prova com óleo).

A Tabela 5.10 mostra o resultado em termos de aquisição de sinal para o Teste 8 no qual obteve-se apenas um sinal de EA de baixa amplitude e duração da excitação.

Tabela 5.10: Resultados obtidos para o teste 8 corpo de prova com a presença de óleo.

Pico	Um (V)	t i (ms)	t f (ms)	Δ t (ms)
1	0,74	29.260,29	29.261,23	0,94

Para o Teste 8 tem-se a ocorrência de sinal no sensor somente após 7 horas e 20 minutos de aquisição conforme Fig. 5.23. Como este sinal é de curta duração e baixa intensidade ocorrido a um tempo distante do início do ensaio, provavelmente isto se deve aos seguintes fatores:

- A trinca pode ter ocorrido antes do acionamento do sistema de EA e o sinal detectado a 7 horas do início ser a sua propagação;

- Pode ser que a trinca formada não seja devido somente a presença de hidrogênio. A trinca pode ter ocorrido a temperatura mais alta que a de hidrogênio (por exemplo trinca de solidificação) e finalmente propagado devido a presença de hidrogênio. Para comprovar este fato ensaios de fractografia deveria ser realizado na superfície da trinca antes de seu aquecimento;

- O acoplamento sensor/corpo de prova pode não ter sido realizado de forma adequada, inviabilizando a aquisição de sinais de formação e/ou propagação da trinca ocorrido antes do pico apresentado na Fig. 5.23.

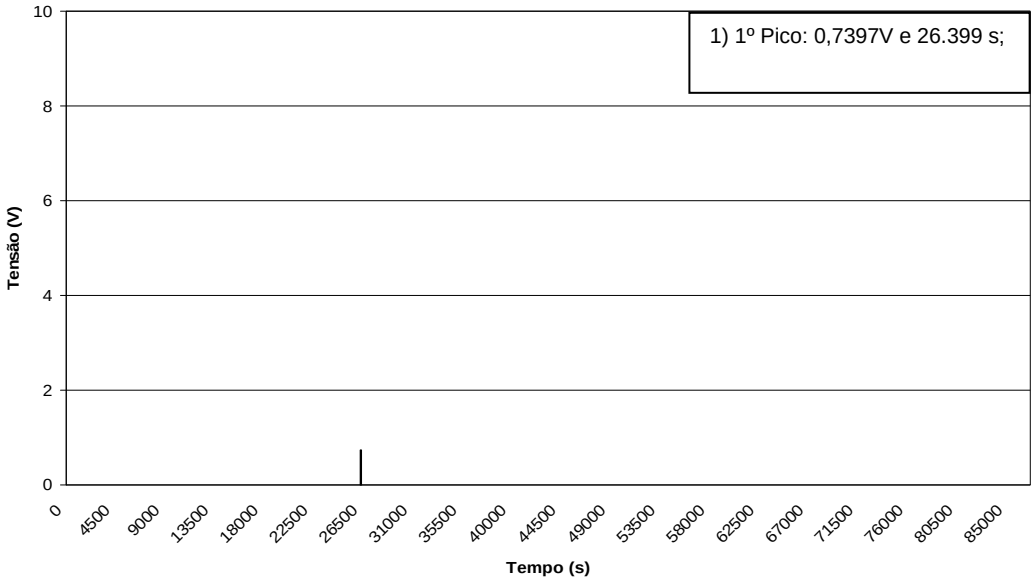


Figura 5.23: Representação do Sinal de Emissão Acústica para o Cordão de Solda Limpo e sem a presença de Óleo para Soldagem com Eletrodo Revestido (Teste 8).

5.3.5. Análise do Teste 9

A Figura 5.24 ilustra a região rompida do cordão de solda após aplicação de chama para o teste 9 realizado com o processo eletrodo revestido e com gás de purga, Argônio puro. Verificou-se uma região homogênea sem o aspecto de presença de trincamento (não foi verificado a coloração característica devido a uma trinca).

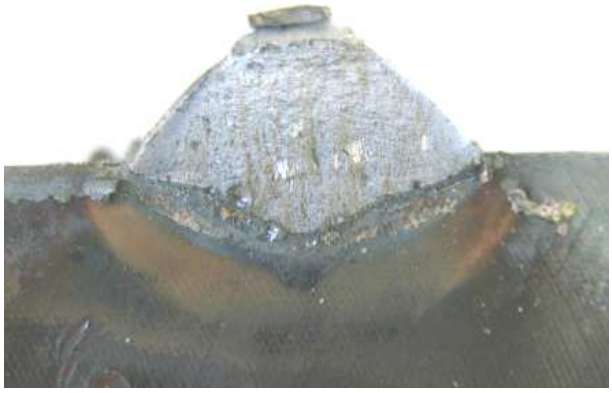


Figura 5.24: Ilustração do cordão de solda do teste 9, soldado com ER e gás de purga.

Portanto não foram detectados sinais de tensão no sistema de EA e indícios de trincamento, comprovando que não ocorreu a formação e propagação de trinca durante o ensaio. Isto é também reforçado pelo aspecto do cordão de solda da Fig. 5.24.

Logo, a aplicação do gás de purga demonstrou ser viável para minimizar a ocorrência da trinca de hidrogênio na região da solda (raiz da solda), mesmo ainda prevalecendo uma elevada restrição e um material com certa susceptibilidade ao trincamento pelo hidrogênio.

5.4. Análise de microdureza e diluição

Foram realizados ensaios de midrodureza nas regiões do cordão de solda tanto para o processo MIG/MAG como para o eletrodo revestido. A Tabela 5.11 apresenta os resultados de microdureza (HV) juntamente com seu desvio padrão. Para a microdureza determinou-se sete medidas em cada região, descartando dois pontos extremos maior e menor, calculando assim a média sobre os cinco pontos restantes. Nota-se uma microdureza maior na ZAC (valores médios) para o processo MIG/MAG e ER. Entretanto, não pode-se considerar uma difereça significativa, devido ao desvio padrão dos mesmos. Para o metal de solda (valores médios) o processo eletrodo revestido apresentou valores acima do MIG/MAG. Esta maior dureza no cordão de solda do processo ER está relacionado a diferente tipo de eletrodo (processo MIG/MAG – ER70S-6 e para o ER – E11018G)

Tabela 5.11: Resultados da microdureza no cordão de solda.

Ensaio G-BOP	**MICRODUREZA (HV)**		
	Metal Base	**ZAC**	**Metal de Solda**
MIG/MAG (teste 4)	186	276	257
Desvio Padrão	8,84	13,96	7,78
ER (teste 6)	176	285	271
Desvio Padrão	14,75	13,49	19,11

A Figura 5.25 ilustra a evolução da dureza no metal base, ZAC e MS, para os testes com o processo MIG/MAG e ER conforme valores médios contidos na Tabela 5.11.

Segundo a literatura a dureza do cordão de solda pode ser um fator analisado para avaliar a susceptibilidade à trinca de hidrogênio. Entretanto Yurioka & Suzuki (1990) comentam que a análise baseada na dureza é um índice imperfeito. Existem na literatura (Fals, 1999) indicações de que valores de dureza abaixo de 250 HV não favorece o aparecimento de trinca à frio. Outros colocam que a dureza abaixo de 350 HV, dependendo

do material, seria capaz de evitar o trincamento por hidrogênio. Desta forma, fica evidenciado uma faixa de valores críticos (entre 250 e 350 HV) onde o fenômeno pode ou não ocorrer. Entretanto a dureza está diretamente relacionada com o tempo de resfriamento da junta soldada, tipo de material e histórico de fabricação do material. Os valores de dureza para a ZAC de 276 e 285 HV e Zona Fundida de 257 e 271 HV estão coerentes com os ensaios realizados, pois para o Teste 4 e 6 (testes de microdureza) apesar de estar na faixa intermediária de susceptibilidade apresentaram trincas no cordão de solda.

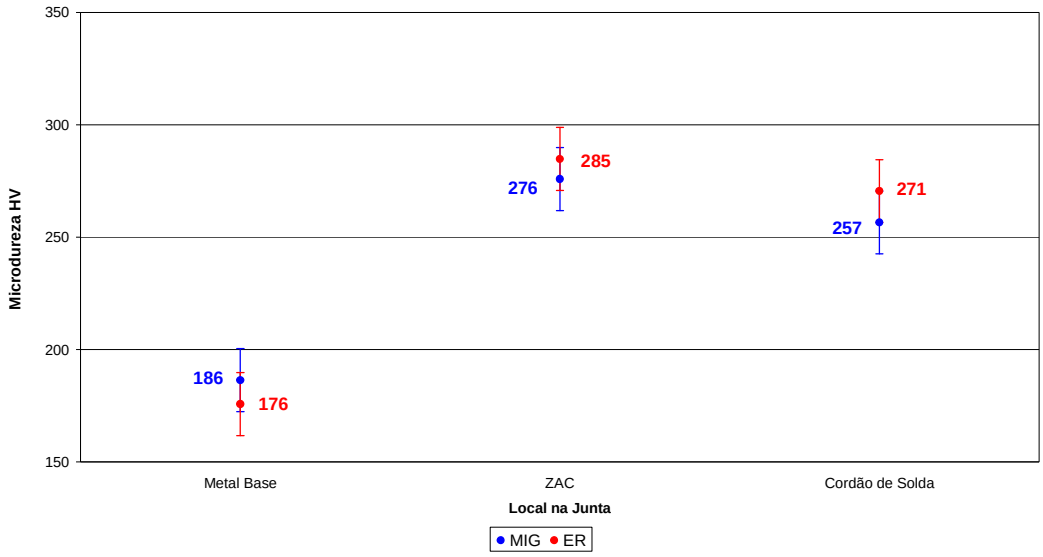


Figura 5.25: Evolução da microdureza para o material soldado com o processo MIG/MAG e ER.

A Tabela 5.12 ilustra a diluição do cordão de solda para o ensaio G-BOP na soldagem MIG/MAG e eletrodo revestido. Observa-se uma maior Área Fundida e Área Total para o processo eletrodo revestido provavelmente ocasionado pelo uso de maior energia de soldagem durante a realização destes testes em relação ao MIG/MAG.

Tabela 5.12: Resultados de diluição no cordão de solda.

Ensaio G-BOP	**DILUIÇÃO (%)**		
	Área Fundida (mm^2)	**Área Total (mm^2)**	**Diluição (%)**
MIG/MAG (teste 4)	15,76	37,27	42,28
ER (teste 6)	28,03	67,68	41,41

Nota-se que em termos de diluição para o Teste G-BOP por se tratar da união de chapas com chanfro reto ocorreu pouca variação em termos de diluição para os processos MIG/MAG e eletrodo revestido.

Entretanto em termos de Carbono Equivalente temos para o processo MIG/MAG o valor entre 0,44 e 0,64 e no ER 0,58. Todos os testes portanto possuem certa sensibilidade ao trincamento por estarem com o metal base na faixa de susceptibilidade e o metal depositado ainda com maior probabilidade de ocorrência de trincas de hidrogênio. Por isso o fato do metal de solda apresentar uma susceptibilidade elevada com diluição em torno de 40% explica o fato de que mesmo na soldagem com criteriosa limpeza observa-se trincamentos a partir da raiz da solda. Fato este eliminado a partir da aplicação de gás de purga durante a soldagem com ER pois não ocorreu trincamento do corpo de prova ao adotar este procedimento recomendado pela literatura.

5.5. Caracterização microestrutural

Para o corpo de prova ensaiado no teste G-BOP (teste 8) foram realizadas análises metalográficas visando verficar a existência ou não de estrutura susceptível ao trincamento pelo hidrogênio. Para essa análise realizou-se uma avaliação da Zona Afetada pelo Calor e Metal de Solda com o objetivo de verificar sua relação com o surgimento da trinca de hidrogênio.

A caracterização microestrutural das diferentes zonas da junta soldada revelou que o metal de solda, apresentou solidificação epitaxial com grãos colunares, crescendo no sentido do máximo gradiente térmico. Cada grão colunar apresentou uma sub-estrutura composta por diversas fases produto da transformação austenita-ferrita. Na Figura 5.26 observa-se a interface entre ZAC e MS (zona de ligação) e o início da formação dos grãos colunares.

A Figura 5.27 apresenta a região do metal de solda em avaliação com os contornos de grãos em matriz ferrítica. Devido a decomposição da austenita, a primeira fase a se formar é a ferrita de contorno de grão, e por ser frágil e estar associada aos contornos de grão o trincamento a frio no MS está relacionado provavelmente com esta fase formada.

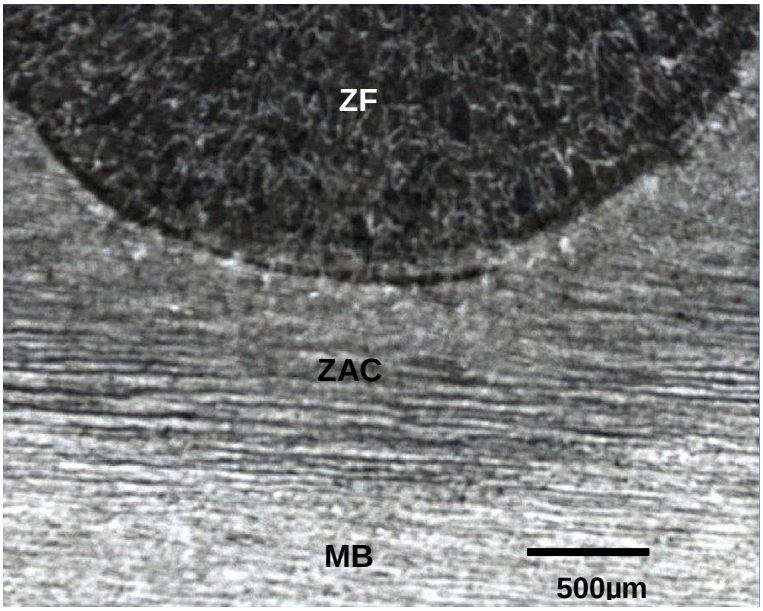
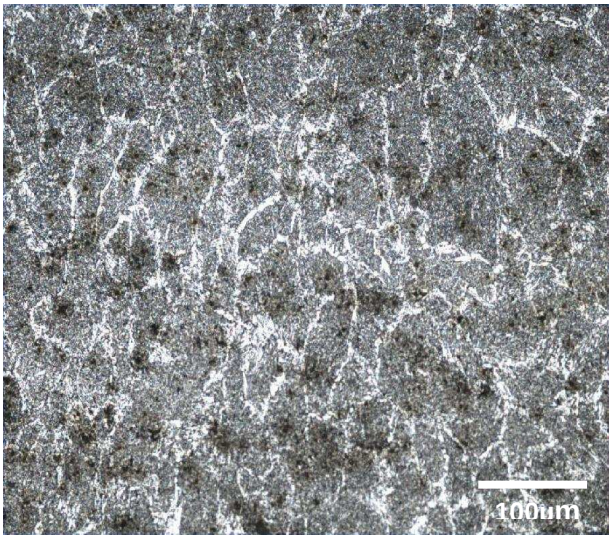
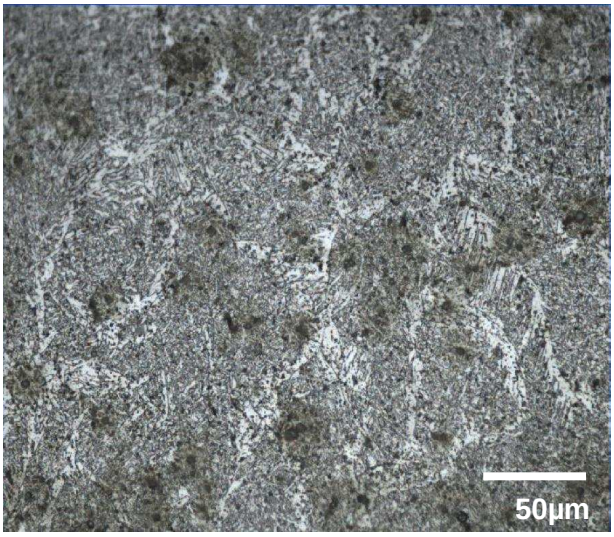


Figura 5.26: Micrografia representativa da interface entre a ZAC e o cordão de solda. solidifcação epitaxial (50x) Nital 2%.



(a)



(b)

Figura 5.27: Micrografia representativa do metal de solda: (a) 200x e (b) 500x (Nital 2%).

Para o cordão de solda embora a microestrutura predominante em ambos os ensaios tenha sido a ferrita acircular, notou-se algumas diferenças na morfologia do grão conforme Fig. 5.28. Observa-se a formação de veios de ferrita associados aos contornos dos grãos da austenita primária (Ferrita de Contorno de Grão PF_G) com veios de ferrita. Também pode-se notar a existência de ferrita de segunda fase alinhada (FS_A) ou bainita e, fundamentalmente,

ferrita intragranular de grão fino, com morfologia de emaranhado e grãos se entrecruzando (Ferrita Acircular AF).

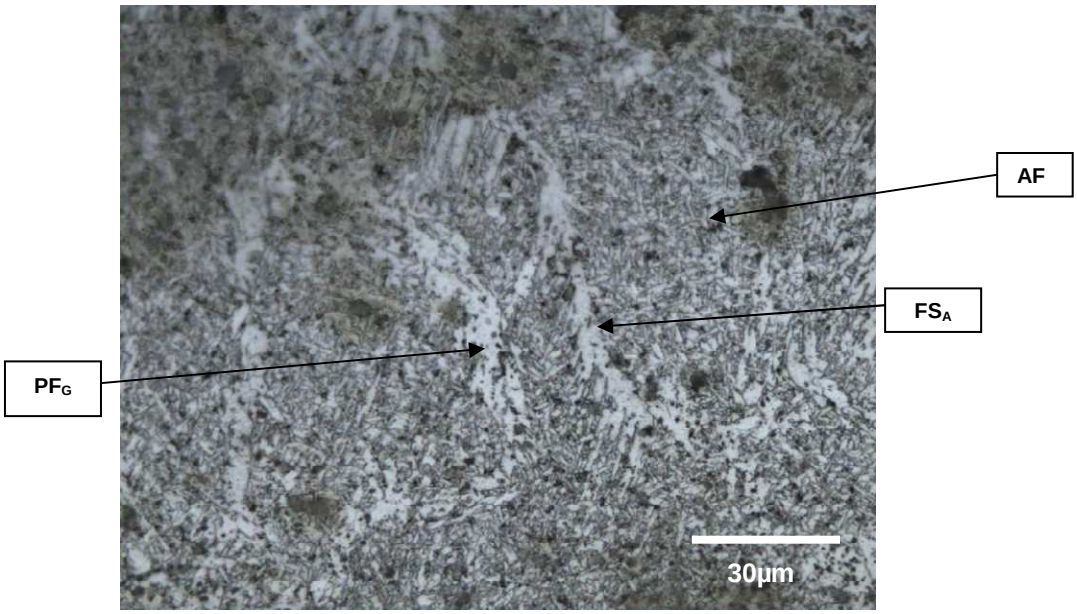


Figura 5.28: Micrografia representativa do metal de solda (1000x) Nital 2%.

Para Viuk (1993) apud Fals (1999) a ferrita de contorno de grão (PF_G), por ser frágil e estar associada aos contornos de grãos, é responsável pelo trincamento pelo hidrogênio no metal de solda. De forma similar Svensson (1999) avaliando a microestrutura deste eletrodo (E11018G) encontrou a presença de uma mistura entre ferrita acircular, bainita e martensita na região da zona fundida.

Cabe ressaltar que existem dificuldades para diferenciar, por metalografia, a FS_A e a bainita superior, dado que ambas apresentam morfologias muito semelhantes. Segundo Alé, Jorge & Rebello (1993), a diferença entre elas está baseada no local de nucleação; a FS_A nucleia a partir da ferrita primária de contorno de grão e a bainita superior nos contornos de grão.

A zona de crescimento de grão da ZAC constitui uma região importante da junta, devido à freqüência com que ocorre o trincamento neste local (Fals, 1999). Nesta região foi observado, o grande crescimento de grão da austenita primária e a formação de uma microestrutura martensítica e ferritas com martensita/austenita/carbeto (MAC) alinhados.

Na Figura 5.29 pode ser observado uma microestrutura representativa realizada por micrografia óptica de uma junta soldada com ER no teste 8, composta por microestrutura martensítica (M) com MAC alinhados.

Maciel (1994) cita que devido à sua granulometria, a Ferrita Acicular (AF) torna-se o microconstituinte mais resistente às trincas de hidrogênio. Por outro lado a Martensita (M),

devido sua fragilidade e a Ferrita de Contorno de Grão, devido à sua baixa resistência, tornam-se os microconstituintes mais susceptíveis a este tipo de defeito.

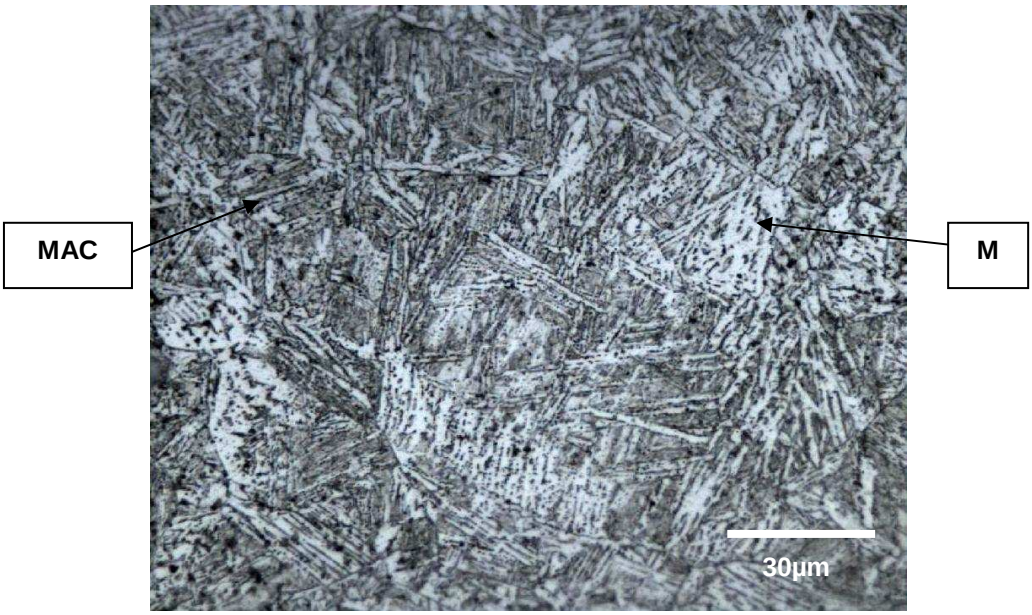


Figura 5.29: Micrografia da ZAC do teste 8 junta soldada com Eletrodo E11018G. Nital 2% Microscopia óptica (1000x).

5.6. Avaliação Final do ensaio G-BOP

Para o Ensaio G-BOP com deposição pelo processo MIG/MAG nota-se a presença de uma Área Trincada de maiores dimensões nos testes soldados com a presença de óleo. Porém todos os testes soldados pelo processo MIG/MAG apresentaram algum tipo de trinca. O primeiro teste com óleo apresentou sinal característico de trincamento com tempos de propagação próximos aos 6 ms. Ao repetir este teste, entretanto nota-se uma intensidade baixa de propagação e um tempo também inferior a 1 ms. Uma possibilidade para este fato é que para o teste 1 foi possível conectar o sensor de emissão acústica na mesma direção de propagação da trinca enquanto que para o teste 2 a trinca se desenvolve em direção diferente do alinhamento do sensor. A rugosidade da peça na interface entre sensor/peça pode contribuir para uma maior dificuldade de propagação e captação deste sinal pelo sistema de EA. O torque de aperto no parafuso que prende o sensor à peça pode influenciar na qualidade do acoplamento e consequentemente prejudicar a aquisição do sinal. Além de todos estes fatores ao colocar acoplante entre a peça e o sensor devido a temperatura ainda elevada no corpo de prova a região do acoplamento pode ficar desprotegida devido a fusão do acoplante. Fatos similares ocorrem também ao conectar o sensor à peça com o corpo de

prova limpo no qual o teste 3 apresenta picos intensos com baixo tempo de propagação enquanto que o teste 4 possui tempos da ordem de 6 ms. Outro importante resultado é que no ensaio G-BOP com soldagem MIG/MAG os trincamentos ocorrem de forma repentina abaixo de 3 minutos indicando com boa probabilidade a ocorrência de trincas ligadas aos fenômenos de trincamento por hidrogênio.

No Teste G-BOP pelo processo eletrodo revestido os resultados para o corpo de prova limpo apresentam-se de forma similar ao obtido para o MIG/MAG. Ambos apresentaram região colorida após rompimento do corpo de prova com início da primeira trinca abaixo de 2 minutos. Aparentemente o trincamento neste caso iniciou-se logo após à conexão do Sensor à peça, assim como na soldagem pelo processo MIG/MAG, com sua propagação em temperaturas abaixo de 200 ℃. Para os testes com a presença de óleo o ensaio G-BOP soldado com eletrodo revestido é bastante sensível ao trincamento. De forma geral o processo eletrodo revestido mostrou-se mais sensível ao trincamento inclusive com o aparecimento repentino de trincas no teste 8 com presença de óleo (a trinca ocorreu antes da colocação do sensor). Nota-se para este caso que antes mesmo da conexão do sensor à peça a trinca se desenvolveu sendo provavelmente uma trinca de solidificação. Este fato pode ser atribuído ao carbono equivalente do eletrodo revestido ser 0,58 estando na faixa de materiais susceptíveis ao trincamento pelo hidrogênio.

Com o objetivo de verificar o efeito do procedimento de soldagem favorável a eliminação de presença de hidrogênio no cordão de solda realizou-se o Teste 9 soldado pelo processo eletrodo revestido no ensaio G-BOP com aplicação do gás de purga. O sinal para este caso não apresentou excitações significativas. Isso comprova a eficiência do sistema de aquisição por Emissão Acústica em termos de resposta bem como a relação entre o procedimento de soldagem favorável à não ocorrência de trincamento e o sinal adquirido sem presença de picos.

Em termos de microdureza percebe-se que existe uma faixa de valores críticos entre 250 e 350 HV que poderá ou não favorecer a propagação da trinca. Para o MS e ZAC todos os valores medidos estão nesta faixa intermediária sendo que os corpos de prova trincaram durante o Ensaio G-BOP. É necessário, portanto avaliar com cuidado a possibilidade de trincamento em termos de dureza crítica devido a inexistência de referências seguras sobre a região de maior probabilidade para ocorrência de trincamento à frio.

Com relação a microestrutura provavelmente a presença de trincamento no metal de solda para o teste 8 está intimamente ligado à presença de ferrita de contorno de grão em sua microestrutura. Além disso a microestrutura da ZAC é martensítica contribuindo para a ocorrência de trincamento à partir da raiz da solda propagando-se para o cordão.

Logo de acordo como os resultados obtidos através da avaliação visual dos corpos de prova após aquecimento e rompimento bem como a análise dos aspectos metalurgicos do fenômeno de trincamento de forma geral tem-se uma resposta favorável por parte do sistema de aquisição por emissão acústica. Cabe ressaltar a necessidade de aperfeiçoar a metodologia proporcionando uma maior confiabilidade das respostas ao aprimorar o procedimento de conexão entre sensor e corpo de prova.

CAPÍTULO VI

ENSAIO TEKKEN

6.1. Resultados gerais dos ensaios

A Tabela 6.1 apresenta os parâmetros de soldagem realizados com os processos MIG/MAG e Eletrodo Revestido para o ensaio Tekken. Estas condições foram obtidas com base em testes preliminares de soldabilidade do material (ver Capítulo 3 item 3.6.2).

A condição limpa para o teste Tekken assim como no ensaio G-BOP implica que os corpos de prova estão livres de sujeiras, passaram por remoção de graxa, resíduos e poeiras com utilização de detergente líquido. Em seguida utilizou-se lixadeira rotativa e escova de aço para retirar alguma camada de óxido remanescente. Para o corpo de prova com óleo utilizou-se lubrificante convencional a base de hidrocarbonetos, aplicados na região do chanfro no qual será realizada a deposição do cordão de solda.

Os valores de corrente e tensão foram coletados diretamente e de forma instantânea no visor da fonte de soldagem para o processo MIG/MAG e com o auxilio de dois multímetros para a soldagem com eletrodo revestido.

Pequenas variações nos níveis de corrente nos processos MIG/MAG e Eletrodo Revestido ocorrem com o objetivo de ajustar melhor as condições de soldagem, pois o objetivo do trabalho é verificar a funcionalidade do sistema Emissão Acústica para detectar o instante de formação e propagação da trinca.

Como resposta dos ensaios obteve-se os sinais de Emissão Acústica ao longo de 24 horas de aquisição. Com isso, apresenta-se na Tab. 6.2 a Tensão Máxima de Pico, o Tempo de Inicial de Pico, Tempo de Final de Pico, a duração do Pico (variável denominada Δt determinada pela diferença entre o Tempo Final e Inicial de Pico) e a Nº de Picos representando a quantidade de picos. Os ensaios com valores zero indicam que não ocorreu nenhum pico durante as 24 horas de ensaio.

Tabela 6.1: Parâmetros de soldagem para o ensaio Tekken soldagem MIG/MAG e ER.

Teste	Processo	Condição	Corrente (A)	Tensão (V)	Vel. de Soldagem (cm/min)	Energia de Soldagem (kJ/cm)
1	MIG/MAG	Limpo	154	21,0	18	0,179
2	MIG/MAG	Limpo	151	21,0	18	0,176
3	MIG/MAG	Com Óleo	160	21,0	18	0,187
4	ER	Limpo	153	24,7	10	0,377
5	ER	Com Óleo	141	25,2	15	0,236
6	ER	Limpo	152	22,0	15	0,222
7	ER	Limpo	154	24,5	15	0,251
8	ER Ressecado	Limpo	167	24,7	10	0,412

Tabela 6.2: Resultados obtidos para o Ensaio Tekken Soldagem MIG/MAG e ER com a presença ou não de óleo.

Teste	Presença de Trinca	Tensão Máxima de Pico (V)	Tempo Inicial de Pico (ms)	Tempo Final de Pico (ms)	Δt (ms)	Nº de Picos
1	Não	0	0	0	0	0
2	Não	0	0	0	0	0
3	Sim	7,59	20.509,00	20.522,42	13,42	1
4	Sim	4,09	25.749.550,00	25.749.557,69	7,69	3
5	Sim	0	0	0	0	0
6	Sim	6,65	14.597,25	14.607,50	10,25	1
7	Sim	4,74	42.809.865,00	42.809.872,36	7,36	1
8	Sim	6,45	61.993.594,00	61.993.601,72	7,72	1

6.2. Resultados para o processo MIG/MAG

Os ensaios 1 e 2 foram realizados com corpo de prova limpo e não ocorreu nenhum pico que pudesse ser considerado a formação ou propagação de uma trinca. Realizando também uma análise visual do cordão de solda pode-se constatar que não se propagaram trincas. Em seguida os corpos de prova foram cortados em duas seções, conforme

procedimento do Capítulo 3 item 3.6. Portanto, não se verificou a presença de trincas, tanto na zona fundida como na zona afetada pelo calor.

A Figura 6.1 mostra o aspecto superficial da vista superior do cordão de solda para a soldagem MIG/MAG no Teste 1. Em uma análise mais detalhada (análise visual) do corpo de prova pode-se comprovar a ausência de presença de trincas e um cordão de solda homogêneo ao longo da cavidade em Y oblíquo do corpo de prova para o ensaio Tekken.

Figura 6.1: Vista Superior do Cordão de Solda MIG para o Teste 1.

No Teste 3 (Tab. 6.1) com presença de óleo ocorreu um pico no tempo de 20,5 segundos do início do ensaio com duração de 13,42 ms. O sinal obtido durante 24 horas de aquisição para o Teste 3 é representado na Fig. 6.2.

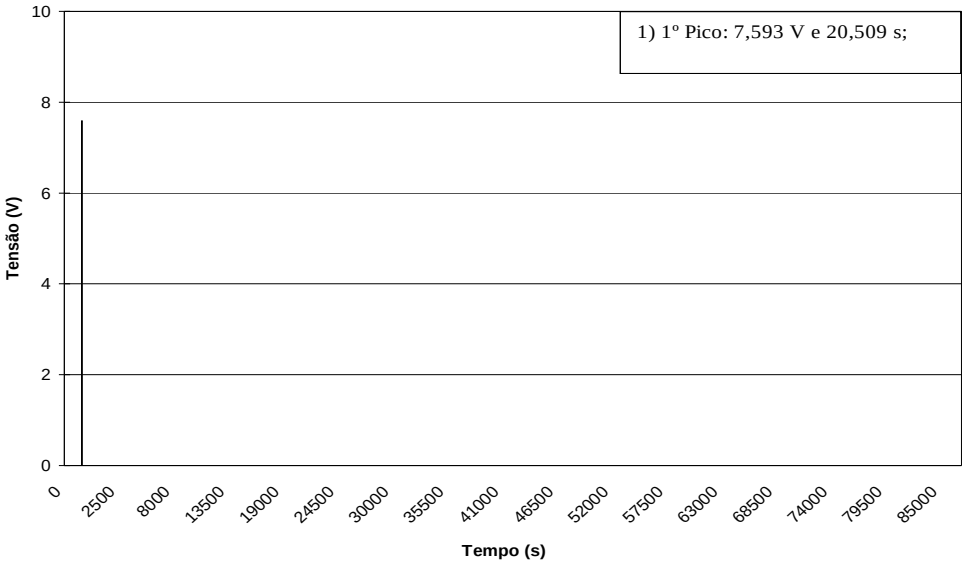


Figura 6.2: Representação do sinal de emissão acústica para o cordão de solda com óleo para soldagem MIG/MAG (teste 3).

Apesar de um período relativamente curto entre a realização do ensaio e a instalação do sensor de Emissão Acústica na peça (cordão do corpo de prova estava com temperatura

um pouco acima de 150 ℃) o sensor detectou a propagação da trinca. E sta trinca ocorreu no centro do cordão de solda na direção longitudinal. O detalhe do sinal detectado pelo sistema está detalhado na Fig. 6.3, comprovando a eficiência de todo o sistema de EA.

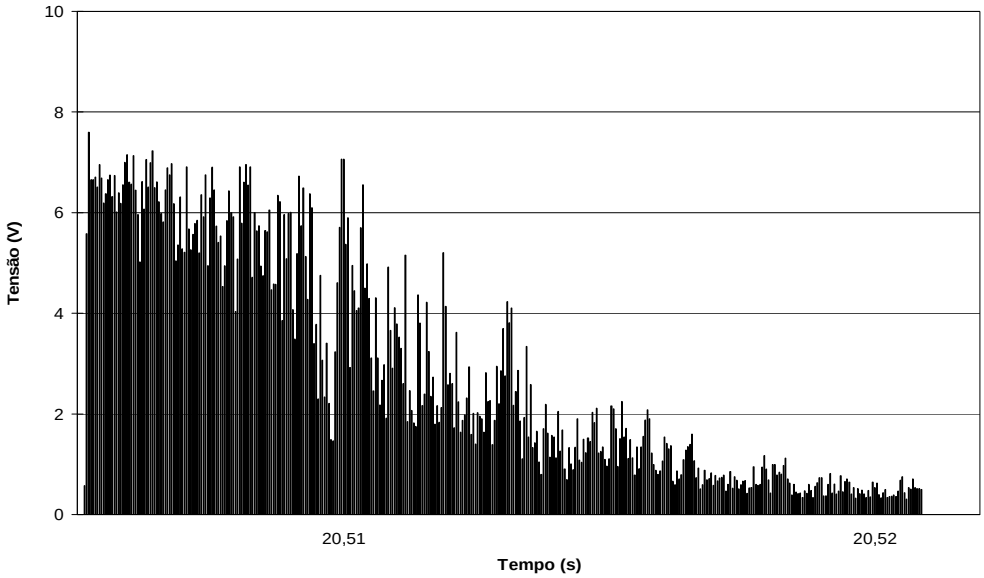


Figura 6.3: Detalhe do sinal de emissão acústica para o cordão de solda do teste 3.

É sabido que para se ter uma trinca de hidrogênio necessita-se que ocorra simultaneamente uma elevada restrição, presença de hidrogênio e microestrutura susceptível. A indicação da presença da trinca (propagação) ocorreu logo no início do ensaio, evidenciando o fato de que este sinal é provavelmente resultado de uma trinca de hidrogênio.

Com esses resultados comprova-se que o sistema desenvolvido com o sensor de EA para captar a formação e/ou propagação da trinca de hidrogênio é confiável também para o ensaio Tekken com soldagem pelo processo MIG/MAG.

6.3. Resultados para o processo Eletrodo Revestido

No Teste 4 soldando com corpo de prova limpo tem-se a ocorrência do primeiro sinal do sensor de Emissão Acústica aos 25.749 segundos após o início do ensaio. O sinal obtido durante 24 horas de aquisição para o Teste 4 é representado na Fig. 6.4. Neste caso nota-se a presença de três pico resultantes do trincamento no cordão de solda.

A Figura 6.5 mostra os detalhes do primeiro pico, ou seja, após uma aquisição superior a 7 horas. Sua intensidade máxima é de 4,09 V propagando durante 7,69 ms. Este

resultado reafirma a eficiência do sistema desenvolvido para detectar a formação e propagação da trinca de hidrogênio para o ensaio Tekken. Os valores de picos e tempo de propagação do sinal de EA estão de acordo com Fals (1999).

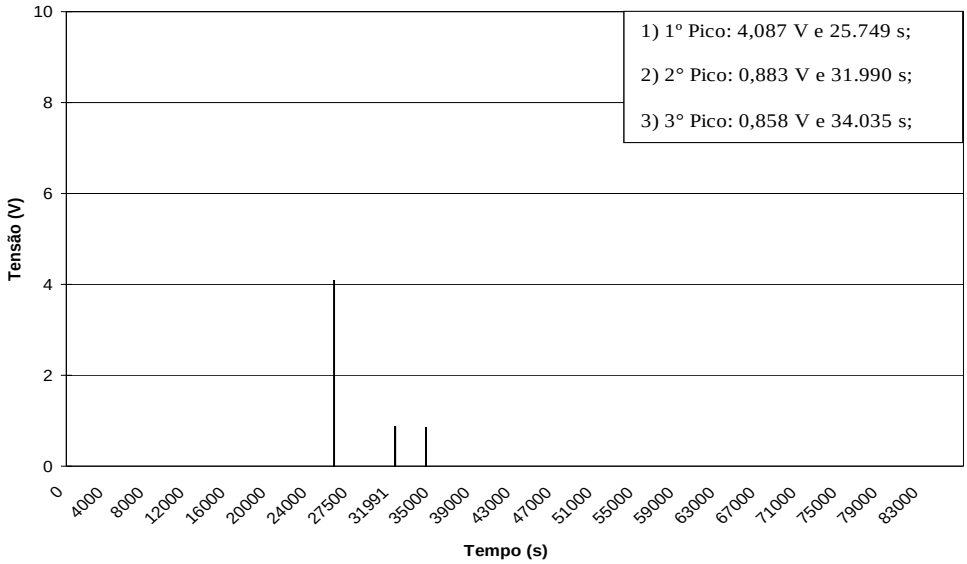


Figura 6.4: Representação do Sinal de Emissão Acústica para o Cordão de Solda Limpo para Soldagem com Eletrodo Revestido (Teste 4).

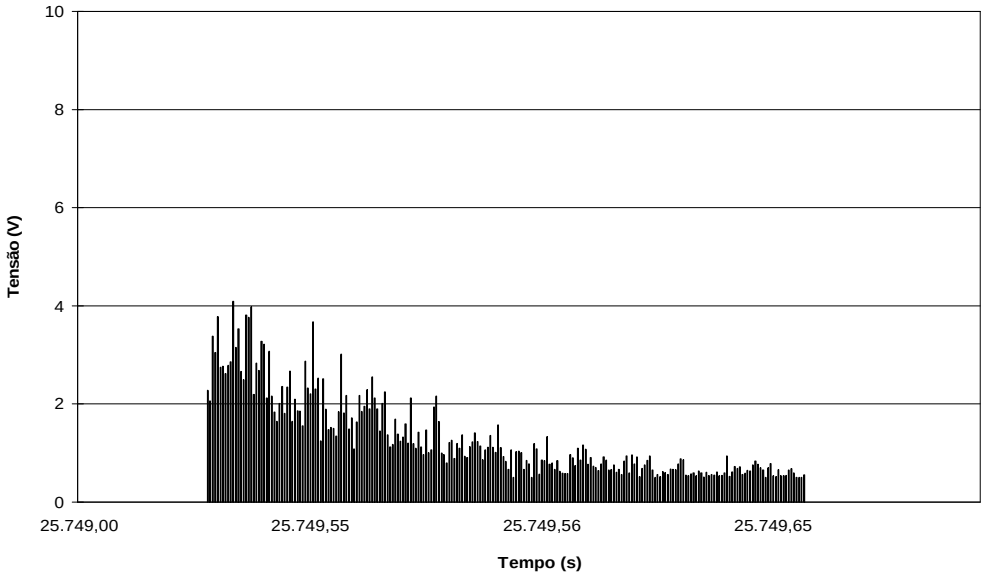


Figura 6.5: Sinal de Emissão Acústica para o Pico nº 1 com Cordão de Solda Limpo.

O Pico 2 aconteceu a 31.990 s após a conexão entre o sensor e a peça conforme Fig. 6.6. Entretanto sua propagação ocorre durante um tempo bastante curto em torno de 0,7

ms. Além disso, os picos tiveram uma intensidade bastante reduzida, bem próximo ao valor de corte do sinal do sensor. Isto também foi evidenciado nos testes com o ensaio G-BOP em que se tem um sinal de alta intensidade no momento de ínicio da trinca e a seguir picos de menor intensidade. Este fato está provavelmente relacionado a posição do sensor no corpo de prova, a intensidade de propagação da trinca de hidrogênio (ondas elástica) e sensibilidade do sensor de EA.

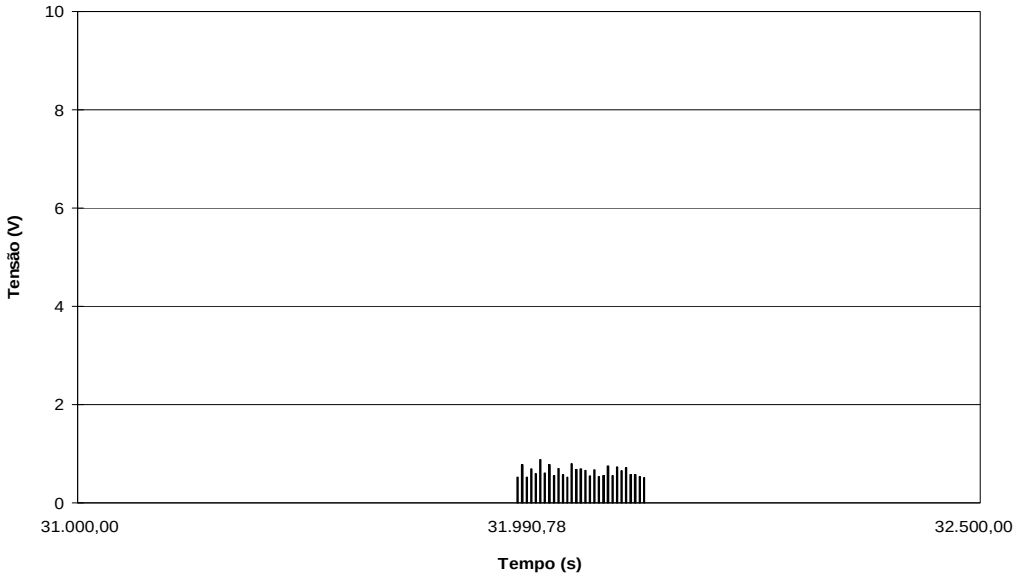


Figura 6.6: Sinal de Aquisição para o Pico n° 2 teste c om cordão de solda limpo.

O Pico 3 acontece a 34.350 s após a conexão do Sensor e a peça conforme Fig. 6.7. Porém sua propagação ocorre durante um tempo extremamente curto em torno de 0,85 ms.

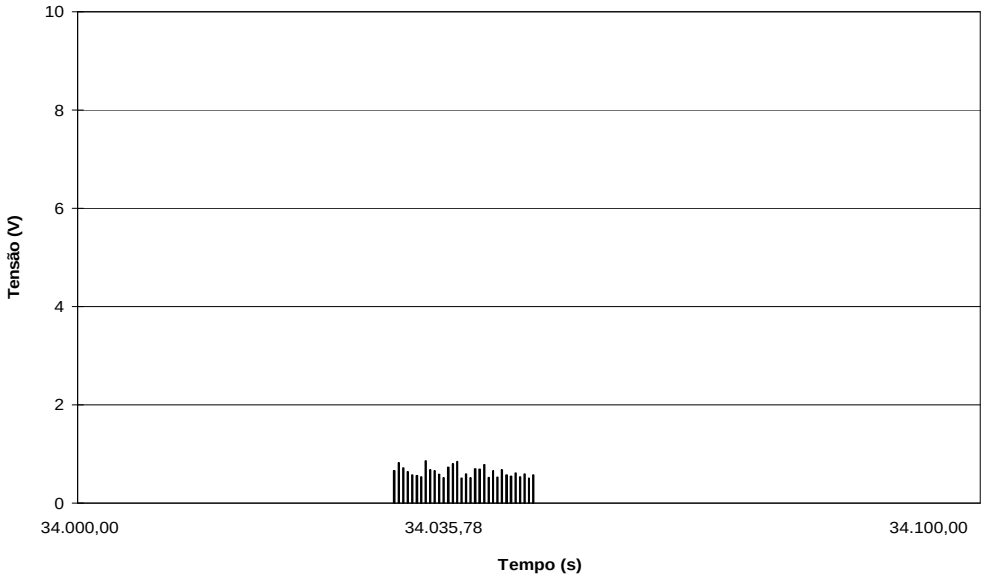


Figura 6.7: Sinal de Aquisição para o Pico n° 3 para o cordão de solda limpo.

Este sinal mostrado nas Figuras 6.4 até 6.7 apresenta relação com a trinca verificada no corpo de prova. Neste caso há uma forte tendência desta trinca ser gerada pelo hidrogênio, principalmente devido à presença de todos os fatores necessários a sua ocorrência, ou seja, tempo de aparecimento acima de 7 horas, temperatura ambiente do corpo de prova (aproximadamente 25°C) e tensões elevadas devido à alta restrição deste tipo de ensaio. É importante destacar que este tipo de trinca ocorreu na zona fundida e o eletrodo utilizado (ER11018G) não sofreu nenhum tratamento (do tipo forno para ressecamento e estufa para a sua manutenção antes da soldagem), evidenciando aqui a necessidade de estocagem adequada para este tipo de eletrodo. Além disso, conforme já verificado no Capítulo V este ER apresenta C_{eq} = 0,58 estando na faixa de materiais altamente susceptíveis à trinca de hidrogênio. Mesmo no teste com o corpo de prova limpo ainda foi percebido de acordo com o sinal de EA e análise visual no cordão de solda, a presença de trincas.

No teste 5 (Tabela 5.1) é com a presença de óleo, porém o sensor de Emissão Acústica não detectou a propagação da trinca durante o ensaio (24 horas). No entanto, ocorreu trinca no momento da soldagem no centro do cordão de solda (zona fundida), conforme Fig. 6.8.

Figura 6.8: Vista Superior do Cordão de Solda trincado para Soldagem com Eletrodo Revestido e Corpo de Prova Limpo.

Este caso tem como provavel responsável pelo fenômeno metalúrgico a trinca de solidificação. O óleo adicionado com prováveis presença impurezas e também a alta restrição do ensaio pode ter contribuído para a formação da trinca de solidificação. Aliado a

todos estes fatores soma-se o fato do eletrodo E11018G estar na faixa de materiais susceptíveis à trinca de hidrogênio com carbono equivalente acima de 0,4. Isto demonstra que o ensaio sem a utilização de um sensor de EA pode levar a erros na avaliação do tipo de fenômeno que está ocorrendo. Portanto, o sistema de EA evita este erro de avaliação sobre o tipo de fenômeno envolvido na formação da trinca.

No Teste 6 aumentou-se a corrente de soldagem em relação ao teste 5 com o objetivo de conseguir-se uma melhor penetração e fusão entre o corpo de prova e o cordão de solda. Neste ensaio ocorreu apenas um pico de tensão do sistema EA aos 14,59 s após o início da aquisição, conforme mostrado na Fig. 6.9. O valor da tensão de EA foi relativamente alto, em torno de 6,65 V, com um tempo de 10,25 ms (Fig. 6.10). Este sinal novamente evidencia a formação e/ou propagação da trinca de hidrogênio.

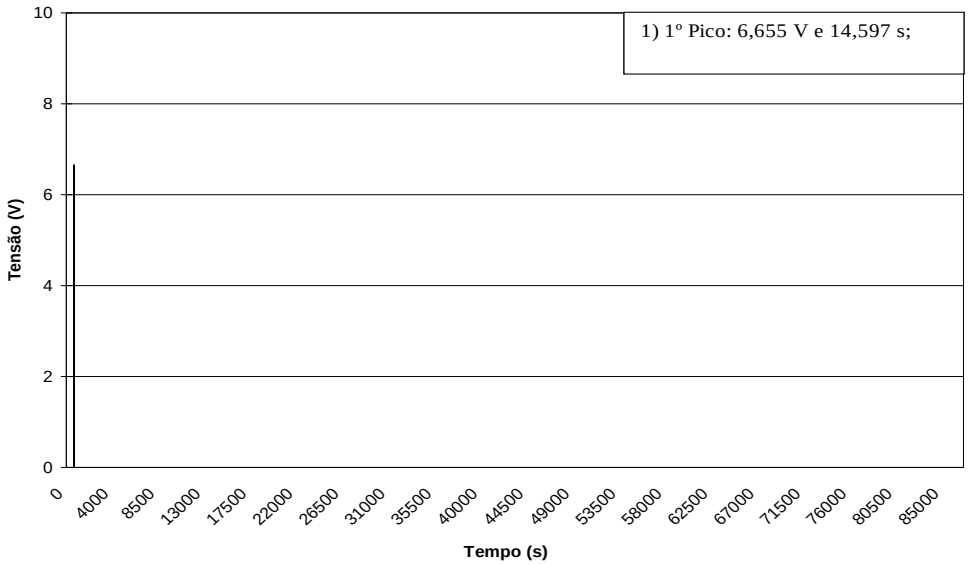


Figura 6.9: Representação do sinal de emissão acústica para o cordão de solda limpo para a soldagem ER (teste 6).

É importante destacar aqui que os ensaios foram realizados sem um controle efetivo da temperatura do corpo de prova para o início da aquisição do sinal de EA. O termopar foi colocado sempre sobre o cordão de solda, não sendo este um procedimento totalmente adequado. Para trabalhos futuros sugere-se colocar o termopar dentro do corpo de prova na região da ZAC de forma a controlar de forma eficiente o início da aquisição dos sinais de EA, melhorando a confiabilidade de todo o sistema.

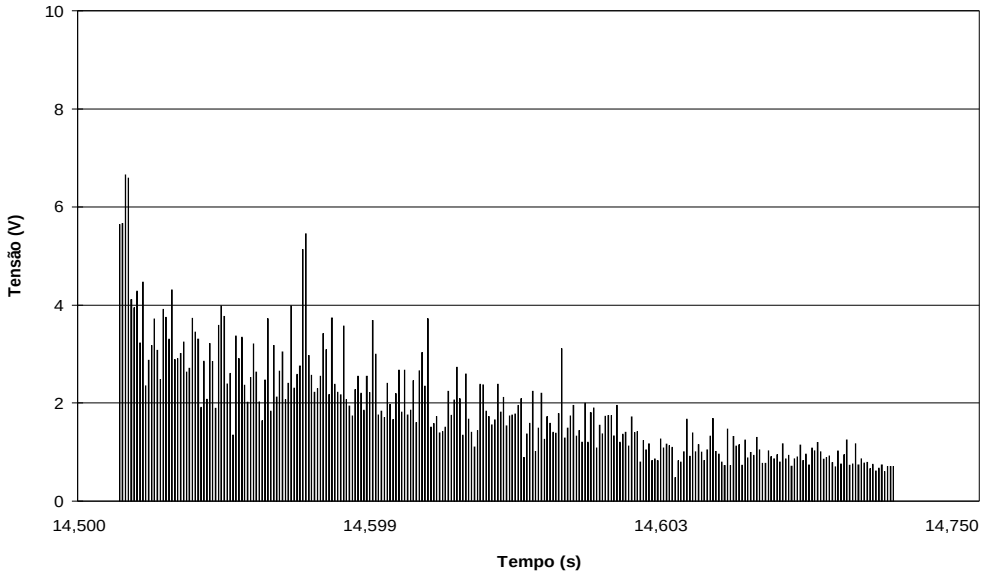


Figura 6.10: Sinal de Emissão Acústica para o Pico nº 1 com cordão de solda limpo com ER.

No Teste 7 procurou manter a mesma corrente de soldagem do teste 6 com o objetivo de conseguir-se repetibilidade dos ensaios realizados. É interessante observar que neste ensaio também ocorreu apenas um pico de tensão, porém a ocorrência do sinal aconteceu após 11 horas de ensaio (pico de 4,74 V e duração de 7,36 ms). O sinal obtido durante 24 horas de aquisição para o Teste 7 é apresentado na Fig. 6.11.

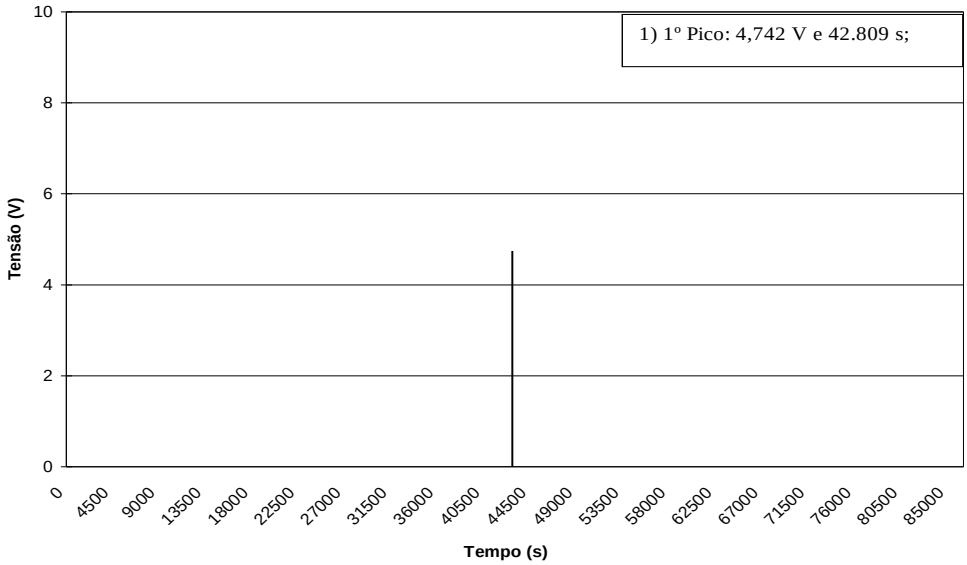


Figura 6.11: Representação do sinal de emissão acústica para o cordão de solda limpo para a soldagem ER (teste 7).

A Figura 6.12 mostra o detalhe do sinal de EA. Só ocorreu um pico com praticamente a mesma intensidade de tensão e tempo de duração. Entretanto, percebe-se uma diferença significativa no tempo de ocorrência do fenômeno, mas os dois ensaios indicaram que o fenômeno é provavelmente trinca de hidrogênio. A Figura 6.13 mostra que a trinca ocorreu na zona de ligação entre a ZF e a ZAC a partir da raiz do cordão de solda, região de alta concentração de tensão e também uma região desprotegida pela soldagem, pois esta fica em contato direto com o ar ambiente e com possibilidade de entrada do hidrogênio.

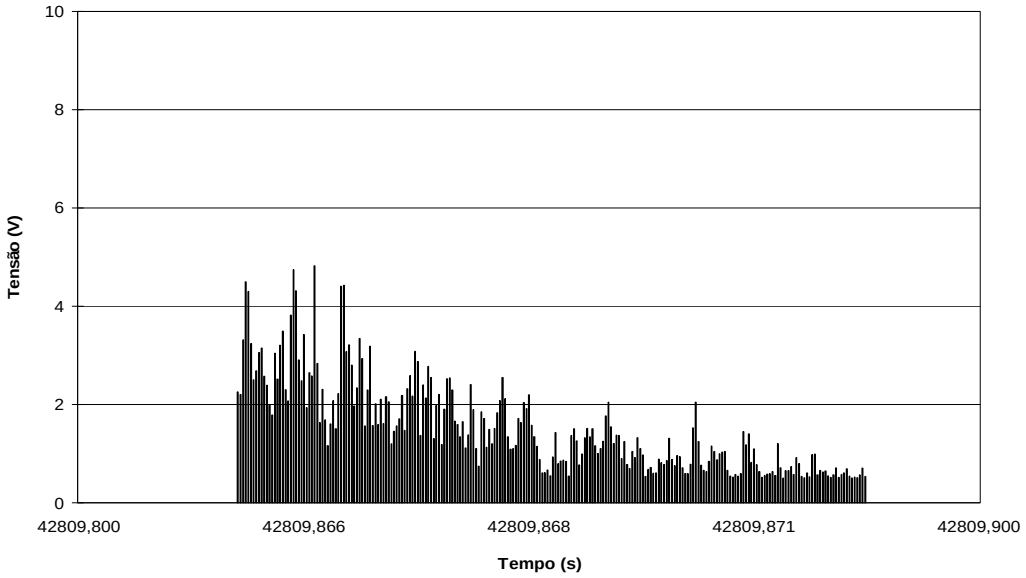


Figura 6.12: Sinal de emissão acústica com cordão de solda limpo com soldagem ER.

Para o Teste 7 a trinca propagou-se na região de ligação entre a ZAC e a ZF conforme Figura 6.13. Durante a avaliação dos ensaios verificou-se uma falta de fusão na raiz do cordão de solda, coerente com a análise para o teste Tekken em Y-Oblíquo no qual se tem uma elevada restrição originando trincas entre o metal de solda e a região da zona afetada pelo calor.

Como os corpos de prova foram cortados transversalmente ao cordão de solda em dois pontos, na outra extremidade o cordão de solda separou do metal base, pois a trinca já estava formada e de grande dimensão (provocada pela presença de hidrogênio no corpo de prova) conforme Figura 6.14 e 6.15.

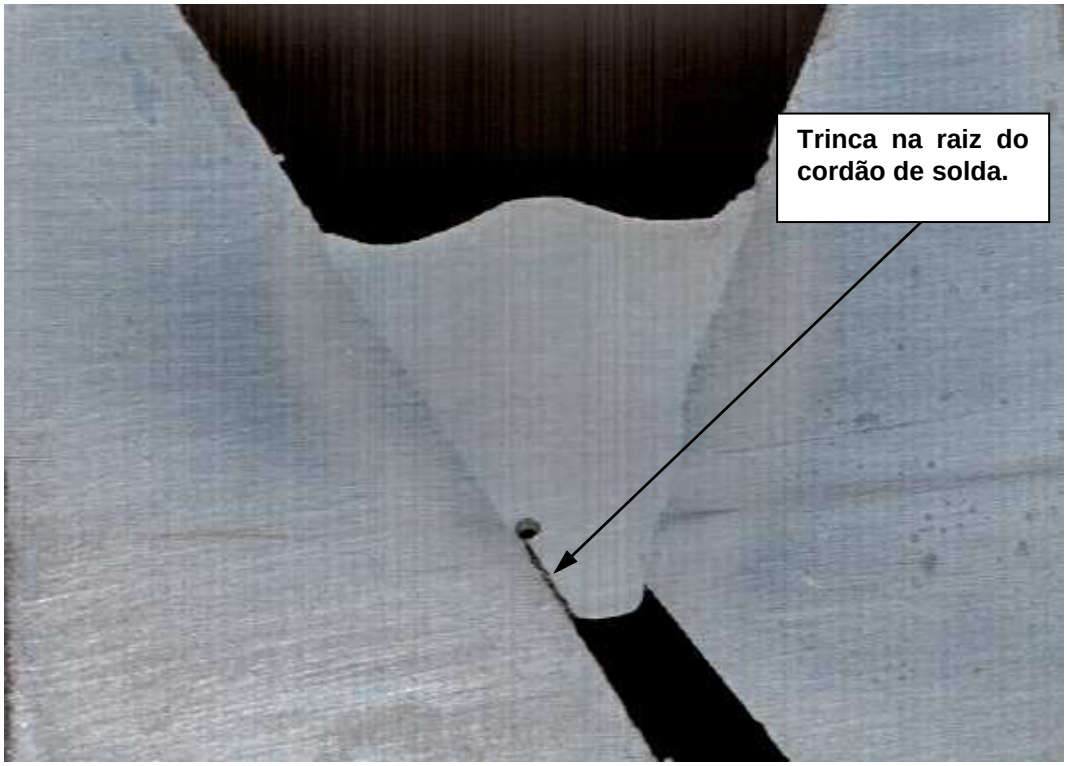


Figura 6.13: Ilustração do cordão de solda do teste 7.

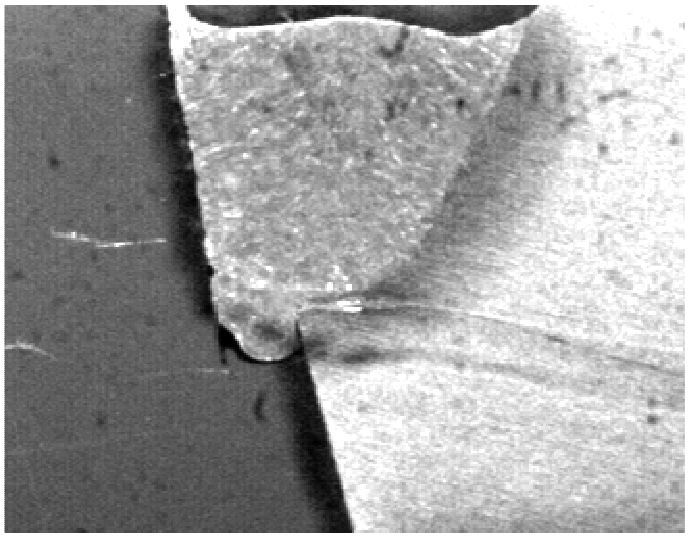


Figura 6.14: Corpo de Prova após o corte da seção com rompimento ao longo da junta.

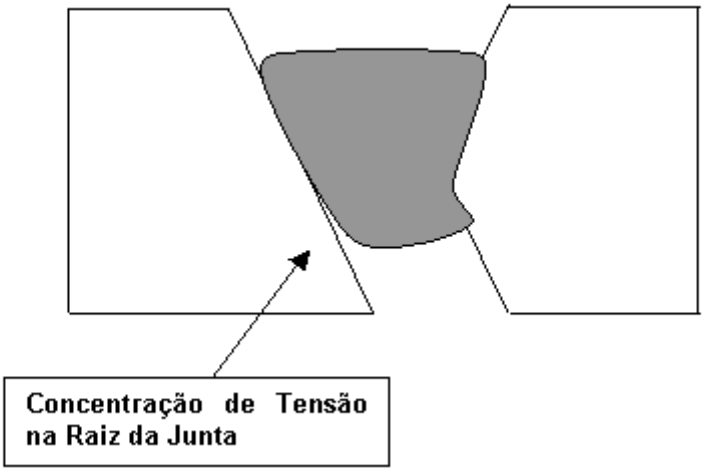


Figura 6.15: Detalhe da região crítica para concentração de tensões no Teste 7.

O teste 8 foi realizado com um eletrodo que foi ressecado a uma temperatura 300°C por duas horas e em seguida mantido na estufa a uma temperatura de 120°C até o momento da soldagem acumulando um período total de 8 horas. A energia de soldagem foi elevada (ver Tab. 6.1) com o objetivo de conseguir-se uma melhor penetração e fusão do cordão de solda. Da mesma forma que os testes 6 e 7 ocorreu apenas um pico de tensão após 17 horas do início do ensaio. O sinal obtido durante 24 horas de aquisição para o Teste 8 é apresentado na Fig. 6.16.

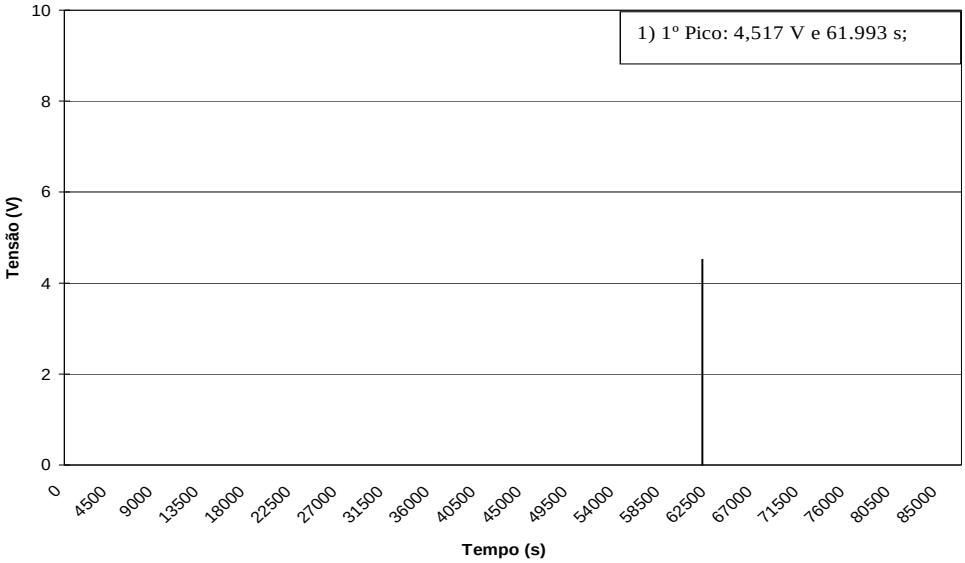


Figura 6.16: Representação do sinal de emissão acústica para o cordão de solda limpo para a soldagem ER ressecado (teste 8).

O pico de tensão máximo ficou em 4,51 V com duração de 7,72 ms. É interessante observar que tanto a intensidade do sinal como duração ficou em valores próximo aos testes 6 e 7, conforme apresentado na Fig. 6.17. Como se tem a ocorrência de picos após um tempo de soldagem superior a 16 horas este evento é provavelmente ocasionado pela propagação da trincas de hidrogênio.

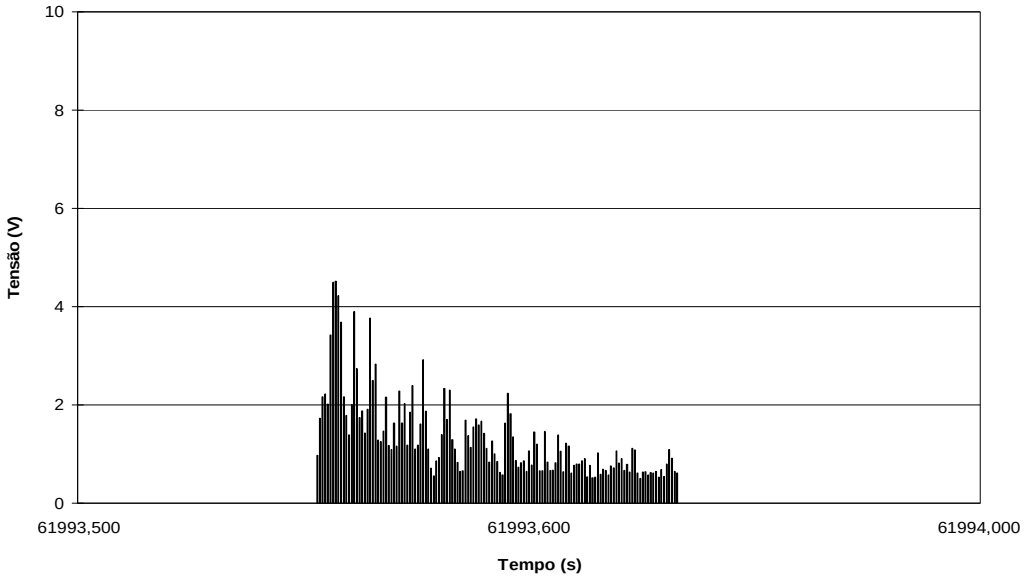


Figura 6.17: Sinal de emissão acústica para o pico com cordão de solda limpo com ER ressecado.

A Figura 6.18 mostra a seção do corpo de prova após a realização de corte transversal mostrando o local da trinca (Zona Fundida). Neste caso devido à presença de elevadas restrições, tempo de propagação da trinca e carbono equivalente na faixa de materiais susceptíveis mesmo ressecando o eletrodo não foi suficiente para evitar a propagação da trinca de hidrogênio.

Nota-se que nos dois ensaios (teste 7 e 8) o sistema de EA detectou-se apenas um pico após um longo período de ensaio. Pode-se afirmar que o sistema detectou a propagação da trinca, entretanto, não é possível afirmar que esta trinca surgiu exatamente neste momento, pois verificou no teste 5 o surgimento de uma trinca a alta temperatura (considerada como sendo uma trinca de solidificação). Este fato leva a necessidade de verificar a superfície da trinca (análise fractográfica).

Figura 6.18: Vista transversal do corpo de prova limpo soldado com ER ressecado (teste 8).

Para este aço em questão e metal de adição utilizado tem-se a provável susceptibilidade ao trincamento à quente. De acordo com o índice de susceptibilidade à fissuração à quente (ISF_q) proposto por Bailey (1977) apud Modenesi (2002):

$$ISF_q = 230\%C + 190\%S + 75\%P + 45\%Nb - 12{,}3\%Si - 5{,}4\%Mn - 1 \qquad (6.1)$$

Para este método tem-se o aço (DNV E40Z25) em questão com valor ISF_q de 24,44, eletrodo revestido (E11018G) com 77,04 e arame eletrodo para o processo MIG/MAG com valor máximo de 9,63.

Segundo Modenesi (2002) valores inferiores a 10 indicam uma alta resistência a fissuração à quente, enquanto valores superiores a 30 indicam baixa resistência. Portanto para o metal base pode-se ter ou não uma elevada susceptibilidade à trinca de solidificação devido seu valor intermediário e para o eletrodo revestido tem-se de acordo com a equação 6.1 uma altíssima probabilidade de ocorrência de trincas à quente. Este fato está coerente com a trinca a quente observada para o Teste 5. Nos testes 7 e 8 devido o tempo elevado de captura de sinal o sensor pode ter indicado somente a propagação da trinca (conforme Fig. 6.11 e 6.16) e seu inicio provavelmente ocorreu anteriormente à conexão do sensor à peça.

O segundo problema pode estar relacionado aos mesmos fatos citados para o teste G-BOP. A direção de propagação da trinca pode ser diferente do alinhamento do sensor. A

rugosidade da peça na interface entre sensor/peça pode contribuir para uma maior dificuldade de propagação e captação deste sinal pelo sistema de EA. O torque de aperto no parafuso que prende o sensor à peça pode influenciar na qualidade do acoplamento e conseqüentemente prejudicar a aquisição do sinal. Além de todos estes fatores ao colocar acoplante entre a peça e o sensor devido a temperatura ainda elevada no corpo de prova a região do acoplamento pode ficar desprotegida devido a fusão do acoplante.

Com o desenvolvimento dos aços ARBL de alta resistência, o fenômeno de trinca de hidrogênio tem acontecido com maior freqüência no MS das juntas soldadas. Assim é importante analisar os fatores característicos desta região que podem influenciar no trincamento. Na decomposição da austenita, a primeira fase a se formar é a ferrita de contorno de grão, e por ser frágil e estar associada aos contornos de grão o trincamento a frio no MS está relacionado com esta fase formada (FALS, 1999).

6.4. Microdureza e Diluição

Foram realizados ensaios de microdureza nas regiões do cordão de solda tanto para o processo MIG/MAG como para o ER. A Tabela 6.3 apresenta os resultados de microdureza (HV) juntamente com seu desvio padrão. Nestes ensaios foram realizadas sete medidas sendo descartados os extremos superior e inferior para o cálculo da média. Nota-se uma microdureza maior na ZAC (valores médios) para o processo MIG/MAG. Entretanto, não pode-se considerar uma diferença significativa, devido ao desvio padrão dos mesmos. Para o metal de solda (valores médios) o processo ER apresentou valores bem acima do MIG/MAG. Esta maior dureza no cordão de solda do processo ER está relacionado a diferente tipo de eletrodo (processo MIG/MAG – ER70S-6 e para o ER – E11018G).

Tabela 6.3: Resultados da microdureza no cordão de solda.

Ensaio Tekken	**MICRODUREZA (HV)**		
	Metal Base	**ZAC**	**Metal de Solda**
MIG/MAG (teste 3)	178	313	274
Desvio Padrão	11,11	19,98	16,83
ER (teste 8)	186	281	342
Desvio Padrão	6,08	11,79	7,72

Outro fato importante é que tanto na ZAC quanto no Metal de Solda a microdureza localiza-se na faixa entre 250 e 350 HV considerada crítica para a ocorrência de trinca de hidrogênio nos testes soldados pelo processo MIG/MAG e eletrodo revestido conforme Fig. 6.19.

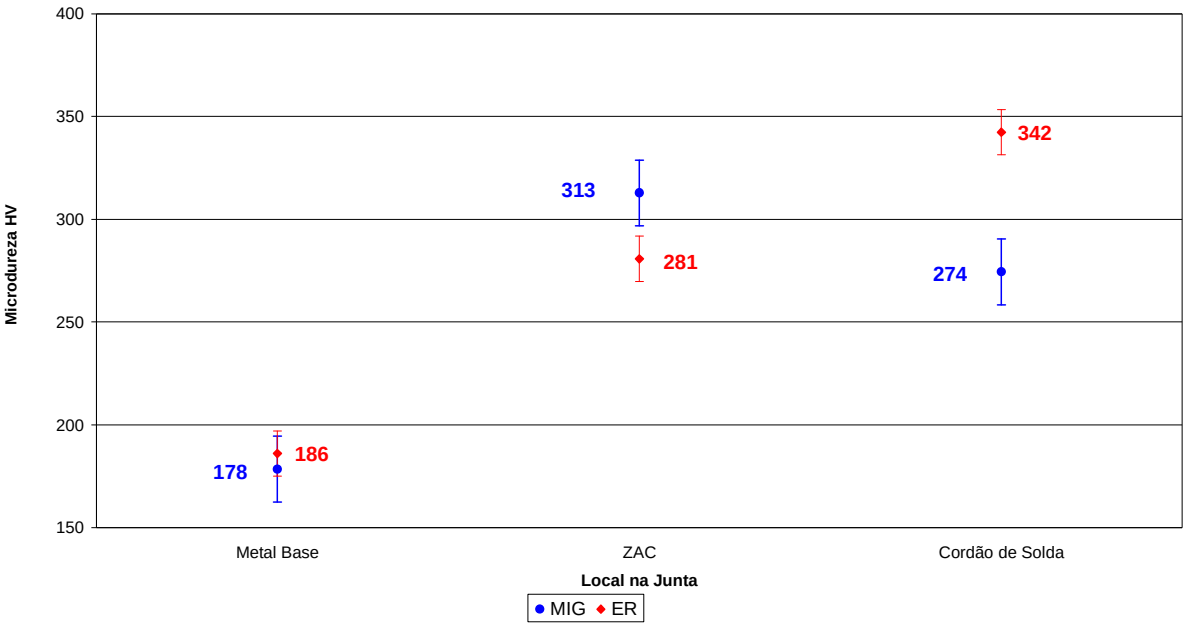


Figura 6.19: Evolução da microdureza para o material soldado com o processo MIG/MAG e Eletrodo Revestido.

Fato interessante também é que para a soldagem pelo processo ER ressecado (teste 8) que apresentou trincamento no cordão, a dureza na ZAC foi menor do que no metal de solda. Uma explicação para esta ocorrência é que a ZAC tornou-se uma região de crescimento de grão mais pronunciada para o teste 8 devido principalmente a maior quantidade de energia de soldagem aplicada. Tem-se também uma dureza de 342 HV no metal de solda próximo ao limite crítico superior de 350 HV para ocorrência de trinca. Com isso fica novamente evidenciado a relação entre o sinal de EA, a característica de trincamento provocado pelo hidrogênio bem como a dureza elevada no metal de solda próximo a região dada como crítica para ocorrência de trinca.

A Tabela 6.4 evidencia a diluição do cordão de solda para o ensaio Tekken na soldagem MIG/MAG e ER.

Observa-se uma maior diluição para o processo ER provavelmente ocasionado pelo uso de maior energia de soldagem durante a realização destes testes em relação ao MIG/MAG.

Tabela 6.4: Resultados de diluição para o processo MIG/MAG e ER.

Ensaio Tekken	DILUIÇÃO (%)		
	Área Fundida (mm^2)	Área Total (mm^2)	Diluição (%)
MIG/MAG (teste 3)	28,03	67,68	4,59
ER (teste 8)	7,29	49,91	14,61

Comparando o ensaio G-BOP com o Tekken observa-se que a diluição diminuiu principalmente devido o formato do chanfro em Y oblíquo sendo o cordão de solda depositado na cavidade do chanfro. Para o ensaio G-BOP o passe é depositado sobre o corpo de prova em chanfro reto implicando em uma maior diluição.

6.5. Avaliação Final do Ensaio Tekken

Para o ensaio Tekken nota-se uma resposta do sistema de aquisição por emissão acústica de acordo com a teoria de propagação de trincas com possibilidade de avaliação visual da trinca no corpo de prova e correspondente presença de sinal característico no sistema de emissão acústica, com tempo de propagação na ordem de mili-segundos, conforme também evidenciado por Fals (1999). Para os testes com o processo MIG/MAG limpo não ocorreu trinca no corpo de prova e não há nenhum pico resultante na aquisição para os dois primeiros ensaios. Para o ensaio com óleo o trincamento ocorreu na raiz da solda de forma prematura e muito intensa logo aos 20 segundos após a conexão do sensor ao corpo de prova.

O ensaio Tekken com eletrodo revestido mostrou-se extremamente sensível ao aparecimento de trincas. Para o caso soldado com a presença de óleo as trincas surgiram anteriormente à fixação do sensor ao corpo de prova evidenciando forte tendência de surgimento de trinca de solidificação. Por isso foi necessário soldar os corpos de prova na condição limpa e eletrodo revestido ressecado. No primeiro teste o pico indica o fenômeno de trinca de hidrogênio devido a baixa temperatura no momento da aquisição e correspondente sinal no sensor. Para o outro teste, da mesma forma, percebe-se trincas após 11 horas de ensaio sendo notável as condições favoráveis para o surgimento de trincas de hidrogênio com correspondente resposta do sensor de Emissão Acústica. Com o objetivo de consolidar os resultados do sensor sem a presença de óleo realizou-se o teste com o eletrodo revestido ressecado. Novamente obteve-se um sinal de trinca após 16 horas de aquisição característico de trinca de hidrogênio. Com isso comprova-se que o ensaio

Tekken com eletrodo revestido é muito sensível à fenômenos de trinca de hidrogênio, devido provavelmente ao fato de seu carbono equivalente situar-se na região de materiais susceptíveis. A soldagem com óleo demonstra que o corpo de prova trinca em tempo inferiores à 1 minuto de aquisição. Outro ponto a ser avaliado é que o aço utilizado está na faixa intermediária de susceptibilidade à trinca de solidificação. Já o eletrodo revestido apresenta um Índice de Susceptibilidade à Trincamento à Quente elevado dentro da faixa de ocorrência de trincas.

Com relação à dureza observada para os cordões avaliados no ensaio Tekken o fato do processo MIG/MAG apresentar menor dureza do que o eletrodo revestido no metal de solda pode justificar o não aparecimento de trincas na soldagem com o corpo de prova limpo para este processo. Isto porque o ensaio Tekken apresenta trincamento característico tanto na Zona Fundida quanto na Zona Afetada pelo Calor. Entretanto fica evidente a maior influência das condições adversas sobre a trinca na Zona Fundida devido sua rápida propagação após a soldagem com óleo. Isto explica também a elevada rapidez de ocorrência de trincas na Zona Fundida ao se utilizar o processo de soldagem com eletrodo revestido na presença de óleo sugerindo fenômenos de Trincas à Quente. Ao se utilizar o processo de soldagem com eletrodo revestido com o corpo de prova limpo, fica evidenciado o início do fenômeno do tipo trinca à quente e sua propagação devido à presença de hidrogênio.

CAPÍTULO VII

CONCLUSÕES

Nas condições de soldagem executadas neste trabalho o material estudado apresenta certo grau de susceptibilidade à trinca de hidrogênio tanto na zona fundida (ZF) como na zona afetada pelo calor (ZAC).

O sistema de Emissão Acústica (EA) construído para detectar a trinca de hidrogênio mostrou-se adequado para esta finalidade.

Com relação a sensibilidade a trincas de hidrogênio percebe-se uma maior susceptibilidade relacionada ao uso do eletrodo revestido (E11018G) quando comparado ao arame eletrodo (ER70S-6).

Com relação à área trincada avaliada durante o ensaio G-BOP percebe-se uma maior área para o processo MIG/MAG com óleo do que com o corpo de prova limpo. Para o eletrodo revestido provavelmente devido sua alta sensibilidade à trincas, a presença ou não de óleo, de forma geral não afetou o tamanho das trincas.

Para os ensaios G-BOP e Tekken tem-se uma analogia entre a ocorrência de trincas no corpo de prova com o sinal característico apresentado pelo sensor de emissão acústica. De acordo com os resultados obtidos percebe-se a possibilidade com o uso do sistema de EA em definir o momento de origem do fenômeno de trincamento bem como analisar de uma forma mais segura a característica da trinca e o mecanismo de sua origem e propagação.

CAPÍTULO VIII

TRABALHOS FUTUROS

- ✓ Melhorar a forma de acoplar o sensor à peça (manter a pressão constante durante os ensaios). Por exemplo, construir um furo circular de profundidade em torno de 5 mm na peça para colocação do sensor e acoplante melhorando a aderência na interface entre o sensor e a peça.
- ✓ Estudar os vários tipos de acoplantes do EA através do uso de acoplantes sólidos ou líquidos com o objetivo de obter um sinal de melhor qualidade.
- ✓ Estudar a influência do grau de restrição do Teste G-BOP na susceptibilidade a trinca através de medidas das tensões imposta ao cordão de solda na faixa de temperatura em que ocorre o fenômeno trinca de hidrogênio.
- ✓ Avaliar o efeito da espessura do corpo de prova e da variação na abertura entre os blocos do Teste G-BOP sobre o nível de trincamento dos corpos de prova;
- ✓ Estudar e avaliar a influência do torque de aperto entre as chapas soldadas do Teste G-BOP no nível tensões residuais no cordão de solda.
- ✓ Desenvolver um sistema de sincronização entre o Sistema de EA e a temperatura do cordão de solda para se ter uma mehor visualização do instante de propagação da trinca com a temperatura do cordão de solda.
- ✓ Desenvolver uma técnica sincronizada com mais de um sensor de EA, isto evitaria possíveis erros ocasionado por ruídos no sistema de aquisição, melhorando a robustez do sinal adquirido.
- ✓ Melhorar o sistema de alimentação e aquisição do equipamento de EA, evitando interrupções durante a aquisição, e desenvolver também um programa utilizando novas ferramentas computacionais.

CAPÍTULO IX

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALCÂNTARA, N.G. de. Weld metal hydrogen cold cracking. Cranfield Institute of Technology – School of Industrial Science, 322 p., Cranfield, April 1982 (Ph. D. Thesis).

ALCÂNTARA N.G. de. Métodos de avaliação da soldabilidade de aços de alta resistência. In: Congresso Latino Americano de Soldadura, VII Congresso Venezuelano de Soldadura, Caracas – Venezuela 1987, Anais.

ALÉ, R. M; JORGE, J.C.& REBELLO, J.M. Constituintes Microestruturais de Soldas de Aço C-Mn Baixa Liga. Parte II Metal de Solda. Soldagem & Materiais, v. 1, n. 2, 1993.

ADONYI Y., “Weldability of High Performance Steels”, Steel Bridge Design and Construction for the New Millennium, 2003.

ATKINS G., THIESSEN D., NISSLEY N., ADONYI Y., “Welding Process Effects in Weldability Testing of Steels”, WELDING RESEARCH, April 2002.

AWS D1.1/D1.1M: 2008, Structural Welding Code-Steel, AMERICAN WELDING SOCIETY.

BALDO, É. D., “Redução do Ciclo de Retificação Cilíndrica de Mergulho com Auxílio da Emissão Acústica”. Dissertação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP. 83p, 1994.

BARSANTI L., POZZOLI G., HILLENBRAND H.G., Production and field weldability evaluation of X100 line pipe, 13 th Joint Meeting PRCI-EPRG, New Orleans, USA, 2001.

BAHADUR A., KUMAR B. R., KUMAR A. S., SARKAR G. G., RAO J. S., Development and comparison of residual stress measurement on welds by various methods, Materials Science and Technology, Vol. 20, February 2004.

BEATTIE, A. G. Acoustic Emission, Principles and Instrumentation. Journal of Acoustic Emission, v. 2, p. 95-128, 1983.

BRAZ M. H. P., FILHO, W. W. B., “Propriedades de Fadiga de Soldas de Alta Resistência e Baixa Liga com Diferentes Composições Microetruturais”, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1999. 101 p. Dissertação (Mestrado).

BROEK, D. Elementary Engineering Fracture Mechanics, Martinus Nijhoff Publishers, Dordrecht, 1986, 501p.

CASTI metals black book – North American Ferrous Data. Edmonton: CASTI Pub. 2000. 4th ed. Chapter 2 – Wrought carbon & alloy steel metallurgy, p. 50-51.

COE, F. R. Weding steels without hydrogen cracking. Abington, Cambridge, The Welding Institute, 1973. Apud GRONG, O. Metallurgical modeling of welding. London: H. K. D. H. Bhadeshia, University of Cambridge, 591p., 1994.

COOPER, R. E., Soldagem e Caracterização das Propriedades Mecânicas de Dutos de Aço API 5L-X80 com Diferentes Arames Tubulares, Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2004. 111 p. Dissertação (Mestrado).

COOPER, R. E.; SILVA, J. H. F. ; TREVISAN, R. E. . Influencia del Precalentamiento en las Propiedades de Uniones Soldadas de Acero API 5L-X80 Soldadas con Alambre Tubular Autoprotegido. Revista de Metalurgia, Espanha, v. 40, n. 4, p. 76-81, 2004.

COTTRELL, C.L.M. “An improved prediction method for avoiding HAZ hydrogen cracking” Welding & Metal Fabrication, 58 (3), 1990, pp. 178-183.

DUNE D., LIU D.Z., Crystallography and Interfacial Structure of Twinned Shape Memory Martensite, Proc. ICOMAT’02, Helsinki, Finland, 2002, accepted for publication in J. de Physique, June 2003.

EASTERLING, K. Introduction on the physical metallurgy of welding. 1ª ed. LONDON: Butterworths & Co (Publishers) Ltda, 1983.

FALS, H. D. C., Proposta de um Ensaio para Avaliação das Trincas Induzidas por Hidrogênio em Juntas Soldadas Assistida por Emissão Acústica, Universidade Estadual de Campinas, 1999. 203 p. Tese (Doutorado).

FERRANDINI, P. L. “Avaliação dos micromecanismos de fratura de um aço microligado ao Ti e Nb em algumas condições microestruturais” Dissertação de mestrado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP 75 p, 1997.

FRAGA, F. E. N., Variáveis de Influência do teste G-BOP, Campinas Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2005. 95 p. Dissertação (Mestrado).

FERRARESI, V. A., “Estudo do fenômeno Trinca de Reaquecimento com auxílio da Emissão Acústica, Tese, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP 173 p, 1996.

FERRARESI, V. A., GONÇALVEZ, R. A. & SCOTTI, A. Avaliação da susceptibilidade à trinca de alívio de tensões em aços estruturais de baixo Cr e Mo. In: XIX ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DE SOLDAGEM. Águas de São Pedro, SP, out. 1993. Anais da ABS. São Paulo, SP, p. 87-96, 1993b.

GRANJON, H., Fundaments of Welding Metallurgy, Abington Publishing, Cambridge, 1991, 210p.

GRANJON, H. “Problémes Métallúrgiques Associés au Soudage dês Aciers”. Soudage et Techniques Conexes: 5-15, Janiever-Frevier, 1975.

GRONG, O., Mettallurgical modelling of welding. London: H. K. D. H. Bhadeshia, University of Cambridge, 581p., 1994.

HAKANSSON K., “Weld Metal Properties for Extra High Strength Steels”, The Royal Institute of Technology (KTH), Doctoral Thesis, August 2002.

HOOJIMANS, J. W.; OUDEN, D., Hydrogen absortion during arc melting. Materials Science and Technology, v.12, p.81, January 1996.

KOU, S., Welding metallurgy. 2nd ed. New Jersey: Wiley-Interscience, 2002. 461 p.

LAZOR R., DINOVITZER A., Begg N. P., Semiga V., " Delayed Cracking in Multipass Welds", Welding Journal 84, Number 9, pp. 34 - 38, Setember 2005.

LINNERT, G.E., Welding Metarllurgy. 3rd. New York, American Welding Society, 1967, p.631.

LIU, S., ASIBU K. E. Classification of AE Signals for Monitoring Martensite Formation form Welding. Welding Journal, p. 389s, October, 1990.

MABELLY Ph., BOURGES Ph., PONT G., Effect of metallurgical transformations on weld residual stresses application to E690 steel grade" Marine Structures, number 14, 2001.

MACIEL, T. M., Ciclo Térmico em Metais de Solda de Aços de Alta Resistência. 1994. 203 p. Tese de Doutorado. UFSCar. São Carlos-SP.

MARQUES, P.V., MODENESI, P. J., Algumas Equações Úteis em Soldagem. XXI Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem, Caxias do Sul, 1995.

MARTINES, F., FERRARESI, V.A., TREVISAN, R.E. "Projeto, construção e aferição de um equipamento de teste de implante modificado para o estudo de trincas de reaquecimento" Anais do XIII Congresso Brasileiro e II Congresso Ibero-Americano de Engenharia Mecânica, UFMG – Belo Horizonte, 12-15 de dezembro de 1995, 1995, 4p.

MARTINS, F., Design, Construction and Test of a Heat Cracking Evaluation Equipment, Master Theses – *Faculdade de Engenharia Mecânica, UNICAMP, Campinas,* Jul. 1995, 111p. (in Portuguese).

McPARLAN, M., GRAVILLE, B. A. Development of the G-BOP test for weld metal cracking. IIW Doc. N. IX-922, 1974. 12 p.

Metalurgia da Soldagem ESAB, Abril 2004.

MILLER, D. K.; HIETPAS, J.; DEPUE, R. Welding FAQs. Welding Journal, v. 81, n. 12, p. 41, December 2002.

MODENESI, P. J., Metalurgia da Soldagem, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 63 p., 6.1-6.22 pp, 2000.

MODENESI, P. J., Soldabilidade dos Aços Transformáveis, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 63 p., 2002.

MODENESI P. J., FIGUEIREDO A. M. G., COSTA A. L. G., "Carregamento Catódico de Hidrogênio na Simulação de Fissuração a Frio", XXIV Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem, Fortaleza – CE, Setembro 1998.

MONTEIRO L. S., LEAL V. S., 'Estudo de Ciclos Térmicos em Juntas Soldadas de um Aço de Alta Resistência e Baixa Liga Através do Método "In Situ"', Dissertação de Mestrado, Unicamp, Campinas SP, Fevereiro de 2004.

NEVASMAA, PEKKA, Predictive model for the prevention of weld metal hydrogen cracking in high-strength multipass welds Department of Mechanical Engineering, University of Oulu, P.O.Box 4200, FIN-90014 University of Oulu, Finland Oulu, Finland 2003.

ORDÓÑEZ, R. E. C., TREVISAN, R. E., 'Soldagem e caracterização das propriedades mecânicas de dutos de aço API 5L-X80 com diferentes arames tubulares', Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas SP, Fevereiro de 2004.

RAMIREZ J. E., MISHAEL S., SHOCKLEY R., "Properties and Sulfide Stress Cracking Resistance of Coarse-Grained Heat-Affected Zones in V-Microalloyed X60 Steel Pipe" Welding Journal 84, Number 7, pp. 113 - 123, July 2005.

RODRIGUES, P. C. M.; PEREMOLA, E. V.; SANTOS, D. B. Mechanical properties of na HSLA bainitic steel subjected to controlled rolling with accelerated cooling. Materials Science & Engineering, A283, p. 136-143, 2000.

SANTOS NETO, N. F., Caracterização de soldas em aços API 5L com diferentes arames tubulares e temperaturas de preaquecimento, Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2003. 87 p. Dissertação (Mestrado).

SENUMA, T. Physical metallurgy of modern high strength steel sheets. ISIJ International, v. 41, n. 6, p. 520-532, 2001.

SILVA, H. R., FERRARESI, V. A., Estudo dos Métodos de Determinação da Sensibilidade ao Trincamento à Frio em Juntas Soldadas, Uberlândia, Minas Gerais, Brasil, Simpósio de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, POSMEC, 2006.

SILVA, H. R., RESENDE, A. A., CAMPOS, T. V., FERRARESI, V. A., Utilização do Sensor de Emissão Acústica no teste G-BOP para determiner a susceptibilidade a trinca de hidrogênio, Salvador, Bahia, Brasil, Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, CONEN, 2008.

SILVA, J. H. F. Proposta de um novo ensaio para avaliar a suscetibilidade de metais de solda ao fenômeno de trincas induzidas pelo hidrogênio em diferentes ambientes. Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia Mecânica, UNICAMP, Campinas, SP, 158p, 2005.

SOARES S. D., DONATO G. V., 1979 a 2002 – 23 anos de Emissão Acústica na PETROBRAS, Desenvolvimentos, Pesquisas e Resultados, XX Congresso Nacional de Ensaios Não Destrutivos, Salvador, agosto, 2002.

SUZUKI, H. Weldability of Modern Structural Steels, IIW 1982 Annual Assembly, 1982, 17p.

SUZUKI, H. & TERASAKI, T. Estimating Critical Stress and Preheat Temperature to Avoid Cold Cracking in Implant and JIS-Y Testy. IIW IX-1417-86, May 1986, 14p.

SVENSSON, l. E., Consumables for welding high strength steels, Svetsaren, Göteborg, Sweden, no 1, p.25-33, 1999.

TAMAKI, K., SUZUKI, J. Reheat cracking test on high strength steels by a modified implant test. (Study of reheat cracking of Cr-Mo steels, Report 1). Transaction of the Japan Welding Society, v.14, n.2, p.25-30, October 1983.

VIEIRA, M. C. B. Medição do nível de hidrogênio no metal de solda. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia metalúrgica da Escola de Engenharia da UFRGS, Porto Alegres RS, 155p., 1990.

WIDGERY D. J. et al. Approaches to the development of high strength weld metals. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON HIGH STRENGTH STEEL. 2002, 10 p. Disponível em: <http://www.sintef.no/units/matek/press/index.html> Acesso em: 7 ago. 2003.

YURIOKA, N.; SUZUKI, H. Hydrogen assisted cracking in C-Mn and low alloy steel weldments. International Materials Reviews, v.35, n.4, pp.217-252, 1990.

ZHAO, M. C.; YANG, K.; SHAN, Y. The effect of thermomechanical control process on microstructure and mechanical properties of a commercial pipeline steel. Materials Science & Engineering, A335, p. 14-20, 2002.