

Universidade Federal do Pará
Instituto de tecnologia - ITEC
Programa de pós-graduação em Engenharia Elétrica
Mestrado Profissional em Engenharia Elétrica

Alberto de Castro Monteiro

Estudo do Comportamento dos Aços Ferramentas Soldados em Fadiga

Dissertação de Mestrado

**Belém-Pa
2011**

Universidade Federal do Pará
Instituto de tecnologia - ITEC
Programa de pós-graduação em Engenharia Elétrica
Mestrado Profissional em Engenharia Elétrica

Estudo do Comportamento dos Aços Ferramentas Soldados em Fadiga

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Instituto de Tecnologia da Universidade Federal do Pará como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica com ênfase em Processos Industriais.

Alberto de Castro Monteiro

Orientador: Prof.Dr. Jose Antonio Silva Souza

Belém-Pa

Universidade Federal do Pará
Instituto de tecnologia - ITEC
Programa de pós-graduação em Engenharia Elétrica
Mestrado Profissional em Engenharia Elétrica

Alberto de Castro Monteiro

Estudo do Comportamento dos Aços Ferramentas Soldados em Fadiga

Defesa de Mestrado

Esta dissertação foi julgada e aprovada para obtenção do título de **Mestre em Engenharia Elétrica na Área de Concentração em Processos Industriais do Programa de Pós-Graduação Strictu Sensu em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pará - ITEC-UFPA**

Belém, 28 de Fevereiro de 2011.

PROF.DR. JOSE ANTONIO DA SILVA SOUZA – UFPA
COORDENADOR

BANCA EXAMINADORA:

PROF.DR. JOSÉ ANTONIO DA SILVA SOUZA
PRESIDENTE–UFPA.

PROF.DR. EMANUEL NEGRÃO MACÊDO
MEMBRO UFPA.

PROF. DR. CÉLIO AUGUSTO GOMES DE SOUZA
MEMBRO-UFPA.

DEDICATÓRIA

DEUS, pela certeza de que nunca estaremos a sós.
Alcino Monteiro, meu pai (em memória), pelos
conselhos e exemplo de dedicação.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal do Pará – UFPA.

Ao Instituto de Tecnologia e Educação Galileo da Amazônia – ITEGAM.

Ao Instituto Federal de Educação Ciências e Tecnologia do Amazonas – IFAM.

Aos Professores: Dr. José Antonio Silva Souza, Dr. Emanuel Negrão Macedo, Dr. Célio Augusto Gomes de Souza e M. Sc. Jandecy Cabral Leite.

Aos meus familiares: Maria Luiza de Castro Monteiro, Delnandina Maria Macedo Monteiro, Bianca Macedo Monteiro e Cesar Augusto Macedo Monteiro.

RESUMO

Sabendo-se que a fadiga é uma redução gradual da capacidade de carga do componente pela ruptura lenta e gradual do material. E que este defeito decorre do avanço infinitesimal de microtrincas, que se formam no interior do material, imperceptível a olho nu, como também é notório que a presença dos elementos de liga nos aços, propicia alterações nas propriedades metalúrgicas e mecânicas no material, aplicado à obra. Por outro lado, ao ser submetido a processamentos dos mais diversos, os mesmos, deformam nas zonas elásticas, plásticas e ao fim rompem-se. Ressaltando-se o objetivo deste estudo, destina-se a abordar as uniões soldadas, nos estágios em que ficam sujeitas a altas temperaturas e resfriam sem controle, até a temperatura ambiente. Ao fim, são solicitados por carregamentos cíclicos constantes ou alternados. Nesta particularidade, espera-se detectar mudanças estruturais profundas na Zona Termicamente Afetada – ZTA, em razão do superaquecimento sofrido, tanto na proximidade do ponto central da poça de fusão como na região localizada na vizinhança. Como não dispomos de parâmetros suficientes e necessários ao controle destas alterações, propomos analisar a ZTA da junta soldada, com a finalidade de avaliar o comportamento metalúrgico e suas implicações causadas pelas interações gás-metal. Analisar os efeitos resultantes do triângulo formado pelo material base aço AISI/SAE 4340, SAE 1020 chanfrados em V e o eletrodo revestido E-6013. A análise da estrutura será realizada pelas técnicas de ensaio metalográfico usando o método da microscopia óptica – MO o qual é de ampla difusão nas comunicações técnicas e científicas, através das quais, distinguirão as transformações multifásicas. Transformações estas, distintas pelas transformações das austenitas diretas em martensitas sem passar pelas ferritas e perlitas. Com estas identidades, o metalógrafo pode caracterizar e prever as reações futuras das estruturas mediante a análise das solicitações, a que possam estar submetidas. Para analisar o comportamento em fadiga dos materiais em questão, adota-se como parâmetro auxiliar, o ensaio do pêndulo de Charpy. Portanto, pelos resultados obtidos, conclui-se que as estruturas são comprometidas por tensões internas em consequência fragilizam, mas o procedimento de soldagem pode ser adotado, seguido de recozimento para alívio de tensões, se não fizer trincas.

Palavras Chaves: Estruturas, Fraturas, Fadiga, Metalografia e Soldagem.

ABSTRACT

Knowing that fatigue is a gradual reduction of the carrying capacity of the component by slow and gradual breakdown of the material. And this defect arises from the infinitesimal advance of microcracks that form inside the material, imperceptible to the naked eye, it is also clear that the presence of alloying elements in steels, allows changes in metallurgy and mechanical properties of the material, applied to work. On the other hand, when he underwent processing of diverse, they all zones deform elastic, plastic, and after break up. Emphasizing the goal of this study, intended to address the welded joints, in stages that are subjected to high temperatures and cools without control, even at room temperature. In the end, are requested by cyclic alternating or constant. In particular, it is expected to detect structural changes deep in the Heat Affected Zone - ZTA, suffered because of overheating, both near the midpoint of the weld pool and in the region and located in the neighborhood. As we do not have enough parameters and necessary to control these changes, we propose to analyze the HAZ of the welded joint in order to evaluate the metallurgical behavior and its implications caused by gas-metal interactions. To analyze the effects of the triangle formed by the base material AISI / SAE 4340, SAE 1020 and chamfered V-coated electrode E-6013. Structure analysis will be performed by testing techniques using the metallographic optical microscopy - MO which is widely circulated in technical and scientific communications, through which, the transformations distinguish multiphasic. These transformations, distinguished by direct transformation of austenite to martensite without passing through the ferrite and pearlite. With these identities, metallography can characterize and predict the future responses of the structures by analyzing the requests, which may besubmitted. To analyze the fatigue behavior of materials in question, it is adopted as a parameter ancillary testing the Charpy pendulum. Therefore, the results obtained, we conclude that structures are compromised by tensions 05/05/2011 internal consequently weaken, but welding procedure can be adopted, followed annealing for stress relief, if not make cracks.

Keywords: Structures, Fracture, Fatigue, Metallography, and Welding.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Esboça o chanfro e a deposição da solda; esquemática de fotomicrografia de ZTA – gerada pela soldagem de topo com chanfro em V	15
Figura 1.2 - Fotomicrografia ilustra a tensões internas pela multifases na vizinhança da poça de fusão composta de: martensita acicular e grãos de perlitas deformados pelo calor, aço hipoeutetoide, 320 X, nital 2%.....	17
Figura 1.3. ilustra a propagação do calor no aquecimento e resfriamento na ZTA, expresso pelo corte Y-Y	20
Figura 1.4 - Ilustra o esquema microestrutural da ZTA após o resfriamento.....	21
Figura 1.5 - Ilustra o aparelho denominado pêndulo de Charpy	22
Figura 1.6 - Descontinuidades de soldagem	23
Figura 2.7 - Ilustra os pontos críticos de matrizes e estampos sujeito, desgaste, deformações e trincas.	34
Figura 2.8 - Ilustra o fotomicrografia do Aço SAE 1020 – microestruturas perlítica na matriz ferrítica ataque nital 2% 400 X.....	36
Figura 2.9 - Diagrama Temperatura Transformação e Tempo – TTT para o tipo de aço SAE 1020	36
Figura 2.10 - Aço SAE 1020 – Carta de Resfriamento Contínuo - TRC	37
Figura 2.11 - Diagrama de Transformação Tempo Temperatura - TTT do aço AISI SAE 4340	38
Figura 2.12 - Aço hipoeutetoide com 0,4%C – <i>Recozido</i>	38
Figura 2.13: A carta de tratamentos térmicos TTT do Aço AISI-SAE 4340 – respectivas curvas de resfriamento contínuo TRC	40
Figura 2.14 - Ilustra a fotomicrografia da união soldada, destacando a ZTA e sua heterogeneidade estrutural do substrato com a extensão da peça	41
Figura 2.15 - Ilustra o esquema e fotomicrografia do efeito da trinca lamelar em união soldada sob tração	42
Figura 2.16 - Ilustra o esquema fenda sob o cordão de solda em trinca.....	44
Figura 2.17 - Ilustra fotomicrografia de ZTA característica de dois tipos de uniões, destacando-se amostra inferior como a base deste estudo	45
Figura 2.18 - Ilustra o esquema de um processo de soldagem a arco	46
Figura 3.1 - Ilustra a função do eletrodo na manutenção da tocha, destacando o	

revestimento e sua função.....	57
Figura 3.2: Fotomicrografia de aço SAE 1020 – estrutura: Perlita na matriz Ferrítica – ataque Nital a 2% - 200 X	59
Figura 3.3 - Fotomicrografia do aço SAE 1040 – Austenitizado e Resfriado lentamente, Estrutura: Campos Claros - Ferrita e Campos Escuros - Perlita, ataque nital, 200 X	59
Figura 3.4 - Diagrama de Transformação Tempo e Temperatura – TTT e simulação de transformação no Resfriamento Contínuo -TRC do SAE 1020	61
Figura 3.5 - Ilustra o Diagrama Transformação no Tempo e na Temperatura – TTT sobreposto com o Diagrama Transformação no Resfriamento Contínuo – TRC Aço SAE 4340	61
Figura 3.6 - Ilustra fotomicrografia aços SAE 1030, recozidos (a) e aços laminado a frio- Encruado (b)	67
Figura 3.7 - Ilustra o fotomicrografia aço SAE 1020 – Fase Perlitica (marron) na matriz ferritica(cinza) 160 X Nital 2%	67
Figura 3.8 - Ilustra a precipitação multifásica Perlitica do aço Eutetóide, com teor de até 0,8%C parâmetro do teor a 100% perlita adaptado	68
Figura 3.9 - Ilustra aços SAE 1040 com 0,77% de Mn, 0,4%C, Normalizado fase: Perlita fina com Ferrita no contorno de Grão, 640 X, Nital 4%	69
Figura 3.10 - registra o Tipo A - MB-360 regulamenta o entalhe em chapa/barra em V	81
Figura 3.11 - Ilustra SAE 1020 – chapa de aço ao carbono – distinta pela região na vizinha mais distante da ZTA – estrutura: grãos pardos Perlita + grãos claros Ferrita, ataque Nital 2%, 160 X.....	83
Figura 3.12 - Ilustra SAE 1020 – chapa de aço ao carbono – distinta pela região na interface da ZTA – estrutura: grãos pardos Perlita + grãos claros Ferrita, ataque Nital 2%, 160 X	84
Figura 3.13 – Ilustra SAE 1020 – na interface da região da ZTA – caracterizado pelo inicio de ataque às deformação dos contornos de grãos, agregando tensões internas, estruturas: perlita (marrom) e ferritas acicular(claras), ataque Nital 2%, 160 X	84
Figura 3.14 - SAE 1020 –Ilustra a região da zona de fusão do metal depositado por arco elétrico com eletrodo revestido E6013, estrutura de ferrita alotriomórfica nos contornos de grãos, ferrita acicular e bainita(perlita fina).....	85
Figura 3.15 – Ilustra os corpos de provas dos Ensaio Charpy – Lab. Ensaio	86

Figura. 3.16 - Ilustra a estrutura resultante de Têmpera e Revenido, microestrutural de martensita revenida e trinca 640 X aço SAE 1045, ataque Nital a 2%	86
Figura 3.17 - Descritivo de variação da temperatura no tempo – durante o resfriamento	87
Figura 3.18 - Descritivo de como varia a energia livre em função da temperatura e do raio crítico atômico	88
Figura 3.19 - Aspecto do fenômeno da solidificação, à esquerda o esquema e a direita a fotomicrografia de um sistema de estruturas dendríticas.....	89
Figura 3.20 - Ilustra a resultante estrutural de uma deposição dessemelhante com a observação de que está trincada - lado esquerdo da imagem como se houvesse severidade no resfriamento, 160 X, ataque nital a 2%	90
Figura. 3.21 - Ilustra a trinca da figura anterior, 320 X atacada com Nital 2%	91
Figura. 3.22 - Ilustra o mesmo material – porem resfriado ao ar depois da deposição, pelo lado esquerdo o metal base e a direita o material de deposição, microestrutura martensita e ferrita acicular pela direita 160 X, ataque nital 2%	92
Figura. 3.23 - Ilustra a interface entre metal base e metal depositado no AISI 4340 – destacando as transformações da ZTA – 320 X ataque nital a 2%.....	93
Figura 3.24 - Tem como função a de comparar as microestruturas, a poça de fusão fora da ZTA e a direita o substrato – metal base, AISI 4340 a 160 X, ataque Nital 2%	94
Figura 3.25 - Tem como função a de comparar as microestruturas, a poça de fusão fora da ZTA e a direita o substrato – metal base, AISI 4340 a 160 X, ataque Nital 2%	94
Figura 3.26 e 3.27 - Ilustra a poça de fusão fora de ZTA, resfriada em água a 25°C e o sub-estrato, após a deposição amostral, 160 X, Nital 2%.....	95

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Características dos Revestimentos de Eletrodos.....	28
Tabela 2.2 - Propriedade dos aços rápidos	29
Tabela 2.3 - Aços ferramentas – selecionados à extrusão a frio.....	29
Tabela 2.4 - Aços selecionados à construção de anéis, extratores e contrapunções.....	30
Tabela 2.5 - A Aços selecionados à construção de anéis, extratores e contrapunções	31
Tabela 3.1 - Eletrodos para aços baixos e meio teor de Carbono.....	55
Tabela 3.2 - Material do núcleo do eletrodo.....	56
Tabela 3.3 - Material Temperatura de recozimento.....	72
Tabela 4.1 – Torre Cilíndrica de Absorção a Baixa Pressão	97
Tabela 4.2 - Energia Absorvida no ensaio do SAE 1020 – Soldado Chanfro em V	97

LISTA DE MAPAS

Mapa 2.1 – Desempenho do processo de Soldagem	47
--	----

SUMÁRIO

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO	14
1.1. Introdução	14
1.2. Objetivos.....	17
1.2.1. Objetivo Geral	17
1.2.2. Objetivos Específicos	17
1.3. Justificativa	18
1.5. Limitações do Estudo	21
1.6. Estrutura do Trabalho	24
CAPÍTULO II - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	25
2.1. Pioneirismo da Soldagem	25
2.2. Caracterização dos os aços usados nas construções de moldes e matrizes	28
2.3. Classificação dos Aços	31
2.4. A falha de Matriz.....	34
2.5. Caracterização do Aço S.A.E. 1020	35
2.6. Caracterização do Aço Liga SAE 4340.....	37
2.7. Tecnologia da Soldagem a Arco Elétrico.....	41
2.8. Falha por fraturas.....	42
2.9 A fadiga	47
2.10. Fadiga às cargas cíclicas de amplitudes variáveis	51
CAPÍTULO III - MATERIAIS E MÉTODOS	54
3.1. Materiais	54
3.1.1. Eletrodos E-6013	55
3.1.2. Caracterização do Aço SAE 1020	58
3.1.3. Caracterização do Aço SAE 4340	59
3.1.4. Comparação das temperabilidade dos aços via Diagrama TTT	60
3.2. Tratamentos Térmicos	63
3.2.1. Tipos de Tratamentos Térmicos	65
3.2.1Características metalúrgicas dos tratamentos e a Metalografia.....	70
3.2.2. Os problemas da incidência de trincas	76
3.2.3. Metalografia e o Controle de Qualidade	78
3.3. O Ensaio Metalográfico.....	79

3.4. Ensaio de Charpy.....	80
3.4.1. Procedimentos	81
3.5. Análise dos Resultados.....	82
3.5.1. Análise Metalográfica.....	83
3.5.2. Ensaio Charpy	85
CAPÍTULO IV - CONCLUSÕES, SUGESTÕES	96
4.1. Conclusões.....	96
4.2. Sugestões para trabalhos futuros	98
CAPÍTULO V – REFERÊNCIAS	99
5.1. Referências Bibliográficas	99

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

1.1. INTRODUÇÃO

Sabendo-se que a fadiga é uma redução gradual da capacidade de carga do componente pela ruptura lenta e gradual do material. E que este defeito decorre do avanço infinitesimal de microtrincas, que se formam no interior material, imperceptível ao olho nu, como também é notório que a presença dos elementos de liga nos aços, os quais propiciam alterações nas propriedades metalúrgicas e mecânicas da obra. Por outro lado, ao serem submetidos a processamentos dos mais diversos, os metais deformam na zona elástica e plástica. Porém, o objetivo deste estudo destina-se a abordar em particular, as uniões soldadas nos estágios em que é submetida a altas temperaturas e resfriadas a temperatura ambiente.

Nesta particularidade, espera-se detectar mudanças estruturais profundas localizadas na obra, em razão do superaquecimento sofrido. Está projetada para abranger tanto na proximidade do ponto central da poça de fusão, como na região localizada na periferia, além da vizinhança. Porém, como não dispomos de parâmetros suficientes e necessários ao controle dessas alterações. Por isto, propomos neste trabalho a análise da Zona Termicamente Atacada – ZTA no local e na vizinhança da junta soldada. Portanto, a fim de analisar o comportamento metalúrgico e suas implicações nas interações gás-metal. Analisar os efeitos resultantes do triângulo formado pelo material base aço AISI/SAE 4340, SAE 1020 chanfrado em V eletrodo revestido E-6013, parâmetros de máquina como: Corrente [A], Tensão [V] e a química do revestimento, até neutra como relação à atividade do processo na condição plasmática.

Para analisar a estrutura multifásica proposta nesta obra acadêmica, vale-se em particular, da técnica de ensaio metalográfico. Porque o método da microscopia óptica – MO é de ampla difusão nas comunicações científica, através do qual, distinguir-se-á às transformações multifásicas resultantes das transformações térmicas. Transformações estas, distintas pelas precipitações austeníticas diretas para martensitas sem passar pelas ferritas e perlitas, trajetória da curva de resfriamento. Portanto, os produtos destas transformações ficam registrados nas microestruturas resultantes do processo de soldagem. Aos quais pelos conceitos de metalurgia física aplicada, podem ser interpretadas, lidas e caracterizadas, ao mesmo tempo em que será distinta e submetida às técnicas que possibilite identificação. Com esta identidade, o

metalógrafo pode prever as reações futuras e passadas das estruturas, mediante: a análise minuciosa das solicitações a que são submetidas.

Quanto à fragilidade e a suscetibilidade a fadiga e conseqüente fratura frágil indesejável em qualquer projeto, serão avaliadas pelo ensaio de Charpy. No qual, se pode registrar, e responder: se é possível submeter os procedimentos de soldagem à recuperação de matrizes e dispositivos, pelo o recobrimento com eletrodo revestido E-6013. Em apreciação simples do processamento aplicado, sabe-se que as interações com impurezas e os elementos de ligas e o rastreamento de sua contribuição, estão sujeitas a suscetibilidade a corrosão nos contornos de grãos. Contribuindo deste modo, com o aumento de fragilidade e baixando a resistência ao choque ou às solicitações cíclicas.

Grandes partes dos materiais metálicos não apresentam reações aparentes, nem melhoras significativas em suas propriedades mecânicas, quando são submetidos a tratamentos térmicos no estado sólido. Para estes materiais, a refusão superficial consiste em método eficiente de modificação localizada, tal como as características mecânicas ou químicas sem a necessidade de envolver o processamento de todo o volume da peça – isto é em distintas partes. A parte não afetada pelo calor atua como dissipador de calor, oriundo da Zona Termicamente Atacada – ZTA.

Nessas condições, a solidificação é extremamente rápida e com taxas de resfriamento extremamente muito altas, acerca de 10^6 Kelvin/segundo. Essas regiões afetadas pelo calor apresentam características diferentes das demais partes da obra, tais como: resistência mecânica, plasticidade, resistência a fadiga e a corrosão. Entretanto, estas modificações em relação às partes não afetadas pelo superaquecimento, segregam e quebra a harmonia microestrutural, tal como ilustrada na Figura 1.1.

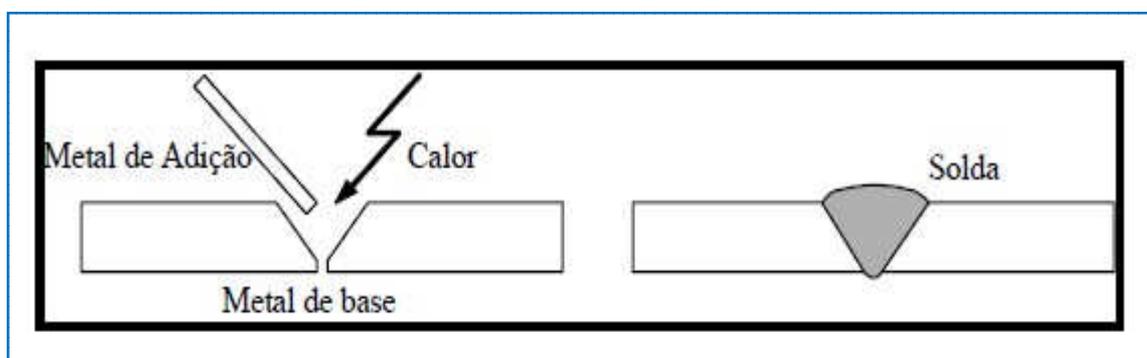


Figura 1.1 - Esboço do chanfro e a deposição da solda; esquemática de fotomicrografia de ZTA – gerada pela soldagem de topo com chanfro em V.

Fonte: (WAINER, DUARTE, & MELLO, 2010).

É evidente que tais modificações têm suas principais razões atribuídas aos fenômenos decorrentes da termodinâmica durante a solidificação como: refinamento de grãos, formação de fases fora do equilíbrio, crescimento de grãos, desenvolvimento de fases de equilíbrio com formação de eutéticos fora de sua composição especificada, extensão da faixa de solubilidade no estado sólido, distribuição de produtos segregados, reorganização de precipitados em solução, volatilização de inclusões etc.

Além dessas mudanças micro-estruturais, a adição prévia da camada de material do eletrodo na superfície a ser tratada, permite a mudança da composição química da camada a ser tratada, seja pela formação de liga na superfície do ou pela deposição de material de natureza diversa do substrato. Conduzindo a consequência, danosa a manutenção da homogeneidade das propriedades do material após soldagem com eletrodos revestidos, mesmo que sejam construídos do mesmo material do substrato, sem dispensar as interferências dos revestimentos dos eletrodos, aditivos neutros, ácidos e/ou básicos, se aceita que: as interferências são devidas ao calor.

Sob a égide do estudo do comportamento dos aços ferramentas soldados em condições de fadiga, constam abordagens balizadas, nas características dos aços do substrato e no eletrodo escolhido. Neste discurso, amplitude do tema, restringe-se ao objetivo geral, definido por – Estudar a Zona Termicamente Atacada – ZTA nos processos de soldagem com eletrodos revestidos em aços ferramentas AISI/SAE 4340, SAE 1020 susceptíveis à fadiga mediante a estimativa obtida pelo ensaio de impacto Charpy. Consolidadas pelos objetivos específicos, definidos por: Identificar as falhas, as segregações e as possíveis trincas na ZTA; Apreciar as variações microestruturais resultantes de aplicações de solda manual com eletrodo revestido E-6013, Analisar o comportamento em fadiga do aço ferramenta soldado com eletrodos revestido – processo manual - pelo ensaio de pendulo de Charpy; Apreciar o grau de comprometimento microestrutural na vizinhança da Zona Termicamente Atacada – ZTA (Figura 1.2), e a suscetibilidade à fratura em condições de fadiga, de aço hipoeutetoide da família dos escolhidos para o estudo.

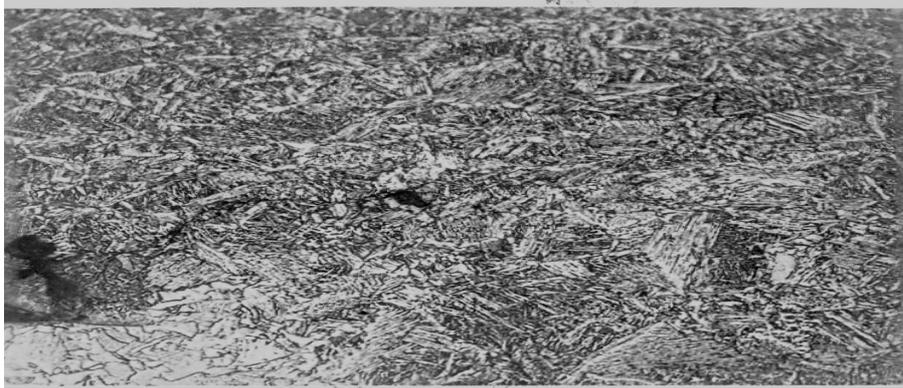


Figura 1.2 - Fotomicrografia ilustra a tensões internas pela multifases na vizinhança da poça de fusão composta de: martensita acicular e grãos de perlitas deformados pelo calor, aço hipoeutetoide, 320 X, nital 2%.

Os métodos de averiguação destas transformações têm como base, o ensaio metalográfico, conferido pela apreciação das heterogeneidades resultante das intensidades de resistências ao risco resultante da análise de microdureza dos corpos de provas extraídos. Existência de microtrincas, fragilidade pela corrosão intergranular. Para se certificar das heterogeneidades restritas a microdureza, crescimento descontrolado de grãos, geração de trincas frágeis, busca-se o auxílio dos resultados obtidos pelo pêndulo de Charpy, cuja interpretação e conclusão são aliadas à ruptura por fragilidade, estudo a parte do trabalho, pelo capítulo da mecânica da fratura.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. OBJETIVO GERAL

Estudar a ZTA nos processos de Soldagem a arco elétrico com eletrodo revestido nos aços ferramentas SAE 1020 e AISI/SAE 4340.

1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Analisar: As falhas; As trincas; As segregações; As heterogeneidades; As corrosões intergranulares; E o grau de comprometimento microestrutural na vizinhança da ZTA.

1.3. JUSTIFICATIVA

Do ponto de vista científico o estudo, o projeto e a manufatura de moldes e matrizes no Brasil ainda é bastante incipiente em relação à grande demanda de produto que encontra aceitação no mercado. Não que seja mais econômico comprar no exterior do que fabricar, mas pela necessidade de satisfação de vários setores inerente, como: Projeto, Compra, Venda e Manufatura. A prova deste fato deve-se ao artigo publicado *workshop* brasileiro de inteligência competitiva e gestão do conhecimento, 2002, São Paulo. Anais. Congresso anual da sociedade brasileira de gestão do conhecimento.

No Brasil foram identificadas apenas 10 patentes de origem brasileira e nenhum documento científico originado aqui sobre moldes para injeção de plásticos, levando a conclusão que a produção científica brasileira sobre este assunto é muito pequena. – prospecção tecnológica sobre fabricação de moldes de injeção de plásticos (HOFFMAN, 2002)

O encontro de 10 patentes registradas, conforme o registro da Prova. Wanda Aparecida Martins Hoffman, de São Carlos, atrela-se a esta justificativa, devida ao objetivo científico abordado – Moldes e Matrizes. Com esta afirmativa podemos convergem-se da idéia de que:

A indústria metal mecânica vem sofrendo interferência crucial em seu desenvolvimento econômico e financeiro devido ao alto custo de produção de moldes e matrizes no País, depois da publicação da medida provisória, que livra de impostos a importação destas ferramentas de outros mercados produtivos. Esta entrada de máquinas descontrolada levou a quebra de fabricante local. Como causas deste transtorno figuram entrada de ferramentas de estamparias na indústria automotiva entre outras, conforme relatos registrados no 8º. Encontro de Fabricantes de Moldes e Matrizes – promovidos pela ABM, em agosto de 2010.

Nesta direção, projetos, manufatura e manutenção de ferramentas especializadas como os moldes e matrizes, sofrem interferências diretas. Como conseqüência, a gestão de manutenção preventiva e preditiva aplicando soldagem a arco elétrico pode ser uma alternativa favorável. Mas, para que esta alternativa tenha objetividade, faz-se necessário a apreciação sistemática, porque ninguém acredita na viabilidade técnica e econômica. Por conseguinte, a recuperação de matrizes, moldes e dispositivos de conformação a frio e/ou a quente, através do revestimento obtido com a deposição metálica por soldagem com eletrodo revestido - SMAW em processamento simples é de baixo custo e intrigante.

Em princípio, o processamento por ser simples, não se destaca o controle do resfriamento posterior e/ou anterior à operação, nem tratamentos térmicos especiais e sim resfriado sem controle até a temperatura ambiente. Ora, sabendo-se que a fadiga é uma redução gradual da capacidade de carga do componente pela ruptura lenta do material e que este defeito decorre do aumento infinitesimal das microtrincas que se formam no seu interior metal, imperceptível ao olho nu.

Ainda, sabendo-se que ao final do processo, há trabalhos das contrações e dilatações térmicas diferentes devidas a presenças elementos de ligas e impurezas nos materiais em questão. Estes elementos de ligas, tais como Cr, Ni e Mo propiciam as alterações em suas propriedades metalúrgicas e mecânicas. Por esta razão, ao serem submetidas a altas temperaturas, como nos processos de uniões soldadas, transformam e se tornam evidentes pelas microestruturas e as tensões internas.

A obtenção dos resultados terá o zelo pela experiência prática, a teoria e as notificações científicas existentes na atualidade aliada à técnica de análise metalográfica. No qual, serão identificadas as microestruturas resultantes dos processos de soldagens e ao mesmo tempo em que, serão caracterizadas, tais como as suscetividades à fadiga e a conseqüentemente incidência de fratura frágil catastrófica, que é um incidente indesejável em qualquer projeto.

A metalografia é a técnica aplicada no estudo, porque é a parte da metalurgia física que descreve e relaciona os metais pelas suas propriedades e estrutura. Portanto, a navegação na imagem fotomacrográfica e fotomicrográfica, do corpo de provas, espera-se encontrar: as heterogeneidades, as descontinuidades, as porosidades, as inclusões, as fendas, as trincas, as fases presentes nas soluções sólidas, os tratamentos térmicos e por fim os processos de fabricação. De posse destas informações, consolidam-se senso críticos fundamentados na interpretação cognitiva das imagens identidades nas dimensões microscópicas. Imagens estas, reveladas pelas fotomacrografias e fotomicrografias, cuidadosamente preparada, em observância as instruções contidas nas NBR 13.284, com este procedimento, espera-se que a fonte de informação gravada na memória do material seja semelhante à leitura da mídia. Na qual, só poderá ser lida e interpretada e registrada pela abertura da metalográfica, como se fosse um Hard Disc – HD de uma simples Central Processing Units – CPU. Condição necessária, que remete à questão, da plataforma auxiliar a pesquisa.

Sabendo-se que as interações de impurezas com os elementos de ligas, podem ser a contribuição para com a suscetividade à corrosão intergranular e outras imperfeições hipotéticas

da suscetividade à trinca por fadiga. A corrosão nos contornos de grãos podem ser indicadores de degradações causadas pela a agressão da microestrutura acerca da Zona Termicamente Atacada – ZTA. A degradação deva-se ao conteúdo em peso dos elementos de ligas em proporções definidas do Cr no aço AISI SAE 4340, (COLPAERT, 2008). Este fenômeno é denominado de corrosão intergranular, que atua nos aços inoxidáveis e nos aços ferramentas, tornando-os suscetíveis a produção de trincas. Fenômeno este, que ocorre nos aços níquel cromo molibdênio ao ser catalisado pelo superaquecimento do arco elétrico. A reação produz precipitado de carbonetos de cromo extremamente duros, que são contribuinte principal do aumento da fragilidade nas uniões soldadas, baixando a resistência do material e, por conseguinte a tenacidade, localizada nas uniões soldas (TSCHIPTSCHIM, GOLDENSTEIN, & SINATORA, 1988).

Por outro lado, a tecnologia da soldagem oferece alternativas pela existência de diversos métodos de unir partes metálicas. Dentre as quais, está a tecnologia da soldagem, como um processo de junção, que se realiza utilizando a fonte de calor gerada pelo arco elétrico, com o qual em determinado tempo de aplicação do arco e sem pressão obtém a fusão completa do eletrodo.

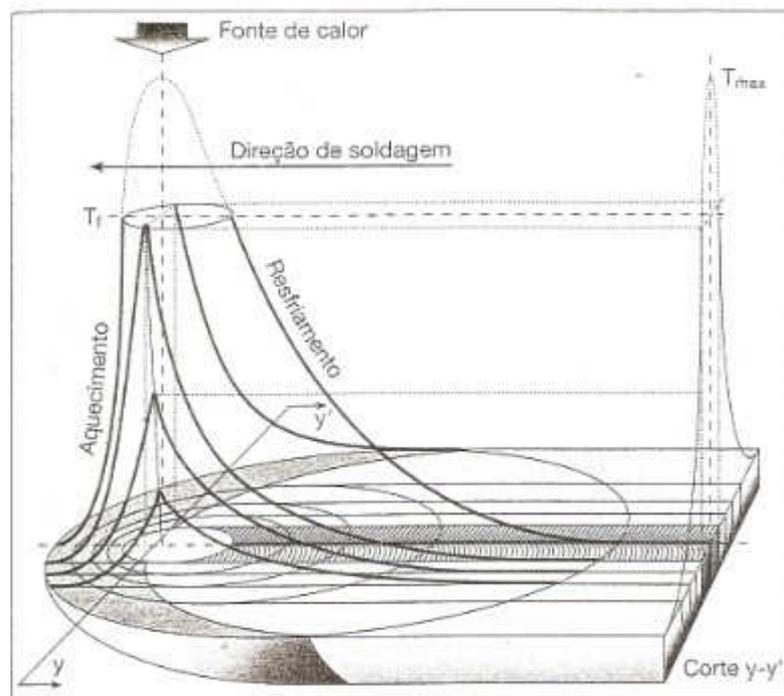


Figura 1.3. ilustra a propagação do calor no aquecimento e resfriamento na ZTA, expresso pelo corte Y-Y'-
Fonte: (COLPAERT, 2008)

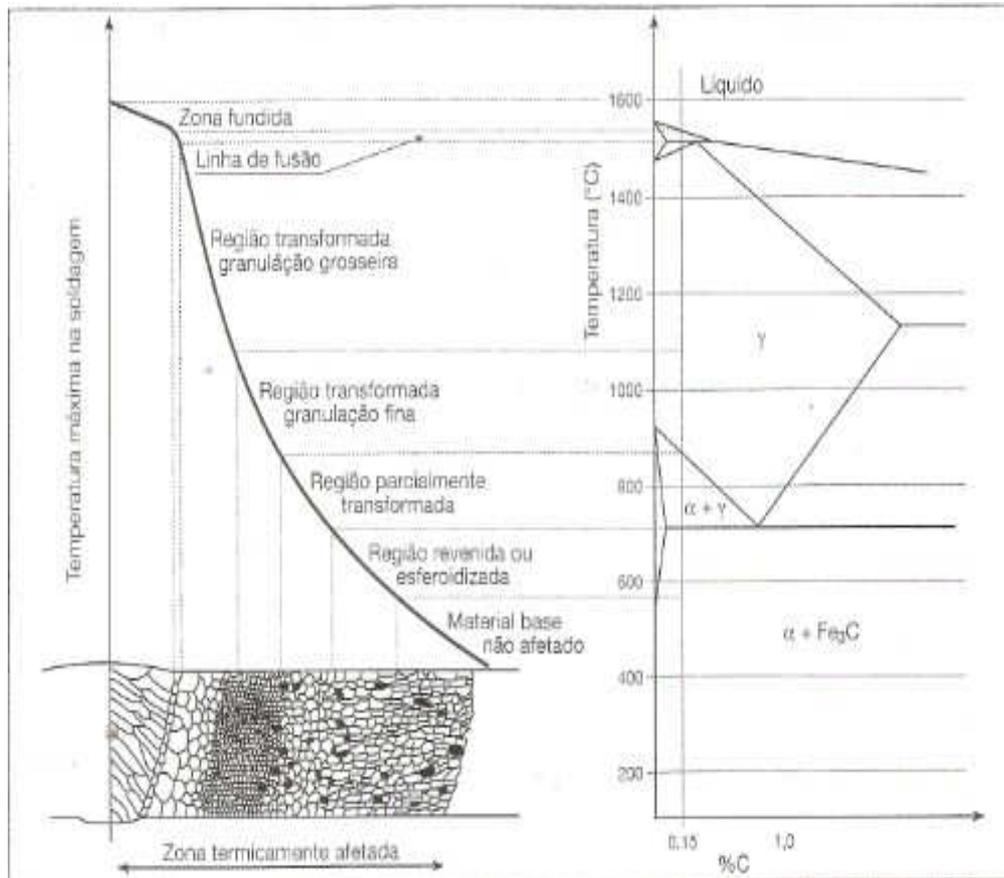


Figura 1.4 - Ilustra o esquema microestrutural da ZTA após o resfriamento (COLPAERT, 2008).

1.4. LIMITAÇÕES DO ESTUDO

Com a abertura microestrutural dos corpos de provas, pretende-se analisar a interferência do superaquecimento da gerado pelo arco elétrico, localizado na ZTA (Fig.1.3), a qual registra a ilustração das curvas de temperatura em diferentes posições da junta soldada.

Também, pretende-se apreciar as principais propriedades dos materiais ensaiados – aço ferramenta SAE 4340 e SAE 1020. Entretanto, sob o tema em epígrafe, o estudo do comportamento dos aços ferramentas soldados em condições de fadiga, conforme desordem causada pela fusão localizada, conforme constam balizados em consonância com: objetivo geral – Estudar a Zona Termicamente Afetada – ZTA nos processos de soldagem com eletrodos

revestidos e a susceptibilidade à fadiga mediante as estimativas obtida pelo ensaio de impacto Charpy.

Objetivos Específicos: Analisar as falhas, segregações e possíveis trincas na ZTA; Apreciar as variações microestruturais resultantes de aplicações de solda manual com eletrodo revestido E-6013; Analisar o comportamento em fadiga do aço ferramenta soldado com eletrodos revestido – processo manual - pelo ensaio de pêndulo de Charpy e (ZAMPANO, HIPERT, DONATO, & KASPARY, Ago 2010).

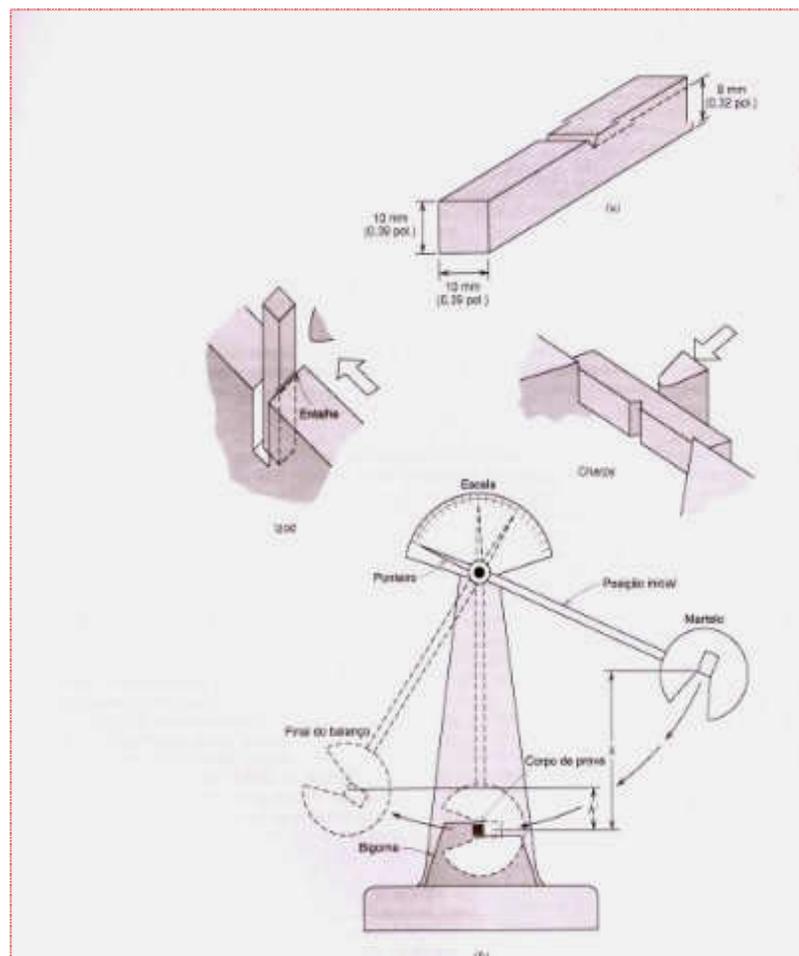


Figura 1.5 - Ilustra o aparelho denominado pêndulo de Charpy (CALLISTER, 2002).

As interações de impurezas com os elementos de ligas e a sua contribuição para com a suscetividade a corrosão intergranular, e a agressão da microestrutura acerca da ZTA, contribuem com o aumento da fragilidade da união, baixando a tenacidade (KOIKE,

TOKIMATSU, NOGUEIRA, & IRIKURA, 2006). O esquema contido na Figura 1.5, descreve o procedimento do ensaio de impacto, cujo formalismo científico explica o fenômeno da fragilidade, pela quantidade de absorção de energia potencial expressa em Joule, medida pela diferença de altura, após a transformação de energia potencial em energia cinética. Com este tratamento, a tenacidade do material, fica equacionada pela absorção de energia mecânica total.

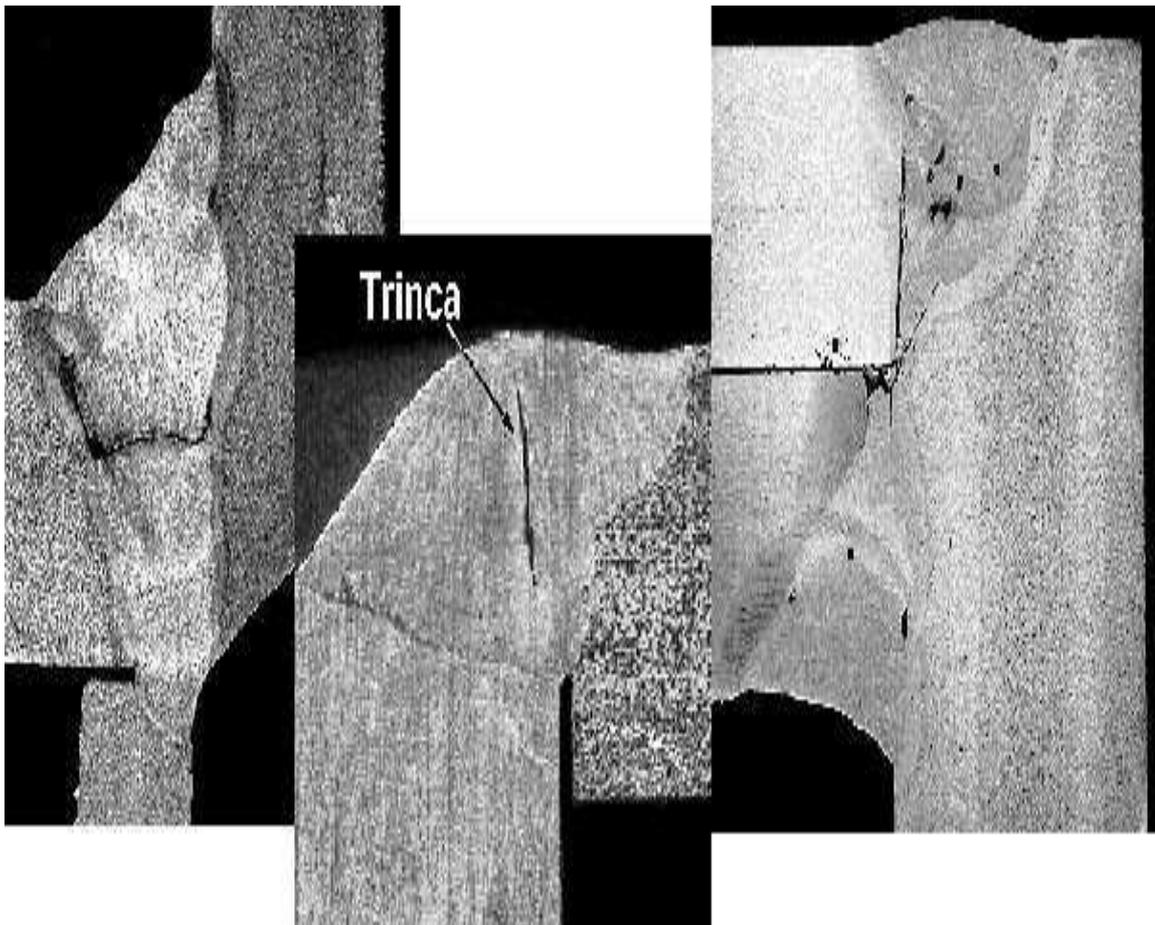


Figura 1.6 - Descontinuidades de soldagem.

Fonte: Cortezia da IFER DA AMAZÔNIA LTDA, 2010.

Em *check list* a estas deformações comprometedoras, constituem pontos críticos nas uniões soldadas e de sua respectiva análise, conclui-se a argumentação de que a meta estabelecida nos objetivos traçados neste estudo dissertativo se atinge pelos ensaios previstos tais como: Metalográfico e Fadiga. Também a análise aqui citada, reflete-se dos resultados, os quais propiciarão a investigação da interação correspondente, como também procedente de alternativas ao controle metalúrgico da soldagem.

Analisar o comportamento em fadiga do aço ferramenta soldado com eletrodos revestido – processo manual - pelo ensaio de pendulo de Charpy. Apreciar o grau de comprometimento microestrutural na ZTA e a suscetível a fratura em fadiga (MONTEIRO, 2008).

1.5. ESTRUTURA DO TRABALHO

Esta dissertação tem por base estrutural, a divisão em cinco distintos tomos, nos quais se abordará o desenvolvimento do trabalho científico composto por todas as arestas e faces do cristal acadêmico necessário e suficiente, ficando para estudos futuros à projeção de novas máquinas de tecnologia superior, ecologicamente econômica e sustentável. Desta feita, com intuito de balizar o estudo programamos a divisão em tomos, aos quais denominamos de capítulos, tais como: Capítulo 1: Aspectos Introdutórios, Capítulo 2: Revisão Bibliográfica, Capítulo 3. Materiais e Métodos, Capítulo 4: Abordagem do estudo de Caso, 5. Conclusões, Sugestões para Trabalhos Futuros, 6. Referencias, 7. Anexos e Apêndices.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. PIONEIRISMO DA SOLDAGEM

A tecnologia da soldagem de modo geral enquanto ciência, conta com pouco mais que 100 anos serviços prestados a humanidade, nesta condição é praticamente extremamente, tal como o automóvel e outros meios de transportes. Mas a necessidade do homem, em produzir uniões permanentes e não permanentes, seja pela rebiteagem, parafuseamento, colagem e outra forma de união, tal como *molhar* as superfícies a ser unidas. Também estas tecnologias de manufatura têm conduzido a pesquisas de novos processos e técnicas cada vez mais avançadas. Todavia outras formas de uniões, como: brasagem, forjamento, caldeamento e fusideposição (DOBIGNIES, 2008); têm sido usadas desde épocas mais remotas possível. Registra-se que desde construções de armas, ferramentas agrícolas, cutelos, utensílio doméstico para manipulação de alimentos até os nossos dias, contam com estes os processos metalúrgicos. Com base nesta afirmação, conta-se que no museu de Louvre em Paris-França há um pingente em ouro, cuja indicação de união ente o olhal e pingo, há indícios de soldagem, produzida na Antiga Pérsia, datado 400 AC (MARQUES, MODENESI, & BRACARENSE, 2010).

A soldagem foi usada na Antiguidade e na Idade Media, segundo relatos, destinada a fabricação de armas e cutelos – naquelas idades o ferro era obtido por oxi-redução direta, cujo inicio de fabricação há indicio desta ocorrência em 1500 AC. Deste modo, as ferramentas e armas da época não adquiriam tempera, os fios de corte eram soldados na estrutura de ferro, após acabamento final eram aquecidas ao rubro e resfriada em água. Com estes resultados, os fios de cortes ficavam endurecidos e tenazes, suportando aos impactos durante as lutas aramadas. Tempos depois, as armas construídas no oriente médio, eram também construídas usando processos semelhantes. Ocorrendo difusão tecnológica, na qual laminas com fios de corte agudos eram soldados entre si e deformada por compressão e torção – forjamento assistido por caldeamento.

Devida a considerada importância da soldagem, a mesma passou a ser um processo de superior importância na indústria metal mecânica. Porque pela versatilidade dos procedimentos e processos podem-se construir grandes aparelhos de transportes e outras utilidades, a partir de

peça e painéis menores. Como tecnologia metalúrgica, foi requisitada ontem e hoje pela rapidez com que se constrói peças, equipamentos e estruturas. Conotação esta, aliada a necessidade de se construir, a partir de peças cujas dimensões eram menores do que as extensões necessárias, tais como às construções de obras de pequeno e de grande porte. Facilitada pela versatilidade dos processos, dos equipamentos e das técnicas que no passado triunfaram.

Entretanto, com a invenção da roda d'água, a forja catalã e o alto-forno no Sec. XIV e meado do século XV possibilitaram a produção de grandes quantidades de ferro gusa para fundição e o processamento de redução na aciaria, para condição de aço, fez-se necessário o desenvolvimento de novas técnicas de forjamento, de caldeamento e outras produções metalúrgicas

Todavia, somente com o advento de outras técnicas de manufatura em aço, a soldagem por caldeamento ficou esquecida, dando lugar a rebitagem. Na qual somente no Século XIX, a técnica tomou força e vigor evoluindo até o período ao qual, foi tratada como processo de fabricação secundária.

Mas a evolução do processo de soldagem vigorou a partir dos experimentos de SIR Humphey Davy com os arcos elétricos- objeto de nosso estudo. Seguido do pesquisador Edmond Davy com a descoberta do acetileno e o desenvolvimento de fontes de calor, ou melhor, transformadores capazes de gerar processos de fusão a arcos, (GANG MA, 2009) a partir de 1800.

Na Inglaterra em 1885, Nicolas Bernardes e Stanislav Olszewky, registraram a primeira patente do processo de soldagem produzido por arco elétrico usando como eletrodo uma vareta de carvão, cuja fusão era obtida pelo curto circuito entre o eletrodo e a peça. A corrida pelo aperfeiçoamento do processo, ainda que tosco, fora desenvolvido para arco com eletrodo metálico nu, por N.G. Stavianov na Rússia e Charles Coffin nos Estados Unidos da América do Norte.

Todavia somente em 1907, Oscar Kjeelberg patenteia o processo de soldagem a arco com eletrodo revestido, no qual constava de CaCO_3 em sua formula original, com a finalidade de estabilizar o arco e possibilitar movimentos diversos, seguido de desenvolvimentos e aperfeiçoamento contínuos, tornou-se o processo mais utilizado em todo o mundo, na produção de uniões permanentes de metais.

A soldagem tomou repercussão com a primeira guerra mundial em 1914, devido à necessidade, passou a ser o processo de fabricação mais importante pela sua simplicidade, a partir desta época, a Tecnologia da Soldagem, tomou grandes aperfeiçoamentos, como também o material auxiliar, principalmente os consumíveis. Portanto, as construções metálicas de pequenos e grandes portes, atualmente contam com mais de 50 processos usados na indústria. Por isto, a motivação que nos levou a estudar este assunto distinguiu-se pela aplicação da indústria naval, mecânica, civil, agro-mecânicas e minas e a maioria dos produtos construídos passam por processos de soldagem dos mais variados tipos, por que.

Hoje a soldagem é o método mais importante para união permanente de metais e ligas (MARQUES, MODENESI, & BRACARENSE, 2010).

Segundo Marques, Modenesi, & Bracarense (2010), a soldagem na atualidade é o processo mais usado para uniões permanentes entre metais, esta aplicação se deve ao fato de que o processo de soldagem permite a montagem de peças e conjuntos com rapidez, segurança agregando a economia de materiais e insumos. Motivo este, deve-se ao fato de que os processos tradicionais, como parafusamento, rebiteagem a frio, rebiteagem a quente, caldeamento, colagem com adesivo e outros; exigem que as chapas sejam perfuradas previamente, com a finalidade de permitir a passagem dos parafusos e ou rebites, acrescidos de porcas, arruelas e anilhas de trava, como também o material do rebite para facilitar a cravagem(recozido). No caldeamento o aquecimento à amarela palha prévio, acrescenta aos custos, a absorção de energia ou o conjunto aumentando o preço e peso final da peça.

Destaca-se também, as juntas soldadas como base de economia e rapidez nos processos de manufatura, desde que as mesmas sejam executadas com material, técnicas e por soldadores especializados. E como referencia, destaca-se pelos rigorosos controles de qualidade, sujeita inspeção a qualquer tempo. Por isto, só as uniões soldadas, podem ser estanques, não devendo nada à necessidade de arte a prevenir vazamentos.

Devida a vasta tecnologia da soldagem hoje existente, limita-se a abordagem que ora se faz ao tipo de soldagem a arco AW, com eletrodos revestidos: Shielded Metal Arc Welding - SMAW – Classe da American Welding Society – AWS. Na qual, se organiza as características dos revestimentos dos eletrodos, com referencia às aplicações de rotina, sem tão pouco reduzir o brilho deste trabalho. Em contra partida, a adoção de normas que as distingue com processos distintos a cada uma destas siglas. Podemos averiguar se de fato, o tipo de revestimento interfere na microestrutura do material final da obra, porque ele controla a atmosfera próxima a tocha, ZF

e a ZTA. Guisa de dirimir dúvida siga-se o exemplo do controle da fissura pela presença do Hidrogênio – trinca por hidrogênio, zelado pelos os inspetores de soldas. Em que, na prática controla-se ao manter a umidade do sistema controlado, a partir do armazenamento dos eletrodos, em especial na região norte, onde a umidade relativa do ar é alta, cerca de 90%. Todavia, para atenuar a adversidade da natureza, adota-se a técnica de: manter os eletrodos sempre acondicionados em estufas. Para melhor explicar a influencia do fator revestimento do eletrodo, confira a Tabela 2.1 abaixo.

Tabela 2.1 - Características dos Revestimentos de Eletrodos

Requisitos	Elementos de Adição
Formadores de Gás	Celulose, Dolomita, CaCO ₃ , etc.
Formadores de Escória e Fundentes	Argila, Talco, TiO ₂ , CaCO ₃ , SiO ₂ , Fe-Mn, FeO, Feldspato, Asbestos, etc.
Estabilizadores de Arco	TiO ₂ , Ilmenita, Silicatos de Na e K, etc.
Desoxidantes	Fe-Si, Fe-Mn, Fe-Cr, etc.
Elementos de Liga	Fe-Ni, Fe-Mn, Fe-Cr, etc.

Fonte: www.esab.com.br

2.2. CARACTERIZAÇÃO DOS OS AÇOS USADOS NAS CONSTRUÇÕES DE MOLDES E MATRIZES

Há vários anos, os aços têm sido classificados por um sistema composto por quatro algarismos, sistema este desenvolvido pela sociedade de engenheiros automobilísticos norte americanos, distinta pela sigla S.A.E. Em suma, o sistema destina-se simplificar as listas de especificações na indústria automobilística, engenharia que mais se desenvolveu nos últimos cem anos. O sistema é simples e destina o primeiro algarismo do numero, para a identificação da liga presente, o segundo algarismo para a indicação da quantidade aproximada dos elementos de liga e os dois últimos algarismos, exprimem os teores de carbono no aço em percentagem.

Após longo tempo, a lista de aços oferecida no mercado americano foi aumentando, que o sistema S.A.E. Ficou pequeno e forçando o instituto americano do ferro e do aço e sociedade dos engenheiros automotivos, criarem um novo sistema formado pela união preexistente AISI-SAE, de uso em geral. O sistema de designação numérica é semelhante ao velho sistema, porem o prefixo de uma letra é empregado para distinguir o processo de como o aço foi produzido. Constante de que o prefixo é usado como segue: B – Aço Carbono ácido Bessemer; C aço ao

carbono base Siemens-Martin; CB processo Bessemer – opção da aciaria, E – aços liga de forno elétrico e sem prefixo – aços liga Siemens Martin. Por exemplo: AISI- SAE 1020 aço ao carbono, AISI-SAE 4340 aço níquel cromo molibdênio.

Os materiais usados na confecção de matrizes podem ser agrupados em termos do conteúdo de ligas, listados nas Tabelas 2.2.

Tabela 2.2 - Propriedade dos aços rápidos

Avaliação do Material	Resistencia ao Desgaste	Dureza a Quente	Tenacidade
Alta	T15;M5;M4;M42	T15;M15;T6;T5,M42	M2;T1;M1
Média	M3;T6;M2;(H.C)	M4;T4;M3	M3;M4;M10;(H.C);M7;M2(H.C.)
Baixa	T1;M10;T4;M1	T1;M2;M10;M1;M7	T4;T5;T15;M15;T6

Fonte: EESC-USP (ALTAN, 1999).

Os aços rápidos, contidos na Tabela 2.2 em desuso hoje em dia, são desenvolvidos para corte de metais, podem ser usados em conformações a quente ou morna. Comercialmente, há dois tipos de aços distintos pela letra T para o tipo Tungstênio e pela letra M para o tipo molibdênio. Estes aços remetem combinações entre: Dureza, resistência mecânica, tenacidade em altas temperaturas. Estas propriedades determinam a seleção para a fabricação de matrizes de conformação a quente, cuja comparação consiste em selecionar por: habilidade para endurecimento uniforme, resistência ao desgaste, resistência a deformação plástica, tenacidade, habilidade de resistência a fadiga térmica, habilidade de resistência a fadiga mecânica.

Tabela 2.3 - Aços ferramentas – selecionados à extrusão a frio

RESISTÊNCIA		AÇOS FERRAMENTAS	
Ksi(quilolibras/polegadas quadrada)	N/mm ²	Designação AISI	HRC
EXTRUSÃO DIRETA			
300	2100	M2	62-64
285	2000	D2	60-62
		O1	60-62
230	1600	S1	56-58
RETRO EXTRUSÃO			
315	2200	M4	63-65
300	2100	M2	62-64
384	2000	D2	60-62

Fonte: EESC-USP (ALTAN, 1999)

A temperabilidade do aço pode ser medida pelo fator temperabilidade distinta pela letra Di correspondendo ao diâmetro de um cilindro infinitamente longo, ao qual somente transformaria a microestrutura específica martensita ao centro. Se a transferência de calor durante o resfriamento fosse ideal, se a superfície atingisse a temperatura do meio de resfriamento instantaneamente. Explica-se o fenômeno pelo fator Di significando que: o aço endurecerá até certa profundidade no resfriamento independente da maior dureza. Exemplo, a temperabilidade aproximada de alguns aços para estampos, é listada aqui como: ASM - 6G – 15; ASM - 6F3 – 36; AISI - H10 – 128; AISI - H12 -88. Mas à fabricação de placas de choques, solicitadas a alto nível de compressão cíclica, determina-se aço endurecido até 62HRC, cuja resistência necessária de 100 Ksi – 700 N/mm², 270-330 HB, tal como AISI/SAE 4340.

Todas estas propriedades combinam e remetem à matriz durabilidade e capacidade de produção infinita. A resistência ao desgaste refere-se a mudança gradual das dimensões ou formato de um componente causado por corrosão, dissolução, abrasão, remoção pelo transporte de material pelo produto da estampagem. Em resumo, quanto maior o limite de resistência a tração e a dureza de um aço próximo à superfície da matriz maior resistência a abrasão. Finalizando, quanto maior a dureza menor a tenacidade.

Aços AISI listados na Tabela 2.4 destacam-se pela alta resistência a abrasão, Dureza HRC na média de 65HRC – quando temperados, por isto são aplicados para construção de punções nas matrizes estão sujeitos a ciclos de alta pressão, tal como a abrasão. Assim, os materiais aplicados para construção de matrizes, devem ter alta resistência à fadiga e boa resistência ao desgaste.

Tabela 2.4 - Aços selecionados à construção de anéis, extratores e contrapunções

DESIGNAÇÃO AISI	DUREZA HB
H13	470-530; 440-510; 330-390
4340	330-390
4140	270-330; 270-330

Fonte: EESC-USP (ALTAN, 1999).

Tabela 2.5 - A Aços selecionados à construção de anéis, extratores e contrapunções

DESIGNAÇÃO AISI	DUREZA HRC
M2	62-64
D2	60-62
A2	60-62
O1	60-62
S1	56-58

Fonte: EESC-USP (ALTAN, 1999).

Os aços listados na Tabela 2.4; 2.5 A inclusive os aços escolhido na pesquisa, remetem ao equipamento, propriedades distinta a aceitar altas pressões na cavidade do molde, qualificadas por uma boa resistência a fadiga e alta razoável resistência ao desgaste. Porque, os anéis de contração, são elementos os maquinas- componente de trabalho mecânico à peça conformado sendo o responsável pela usinagem de rebaixas e nervuras. Por razão são os mais solicitados na conformação e, portanto: demanda mais propriedades. Sendo assim, os punções e contrapunções são elementos suscetíveis a desgaste por abrasão, em consequência do atrito a que estão sujeito a solicitações cíclicas severas durante a retirada da obra da ferramenta. Em destaque o aço AISI-SAE 4340, conferindo o Metal Handbook, vol.9 - Ohio - 1983 não consta na tabela, como aço tratável termicamente, sua carta de tratamentos térmicos pode ser comparada com o modelo esquematizado na Figura 2.6.

2.3. CLASSIFICAÇÃO DOS AÇOS

Há vários anos, os aços têm sido classificados por um sistema composto por quatro algarismos, sistema este desenvolvido pela sociedade de engenheiros automobilísticos norte americanos, cuja classe distinguiu-se pela sigla S.A.E. Em que consiste a classificação dos aços segundo a Society of Automotive Engineering em suma, é o sistema que se destina em simplificar as listas de especificações na indústria automobilística, engenharia e no comercio que mais se desenvolveu nos últimos cem anos. O sistema é simples e destina o primeiro algarismo do numero, para a identificação da liga presente, o segundo algarismo para a indicação da

quantidade aproximada dos elementos de liga e os dois últimos algarismos, exprimem os teores de carbono no aço em percentagem.

Após longo tempo, a lista de aços oferecida no mercado americano foi aumentando, a tal ponto que o sistema S.A.E., ficou pequeno para expressar a gama de tipos de aços, isto sem falar nos aços destinados a indústria naval. Por isto, a indústria metal mecânica, viu-se imbuída em ampliar, forçando o Instituto Americano do Ferro e do Aço e Sociedade dos Engenheiros Automotivo a criarem um novo sistema formado pela união preexistente AISI-SAE, desta forma promove o uso em geral. Exemplo: AISI-SAE 4340 aço níquel cromo molibdênio – superendurecível – aço ferramenta e o SAE 1020 - aço estrutural.

De modo, a abordagem destes materiais de construções de ferramentas, como ícone, o aço AISI-SAE 4340 destinado aos experimentos esta inserido na Tabela 2.5. E o aço AISI-SAE 1020 alternativo, na listagem encontram-se vários outros tipos com características semelhantes, tal como o H13.

Portanto, as Produções de matrizes demandam: tecnologia de manufatura – máquinas, mão-de-obra especializada, e materiais de construção. Nosso estudo reporta-se ao limite da seleção, por isto, quanto a seleção dos aços e outras especificações exigidas pelos projetos e pelos materiais de construções de peças e ferramentas, estão em acordo com a afirmativa que: “O projeto e fabricação de matrizes ou estampos, assim como a seleção dos materiais, são muito importante na produção de componentes por meio dos processos de conformação” (ALTAN, 1999).

No contexto, está implícito que a vida da ferramenta, depende da escolha do material de construção e a respectiva finalidade. Atender aos objetos do estudo disserta-se que entre os processos de fabricação, a tecnologia de conformação dos metais tem lugar de destaque, uma vez que agrega valor para produzir peças de propriedades mecânicas simples e complexas com um mínimo de desperdício de material. Na estampagem e no forjamento as conformações dos metais, o material de partida tem a geometria relativamente simples basta um passe, mas para obras de configurações complexas é plasticamente deformada em uma ou mais passes. Na próxima forma, é a final – near net shape, ou a forma final – net shape, reduz drasticamente a necessidade de remoção de material, economiza material e energia, motivo principal de estudo com a finalidade desvendar o mistério do custo elevada do ferramental, é o objeto de busca da presente abordagem. Portanto, a variação nos custos de material e energia, requer que o controle

de material e energia seja os indicadores principais na fabricação flexível, inviabilizem a fabricação por tentativas-e-erros, retornando.

Por esta razão, as aplicações de Computer-Aid-Designer/Computer-Aid- Manufacturing - CAD/CAM, tal como Computer Aided Engineering – CAE; se tornou aceita tecnologia das conformações dos metais. Uso desta técnica de desenhar, testa com simulação a usinagem automática; a qual requer ao técnico e ao engenheiro completo domínio das principais variáveis do processo de conformação e suas interações. Estas variáveis incluem: o comportamento do fluxo de metal no interior da matriz, deformado sob as condições do processo; a geometria e o material do ferramental; o atrito; a mecânica da deformação; as características dos equipamentos de conformação; a geometria do produto, tolerâncias, acabamentos superficiais, as propriedades mecânicas são finalmente o efeito do processo no meio ambiente.

Do ponto de vista econômico, o sucesso do processo de conformação depende da vida útil da ferramenta e do custo por peça produzida. Portanto, para uma dada aplicação, a seleção do material apropriado para a ferramenta depende fundamentalmente das variáveis: relacionadas com o processo – incluindo fatores tais como:

- O tamanho da cavidade,
- O tipo de máquina,
- A velocidade;
- O tamanho do tarugo;
- A temperatura do tarugo;
- A temperatura de operação da matriz a ser usada;
- A lubrificação;
- A razão produção e número de peças a ser produzido;
- Fatores relacionados com o tipo de carga;
- A velocidade de carregamento;
- O tempo de contato entre matrizes e o metal de conformação (principalmente a quente);
- A forma de impacto;
- A aplicação gradual de carga;
- A carga máxima;
- A pressão na matriz;
- A temperatura máxima e mínima;
- O número de ciclos de carregamento;

As propriedades mecânicas do material da matriz;

O endurecimento;

A resistência ao impacto;

A resistência a fadiga térmica (aços ferramentas soldados a fadiga) e

A resistência a fadiga mecânica. (aços ferramentas soldados em fadiga – fratura frágil)

2.4. A FALHA DE MATRIZ

Com base na abordagem distinta pelo mérito deste estudo, a vida útil da ferramenta de conformação plástica - matrizes e estampos dependem da seleção adequada do material. Em outra estância, a severidade de operações, a capacidade de recuperação de itens vitais como cavidades, orifícios, furos cegos, alojamento dos punções, contrapunções da técnica (soldagem) aportada à fabricação e o projeto. Para determinar o tempo de vida do aparelho de conformação da matriz ou estampo, faz-se necessário exame minucioso da função da ferramenta. Entretanto, começado pela pergunta clássica que tira o sono de qualquer técnico ou engenheiro de produção: quando a matrizes devem ser substituídas exatamente? Devem ser substituída por uma serie de razões, entres quais se destaca: mudanças dimensionais causadas pelo desgaste – resultante do atrito em pontos críticos da cavidade, deformações plásticas; perda de acabamento superficial; obturação de orifícios e canaletas de lubrificação, trincas por fadiga térmica ou mecânica, fratura (quebra).

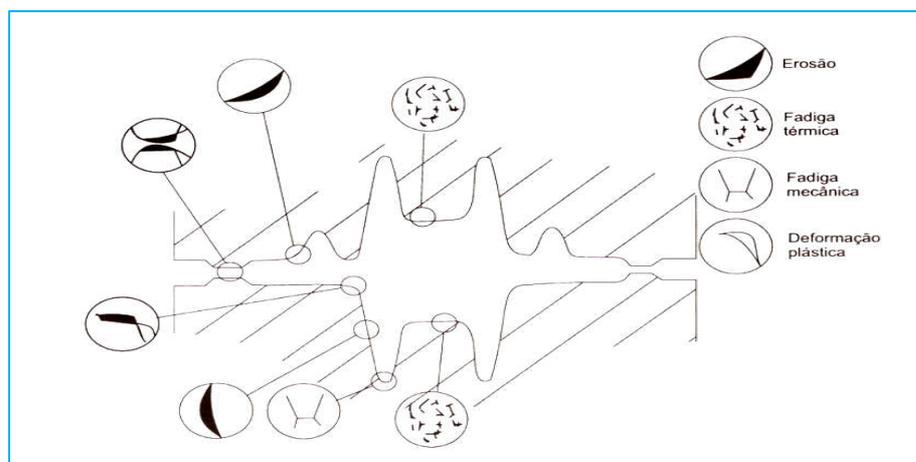


Figura 2.7 - Ilustra os pontos críticos de matrizes e estampos sujeito, desgaste, deformações e trincas.

Fonte: ALTAN, (1999).

A Figura 2.7 esquematiza os pontos críticos relacionados com as nervuras e cavidades existentes na maioria dos moldes, balizadas pelos pontos de desgaste das matrizes. Porém, a título de ilustração confirma-se em destaque os principais tipos de desgaste, característicos de erosão, fadiga térmica, fadiga mecânica e deformações plásticas, isto é permanente.

Conforme a Figura 2.7 pode-se listar os seguintes pontos:

1. A **Erosão** é o desgaste abrasivo do material da matriz por pressão de atrito, causas baixa resistência ao desgaste, temperatura da superfície muito alta, por falta de refrigeração, velocidade relativa na interface, natureza do material de camada na interface.

2. **Fadiga Térmica** - ocorre na superfície da ferramenta em conformação a quente, resultam em trincas térmicas ou queima, é consequência de carregamento do ciclo até o limite escoamento da superfície de contato com o material aquecido em deformação. Esta expansão e função do gradiente de temperatura, visto que as camadas estão sujeitas tensões de compressão. Em altas temperaturas as camadas compressivas podem causar deformações. Quando a superfície esfria, gera tensões reversas e as camadas sofrerão tração, após a ciclagem elevada, a fadiga causara formação de trincas – causadas pela fadiga térmica, a fratura ou trinca são causadas pela fadiga mecânica.

3. **Fadiga Mecânica** - a ocorrência desta é função do carregamento exacerbado cíclico, gerando tensões locais elevadas, causadas pela ação do trabalho cíclico, em função da carga e descarga, as quais iniciam trinca e depois falha.

2.5. CARACTERIZAÇÃO DO AÇO S.A.E. 1020

Na qualidade metalúrgica, os aços SAE 1020 são aço ao carbono hipoeutetóide com menos de 0,77%C em peso, constituído dos seguintes componentes primários, proeutetóides, cuja fase se forma antes da reação eutetóide iniciar. Deste modo, a ferrita – $Fe\alpha$ é o constituinte primário do aço hipoeutetóide, e a cemetita - Fe_3C é o constituinte dos aços hipoeutetóides. Quando aquecido acima de 750° C produz microestrutura monofásica denominada de austenita – $Fe\gamma$. A temperatura a baixo de 750° C e com resfriamento contínuo, a ferrita sofre o fenômeno da nucleação e cresce nos contornos de grãos da austenita e a quantidade de ferrita aumenta até a temperatura crítica de 727° C. Nesta temperatura, a austenita passa a precipitar nos contornos de grãos e a sua composição altera de 0,60% para 0,77%C.

Resfriando em seguida este aço à temperatura abaixo de 727°C , conduz a reação eutetoide de toda austenita precipitada, transformar em perlita. M. Esta microestrutura é resultante de recozimento pleno, o transforma em um aço dúctil pela presença 80% ferrita primaria, conforme mostra a Figura 2.8.

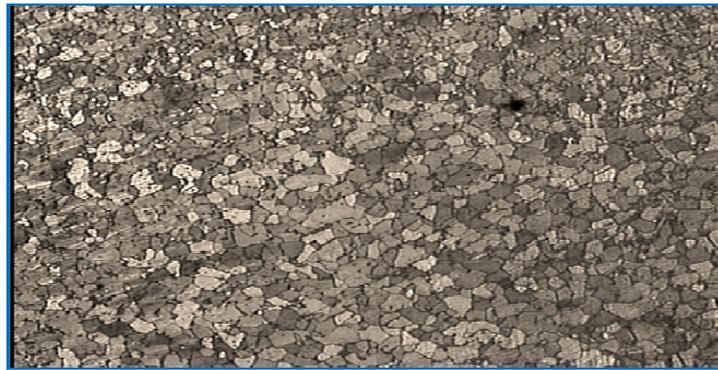


Figura 2.8 - Ilustra o fotomicrografia do Aço SAE 1020 – microestruturas perlítica na matriz ferrítica ataque nital 2% 400 X. (LABORATÓRIO DE METALOGRAFIA/IFAM, 2010).

Por outro lado, 20% de perlita, o torna o aço resistente visto que a mesma endurece por dispersão, quanto maior for as lamelas, menor será a dureza. O SAE 1020, contem em peso aproximadamente 0,2%C, caracteriza-se pelas seguintes propriedades mecânicas: limite de resistência a tração 394 MPa; Limite de escoamento 295 MPa; Alongamento 36,5% (perlita grossa) e Limite de Escoamento 346 MPa; Limite de resistência à tração 441 Mpa e Alongamento 36% (perlita fina). Composição química acerca de 0,18-0,23%C, 0,3-0,6%Mn.

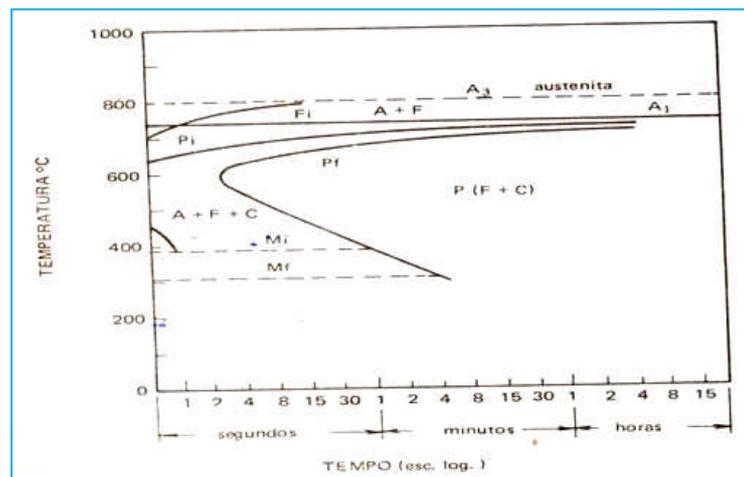


Figura 2.9 - Diagrama Temperatura Transformação e Tempo – TTT para o tipo de aço SAE 1020 (CHIAVERINI, 1986).

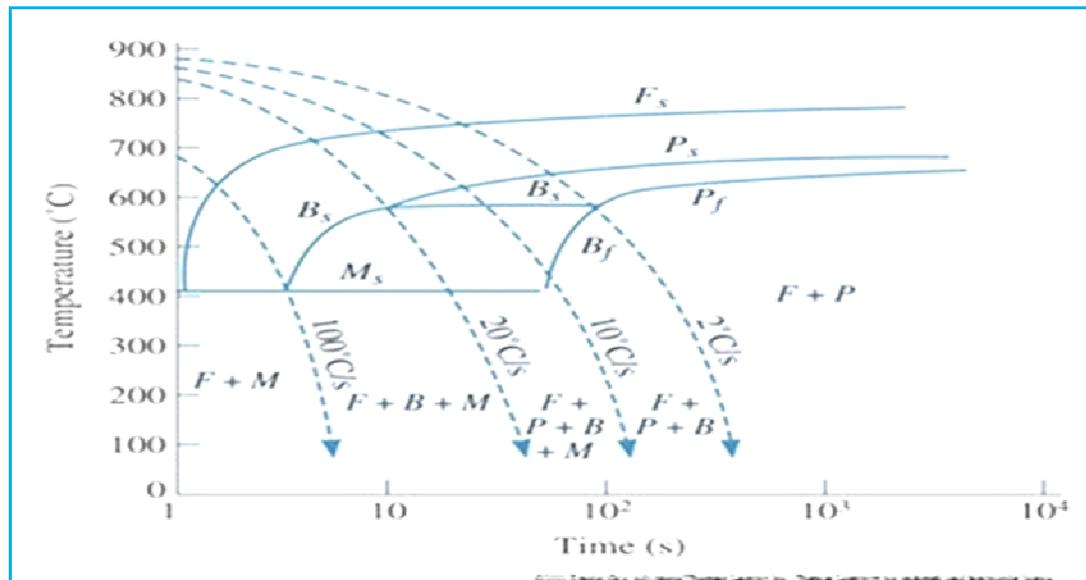


Figura 2.10 - Aço SAE 1020 – Carta de Resfriamento Contínuo - TRC (DONALD R. ASKELAND, 2008).

2.6. CARACTERIZAÇÃO DO AÇO LIGA SAE 4340

A medida que o teor de carbono aumenta no aço, a quantidade de cementita e perlita se eleva, e com isso, também a resistência mecânica (DONALD R. ASKELAND, 2008).

A Figura 2.9 ilustra o a carta de tratamentos térmicos do SAE 1020, e a temperabilidade deste aço está comprometida a curva esta osculando a ordena não permitindo que em qualquer curva de resfriamento contínuo, obtenha-se como produto a martensita no percentil total, isto ocorrerá sempre, por que: porque na velocidade de resfriamento Máximo = 100°C/s – a transformação para martensita não é total. Com esta observação, um resfriamento com duração menor que 10 s, transformam-se em Ferrita e Martensita, martensita esta, tênue em razão do baixo teor de carbono. Confirmado pela Figura 2.10 em que ilustra a impossibilidade de transformação de austenita em Martensita total, restando uma formação residual e não plena com é de se esperar em um Aço com mais de 0,4%C.

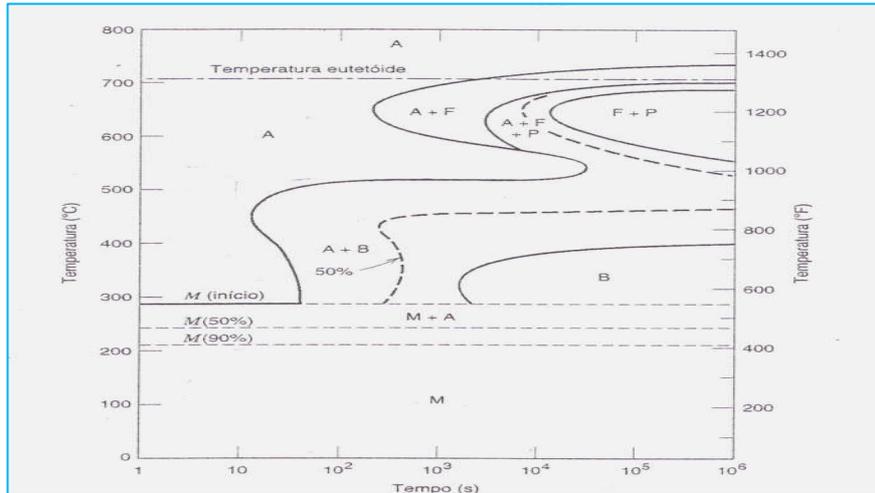


Figura 2.11 - Diagrama de Transformação Tempo Temperatura - TTT do aço AISI SAE 4340 (CALLISTER, 2002).

A resistência a dureza é uma propriedade mecânica que consiste em resistir à penetração de outro material mais duro, BRINNEL, ROCKWEEL e VICKERS. E esta propriedade é sensível em aços, cujo teor de carbono seja superior 0,4% C – FIG. 2.11 – diagrama TTT do aço SAE 4340, no a curva C esta bem afastada da linha vertical das temperaturas – facilitando ao metalúrgico quaisquer tratamentos térmicos. Por outro lado, como é caso do aço proposto no projeto, SAE 1020 não é temperável (Figura 2.10), mas aceita o beneficiamento da cementação. Devendo-se ao acréscimo apenas pela dispersão da perlita grossa em perlita fina, a qual remete a diferença de 0,5 pontos percentuais no alongamento. Isto é, os espaços inter lamelar entre a ferrita e cementita. A abordagem deste material tem sua razão, porque pretende-se comparar com um contra tipo: Aço temperável e não, com finalidade de conferir a transformação causadas pela solda.

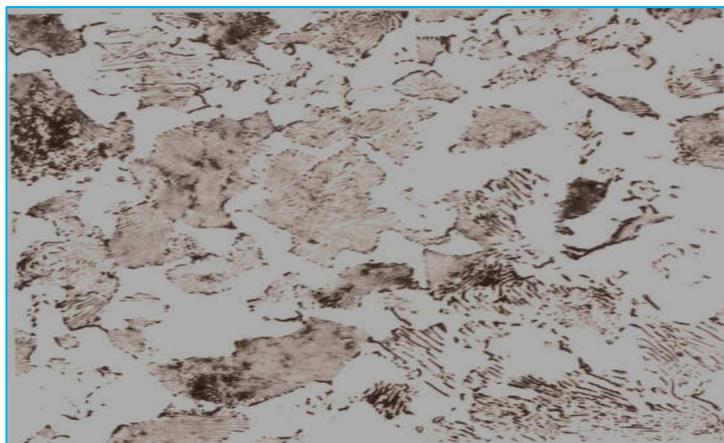


Figura 2.12 - Aço hipoeutetóide com 0,4%C – *Recozido* (VAN VLACK, 1989).

Na base dos sistemas de identificação SAE-AISI, aplica-se aos aços baixa liga, tal como SAE- AISI 4340, que é um aço com 0,4%C, e cujos principais elementos de liga são o Ni, Cr e Mo, representados pelos dois primeiros dígitos – 43XX. Se fosse o caso de aços inoxidáveis, seriam representados por três dígitos, sendo distintos por séries. Tais como: 2XX, 3XX representam os aços austeníticos e os aços distintos pela série 4XX reúnem os aços ferríticos e os martensíticos.

No caso dos aços SAE-AISI 4340, que pertence à categoria de aços ferramentas são identificados por letras de acordo com as aplicações e as suas características. Em geral, os aços martensíticos são médio carbono e de difícil soldabilidade, mas existem aços martensíticos resistentes à corrosão, da série 4XX, são de baixo, médio ou alto carbono(dependendo da aplicação), cuja soldagem exige cuidados especiais, como também existem aços martensíticos resistentes ao desgaste- uma das razões deste estudo.

Os aços ferramentas (série A, O, e H, entre outras), de médio a alto carbono, a soldagem é sempre trabalhosa, mesmo quando cuidadosamente tratados, motivos pelos quais merecem destaque neste estudo. Conforme as afirmativas acima ficam evidentes que o teor de carbono influencia na soldabilidade. Deste modo, tanto o carbono como os elementos de liga influenciam na soldabilidade, entretanto o teor de carbono é determinante, pois é o responsável pelo nível de endurecimento. Com base no gráfico registrado no ASM - Handbook Volume 6, a soldabilidade varia em função do teor de carbono e dos elementos de liga. Por isto, a investigação abordada neste estudo, pretende assinalar com razoável precisão um ou mais motivos pelos quais, os *Profissionais projetistas, manufaturas e manutenção não aconselham a recuperação das ferramentas via revestimento por deposição metálica a arco elétrico*, em outras palavras, com revestimentos depositados por soldagem. Principalmente, se estes profissionais aplicarem em suas construções o aço SAE-AISI 4340. Não há modo ou procedimento capaz de permitir uma boa soldabilidade, pois cada material é diferente do outro.

Mas com adoção de cautelas, comuns a todos os aços martensíticos - que são conforme descrito abaixo:

- Evitar soldar um material que já sofreu serviço (em manutenção) sem antes aliviar as tensões, pois o material acumula tensões internas e pode trincar durante soldagem;
- Não soldar estes materiais com chuva ou com consumíveis úmidos, pois um dos problemas dos martensíticos é a trinca a frio, causada pela interação do mesmo como o hidrogênio contido na água, cuja dissociação no arco elétrico precipita H₂;

- Evitar processos/procedimentos que requeiram elevado gradiente de calor, pois as juntas soldadas podem sofrer perda de resistência mecânica, além de permitir crescimento de grão na Zona Termicamente Afetada- ZTA, o que favorece perda da resistência ao impacto – isto é ao choque a solicitações cíclicas;
- Determinar a temperatura de pré-aquecimento em função do tipo de aço, evitando sempre a formação martensítica no resfriamento (o que é impossível pois o aço é martensítico), e sim evitar que a transformação ocorra com alto tensionamento de contração da peça, o que levaria a trincas.

O alívio de tensões aplicado ao SAE-AISI 4340 se situa na faixa dos 600°C, onde ocorre à máxima sensitização tal como dos aços inoxidáveis da série 300, de forma que, se o componente sofrer perda a resistência à corrosão, portanto deve-se evitar soldá-lo com pré-aquecimento. Para efetuar o procedimento de soldagem no aço, deve-se observar que

- Soldar o chanfro do SAE-AISI 4340 com um consumível tipo AWS 309 (austenítico), com o pré-aquecimento recomendado para o SAE-AISI 4340, formando uma almofada, em uma camada de espessura superior a 4 mm;
- Realizar tratamento térmico para o alívio tensões deste conjunto na faixa recomendada para o AISI 4340;

Entretanto, em atenção à carta de tratamentos térmicos, que é bem diferente da carta do aço SAE 1020 e, por conseguinte permite que se estabeleça uma gradiente de resfriamento com intervalo de tempo mais largo. o possível de se realiza, conforme ilustrado na Figura 2.13.

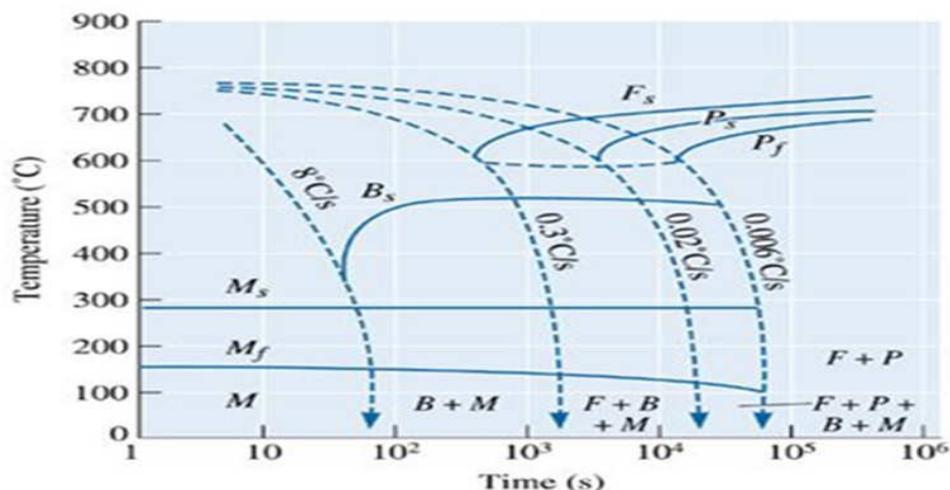


Figura 2.13: A carta de tratamentos térmicos TTT do Aço AISI-SAE 4340 – respectivas curvas de resfriamento contínuo TRC. (DONALD R. ASKELAND, 2008).

2.7. TECNOLOGIA DA SOLDAGEM A ARCO ELÉTRICO

Os processos de soldagem baseiam-se na utilização do calor gerado pelo arco elétrico, no qual a união se pela fusão localizada as bordas da peça obra e essa alta temperatura cerca de 10.000° C. Assegura um aquecimento rápido e concentrado fundindo o metal, e ao resfriar forma uma união se necessidade de aplicar qualquer esforço externo – efeito molhar mostrado na Figura 2.14 expressa a distinta ZTA. Em processos modernos podem ser: a mão livre, semi-automático e automático. A soldagem por arco se realiza com corrente contínua e corrente alternada. Todavia, pela versatilidade da soldagem com corrente alternada, merece neste estudo destaque, porque os equipamentos são mais baratos, tem dimensões e peso menores que os equipamentos de corrente continua.

O consumo de energia elétrica com corrente continua é 40 a 50% maior que empregado em corrente alternada, (SHUVALOV, 1978). Para Shuvalov, (1978), em seu livro Tecnologia dos Metais confirma uso da tecnologia da soldagem na Rússia, assevera que interação metalúrgica do processo de soldagem, a transformação da microestrutura, cujos efeitos da agressão da solda podem ser conferidos pela Figura 2.14. Afirmação esta, pode ser conferida pelo o registro metalográfico da estrutura na ZTA, como parâmetro de investigação das causas da agressão microestrutural, enfim baliza a intervenção da engenharia eletrônica na construção das maquinas de geração de arco. E a 32 anos de sua publicação em português, oriunda do espanhol, demonstra preocupação com a conservação de energia.

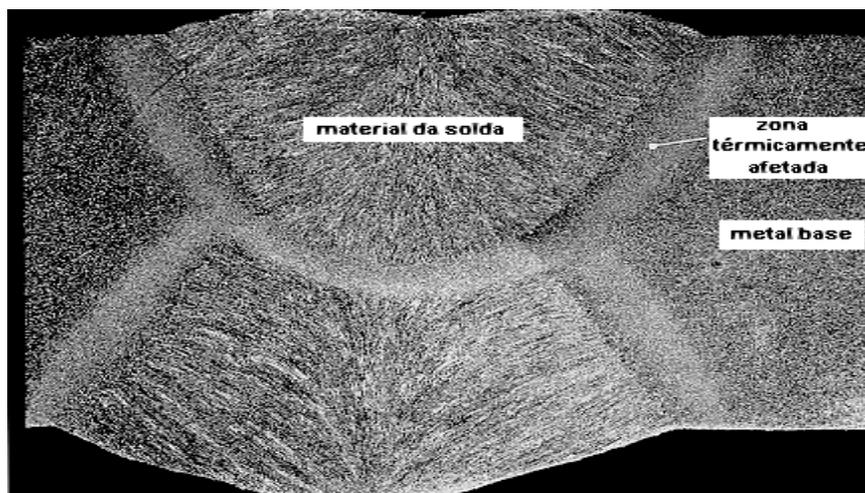


Figura 2.14 - Ilustra a fotomicrografia da união soldada, destacando a ZTA e sua heterogeneidade estrutural do substrato com a extensão da peça.

Fonte: IFER DA AMAZÔNIA S.A.

2.8. FALHA POR FRATURAS

Uma vez que os processos de soldagem provocam a fragilidade, a abordagem da mecânica da fratura não poderia ser dispensada neste estudo, por isto, inclui-se a fratura como o um evento probabilístico de acontecer. Porém, de natureza controlável por métodos e técnicas seguras de evitar.

Há 40 anos*, deu-se início ao estudo da mecânica da fratura e atualmente os conceitos são francamente discutidos e desenvolvidos estudos, mediante as tendências de produção da indústria. Por outro lado, a mecânica da fratura é considerada aqui porque permite identificar a resistência a fratura em consequência do processamento de materiais de elevada resistência. As aplicações posteriores permitiram de aperfeiçoamento do método de determinação de falhas e de fabricações de ligas metálicas de alta resistência necessárias para obter a elevação da resistência a fratura com apenas uma pequena redução da resistência mecânica. Esses resultados iniciais bem sucedidos conduziram a outras aplicações na área.

Lavrando os resultados iniciais bem sucedidos, conduziram a outras aplicações na área de projetos estruturais, ensaios não destrutivos das estruturas e especificações de materiais novos. Na base da indústria aeronáutica pelo conceito – vida segura - no qual se esperava que os componentes críticos da estrutura em operação, fossem os critérios adotados para projetos por muitos anos, depois seria retirada de operação.

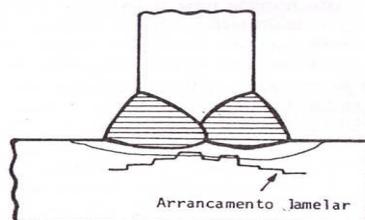


Figura 2.15 - Ilustra o esquema e fotomicrografia do efeito da trinca lamelar em união soldada sob tração (BRANCO, 1999).

O critério do dano tolerado preconizou que todas as estruturas manufaturadas têm base defeitos ou trincas iniciais, combinados com determinadas dimensões, ou em menor dimensão determinada, conferidos por ensaios não destrutivos, permitindo-se que estes defeitos cresçam até as dimensões críticas durante toda a vida útil esperada. Há três tipos de análises elementares, a saber: propriedades mecânicas da fratura dos materiais, capacidade de detecção do defeito, por métodos não destrutivos, métodos propriamente dito de mecânica da fratura (CAHN & HAASEN, 1996).

Adotando como base as complexidades dos tratamentos necessários aos métodos ordinários da mecânica da fratura não linear, a serem descritas apenas pelos conceitos da mecânica da fratura, a saber: Tensões nas extremidades de trinca, Valores críticos de k_1 resistência a fratura. Em abordagem simplificada, as tensões extremas das trincas distinguem-se pela translação de eixos das tensões, uma em relação às outras, distinguindo-se por três modos constantes, tais como: aberturas das partes, deslocamentos de planos e deslocamento cisalhante. Admitindo-se que k_1 , é o fator de intensidade de tensões e evidencia o parâmetro de campo de tensões, na extremidade da trinca, K_t pela estruturalmente é caracterizado com uma descontinuidade do tipo: circular, elíptica, trinca linear laminar. Descontinuidades perigosas exigem de cuidados necessários, a fim de se estabelecer a garantia e a previsão de fraturas das peças em serviço, como por exemplo, nas construções de aeronaves a indústria de aparelhos aeronáuticos. Deste modo, pode-se estimar que o fator de tensões K_t , definido pela razão entre as tensões máximas e as nominais. Igualmente obtêm-se calculando as tensões nas regiões adjacentes aos pontos críticos e na direção normal, aumentada em módulo e criando-se uma distribuição heterogênea na região próxima do orifício. No qual o fator de tensões pode ser definido pela razão entre a tensão máxima e a tensão nominal, anteriormente definido e expresso aqui pela equação 1.

$$R = K_t = \frac{\sigma_{\text{máxima}}}{\sigma_{\text{nominal}}} \quad \text{E - 2.1.}$$

Nos processos de soldagens. É que editamos estes trabalhos levantando dados à ótica científica decorrente das transformações e suas conseqüências, deixando para outro trabalho, a redução destes efeitos. Pretende-se observar as mudanças causadas pela termodinâmica oriundas da elevada temperatura plasmática e de transição. A que estão associadas à fragilidade e susceptível corrosão intergranular ao Ni, controlável pela adição dos elementos de liga ou até mesmo a retirada dos mesmos, claro sob a ótica metalúrgica da soldagem como mostra a Figura 2.16.

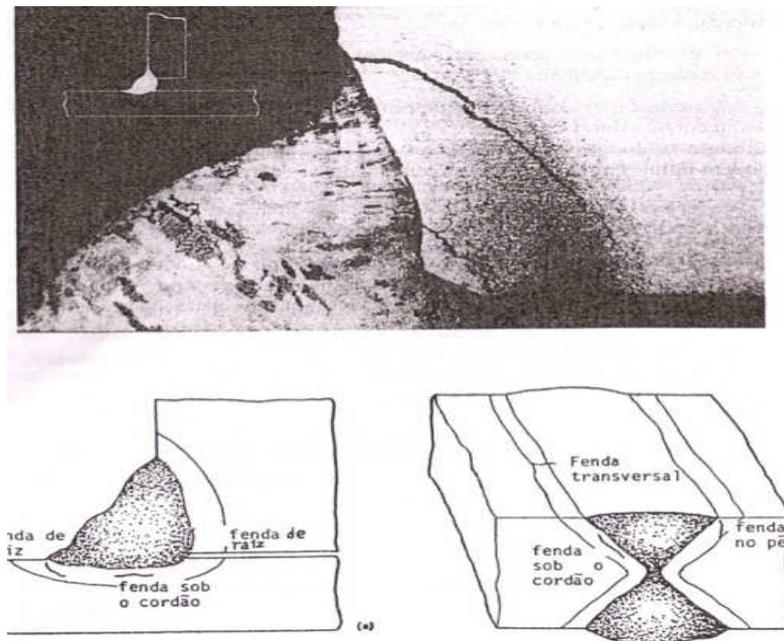


Figura 2.16 - Ilustra o esquema fenda sob o cordão de solda em trinca (BRANCO, 1999).

Com este estudo, o que podemos afirmar com referencia à recuperação de matrizes, moldes e dispositivos de conformação a frio Fazer citações dos revestimentos metálicos com a deposição metálica por solda por eletrodo revestido em processamento simples?

No processamento simples, não se destaca o controle do resfriamento posterior, nem tratamentos especiais e sim resfriado a ar. Sabendo-se que a fadiga é uma redução gradual da capacidade de carga do componente pela ruptura lenta do material. E que este defeito decorre do avanço infinitesimal das microtrincas que se formam no seu interior, imperceptível ao olho nu, sabendo-se também que a presença elementos de liga nestes aços propiciam alterações em suas propriedades metalúrgicas e mecânicas. Por outro lado, ao ser submetido a processamento como uniões soldadas nos estágios em que ficam sujeitas as altas temperaturas, espera-se que ocorram mudanças microestruturais profundas, registrada na literatura vigente.

Mas, como não dispomos de parâmetros suficientes e necessários ao controle dessas alterações, encaminhamos para uma investigação científica capaz de apresentar parâmetros de controle, no sentido de assegurar a ampla utilização dos processos de soldagem, projetada para

resistir solicitações normais do trabalho cinemático. Neste trabalho nos limitaremos a análise da ZTA na vizinhança das uniões conforme Figura 2.17.

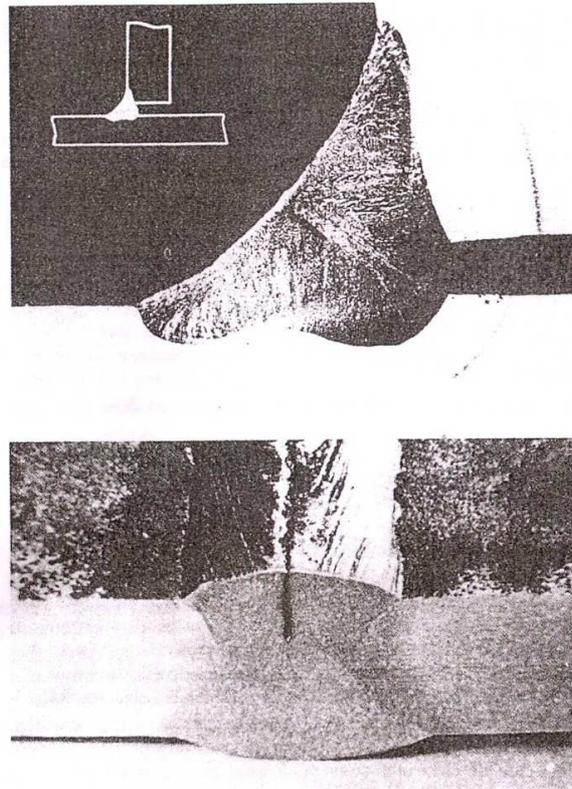


Figura 2.17 - Ilustra fotomicrografia de ZTA característica de dois tipos de uniões, destacando-se amostra inferior como a base deste estudo (BRANCO, 1999).

A fim de apreciar os comportamentos metalúrgicos, diante das interações gás-metal, resultante do triângulo formado pelo material base aço SAE 4340, chanfrado em duplo U, eletrodo revestido E-6013 e os parâmetros de máquina, tais como: Corrente [A], Tensão [V], potência [W], composição química do material de eletrodeposição e a química do revestimento.

A obtenção dos resultados tem com fulcro o zelo pela experiência prática, a teoria e as notificações científicas existentes na atualidade aliando-se à técnica de análise metalográfica. Técnica de ensaio, na qual se distinguirá com perfeição as microestruturas resultantes dos processos de soldagens e ao mesmo tempo as caracteriza, tal como a suscetibilidade a fadiga e a conseqüente fratura frágil, que é um incidente indesejável em qualquer projeto.

Existem diversas maneiras de unir duas partes metálicas. Entre elas está a soldagem, que é um processo de junção, utilizando uma fonte de calor, com ou sem aplicação de pressão de altíssimo potencial energético. Um processo de soldagem deve ter as seguintes características: produzir uma quantidade de energia suficiente para unir dois materiais, similares ou não com ou sem fusão entre as partes:

- Evitar o contato da região aquecida e/ou fundida com o ar atmosférico;
- Remover eventuais contaminações das superfícies que estão sendo unidas, oriundas do metal de base ou do metal de adição;
- Propiciar o controle das transformações de fase na junta soldada que podem afetar o seu desempenho;

A Soldagem é o processo de união de metais mais importante do ponto de vista industrial sendo extensivamente utilizada na fabricação e recuperação de peças, equipamentos e estruturas. A sua aplicação atinge desde pequenos componentes eletrônicos até grandes estruturas e equipamentos (pontes, navios, vasos de pressão, tubulações industriais) Figura 2.18.

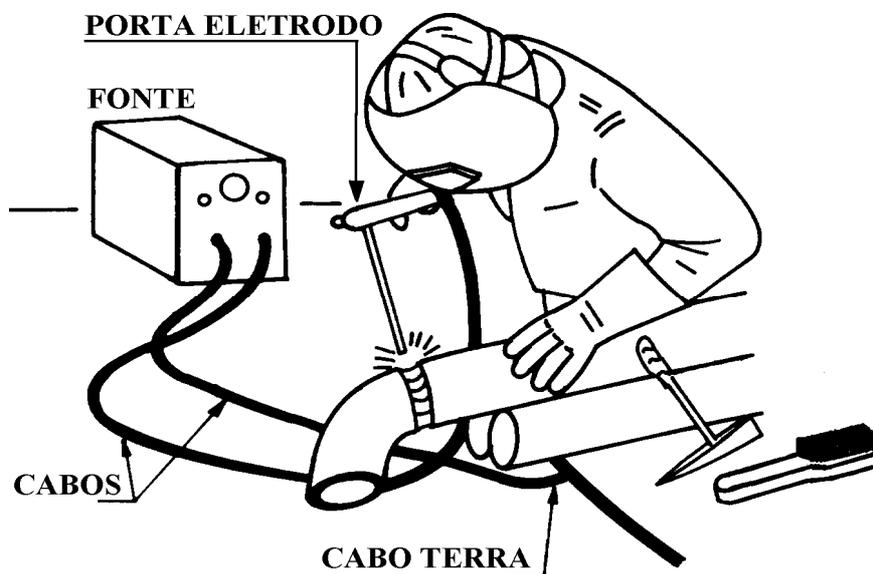


Figura 2.18 - Ilustra o esquema de um processo de soldagem a arco.
Fonte: (EMILIO WAINER, 2010)

Existe um grande número de processos de soldagem diferentes, sendo necessária a seleção do processo (ou processos) adequado para uma dada aplicação. Inclusive maior

demanda, requerido pela indústria de construção naval, cuja taxa de crescimento registra de 10% a 20% até o final do ano em curso (ASSIS, 2010). A tabela abaixo lista algumas das principais vantagens e desvantagens dos processos de soldagem.

Mapa 2.6 - Desempenho do Processo de Soldagem

Item	Vantagens	Desvantagens
A	Juntas de integridade e eficiência elevadas;	Não pode ser desmontada;
B	Grande variedade de processos;	Pode afetar microestrutura e propriedades das partes;
C	Aplicável a diversos materiais	Pode causar distorções e tensões residuais;
D	Operação manual ou automático;	Requer considerável habilidade do operador;
E	Pode ser altamente portátil;	Pode exigir operações auxiliares de elevado custo e duração (ex.: tratamentos térmicos);
F	Juntas podem ser isentas de vazamentos;	Estrutura resultante é monolítica e pode ser sensível a falha total
G	Custo, em geral, razoável;	

Fonte: (EMILIO WAINER, 2010).

2.9 A FADIGA

A fadiga é uma forma de falha que ocorre em estruturas que estão sujeitas a tensões dinâmicas e oscilantes – fenômeno que ocorre em pontes, veículos ferroviários, veículos rodoviários, veículos navais e aeronaves em geral. Nas circunstâncias em que se movimentam, sujeitam-se a deslocamentos em grandes velocidades, portanto são suscetíveis a ocorrência de uma falha em um nível de tensão, consideravelmente inferior ao limite de resistência a tração ou

limite de escoamento residual para uma determinada carga estática. Também, faz sentido acrescentar que o termo FADIGA deve se fato de que o tipo de falha sempre ocorre após longo período de tensão repetitiva ou ciclo de deformação. Por conseguinte, a fadiga é a maior causa individual de falhas em metais, sendo estimado que ela compreende acerca de 90% de todas as falhas em metais.

A falha em fadiga é de natureza frágil, mesmo em metais dúcteis – caracterizada por não deixar vestígios de deformação plástica. O processo se faz pela iniciação e propagação de trincas e em geral a superfície da fratura é perpendicular a direção de uma tensão de tração aplicada. O limite de resistência a fadiga representa o maior valor de tensão oscilante que não irá causar a falha após essencialmente um número N de infinitos ciclos, isto N ciclos. Para muitos aços os limites de resistência a fadiga, variam em função dos ciclos 35 e 607 ciclos do limite de resistência a tração.

Outro importante parâmetro que caracteriza o comportamento em fadiga dos materiais é número de cíclicos – vida em fadiga – N_f . Este é o número de ciclos necessários para causar a falha em um número de nível de tensão específico. A propagação de trincas. Este parâmetro é um indicador necessário ao técnico e ao engenheiro pela gama de informação que fornece aos cálculos necessários a apreciação e determinação da vida em fadiga.

Este estudo relaciona a iniciação e propagação de trincas como elementos principais de controle por distintas etapas, por isto o processo de falha em fadiga é caracterizado por três distintas etapas, a saber:

- a) iniciação de trincas, onde uma pequena trinca se forma em algum ponto de severa concentração de tensões;
- b) propagação de trinca, durante a qual essa trinca avança em incrementos em todos os ciclos de tensões;
- c) fratura final, que ocorre muito rapidamente, isto é, quando a trinca avança com muita velocidade para o seu tamanho crítico. Neste caso a vida em fadiga N_f pode ser considerada a soma do número de ciclos iniciais N_i e a propagação da trinca N_p , equação 2.2.

$$N_f = N_i + N_p$$

E – 2.2.

Como a contribuição da frequência final é insignificante, porque a amplitude extrapolou os limites e ocorre rapidamente. Há interesse em estudar as proporções da duração total, relativas as N_i e N_p , que dependem do material, natureza deste estudo, e das condições de ensaios. Admitindo-se: para baixos níveis de tensões, grande fração de vida útil em fadiga, no início da trinca. Entretanto, com o aumento do nível de tensão N_i diminui e as da trincas se formam rapidamente. De modo que, se a fadiga de baixo ciclo e o caso em particular, a propagação é predominante, tal como: $N_p > N_i$. portanto, as trincas da vizinhança com falhas de fadiga sempre se iniciam ou nucleiam na superfície dos componentes, pontuais nos campos de concentrações de tensões, em determinados sítios, como: ZTA, cantos vivos, rasgo de chavetas, fios de rosca, mossas e afins. Admitindo-se que: a taxa de propagação da trinca pode ser expressa como:

$$\frac{da}{dN} = A(\Delta K)^m \quad \text{E-2.3.}$$

Estes parâmetros acima citados correspondem a descrição matemática do fenômeno, onde A e m são constantes dependentes da classe do material, do ambiente, da frequência e da razão entre tensões R na equação na sessão 2.8. O valor de m varia de 1 a 6, Y é relacionado com a tenacidade do material e definido com a razão entre comprimento da trinca a e a largura W , e ΔK é a faixa do fator de intensidade de tensão na extremidade da trinca isto é na borda da trinca, tal que

$$\Delta K = K_{\max} - K_{\min} \quad \text{E - 2.4.}$$

$$\Delta K = \sigma \Delta Y \sqrt{a\pi} \quad \text{E - 2.5.}$$

mas;

$$\sigma \Delta = (\sigma_{\max} - \sigma_{\min}) \quad \text{E - 2.6.}$$

$$\text{Então: } \Delta K = (\sigma_{\max} - \sigma_{\min}) Y \sqrt{a\pi} \quad \text{E - 2.7.}$$

$$\frac{a}{W} = Y \quad \text{E - 2.8.}$$

Fatiga dúctil – é caracterizada pela extensa deformação plástica na vizinhança, da trinca em estado de propagação, também prossegue de maneira relativamente lenta à medida que o comprimento da trinca se estende – na peças cilíndricas na tração reduz a seção a te romper. Torna-se cada vez mais crítico a zona afetada, deste modo, o zêlo e o bom senso deve-se sobressair. Porque, esse tipo de trinca é freqüentemente controlável, quando a condição do carregamento é constante, isto é dentro da zona de vibrações limítrofes, com freqüência e amplitude estáveis. Em outras palavras, quer dizer que ela resiste a qualquer extensão adicional, a salvo se houver aumento na tensão. Eis neste caso o limite.

O aço SAE 4340 por ser um aço ferramenta encontra vasta aplicação em construções de máquinas, esta condição é sempre encontrada em peças sujeito as solicitações cíclicas, como também em todas as construções em que este aço é aplicado, tal como na construção de eixos de máquinas, além de moldes e matrizes. Por esta razão se faz necessário acrescentar outros conceitos clássicos como. Dentre as tensões, as mais críticas, estão as tensões cíclicas, caracterizadas por dominar a tensão aplicada de natureza axial - tração-compressão – de flexo-torção. Em geral são três metodologias de estudos a estas solicitações, das quais destaca-se: a cisalhamento pela tração-compressão; de dobramento, flexão- torção e as tensões intermitente – oscilante no tempo.

A concentração de tensão – nos projeto de máquinas faz se necessário que os projetistas tenham a cautela de evitar pontos críticos na obra como cantos vivos e outras mais. Isto porque a presença de defeitos ou trincas muito pequenas, microscópicas, sempre existe sob condições normais na superfície e no interior do corpo de peças acabadas. Mas como a metalografia é um ensaio destrutivo de certo modo, é impossível detectar as microtrincas. Esses defeitos deterioram a resistência à fadiga relatada como fratura, uma vez que uma tensão aplicada pode ser amplificada ou concentrada na extremidade.

Deste modo a resistência a fratura de um material solido é uma função das forças de coesão e repulsão entre os átomos. Para observa as microtrincas são necessárias um tratamento de superfície, para torná-la plana e polida devidamente atacada e então se pode apreciar as microestruturas reveladas – objeto deste estudo simplificado.

2.10. FADIGA ÀS CARGAS CÍCLICAS DE AMPLITUDES VARIÁVEIS

Limitando-se aos carregamentos cíclicos, embora haja outros tipos de natureza, este estudo não pode se eximir de abordar, a fadiga como um evento calculado e previsível. Por isto, incluem-se as cargas cíclicas de amplitudes variáveis, como oriente de discussão. Dentre as quais, destaca-se a solicitação do tipo sinusoidal que é a representação esquemática dos carregamentos cíclicos a que estão submetidos diversos elementos de maquinas, estruturas de maquinas, estruturas na construção civil e em estrutura aplicadas a minera-metalurgia - metalurgia aplicada ou extrativa.

De base na natureza periódica do evento, um espectro sinusoidal pode perfeitamente exprimir o modelo que mais se assemelha à realidade, tomando base de calculo a variação da amplitude de uma variedade de parâmetros distintos, tais como:

σ_{\max} = tensão máxima;

σ_{\min} = tensão mínima;

R = razão entre tensões máximas e tensões mínimas;

f = freqüência.

Determinando-se f como a freqüência em que se enquadre na faixa de onda, cujo grau de liberdade esteja no intervalo: 200 a 700 ciclos por minuto. Por consequência de que tem influência reduzida no comportamento à fadiga, porem limitado à ausência de gradiente de temperatura e agente corrosivos. A maior parte dos resultados obtidos de ensaios clássicos de fadiga é obtida sob condições de carga em amplitudes constantes do tipo senoidal. De tal modo que o seu uso na definição de curvas de projeto do tipo $S-N$ só será, em rigor, valido no caso de construção sujeitas em serviços a espectro de cargas senoidais, e tal como é caso do servo mecanismo. No caso de estruturas soldadas, os espectros de carga não são tão simples assim de analisar, podendo a cargas de serviço variar aleatoriamente, deste modo, os resultados dos ensaios de fadiga, para serem relevantes, deveriam ser feitos para cargas semelhantes, às que operam na rotina do serviço.

A realidade de ensaios não só é pratica devida inclusão de equipamentos sofisticados, como também revelar se de interesse limitado dado não permitir a generalização, isto é cada caso é um caso. Por esta razão, os ensaios clássicos são realizados sob espectro de cargas vibrantes

cujo espectro de análise reflete a propriedades das vibrações senoidais. Deste modo, pode se afirmar que a influencia real da carga no comportamento a fadiga de uma estrutura soldada, é uma variável importante e faz-se necessário saber, como esta, evolui a sua resistência a fadiga.

Então, identificar os *espectros* dos eventos pela aplicação de sucessivos ciclos de carga pode favorecer ao ato de ler, isto é interpretar os aspectos da aplicação da carga sob uma forma que facilite a sua análise, a identificação dos dois parâmetros: danos produzidos e os sucessivos ciclos de carga variáveis. Por exemplo, a asa de um avião, durante seu serviço, cada uma das peças de sustentação são flexíveis e resistem às flexões causadas pelas cargas transportadas em viagem de cruzeiro, durante a decolagem e pouso com se sabe é um controle extremamente rígido.

O cuidado destacado é com as flechas críticas, porque as mesmas não podem ultrapassar as amplitudes superiores às definidas em projetos, sob pena de se desintegrar, tal como a hipótese de que uma provável causa no caso do acidente com Boing da Air France, derrubado do Atlântico. Os danos causados por fadiga é caracterizado pela desintegração das propriedades do material. Por efeito, a aplicação cíclica da carga, independente de se tratar de cargas constantes ou variáveis, mas de um modo geral são vários os parâmetros, usados pelos engenheiros para caracterizar. Deste modo, destacam-se como pontos críticos os seguintes eventos na evolução da propagação de trinca:

- Crescimento da fenda;
- Absorção de energia plástica;
- Degradação da resistência a tração estacionaria;
- Redução do limite de fadiga;
- Crescimento da deformação plástica.

Ademais, estas regras são estudas e proposta por Miner. Na qual a desintegração da resistência sob aplicação de uma tensão cíclica é proporcional a energia absorvida pelo material, definida pela razão:

$$\frac{n}{N} = D = \beta \quad \text{E-2.9.}$$

Sendo:

n = é numero total de ciclos

N = ruptura total

β = é a fração da vida usada pela aplicação de n ciclos

$$\beta = \frac{P'}{P} = \frac{n'}{N} = 1 \quad \text{E-2.10.}$$

De modo que se observa uma fenda, o P representa a energia condensada P em uma propagação de onda, P' representa a energia dissipada, e P representa a energia total dissipada

$$D = \sum_{i=1}^n \beta = \text{converge para } 1 \quad \text{E-2.11.}$$

É a expressão da regra de MINER para carregamento variável.

Espectro de carga real – pode ser representado de diversas formas e complexidade, de modo que, o espectro de carga é expresso de tal modo que um componente estrutural ou mecânico isto é estático e dinâmico, sujeito a solitação do tipo cíclica e continua ou uma seqüência de amplitudes de cargas discretas e/ ou variável com o tempo, exemplo estruturas de elevação; VASOS sob pressão, pontes e edifícios sob freqüência variável do ponto de vista do carregamento continuo podem se observados pelos seguintes processos, um de banda curta e outro de banda larga e processo não estacionário, sendo $S(t)$ a tensão, variável aleatória em função do tempo, pode definir-se com o espectro *estacionair* se o valor u e desvio padrão σ , mantenha-se constante no tempo t , sendo u , σ dados pela expressão

$$u = \frac{1}{T} \int_0^T s(t) dt \quad \text{E-2.12.}$$

$$\sigma = \frac{1}{T} \int_0^T [s(t) - u]^2 dt \quad \text{E-2.13.}$$

Deste modo é possível representar a s vibrações matematicamente os espectros contínuos: uma das distribuições mais usadas são precisamente distribuições normais, se admitir que em qualquer instante $s(t)$ apresenta a distribuição normal com valores médio u , e desvio padrão σ . Pela identificação das funções de distribuição gaussiana ou não é possível definir a distribuição de valores máximos ou de varias tensões, analiticamente.

CAPÍTULO III

MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. MATERIAIS

A maioria das construções estruturais soldadas são projetadas e fabricadas em aços ferríticos, na prática. Aos quais, atribui-se a capacidade de redução da transformação da martensita na ZTA. Contudo, com a finalidade de balizar o estudo e simplificar podemos subdividi-los em vários grupos, notadamente os perlíticos, estão excluídos porque à medida que aumentam os teores de carbono destes aços, reduz-se a capacidade de se deixar soldar. Em outras palavras, os elementos de liga corroboram com a baixa soldabilidade do material. Nesta ordem, os aços ao carbono, com acerca de 0,38% C em peso, série SAE 4340, contendo Mn a 1,5% série SAE 13XX e Si entre outros elementos residuais, apresentam microestruturas perlita+ferrita, são os mais usados na indústria do petróleo e na indústria naval. A preferência se deve ao fato de que ao serem selecionados pelas propriedades mecânicas, são caracterizados pelos índices de tensão de ruptura 50MPa.

Os aços ligas apresentam características de resistência mecânica idêntica as dos aços da Série SAE 13XX, embora detenha melhor soldabilidade e tenacidade. A melhoria da tenacidade é obtida pelos beneficiamentos proporcionados pelos tratamentos térmicos, termomecânicos e termoquímicos, dos quais se destacam: recozimento para refino de grãos pela adição do Al, normalização, tempera e revenido. Nesta direção, os aços de alta resistência mecânica com tensões de resistência ao choque mínima de 35MPa, obtidos com aços ao carbono, aços ligados com Nb, V, Cu podem atingir a tensões de rupturas a ordem de 40 a 50MPa, no estado de normalizados, portanto:

Embora o carbono seja um agente de endurecimento do material, contribuindo para aumentar a resistência mecânica, influi desfavorável nas características de soldabilidade e tenacidade devida a formação de estruturas perlíticas e/ou bainíticas (BRANCO, 1999).

Para Branco (1999), todos os aços baixo carbono são especialmente de boa soldabilidade, porem seu endurecimento so é possível através do forjamento e da laminação a frio. Mais comentarios ficarão distinto no material aplicado a construção dos eletrodos, a seguir.

3.1.1. ELETRODOS E-6013

Para soldagem a arco, utilizam-se eletrodos com núcleos metálicos, eletrodos de carvão e de grafite, mediante a condutibilidade elétrica destes. E o E-6013 é aplicado em geral, porque é construído de aço comum e excelente desempenho em chapas de aço galvanizados, favorece a geração de arco suave e constante, reduz emissão de respingos e fumos, é francamente indicado para serviços de serralharia, estruturas metálicas, construções leves e montagens industriais. Especificações estas obtidas no – Catalogo de Produtos LINCOLN -2005, Tabela 3.1, a qual descreve as aplicações do eletrodo, indicando especificamente à uniões leves para as construções estruturais, montagens industriais e serviços de serralheiro, uso geral. Apresenta excelentes resultados, quando aplicados em aços comuns e em chapas galvanizadas.

Tabela 3.1 - Eletrodos para aços baixos e meio teor de Carbono

AWS	Características	d (mm)	L(mm)	Corrente(A)	Polaridade
E6013	Arco suave, soldagem com o mínimo de respingos, indicado para estruturas metálicas leves e montagens industriais.	2,00	300	40-80	CA e CC+
		2,50	350	60-100	
		3,25	350	80-150	
		4,00	350	105-205	
		5,00	350	155-300	

Fonte: Catalogo do Fabricante – Eletrodos Revestidos (LINCOLN, 2005).

Por outro lado, com eletrodos de grafite a amperagem deve ser acrescida de 2 a 3 vezes que as usadas em eletrodos de carvão. Deste modo, os eletrodos de metal oferecem vantagens, porque são preparados para soldagem manuais. Comercialmente são apresentados em varetas nas dimensões de 1 a 12 mm de diâmetro e até 500 mm de comprimento. Nas soldagens automáticas

apresentam-se em forma de rolos, podem ser nus e revestidos. Por se tratar de processos com deposição metálica, o elemento de controle em relação ao metal base é o eletrodo. Visto que, interfere na estrutura localizada da obra, por isto, para soldar aço ao carbono baixa liga, usam-se eletrodos na ordem de 0,1% a 0,18% C, nos limites de impurezas tais que não excedam de 0,025% S e 0,04% P. (MARQUES, MODENESI, & BRACARENSE, 2010)

E-6013 é um eletrodo rúflico – a base de TiO_2 , (www.answers.com/topic/rutile, 2010) especial para trabalhos de serralheiros. Solda todos os tipos juntas, mesmo sem a devida preparação e especificação. Admite soldagem em todas as posições, por esta razão obta-se pela escolha, do mesmo neste trabalho. Também, apresenta arco estável, baixo respingo, escoria de fácil remoção, produz cordões com excelente acabamento, baixa emissão de fumos, fácil reacendimento e ótimo rendimento. Por fim, pode ser aplicado na construção em geral de estruturas e chapas. Para reforçar, exhibe homologação na ABS, BV, CNV e LR. (ESAB, 2010).

Tabela 3.2: Material do núcleo do eletrodo

Material a soldar	Material do núcleo
Aço doce, baixa liga	Aço efervescente (C < 0,10 %)
Aços inoxidáveis	Aço efervescente ou aço inoxidável
Ferros fundidos	Níquel puro, liga Fe-Ni, Ferro fundido, aço, bronze, etc.

Fonte: (MARQUES, MODENESI, & BRACARENSE, 2010)

Quanto aos aços ligas – aplicados em ferramentas - empregam-se aços na ordem de 0,25%C, na intenção de que a deposição não interfira na homogeneidade do material base, nem tão pouco possa agredir sensivelmente a estrutura. Conforme a classificação contida na Tabela 3.2, para simplificar os eletrodos são usados com restrições, pela baixa qualidade de soldagem que apresentam. Porém os eletrodos revestidos, base deste estudo, são mais requisitados para estas operações, por vários motivos entre os quais a manutenção do arco e a proteção da poça fundida para com o meio ambiente e em consequência a ZTA. O revestimento demanda tecnologia, e variam de finos de 0,1 a 0,25mm e grossos acerca de 0,6mm ou mais. São preferenciais aplicados e escolhidos de acordo com as finalidades com que se depositam na obra. Propriedades como: ionizantes e as qualidades de proteção à fusão do metal de deposição. Os revestimentos ionizantes são substâncias a base de $CaCO_3$ (giz) e vidro Silicoso, é o mais simples visto que assegura a estabilidade do arco mas não protege a poça de fusão das

intempéries do meio ambiente. Os revestimentos de qualidade da soldagem, além de estabilizar, protegem a união, contra a oxidação, nitretação. As substâncias usadas nos revestimentos de qualidade, constam matérias ionizantes – GIZ, Escorificantes – Caulim, Gaseificantes – Amido de cana, Desoxidantes – Al, Fe-Mn, Catalisadores coercivo. As atuações dos revestimentos de qualidade além de estabilizar o arco, protege o metal fundido da oxidação e da nitretação e também ligam os metais da união como os elementos necessários.

De modo que, ao fundir-se simultaneamente com o eletrodo, transformam em escórias, cobrindo a união, as protegendo das influencias dos óxidos, dos nitretados. Como também reduzindo o fluxo termodinâmico de resfriamento e em seguida à velocidade de resfriamento do metal fundido acelerando a difusão dos gases no meio ambiente, compactando o metal na união de acordo com a tocha e o arco elétrico a temperaturas elevadíssimas conforme a ilustração contida na Figura 3.1.

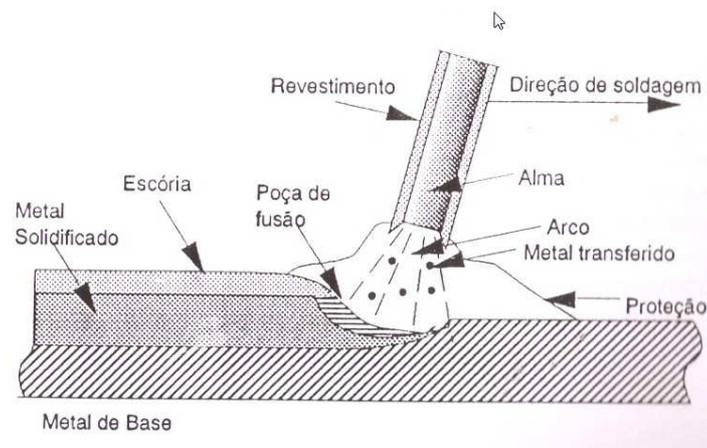


Figura 3.1: Ilustra a função do eletrodo na manutenção da tocha, destacando o revestimento e sua função.

Fonte: (MARQUES, MODENESI, & BRACARENSE, 2010)

Nestas condições de interferências, o revestimento é um item que pode fazer o diferencial, na escolha dos processos para as diversas aplicações. Especula-se bastante o processo de soldagem e o elemento de pesquisa (GIZ e CAULIM - recurso natural) pelo poder do revestimento, na qualidade final da soldagem, até segredo industrial. Escolher um fabricante para definir a composição de um revestimento e suas aplicações.

3.1.2. CARACTERIZAÇÃO DO AÇO SAE 1020

Na qualidade metalúrgica, SAE 1020 é um aço ao carbono, classificado em função do teor de carbono, em hipoeutetóide com menos de 0,77%C em peso, constituído dos seguintes componentes primários, proeutetóides, cuja fase se forma antes da reação eutetoide iniciar. Deste modo, a ferrita – Fe α é o constituinte primário do aço hipoeutetóide, e a cemetita - Fe₃C é o constituinte secundário dos aços hipoeutetóides. Quando aquecido acima de 750° C produz microestrutura monofásica denominada de austenita – Fe γ e a temperatura menor que 750° C em resfriamento contínuo, a ferrita sofre o fenômeno da nucleação e cresce nos contornos de grãos da austenita e a quantidade de ferrita aumenta até a temperatura crítica de 727° C.

Nesta temperatura, a austenita passa a precipitar nos contornos de grãos e a sua composição altera de 0,60% para 0,77%C. Resfriando em seguida este aço à temperatura abaixo de 727° C, conduz à reação eutetoide de toda austenita precipitada, transformando-o em perlita. A microestrutura resultante desta termodinâmica é a precipitação de ferrita primária e a perlita constante de Ferrita, Cementita e Ferrita remanescente. Esta microestrutura é resultante de recozimento pleno, o torna um aço dúctil pela presença 80% ferrita primária. Por outro lado, 20% de perlita, o torna o aço resistente visto que a mesma endurece por dispersão, quanto maior for as lamelas, menor será a dureza.

O SAE 1020, contem em peso aproximadamente 0,2%C, caracterizando-se pelas seguintes propriedades mecânicas: limite de resistência a tração 394 MPa; Limite de escoamento 295 MPa; Alongamento 36,5% (perlita grossa) e Limite de Escoamento 346 MPa; Limite de resistência à Tração 441 MPa e Alongamento 36%(perlita fina). Composição química acerca de 0,18-0,23%C, 0,3-0,6%Mn. (CALLISTER, 2002).

À medida que o teor de carbono aumenta no aço, a quantidade de cemetita e perlita se eleva, e com isso, também a resistência mecânica (DONALD R. ASKELAND, 2008).

A resistência a dureza é uma propriedade mecânica que consiste em que o material, apresenta em resistir à penetração de outro material mais duro. Esta propriedade é sensível em aços, cujo teor de carbono seja superior 0,4% C como é caso do aço proposto no projeto, mas o mencionado SAE 1020 não é temperável, acrescido apenas com a dispersão da perlita grossa e perlita fina. Isto é o espaço lamelar a varia em função do resfriamento adotado.

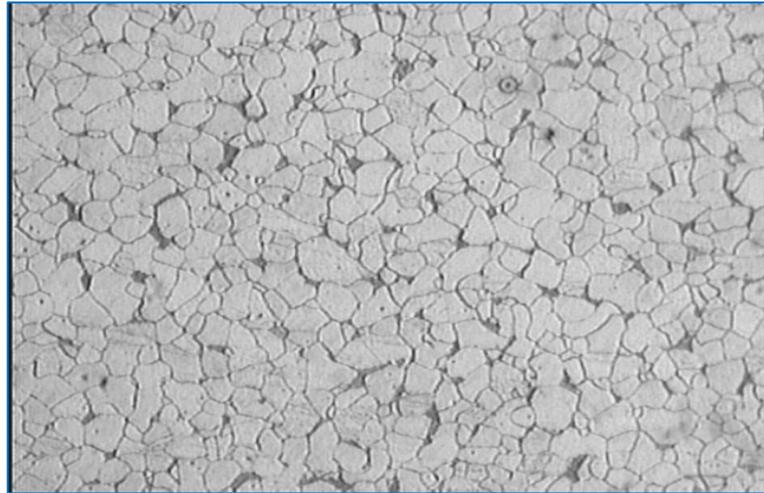


Figura 3.2: Fotomicrografia de aço SAE 1020 – estrutura: Perlita na matriz Ferrítica – ataque Nital a 2% - 200 X – (LABORATÓRIO DE METALOGRAFIA IFAM, 2010).

3.1.3. CARACTERIZAÇÃO DO AÇO SAE 4340

Na base dos sistemas de identificação SAE-AISI, aplica-se aos aços baixa liga, tal como: SAE/AISI 4340, que é um aço com teor de carbono acerca de com 0,4%C, e cujos principais elementos de liga são o Ni, Cr e Mo, representados pelos dois primeiros dígitos – 43XX.

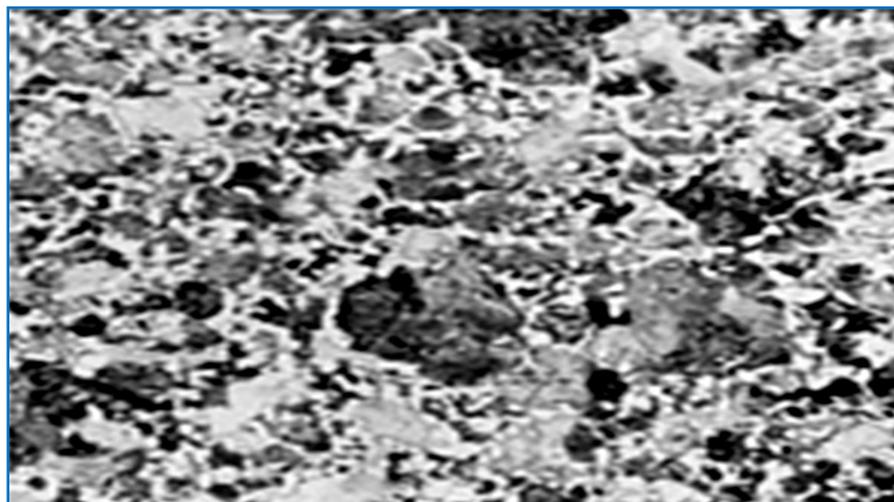


Figura 3.3 - Fotomicrografia do aço SAE 1040 – Austenitizado e Resfriado lentamente, Estrutura: Campos Claros - Ferrita e Campos Escuros - Perlita, ataque nital, 200 X

Fonte: Metal Handbook Vol. 9 – Metallography and Microstructures - ASM – Ohio - 1985.

Pela complexidade na aplicação de soldas, tal como os aços inoxidáveis, seria representado por 3 dígitos, sendo distintos por series, tais como: 2XX, 3XX representam os aços inox austeníticos e os aços distintos pela serie 4XX reúnem os aços inox ferríticos e os martensíticos. No caso dos aços SAE-AISI 4340, na categoria de aços ferramentas são identificados por letras de acordo com as aplicações e as suas características (MEYERS, 1999).

Em geral, os aços inox martensíticos são médio carbono e de difícil soldabilidade, mas existem aços inox martensíticos que são resistentes à corrosão, da série 4XX, de baixo, médio ou alto carbono(dependendo da aplicação), cuja soldagem exige cuidados especiais. Como também existem aços inox martensíticos resistentes ao desgaste, do tipo ferramenta de médio a alto carbono, e cuja soldagem é sempre muito trabalhosa, cuidadosamente tratados objeto deste estudo. Conforme as afirmativas acima ficam evidentes que o teor de carbono influencia na soldabilidade do material, deste modo, tanto o carbono como os elementos de liga influenciam também, sendo assim, o que mais interfere é o teor de carbono.

3.1.4. COMPARAÇÃO DAS TEMPERABILIDADE DOS AÇOS VIA DIAGRAMA TTT.

Pois o teor de carbono é o responsável pelo nível de endurecimento conforme a apreciação feita na nos diagramas TTT Figura 3.4. , dos aços em questão: os aços com até 0,2% C não adquirem tempera devido à curva C corta o eixo das ordenadas impedido toda a perlita se transforme a Martensita, mas nos aços com teores de 0,4% C a curva C esta afastada do eixo de ordenadas, permitindo deste modo, a transformação da Martensita, com gradiente de resfriamento até de 1,5 min. Com base nestas observações e o gráfico registrado no ASM Handbook Volume 6, a soldabilidade varia em função do teor de carbono e dos elementos de liga.

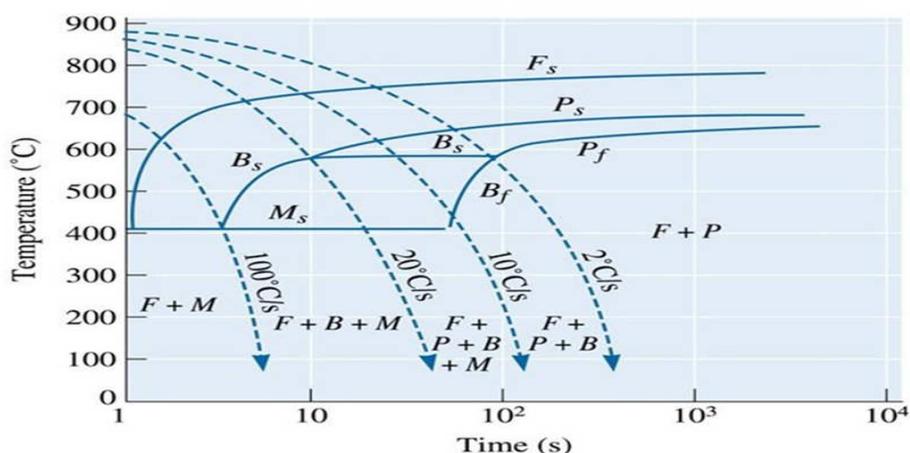


Figura 3.4 - Diagrama de Transformação Tempo e Temperatura – TTT e simulação de Transformação no Resfriamento Contínuo -TRC do SAE 1020 (DONALD R. ASKELAND, 2008).

Por esta razão, a investigação abordada neste estudo, reserva-se à oportunidade de assinalar com razoável precisão, um ou mais motivos pelos quais, os Profissionais dos projetos, manufaturas e manutenção dos moldes e matrizes não aconselham a recuperação das ferramentas por soldagem. Quando aceitam o tratamento, recomenda a exigência de controles expressivos que os inibem, tal prática. Mesmo que os profissionais apliquem em suas construções o aço SAE/AISI 4340, não há modo ou procedimento capaz de permitir uma boa soldabilidade, pois cada material é diferente do outro, por exemplo: conferindo o diagrama TTT do aço SAE 4340 observa-se a diferença de posição da curva C com relação a Curva C no diagrama TTT do aço SAE 1020, o aço SAE 4340 dispõe de mais tempo para transformar a austenita em martensita, isto posto todo aquecimento seguido de resfriamento rápido, como é o caso da ZTA transformará – Figura 3.2. Em que sobrebreposto com a Transformação no Resfriamento Contínuo - TRC

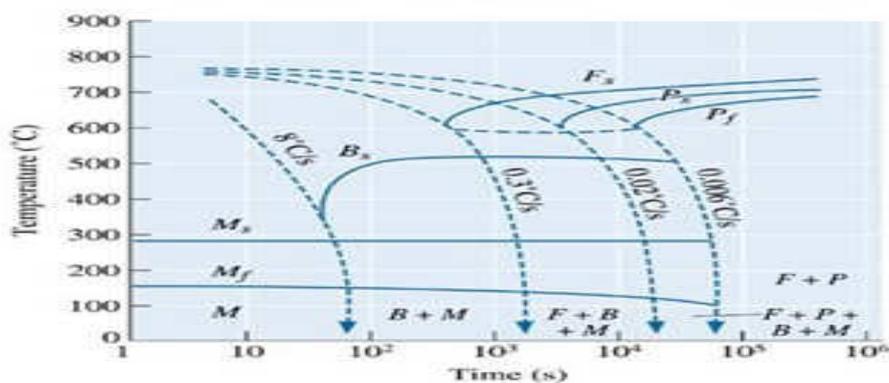


Figura 3.5 - Ilustra o Diagrama Transformação no Tempo e na Temperatura - TTT sobreposto com o Diagrama Transformação no Resfriamento Contínuo – TRC. Aço SAE 4340 (DONALD R. ASKELAND, 2008).

A Figura 3.5. Expressa a graficamente o que seria um prospecto de tratamentos térmicos possíveis do material em questão, observando-se que com o gradiente de resfriamento acerca de $8^{\circ}\text{C}/\text{seg.}$ transformará sempre martensita.

Todavia, com a adoção de controles extremos e cautelas previamente estabelecidas, também existem procedimentos não científicos de cuidados que são comuns a todos os aços martensíticos, tais como:

- Evitar soldar um material que já sofreu serviço (em manutenção) sem antes aliviar as tensões, pois o material acumula tensões internas e pode trincar (não científico) durante soldagem;
- Não soldar estes materiais com chuva (não científico) ou com consumíveis úmidos, pois um dos problemas dos martensíticos é a trinca a frio, causada pela interação do mesmo, como o hidrogênio contido na água, cuja dissociação através do arco elétrico plasmático precipita H_2 ;
- Evitar a soldagem com processos/procedimentos de aporte de calor elevado, pois as juntas soldadas podem sofrer uma perda de resistência mecânica devido ao calor excessivo, além de permitir crescimento de grão na Zona Termicamente Afetada- ZTA, o que favorece perda da resistência ao impacto; solicitações cíclicas; fenômeno de conclusão.
- Determinar a temperatura de pré-aquecimento em função do tipo de aço, lembrando-se que não se deseja evitar a formação martensítica no resfriamento. Mas sabe-se de antemão que é impossível, pois o aço é martensítico. E sim, evitar que a transformação ocorra produzindo concentração de tensões no trabalho de dilatação e contração da peça, o que levaria naturalmente a pré-trinca e em seguida a trinca, por clivagem devida à severidade do resfriamento, cabendo neste termo lembrar que:

Temperaturas elevadas de pré-aquecimento podem até mesmo ser deletérias para estes aços, favorecendo quebra do efeito da tempera de aços revenido em baixa temperatura, o crescimento de grão excessivo (fragilização) e ou a retenção de austenita no pós-aquecimento (PADILHA, SICILIANO, FULVIO JR., 2005).

A ação deletéria do revenido no aço manifesta-se pela retenção peritética catalisadora da alta temperatura. Caso o alívio de tensões, abordado no item tratamentos térmicos, não for realizado logo após a soldagem deve-se pós-aquecer o componente às temperaturas acerca de

50°C a 100°C acima da temperatura de pré-aquecimento, permanecer nesta temperatura por algumas horas, com a finalidade de evoluir o hidrogênio introduzido na soldagem sempre aliviar as tensões do material em temperaturas inferiores à de revenimento do aço, para evitar perda de resistência mecânica no resto do material. No caso dos aços inoxidáveis martensíticos deve-se garantir resfriamento rápido após o alívio para evitar a fragilização a 475°C.

O alívio de tensões usual para um AISI 4340 se situa na faixa dos 600°C, onde ocorre a máxima sensitização dos aços inoxidáveis da série 300, de forma que, não se pode perder a escolha de um fabricante para definir a composição de um revestimento metálico em moldes e suas aplicações. (SILVA, 1998)

No caso dos metais dúcteis como é o caso do AÇO SAE 1020, pode valer-se do conceito e definição da *Integral – J* como modelo matemático com fito de descrever melhor o fenômeno das tensões causada na ZTA até o trincamento crítico localizado, porem esta inserção não tem função de modificar os objetivos inicialmente tratados, mas sim propor novas discussões sobre as transformações oriundas da soldagem na região de ZTA.

3.2. TRATAMENTOS TÉRMICOS

O metal base e a interface da ZTA do metal depositado são sujeitas a transformações microestruturais pelo efeito do ciclo térmico da soldadura, podendo se originar estruturas duras conseqüentemente frágeis e sujeitas a fratura por fadiga (TSCHIPTSCHIN, GOLDENSTEIN, & SINATORA, 1988). A priori as transformações matensíticas, são estruturas indesejáveis na soldagem, considerando-se as sujeições a que o material estar ancorado. Como conseqüências poderão ocorrer sede de microfendas após a operação de soldagem, combinando-se com outros fatores, tais como: presença de hidrogênio e tensões internas elevadas. Portanto, possibilidade de ocorrência deste fenômeno de fissura pode ser controlado não só pela escolha correta do processo como também pelo controle. Aliando-se a esse controle, a identificação dos fatores responsáveis pela fissuras e a eleição de métodos e processos pro eliminação.

Destacamos aqui, que a fissura induzida pelo hidrogênio pode ocorrer tanto na zona termicamente afetada – ZTA, como no metal depositado. Isto é , sua ocorrência se verificará quando se combinam, quatro fatores simultâneos, a saber: Presença de Hidrogênio, Tensões Combinadas de Tensão flexo-torção - empenamento, Heterogeneidades Microestruturais, Baixa

Temperatura Ambiental. Todos estes fatores podem ser controlados, através de tratamentos térmicos entre os quais destacamos, como segue:

Os tratamentos térmicos são procedimentos que têm por objetivo modificar as propriedades dos aços e de outros materiais, através do conjunto de operações que incluem o aquecimento e o resfriamento em condições controladas. Desta maneira, conseguimos obter uma variada gama de propriedades que permitem que tenhamos materiais mais adequados para cada aplicação, sem que com isto os custos sejam muito aumentados. Todavia, como o aço é o material mais comumente utilizado em engenharia todo o enfoque dado aqui residirá sobre este tipo de material, embora os tratamentos térmicos aqui descritos possam ser aplicados a outros tipos de materiais.

Afora os tipos de tratamentos requisitados pelos clientes, segundo suas necessidades fabril, destacamos os métodos e processos, mais usados na indústria metal mecânica, conforme a lista que segue:

- Remoção de tensões internas;
- Aumento ou diminuição da dureza;
- Aumento da resistência mecânica;
- Melhora da ductilidade;
- Melhora da usinabilidade;
- Melhora da resistência ao desgaste;
- Melhora da resistência à corrosão;
- Melhora da resistência ao calor;

Para se obter a máxima dureza em uma peça de aço faz-se necessário que tenhamos a microestrutura composta por martensita (TANANKO, BELOZEROV; MAKHATILOVA, 2010). Esta microestrutura, entretanto somente será obtido se pudermos eliminar as transformações da austenita que são dependentes da difusão como é o caso da transformação perlítica (Romaniv, 2005) e da transformação bainítica. Isto só será obtida se tivermos um resfriamento suficientemente rápido – isto é fora da curva mais acentuada, pelo lado da ordenada no diagrama TTT, a expressão da temperabilidade do material.

Existe certo número de fatores que afetam as velocidades de resfriamento e, portanto, a formação de martensita, com a conseqüente variação considerável de dureza ao longo da seção da peça ou ao longo de seções idênticas fabricadas com aços de diferentes composições.

O conceito de temperabilidade de que trata do segundo caso. Registra que segundo alguns autores temperabilidade podem ser definidos como "a susceptibilidade de endurecimento por um resfriamento rápido" ou ainda como "a propriedade, das ligas ferrosas, que determina a profundidade e a distribuição da dureza produzida por uma têmpera". Os dois conceitos enfatizam a dureza como parâmetro de comparação e como já foi salientado acima a origem da dureza é a formação e a presença de martensita, e então temos um terceiro. Este conceito descreve mais precisamente o processo físico-químico que conduz ao endurecimento.

Aliado ao fenômeno da alotropia da liga Fe-C, podemos explicar como a transformação no tempo e na temperatura causada pela a mudança sofrida da ação termodinâmica durante um aquecimento ou resfriamento. Caracterizado pela passagem do reticulado cristalino do sistema CCC para CFC e vice versa, distinto pela estrutura ortorrômbica tetragonal compacta. Como também a análise deste fenômeno explicar a transformação de toda austenita em martensita, mediante resfriamento rápido e controlado (YU HUA TAN; DE CHANG ZENG; XI CHUN DONG; YUE HUI HE AND SHU QIN HU, 1992, may volume 23A). Fatores que influem nos tratamentos térmicos são os Ciclos térmicos, cuja função reflete nas seguintes variáveis:

- *Temperatura:* depende do tipo de material e da transformação de fase ou microestrutura desejada.
- *Tempo:* O tempo de tratamento térmico depende muito das dimensões da peça e da microestrutura desejada. Visto que o quanto maior for o tempo: Maior será a segurança de completa dissolução das fases e posterior transformação e Maior será o tamanho de grão, necessitando recristalização.
- *Velocidade de resfriamento:* Depende do tipo de material e da transformação de fase ou microestrutura desejada; e é a variável mais importante porque é ela que determinará a microestrutura, além da composição química do material.
- *Atmosfera:* de acordo com atmosfera do ambiente, esta propiciará a oxidação ou perda de elemento químico de liga, ex: descarbonetação.

3.2.1. TIPOS DE TRATAMENTOS TÉRMICOS

Os tratamentos térmicos podem ser aplicados de acordo com o beneficiamento e eliminação de tratamentos anteriores com a finalidade a ampliar as aplicações dos aços. E dependendo das aplicações, podemos contar com os seguintes tipos:

Recozimento: Durante o processo de deformação mecânica, não só as dimensões são modificadas, mas também as microestruturas resultantes. Todavia, embora a maior parte da energia gasta nos processos de conformação a frio seja perdida na forma de calor e apenas 2 a 10% é armazenada na forma de defeitos cristalinos, esses defeitos causam um aumento de dureza significativo. Esse fenômeno é refletivo como aumento de dureza e resistência mecânica, resultante da deformação plástica é denominado de encruamento. Para continuar trabalhando o metal, faz-se necessário a eliminação deste defeito mecânico. O técnico ou engenheiro, decide processar o rearranjo do reticulado cristalino, possível através do recozimento. Isto é, aquecer a temperatura de austenitização e resfriar lentamente para favorecer a difusão dos átomos e a recristalização. Portanto, se for conveniente eliminar ou diminuir o encruamento do material deformado, aplica-se o tratamento recozimento para recristalização. Durante esse tratamento térmico ocorrem mudanças microestruturais em consequência, a diminuição de dureza (VLACK, 1984).

Os materiais metálicos podem ser deformados a quente, durante o processo de deformação a quente os defeitos são criados e logo após são rearranjados e/ou eliminados. De forma que se pode obter durante o processo a quente uma microestrutura semelhante à microestrutura do material que não sofreu deformação plástica. A deformação a quente é caracterizada por ser realizada acima da temperatura de recristalização. Portanto, a temperatura de recristalização separa a deformação a quente da deformação a frio.

A homogeneização de grãos e eliminação de defeitos cristalinos sem alteração da microestrutura, mas com restauração parcial das propriedades do material. Recristalização ocorre eliminação de defeitos cristalinos pela migração de contornos de grão e Crescimento de Grãos.

O aquecimento continuado após o término da recristalização causa crescimento de grãos (PADILHA & SICILIANO, 2005).

Esta afirmativa, refere-se às 7 leis, que sintetizam a recristalização, prevista por Burke Turnbull , 1952 – denominada Leis da Recristalização. É parte de comentários de Kruger e Woldt, que consideram a abordagem de que não existe distribuição de energia de ativação para recristalização e sim distribuição de energia, o que esta de acordo com a existência de Heterogeneidades de Deformação nos materiais encruados.

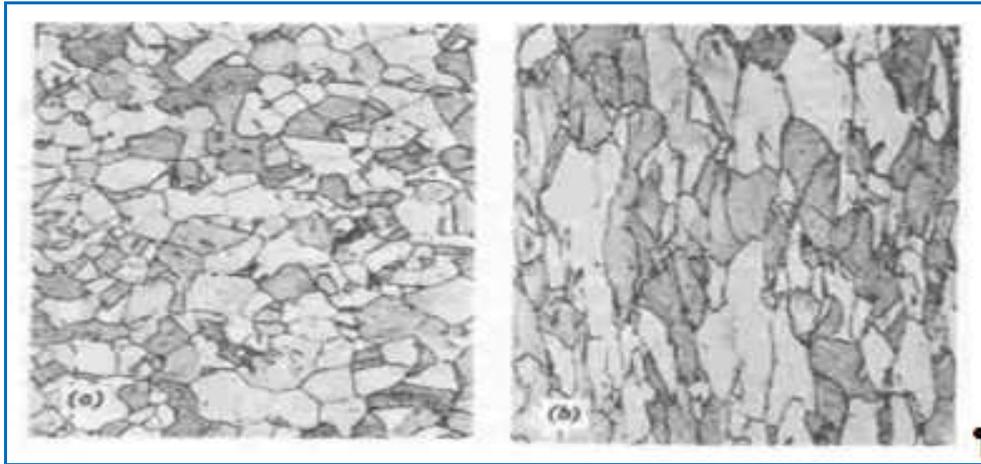


Figura 3.6 - Ilustra fotomicrografia aços SAE 1030, recozidos(a) e aços laminado a frio- Encruado(b) (From W.G. Moffatt, G.W. Pearsall, and J Wuff – The Structure and Properties of Materials Vol. 1, p 140 – 1964. By John & Sons New York. Reprinted by Permisson of Wiley & Sons. Inc.).

As regiões escuras da Figura 3.6., correspondem a um composto chamado perlita e as regiões claras correspondem a uma fase chamada ferrita. A ferrita tem estrutura cristalina CCC e tem baixa solubilidade do carbono. Já a perlita multifásica e compõe-se de duas fases, a saber: ferrita e cementita. A cementita é um carboneto de ferro (Fe_3C), a qual caracteriza-se por uma fase dura e frágil. Ao passo que a ferrita é uma fase dúctil e maleável precipitada entre lamelas de cementita, atribuindo ao aço tenacidade, como mostra a FIG. 3.7, abaixo.

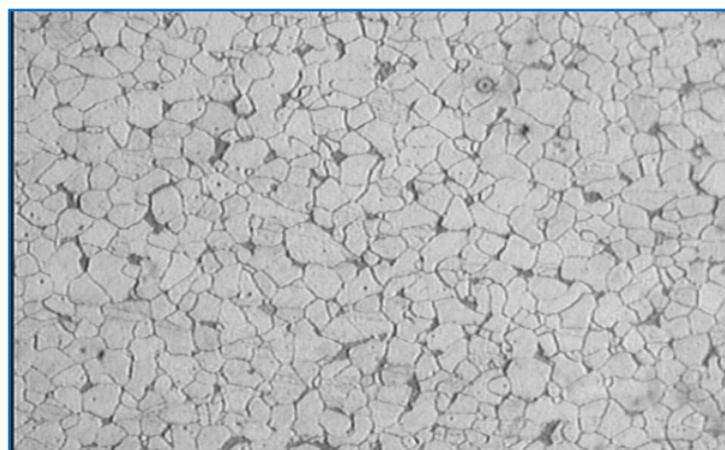


Figura 3.7 - Ilustra o fotomicrografia aço SAE 1020 – Fase Perlitica (marron) na matriz ferritica(cinza) 160 X Nital 2%. (LABORATÓRIO DE METALOGRAFIA –IFAM, 2010).

A primeira diferenciação que se faz dos aços neste contexto é a composição química. Nesta direção, os elementos de liga, bem como a quantidade de elementos de liga adicionada, vão depender da aplicação do aço, isto é, do requisito mais importante a ser levado em conta no projeto. Este requisito pode ser mecânico, econômico ou ligado ao ambiente (aços inoxidáveis). A outra diferenciação que deve ser feita, quanto se pensa em aços, é com relação ao tratamento térmico realizado. Uma fase também muito importante que se forma nos aços é a martensita.

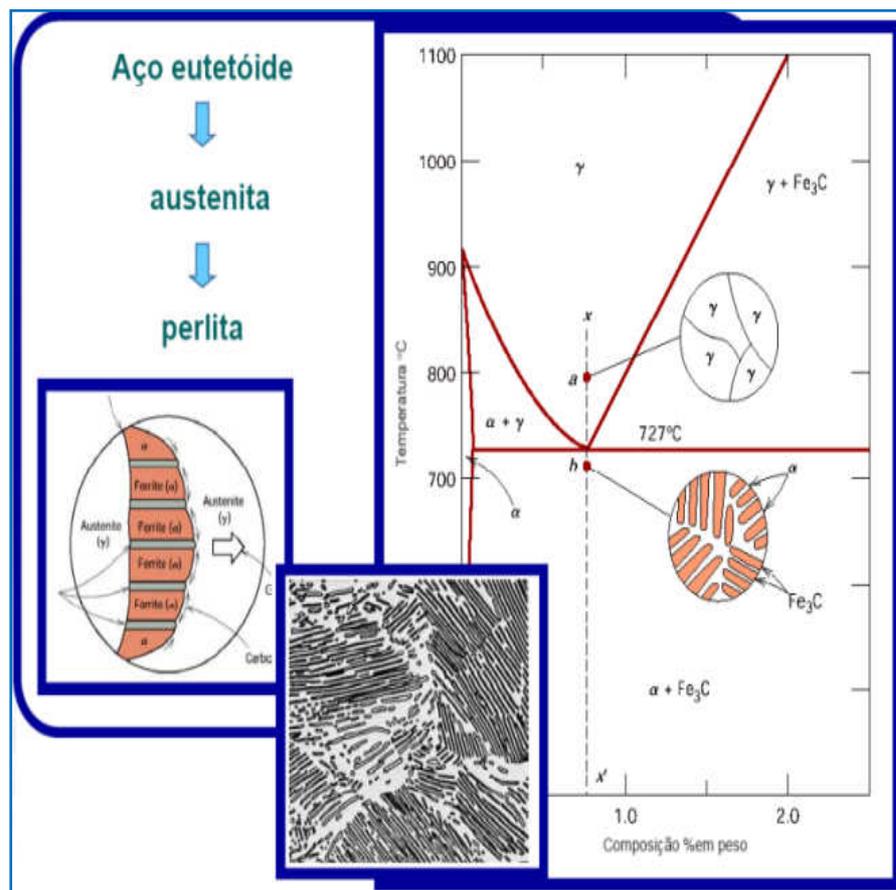


Figura 3.8 - Ilustra a precipitação multifásica Perlítica do aço Eutetóide, com teor de até 0,8% C parâmetro do teor a 100% perlita adaptado. (CALLISTER, 2002).

Na Figura 3.8., mostra de maneira detalhada e esquematicamente, as microestruturas características de aços para construção mecânica. SAE 1080 (eutetóide) e ilustração esquemática de reação eutetóide formação da perlita.

Essa fase resulta da transformação da austenita, que não é estável na temperatura ambiente, durante o resfriamento rápido dos aços. Cabe aqui uma observação, a maioria dos

tratamentos térmicos realizados em aços parte da existência de austenita. Em que Austenita é uma fase CFC, que está presente nos aços carbono acima de 727°C (eutetóide).



Figura 3.9 - Ilustra aços SAE 1040 com 0,77% de Mn, 0,4%C, Normalizado fase: Perlita fina com Ferrita no contorno de Grão, 640 X, Nital 4%. (LABORATÓRIO DE METALOGRAFIA – IFAM, 2000).

Em análise bastante simplificada, descreve-se o resfriamento lento a partir da austenitização a qual resulta em fases ferrita e perlita e o resfriamento ao a partir da austenita resulta em Perlita Fina na Figura 3.9. Para descrever este fenômeno, são necessários outros tipos de diagrama para mostrar as transformações fora da condição de equilíbrio, que são os digramas de Tempo - Temperatura-Transformação-TTT, sobreposto com o de resfriamento contínuo Transformação-Resfriamento-Contínuo-TRC. Todos os aços comerciais podem ser tratados, desde que sejam conferidas as condições definidas nas cartas de tratamentos térmicos fornecidas pelo fabricante. Quando não estão disponíveis na obra, o técnico ou engenheiro recorre ao método do ensaio JOMINY, obter parâmetros de endurecibilidade do aço durante o resfriamento e aos métodos do exame metalográfico (AZEVEDO & CESCÓN, 2004).

Os tratamentos térmicos no meu ponto de vista devem ser tratados neste trabalho – devido ao potencial que representa como transformação, mudanças de fases e estruturais. Em conseqüência, as mudanças de propriedades. Para análise destas mudanças são passíveis o registro da imagem, seguidas de controle dos processos de tratamentos térmicos. Com as imagens ampliadas, bem definidas pode se: analisar, controlar, coordenar e planejar a recuperação e beneficiamento, em particular os aços ferramentas. Portanto, as microestruturas

resultantes são as provas incontestáveis da certeza de que o tratamento foi realizado com sucesso (NEMECEK; NOVY; STANKOVA, 2006).

Deste modo, a abordagem da metalografia neste estudo consistem em comprovar a estrutura resultante e baliza o tipo de tratamento a que foi submetido o material, ao mesmo tempo em que, os distinguir e dois grandes grupos, a saber: recuperação e beneficiamento.

- Da recuperação agrupam-se todos os tratamentos que facilitam os processamentos, tais como: Recozimentos e Normalização.
- Do beneficiamento agrupam-se todos os tratamentos que ampliam a aplicabilidade do material acrescentando, outras propriedades mecânicas e tecnológicas, não aferidas após processado nas aciarias, tais como: Patenteamento, Têmpera Revenimento, Martêmpera, Austêmpera, Cementação, Nitretação e Carbonitretação (EDENHOFER, 2006).

3.2.2 CARACTERÍSTICAS METALÚRGICAS DOS TRATAMENTOS E A METALOGRAFIA:

1. Recozimento para alívio de tensões.

- Objetivo. Remoção de tensões internas originadas de processos (tratamentos térmicos anteriores, tratamentos mecânicos, soldagem, cortes)
- Temperatura. Não deve ocorrer nenhuma transformação de fase
- Resfriamento. Devem-se evitar velocidades muito altas devido ao risco de distorções, portanto: Lento e Gradual.
- Estruturas resultantes, para aços:
 - Hipoeutetóide - ferrita + perlita grosseira;
 - Eutetóide - perlita grosseira
 - Hipereutetóide- cementita + perlita grosseira

Por exemplo: Aço SAE 1020 – resultara em Ferrita + Perlita na ordem de 20% de perlita e 80% ferrita. AISI SAE 4340 – resultara em Ferrita + Perlita, todavia na ordem de 50% Ferrita e 50% Perlita.

2. Reozimento para recristalização.

- Objetivo: Elimina tensões internas resultantes do encruamento gerado pela deformação à frio – tal como Embutimento Profundo EP.
- Temperatura: Não deve ocorrer nenhuma transformação de fase
- Resfriamento: Lento (ao ar ou ao forno)
- Estruturas resultantes para aços:
 - Hipoeutetóide - ferrita + perlita grosseira;
 - Eutetóide - perlita grosseira;
 - Hipereutetóide - cementita + perlita grosseira.

3. Reozimento para homogeneização (para peças fundidas)

- Objetivo. Melhorar a homogeneidade da microestrutura de peças fundidas;
- Temperatura: Abaixo da austenitização.
- Resfriamento: Lento (ao ar ou ao forno)
- Estruturas resultantes, para aços:
 - Hipoeutetóide - ferrita + perlita grosseira;
 - Eutetóide - perlita grosseira;
 - Hipereutetóide - cementita + perlita grosseira.

4. Reozimento pleno (aços)

- Objetivo: Remover a dureza e estrutura controlada para os aço
- Temperatura: Acima da austenitização
- Resfriamento: Lento e gradual
- Estruturas resultantes, para os aços:
 - Hipoeutetóide - ferrita + perlita grosseira;
 - Eutetóide - perlita grosseira
 - Hipereutetóide - cementita + perlita grosseira.

Beneficiamento: A perlita grosseira é ideal para melhorar a usinabilidade dos aços baixo e médio carbono. Para melhorar a usinabilidade dos aços alto carbono recomenda-se a esferoidização.

5. Reozimento isotérmico ou cíclico (aços)

- Objetivo: homogeneização dos grãos - cuja diferença do recozimento pleno está no resfriamento que é bem mais rápido, tornando-o mais prático e mais econômico;
- Outras recuperações - Permite obter estrutura final + homogênea;
- Limitações - Não é aplicável para peças de grande volume porque é difícil de baixar a temperatura do núcleo da mesma;

Procedimentos de rotina - Esse tratamento é geralmente executado em banho de sais.

1ª Fase: Aquecimento – As peças são aquecidas a uma temperatura que variam de acordo com os materiais a ser recozido. (Entre 500°C e 900°C). A escolha da temperatura de recozimento é feita mediante consulta a uma tabela. Exemplo de Tabela 3.3:

Tabela 3.3 - Material Temperatura de recozimento

Aço 1040	800°C
Aço 1060	1080 785°C
Aço 1090	770°C
Aço rápido	900°C (aço ferramenta)

Fonte: LAFUN/CEM/UFRGS - UFRGS, 2010

2ª Fase: Manutenção da temperatura_– A peça deve permanecer aquecida por algum tempo na temperatura recomendada para que as modificações atinjam toda a massa da mesma.

3ª Fase: Resfriamento – O resfriamento deve ser feito lentamente, tanto mais lento quanto maior for a porcentagem de carbono do aço.

No resfriamento para recozimento adotam-se os seguintes processos:

- Exposição da peça aquecida ao ar livre. (Processo pouco usado).
- Colocação da peça em forno ou em caixas contendo cal, cinza, areia ou outros materiais de baixa condução térmica.

N.B. O material para resfriamento da peça deve estar bem seco isento de umidade. Devida a difusão do H_2 :

6. Normalização - O processo de normalização produz propriedades semelhantes às obtidas no recozimento. Em virtude disto muitas vezes os dois podem ser usados alternadamente para obter baixa dureza, boa ductilidade e para eliminar estruturas provenientes de tratamentos anteriores, como é o caso de tratamentos prévios de têmpera e em peças fundidas ou forjadas.

Ocorre, porém, que a normalização é feita geralmente com resfriamento das peças ao ar. Isto conduz a uma velocidade de resfriamento mais alta do que aquela do recozimento, dando como resultado uma estrutura formada por perlita mais fina. Em conseqüência, a ductilidade será menor do que no material recozido, sua dureza e resistência mecânica serão maiores. Por outro lado, devido à maior velocidade de resfriamento teremos um refino do grão do aço, pois a velocidade de nucleação da ferrita e da perlita será maior na medida em que tivermos temperaturas de transformação mais baixas, conforme será visto em capítulo posterior. Outra vantagem da normalização reside no fato de que se podem utilizar temperaturas mais altas de austenitização, permitindo uma maior dissolução dos carbonetos dos elementos de liga e, no caso de aços hipereuteóides, não teremos a formação da rede de cementita em contorno de grão, como acontece no recozimento.

Normalmente não se tem maiores problemas em adotar o resfriamento ao ar para o processo de normalização, entretanto, para aços com alta temperabilidade esta velocidade pode ser excessiva, dependendo do tamanho da peça, teremos a formação de bainita e até mesmo martensita. Nesta situação deve ser feito um tratamento a uma velocidade mais baixa de resfriamento ou um tratamento isotérmico.

Esta é questão levantada nos objetivos deste trabalho, razão pela qual, as matrizes e estampos, necessitam de controles extremos durante a recuperação com solda, seja de qualquer natureza ou processos.

Têmpera: Dentre os tratamentos térmicos comuns, o tratamento térmico de têmpera é o mais importante devido ao fato de que através dele podemos ter um grande aumento da resistência mecânica e da dureza do aço. Este é o aspecto mais importante beneficiamento porém, em contrapartida teremos uma queda muito grande da ductilidade e principalmente da tenacidade.

Se por um lado o tratamento de têmpera nos dá condições de produzirmos um grande aumento na resistência mecânica e na dureza, a um custo relativamente baixo, por outro existe uma maior complexidade na sua execução. Isto se deve à grande variação na composição dos aços e, por consequência, na sua temperabilidade.

O carbono e os elementos de liga exercem um papel preponderante com relação a este tratamento, já que tanto influem na temperatura de austenitização quanto na velocidade de resfriamento. Assim, a temperatura de austenitização varia de aço para aço, como consequência da variação no teor de carbono e dos elementos de liga, pois os carbonetos formados devem ser dissolvidos pelo menos em parte para que tenhamos o efeito desejado na temperabilidade.

Não basta, portanto austenitizar o aço para termos sucesso no tratamento, mas é preciso que tenhamos também parte dos elementos de liga dissolvidos na austenita.

Durante o seu resfriamento, a austenita se torna instável abaixo da linha de austenitização e começa a se transformar em ferrita (aços com menos de 0,8%C) ou em cementita (aços com o teor de carbono superior a 0,8%C) (MARQUES, MODENESI, & BRACARENSE, 2010).

Além da temperatura de austenitização cerca de 727°C, outro fator importante é a taxa com que é resfriado o material, cuja tangente da reta não pode cortar a isoterma em C. Esta deve ser tal que impeça a formação de qualquer outro produto que não seja a martensita. É obvio que isto nem sempre é possível, pois outros fatores devem ser considerados, mas, de qualquer forma, este é o objetivo que deve ser perseguido neste tratamento. Como existe variação na temperabilidade com a variação do teor de carbono e dos elementos de liga, também a velocidade de resfriamento varia. Ela deve ser a menor possível para que tenhamos o menor empenamento possível das peças, mas, não deve ser tão lenta que impeça a formação de martensita. Há duas curvas, distinta para seja observa a penetração de tempera entre a superfície e o núcleo. Sendo uma relativa à superfície da peça e a outra relativa ao centro.

O problema do resfriamento é um dos problemas mais complexos no caso deste processo. Se por um lado, quanto mais rápido for os resfriamentos maiores serão as chances de obtermos martensita, por outro maiores serão também as chances de termos trincas e empenamentos na peça. Além disso, um resfriamento não homogêneo ao longo da superfície da peça pode também causar empenamento e variações na dureza. Como existe uma variação no volume da peça

durante o aquecimento e o resfriamento também há variação devido à transformação da estrutura em martensita.

Para velocidades de resfriamento suficientemente elevadas, a reação eutetoide é inibida e uma fase nova, não prevista no diagrama Fe-C, a martensita, pode ser formada (MARQUES, MODENESI, & BRACARENSE, 2010).

Portanto, quanto maior for a diferença entre as velocidades de resfriamento na superfície e no centro ou em diferentes pontos da superfície maior será o empenamento e a possibilidade de aparecimento de trincas. Note-se que a velocidade de resfriamento inicialmente é baixa, tornando-se alta apenas para valores intermediários de temperatura da peça. Inicialmente temos um estágio em que se forma um envelope de vapor em volta da peça que impede a troca de calor da peça com o líquido, fazendo com que a velocidade seja baixa. Em um segundo estágio existe a formação de bolhas que entram em colapso rapidamente, permitindo que o fluido entre em contato com a peça e produzida agitação bastante grande do fluido, cresça a velocidade de resfriamento rapidamente. Por fim em um terceiro estágio, a temperatura da peça não é mais suficiente para que haja a formação de bolhas e o resfriamento se dá apenas por convecção, fazendo com que a velocidade de resfriamento caia novamente.

Outra variação esta em que a peças de formato complicado, como é o caso de uma engrenagem, de um eixo com rasgo de chaveta e de outras peças com variações no relevo, pode ocorrer a variação nas condições de resfriamento na superfície. Estas condições irão fazer com que a velocidade de resfriamento seja diferente em cada ponto, conduzindo também ao aparecimento de trincas, empenamentos ou mesmo pontos moles. Outro problema que pode ocorrer, este mais freqüente e mais simples é aquele em que temos pequenas diferenças de velocidade de resfriamento entre a superfície e o centro.

Neste caso o que pode acontecer é a formação de 100% de martensita na periferia da peça e um teor menor de martensita juntamente com bainita e/ou perlita nas regiões mais centrais. O que acontece uma redução da dureza em função da intercepção da Curva C no diagrama TTT, quando é levada a formação e perlita fina ou bainita. Esta transformação caminha em direção ao centro da peça, situação esta que nem sempre pode ser evitada. Esta situação pode ser induzida pelo meio arrefecente ou pelo tamanho da peça.

De acordo com o que foi acima exposto, o meio de resfriamento mais adequado é aquele que permite obtermos a maior quantidade possível de martensita na peça. Assim sendo

poderemos ter que resfriar a peça em salmoura, em água ou mesmo em óleo e outros produtos sintéticos, estes últimos para aços de construção mecânica ligados. Para aços de alta temperabilidade como aços para matrizes e ferramentas, tipo AISI-SAE 4340, pode-se utilizar até mesmo o resfriamento ao ar em alguns casos. Quanto maior a temperabilidade menos drástico terá que ser o meio de resfriamento utilizado.

3.2.3. OS PROBLEMAS DA INCIDÊNCIA DE TRINCAS

O problema da incidência da trinca, defeito irreparável, está associado com o resfriamento para a obtenção de martensita é a variação volumétrica da peça sendo fator preponderante no cálculo da batelada para o forno. Sempre que temos transformação martensítica teremos uma variação de volume e esta terá efeitos mais importantes quanto maior for a diferença de temperaturas de um ponto para outro.

Há sempre variação de volume no aço quando este é aquecido até o campo austenítico e após resfriado rapidamente para que se obtenha martensita. A diferença de volume entre a estrutura original e a estrutura final martensítica pode conduzir a empenamentos e até mesmo a trincas se as tensões surgidas como consequência da variação de volume ultrapassar o limite de ruptura do material. Quando temos diferenças de velocidade de resfriamento da periferia para o centro, por exemplo, forma-se uma capa de martensita que é dura e frágil e que ao aumentar de volume comprime o núcleo. Quando o núcleo por sua vez se transforma, este expande e provoca o aparecimento de tensões sobre a capa externa endurecida, podendo produzir trincas na peça (ROMANIV, 2005).

Embora tenhamos um significativo ganho na resistência mecânica e a dureza na têmpera, fatores primordiais quando se quer reduzir o peso da peça ou evitar o desgaste superficial, a ductilidade cai quase a zero. Como a utilização de um aço ferramentas nestas condições é impossível devido aos riscos de uma falha catastrófica, este problema tem que ser corrigido, com o revenido.

O revenido é um tratamento em que se faz o reaquecimento da peça temperada dentro de uma faixa de temperatura entre 150° C e 600° C geralmente. As peças são aquecidas e permanecem durante um intervalo de tempo suficiente para que ocorram as transformações necessárias à recuperação de parte da ductilidade e tenacidade perdidas, sendo após resfriadas até

a temperatura ambiente. Como consequência, teremos perda na resistência mecânica e na dureza. Quanto mais alta for a temperatura de revenido utilizada ou quanto maior for o tempo de tratamento, maior será o ganho em ductilidade e tenacidade e maior será a perda de resistência e de dureza.

Nesta faixa, portanto, não é conveniente que se faça o revenido porque, embora tenhamos redução na dureza e na resistência, não teremos em contrapartida um aumento de tenacidade.

Muitas peças de mecânica necessitam ter elevada dureza externa para resistirem ao desgaste; entretanto que internamente precisam permanecer dúcteis, para suportarem vibrações cíclicas permanentes ou alternadas.

Essas peças geralmente são em aço de baixa porcentagem de carbono e recebem um tratamento denominado CEMENTAÇÃO.

A cementação é um tratamento que consiste em aumentar a porcentagem de carbono numa fina camada externa da peça. Após a cementação, tempera-se a peça; as partes externas adquirem elevada dureza enquanto as partes internas permanecem sem alterações. A cementação é feita aquecendo-se a peça de aço de baixo teor de carbono, junto com um material rico em carbono (carburante). Quando a peça atinge alta temperatura (750°C a 1.000°C) passa a absorver parte do carbono do carburante. Quanto mais tempo a peça permanecer aquecida com o carburante, mais espessa se tornará a camada. Os carburantes podem ser sólidos, (grãos ou pós), líquidos ou gasosos. A qualidade dos carburantes influi na rapidez com que se forma a camada.

1ª Fase: Aquecimento

- Cementação em caixa: As peças são colocadas em caixas juntamente com o carburante, fechadas hermeticamente e aquecidas até a temperatura recomendada.
- Cementação em banho: As peças são mergulhadas no carburante líquido aquecido, através de cestas ou ganchos.

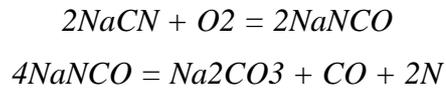
2ª Fase: Manutenção da temperatura

- O tempo de duração desta fase varia de acordo com a espessura da camada que se deseja e da qualidade do carburante utilizado. (0,1mm a 0,2mm por hora).

3ª Fase: Resfriamento – A peça é esfriada lentamente dentro da própria caixa.

Após a cementação as peças são temperadas.

Carbonitreção - É um processo realizado em aços baixo carbono, onde ocorre um enriquecimento na superfície tanto em carbono como em nitrogênio. Nesse caso a reação ocorre conforme a equação dada por:



Neste processo o aço é aquecido entre 700 e 800°C em uma atmosfera rica em carbono e em amônia. A peça é resfriada em óleo. O resultado desta operação consiste na deposição intermetálica do Nitrogênio na superfície da peça por difusão.

Esta abordagem deve-se ao contexto do uso SAE 1020, como aço ferramenta, após o tratamento termoquímico para carbonitreção a gás C_3H_8 ou NH_3 .

3.2.4. METALOGRAFIA E O CONTROLE DE QUALIDADE

Na perspectiva de poder registrar a intensidade de comprometimentos estrutural do AISI-SAE 4340 e SAE 1020, após o processamento de soldagem. Usando como método a microscopia óptica. Podemos tomar como base, a interpretação das imagens microestruturais – fotomicrografadas, método da análise metalográfica. Procedimento pelo qual o corpo de provas - CP soldado com o eletrodo especificado – E6013. Uma vez que o CP for caracterizado como aço liga, composto basicamente de Ni, Cr, Mo. Caracterizado pela alta temperabilidade, é selecionado para construção de matrizes e estampos.

Devidamente citado na Tabela 2.5. A, para construção de anéis, extratores e contrapunções, tem função de serem os mais solicitados. Por isto, deve-se ter a resistente a abrasão e ao desgaste, soldável por processo simples. Por outro lado, o SAE 1020 caracterizado por aço ao carbono tem tenacidade, ductibilidade, soldável, não adquire tempera, transforma martensita, mas em percentagem baixa não influenciando na dureza, mesmo assim, aplicando à rotina para tempera, estes aços não produzem martensita e sim duas fases: ferrita – $Fe \alpha$ mais perlita – $Fe \alpha + Fe_3C$.

O controle de qualidade de um produto metalúrgico pode ser estrutural e dimensional. O dimensional se preocupa em controlar as dimensões, tais como: comprimento, área e volume. Grandezas estas, de natureza físicas de um determinado produto. As quais denominamos de Metrologia. O controle estrutural preocupa-se com a natureza Macroscópica e Microscópica do

material, qual morfologia que a peça registra e suas interações com o ambiente metalúrgico-mecânico. Como também, sua composição, propriedades, aplicação, entre outras de interesse tecnológico.

Deste modo, pode ser: físico, químico, metalográfico. Portanto, a metalografia atua como ferramenta de controle da qualidade, consiste no estudo dos produtos metalúrgicos, com o auxílio do microscópio. Onde se pode observar, classificar e identificar a granulação do material, a natureza, a forma, a quantidade, e a distribuição dos diversos constituintes, multifásicos, entre outras as heterogeneidades e as inclusões. Heterogeneidades estas, apreciadas pelo técnico de projeto, manufatura e manutenção. A metalografia pode responder as perguntas dos técnicos e engenheiros, quanto à escolha de um produto metalúrgico, seja na produção, manufatura e projeto, tendo respostas:

- Para explicar a termodinâmica da solidificação;
- Para caracterizar a formação de fases;
- Para verificar o tamanho de grão;
- Para verificar o nível de inclusões;
- Para verificar o nível de segregação;
- Para determinar a aceitação de uma de uma matéria prima em relação a sua estrutura interna;
- Para verificar a incidência de trincas internas;
- Para avaliar o nível de microporosidade (estanqueidade);
- Para compreender a formação morfológica;
- Para projetar novos materiais (PAVARIN, 2010).
- Qualificar de fornecedor de produtos metalúrgicos e assemelhados
- Para correlacionar as fases e o tamanho de grão com as características mecânicas de um material:

3.3. O ENSAIO METALOGRÁFICO

O ensaio metalográfico tem como objetivo relacionar a microestrutura, com as suas propriedades físicas, mecânicas entre os quais, memoráveis como: O material de que é construída a peça, o processo de fabricação, o desempenho de suas funções no conjunto de

maquinas, os tratamentos térmicos independentes e associados, para beneficiamento, facilitar a conformação por retirada de cavacos e sem retirada de cavacos e outros. O controle do processo e do produto pode ser: Macrográfico e Micrográfico.

A ação de examinar o aspecto de uma superfície após devidamente polida e atacada por um reagente adequado. Por seu intermédio, o metalógrafo admite a idéia do conjunto, referendando a homogeneidade do material como: a distribuição e natureza das falhas, impurezas e ao processo de fabricação, apreciar a ZTA de soldagens em geral nos tubos com costura, regiões dendríticas em fundidos, segregações trincas – inclusive é a mais aplicada para análise de propagação de trincas e mecânica da fratura.

A micrografia remete ao técnico e ao engenheiro a liberdade de distinguirem-se: quais são as fases presentes no CP, a dimensão dos tamanhos de grãos, os tipos de materiais, os processos de fabricação, os benefícios dos tratamentos térmicos, as classificações das inclusões, classificação comercial do produto metalúrgico, a presença de poros, a presença de trincas ou fendas, soldas em tubos com costura, controle de ZTA e finalizando com a indicação de propriedades mecânicas e tecnológicas co-relacionadas.

3.4. ENSAIO DE CHARPY

O ensaio de Charpy é a técnica de análise, que se destina a medição da tenacidade dos materiais metálicos e não metálicos, associado a conservação de energia de mecânica. Teoria esta, explicada pela parte da mecânica física aplicada definida por: Dinâmica. Os resultados expressos por esse ensaio determinam a capacidade de absorção de energia mecânica até o rompimento por fratura. Todavia, para executar o ensaio, faz-se necessário observar as normas que o preconizam, como:

UNBR MB 360 regulamenta o entalhe em U.

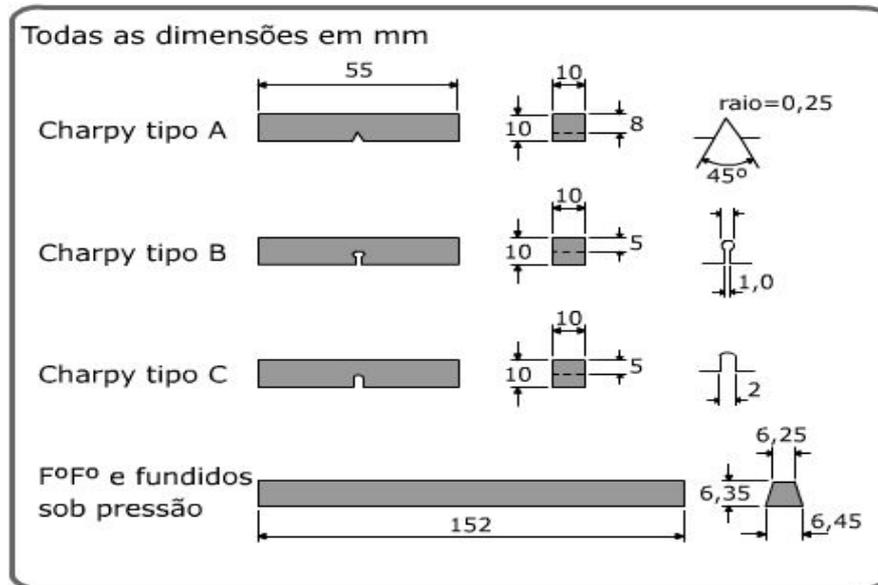


Figura 3.10 - registra o Tipo A - MB-360 regulamenta o entalhe em chapa/barra em V. Metals HandBook vol. 14 – Ohio - 1985.

3.4.1. PROCEDIMENTOS

A barra biapoada na horizontal livre para receber o impacto do martelo pendular, cujo peso especificado pelo lado oposto da bigorna espera. Primeiramente calibra-se a máquina escolhendo-se o ângulo e a altura em que o martelo será abandonado em queda livre. Deformando o corpo de provas permanentemente, marcando as deformações plásticas e frágeis, dependendo do material. Igualmente, na região próxima ao entalhe propicio ao rompimento a 20% de profundidade com relação a altura da barra, atua um estado de tensões triaxial com alta taxa de deformação, cuja fratura revela-se: Frágil ou Dúctil.

O fator de tenacidade do material é expresso em grandezas de energia Joule – J, para definir a energia absorvida pelo material no momento do rompimento por fratura. Caracterizado por frágil quando forma curva de beira de praia e dúctil quando faz pescoçamento fibroso.

Contudo, sabe-se que a energia absorvida na fratura diminui com a redução gradual da temperatura. Há determinada temperatura, abaixo da qual, o material passa a se comportar de

forma frágil, vezes por outra, não se tem uma temperatura bem definida, mas sim uma faixa de Temperatura de transição dúctil-frágil. Temperatura esta, definida como parâmetro de suma importância na seleção e aplicações de materiais destinados a construção naval, indústria do petróleo e do gás, produção de tubos de grandes diâmetros e toda sorte de vasos de pressões. Evidente que temperatura de transição dúctil frágil – TTDF depende de outras variáveis como: processamento mecânico – encruamento, composição química, tratamentos térmicos, tratamentos termomecânicos, microestrutura, fator de tenacidade – fadiga. Para controlar a TTDF, o único método que equilibra TTDF sem redução da resistência mecânica é o tratamento térmico de beneficiamento: recozimento para refinamento de grãos. Visto que o crescimento de grãos na faixa intermediária entre o metal base, zona de fusão e zona termicamente afetada – ZTA, estruturas resultantes de soldagem, conforme ilustrados nas figuras 3.9, 3.10 e 3.11.

A transição dúctil e frágil é função da temperatura e tem como base comparar dois materiais com as mesmas características geométricas. Mesmo não sendo absoluto, mas tem como parâmetro a lei de conservação de energia mecânica total, expressa a energia total absorvida até a fratura, expressão do Charpy convencional, de modo que a energia de propagação da trinca pode ser expressa pela soma vetorial das energias potencial e a energia mecânica.

O início da trinca, E_i é a parcela de energia de início de trinca e E_p é a energia de propagação total da trinca, então:

$$E_t = E_i + E_p$$

Para medir corretamente, os parâmetros envolvidos desenvolveram-se o ensaio instrumentado, no qual atem da energia absorvida de carga ao longo do tempo, medida por células da carga, transdutores em registro em osciloscópio, para registrar as curvas e possibilitar análise das mesmas e comparar com as contidas na literatura científica. Por fim, a análise destes parâmetros auxiliam na formação de um parecer técnico embasado na interpretação dos resultados obtidos pela formas de marcas deixadas na fratura.

3.5. ANÁLISE DOS RESULTADOS

A análise, ora descrita visa atender as metas traçadas neste trabalho, por seus objetivos específicos conforme listado como segue: Identificar as falhas, segregações e possíveis trincas na Zona Termicamente Atacada – ZTA; Apreciar as variações microestruturais resultantes de

aplicações de solda manual com eletrodo revestido E-6013; Analisar o comportamento em fadiga do aço ferramenta soldado com eletrodos revestido – processo manual - pelo ensaio de pendulo de CHARPY, Analisar o grau de comprometimento micro-estrutural na vizinhança da Zona Termicamente Atacada – ZTA e a suscetividade à fratura em condições de fadiga.

3.5.1. ANALISE METALOGRÁFICA

A apreciação metalográfica, confirmando o que foi registrado anteriormente, é uma importante ferramenta na caracterização dos materiais, em especial nesta abordagem, em que: Os aços SAE 1020 e AISI 4340. Para que se tenham resultados confiáveis, faz-se necessário um plano de estudo, tal como: técnica de preparação dos corpos de provas – dentro da norma vigente NBR 13.284, fotomicrografias e fotomacrografias em tecnologia digital. Para constar, seguem o registro fotomicrográfico para confirmar que os trabalhos foram realizados com esmero e dedicação.

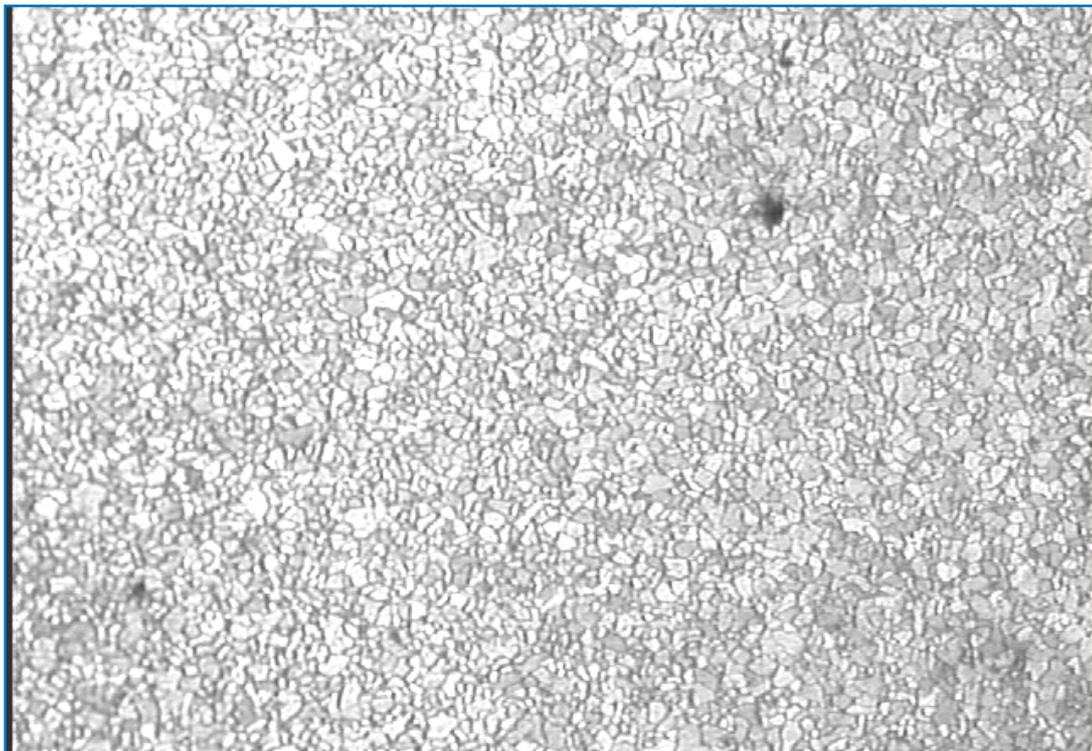


Figura 3.11 - Ilustra SAE 1020 – chapa de aço ao carbono – distinta pela região na vizinha mais distante da ZTA – estrutura: grãos pardos Perlita + grãos claros Ferrita, ataque Nital 2%, 160 X – Laboratório de Soldagem e Metalografia – IFAM -2010.

Na figura 3.11. Registra-se a fotomicrografia do SAE 1020, destacando a homogeneidade dos grãos de perlita e ferrita, natural de uma aço recozido ou normalizado, não revelando nenhuma alteração microestrutural, passível de aplicação a quaisquer processos de manufatura.

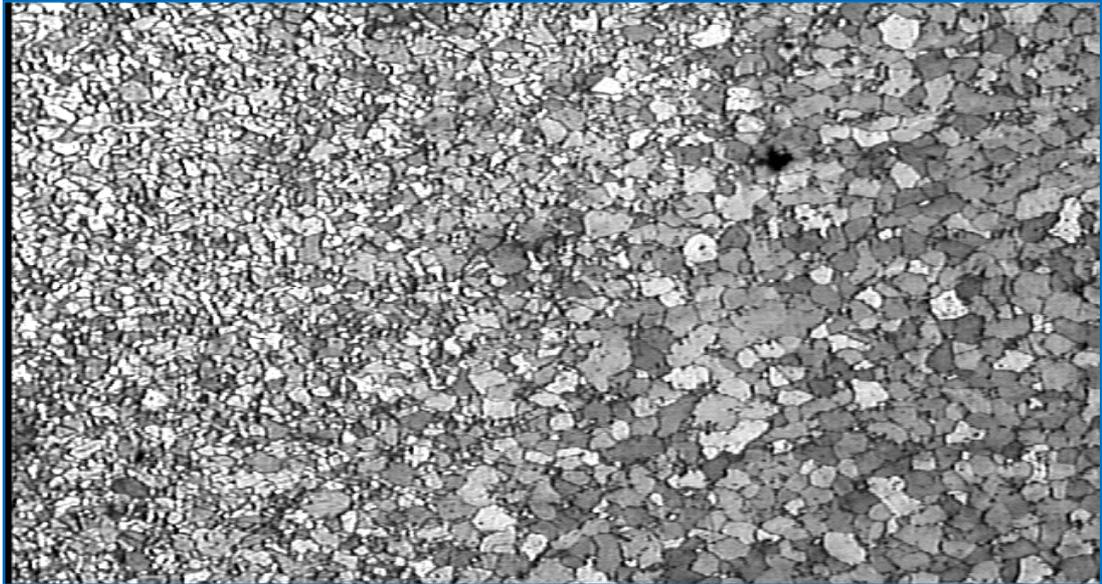


Figura 3.12 - Ilustra SAE 1020 – chapa de aço ao carbono – distinta pela região na interface da ZTA – estrutura: grãos pardos Perlita + grãos claros Ferrita, ataque Nital 2%, 160 X – Laboratório de Soldagem e Metalografia – IFAM -2010.

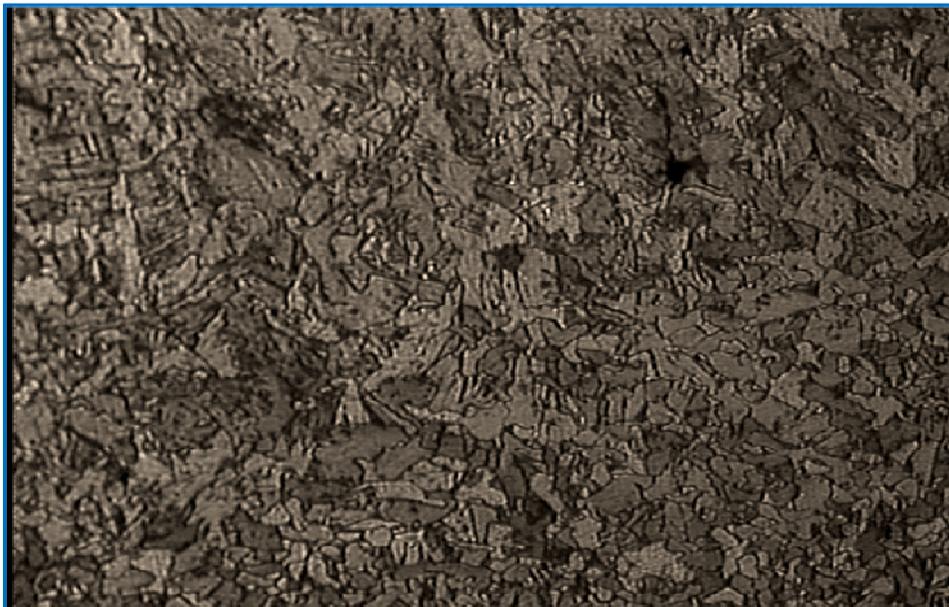


Figura 3.13 – Ilustra SAE 1020 – na interface da região da ZTA – caracterizado pelo início de ataque às deformação dos contornos de grãos, agregando tensões internas, estruturas: perlita (marrom) e ferritas acicular(claras), ataque Nital 2%, 160 X . Laboratório de Soldagem e Metalografia – IFAM -2010.

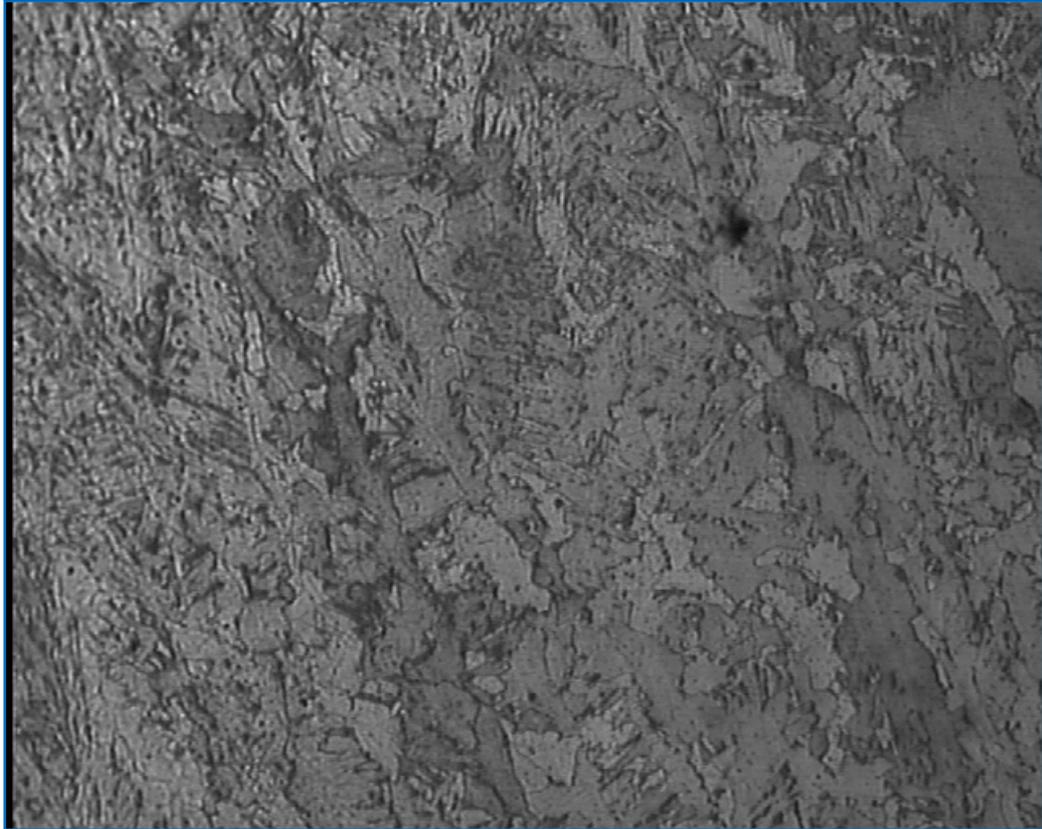


Figura 3.14 - SAE 1020 –Ilustra a região da zona de fusão do metal depositado por arco elétrico com eletrodo revestido E6013, estrutura de ferrita alotriomórfica nos contornos de grãos, ferrita acicular e bainita(perlita fina).
Laboratório de Soldagem e Metalografia – IFAM -2010.

3.5.2. ENSAIO CHARPY

O ensaio de Charpy é a técnica de análise, que se destina à medição da tenacidade dos materiais e está diretamente associado a capacidade de absorção da energia até a fratura. Todavia, para executar o ensaio, faz-se necessário observar as normas que o preconizam, tais como:



Figura 3.15 – Ilustra os corpos de provas dos Ensaios Charpy – Lab. Ensaios – IFAM Campus Manaus Centro 2011.

A figura 3.15 registra os corpos de provas obtidos como resultados do ensaio de Charpy, no qual, obtemos fratura dúctil para o aço SAE 1020 depois de soldado com E-6013, chanfro V na ZTA. Tal como obtidos na literatura Técnica (CALLISTER, 2002).

Como é avaliada a transformação microestrutural de um aço com mais de 0,2% carbono em função do aquecimento localizado, até a temperatura de fusão.

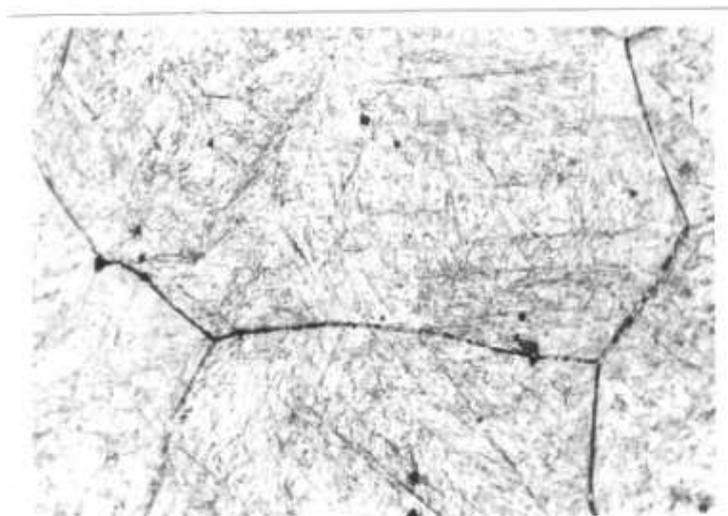


Figura. 3.16 - Ilustra a estrutura resultante de Têmpera e Revenido, microestrutural de martensita revenida e trinca 640 X aço SAE 1045, ataque Nital a 2%.

Na abordagem do estudo, a microestrutura da figura acima, assemelha-se àquela resultante do processo de soldagem, localizada na poça de fusão. E ocorre quando a energia de vibração dos átomos por conta do aumento da temperatura supera a energia envolvida na ligação química entre os átomos. A descrição deste fenômeno pode ser apreciada na curva esquemática do resfriamento – livre – que ocorre mediante a busca pelo equilíbrio térmico e o metal base local da união, e o metal de deposição, estas são as variáveis do sistema: Temperatura T e o tempo t no processo de resfriamento.

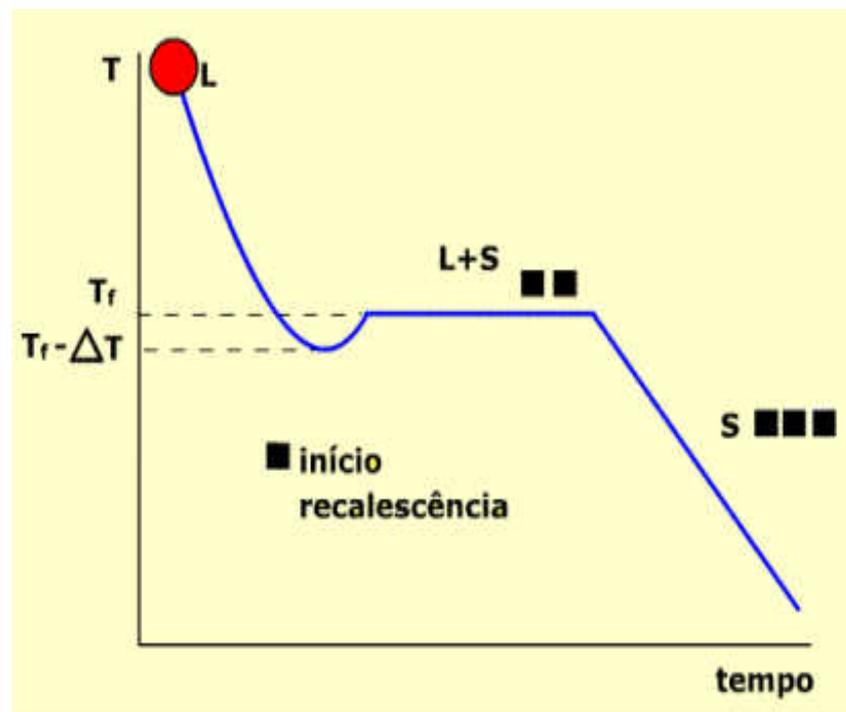


Figura 3.17 - Descritivo de variação da temperatura no tempo – durante o resfriamento.

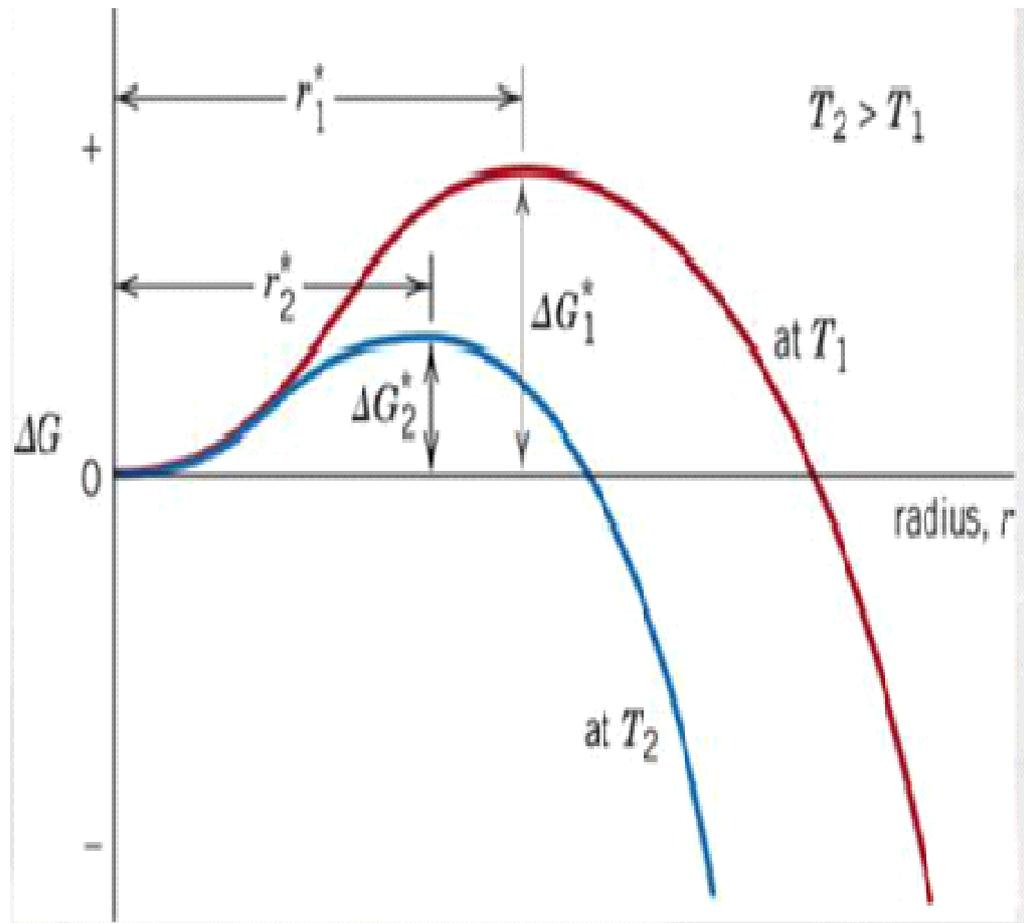


Figura 3.18 - Descritivo de como varia a energia livre em função da temperatura e do raio crítico atômico.

Faz-se referencia neste gráfico ao raio crítico entre os átomos, neste processo em que o raio crítico r^* diminui com o aumento de T , portanto: Quanto maior for o super-resfriamento menor será r^* e por conseguinte G_v a variação da energia livre.

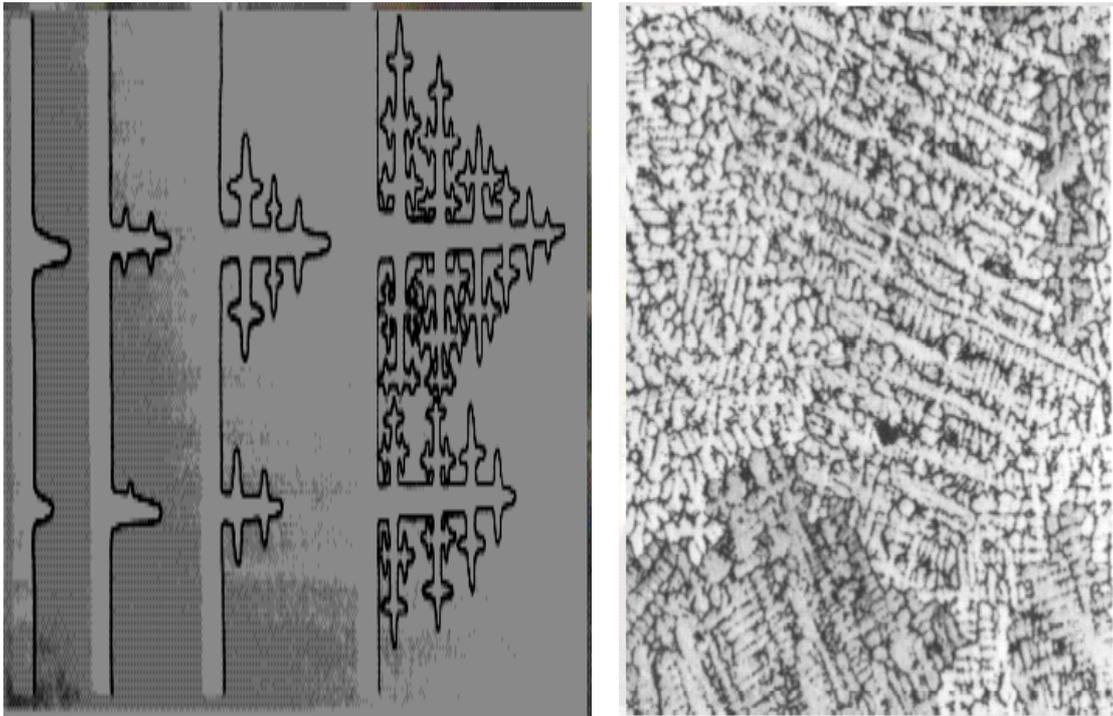


Figura 3.19 - Aspecto do fenômeno da solidificação, à esquerda o esquema e a direita a fotomicrografia de um sistema de estruturas dendríticas.

Por conseguinte, as figuras acima destacam os fenômenos do estado sólido evidenciado pela formação dendrítica nos quais nucleação transforma os cristais em grãos sem evitar o fenômeno da formação dendrítica resultante da solidificação durante a soldagem – o fenômeno de molhar a superfície sólida com a superfície líquida do material de deposição.

Com base na fenomenologia da solidificação, fazemos um estudo das uniões dissimilares entre AISI 4340 e SAE 1020, contido no eletrodo E-6013, admitindo-se como a metodologia, o ensaio metalográfico, devidamente explicado como os aços ferramentas se transformam em função do calor recebido. Para este fim, processemos a viagem pela microestrutura resultante da soldagem dos dois aços, sendo em primeiro lugar o SAE 1020 e eletrodo E-6013, em segundo lugar o AISI 4340 e E-6013.



Figura 3.20 - Ilustra a resultante estrutural de uma deposição dessemelhante com a observação de que está trincada - lado esquerdo da imagem como se houvesse severidade no resfriamento, 160 X, ataque nital a 2%.

No entanto trata-se da natureza da união de soldagem nas proximidades da zona termicamente afetada - ZTA, este fenômeno só é visível mediante a abertura da microestrutura e atacada como reativos a base de ácido nítrico – nital 2%. A trinca observada resulta de heterogeneidade de materiais, catalisadas em função do aquecimento gerado na soldagem.

No entanto trata-se da natureza da união de soldagem nas proximidades da zona termicamente afetada - ZTA, este fenômeno só é visível mediante a abertura da microestrutura e atacada como reativos a base de ácido nítrico – nital 2%. A trinca observada resulta de heterogeneidade de materiais, catalisadas em função do aquecimento gerado na soldagem.



Figura. 3.21 - Ilustra a trinca da figura anterior, 320 X atacada com Nital 2%.

Esta figura reflete a severidade do resfriamento e a capacidade do aço transformar em microestruturas extremamente duras, sujeitas a trincas.

A região parcialmente fundida se expande a um ou dois grãos dentro da zona termicamente afetada (ZTA), e é caracterizada pela liquação do contorno de grão, que pode resultar em trincas à quente durante o processo de soldagem ou tratamento térmico pós-soldagem (PWHT).

As transformações apreciadas na figura acima, responde ao questionamento, é possível soldar aços ferramentas? Pela transformação causada na ZTA, não. Porque o aquecimento gerado na soldagem, transformam a microestrutura em textura vítrea pela extrema dureza e as tensões internas as trincas.



Figura. 3.22 - Ilustra o mesmo material – porém resfriado ao ar depois da deposição, pelo lado esquerdo o metal base e a direita o material de deposição, microestrutura martensita e ferrita acicular pela direita 160 X, ataque nital 2%.

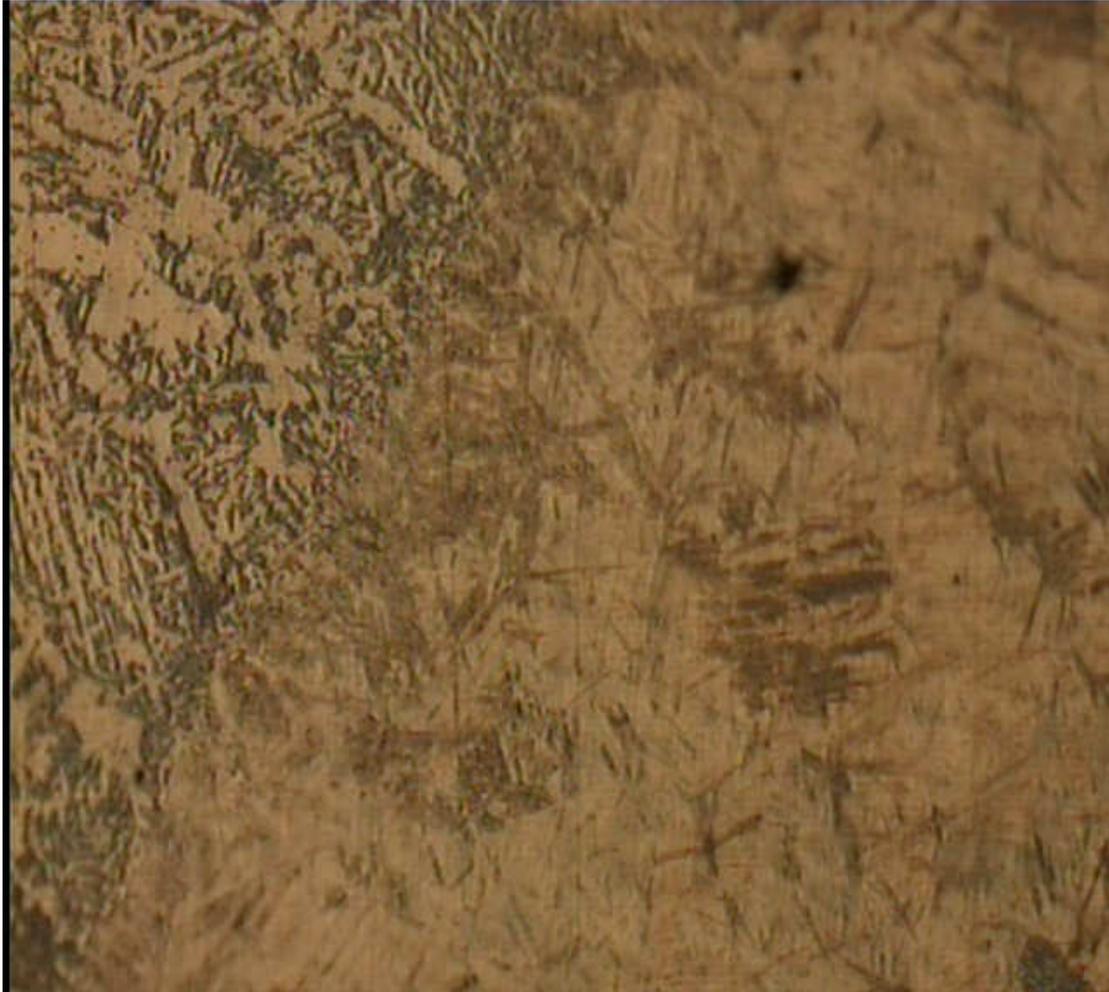


Figura. 3.23 - Ilustra a interface entre metal base e metal depositado no AISI 4340 – destacando as transformações da ZTA – 320 X ataque nital a 2%.

Da figura acima, podemos afirmar que há estrutura dendrítica no metal depositado – a esquerda da imagem e a direita a presença de martensita e ferrita acicular, resultante de super-resfriamento. O metal base atuando como molde, lingoteira ou coquilha, as heterogeneidades apreciadas até aqui, denotam a presença de tensões, por trata-se de aços dessemelhantes.

Na extensão da amostra colhida, podemos apreciar as mudanças causadas pela ZTA, independente do tipo de resfriamento:

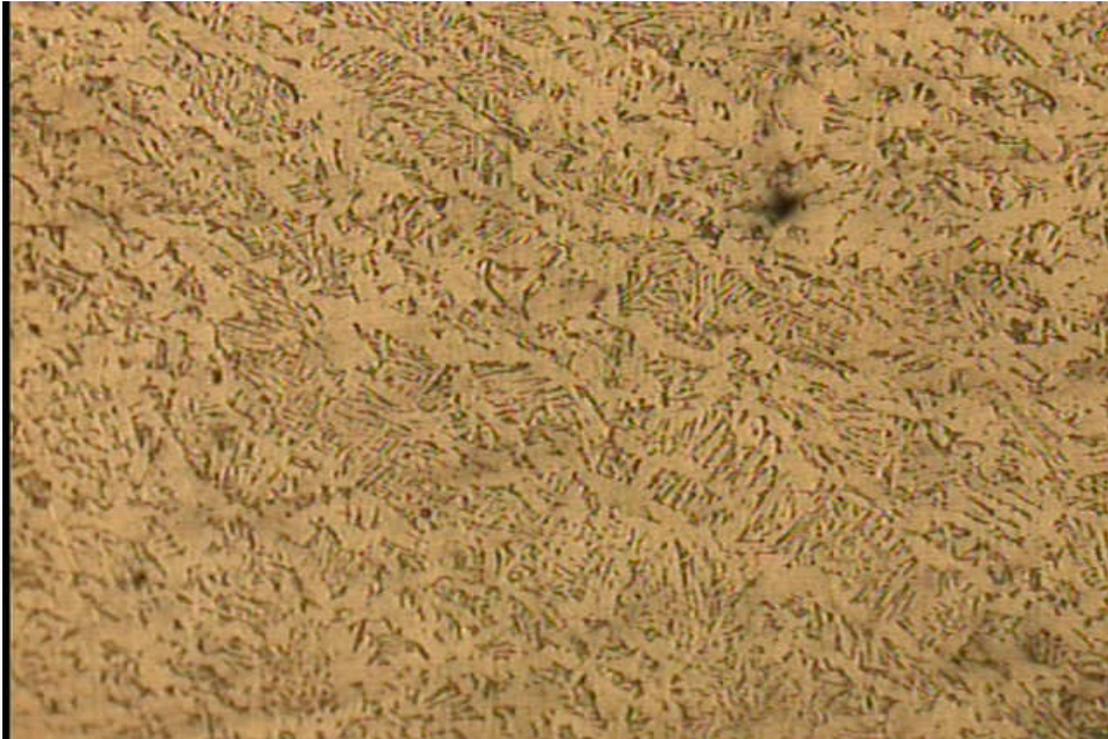


Figura 3.24 - Tem como função a de comparar as microestruturas, a poça de fusão fora da ZTA e a direita o substrato – metal base, AISI 4340 a 160 X, ataque Nital 2%.



Figura 3.25 - Tem como função a de comparar as microestruturas, a poça de fusão fora da ZTA e a direita o substrato – metal base, AISI 4340 a 160 X, ataque Nital 2%.

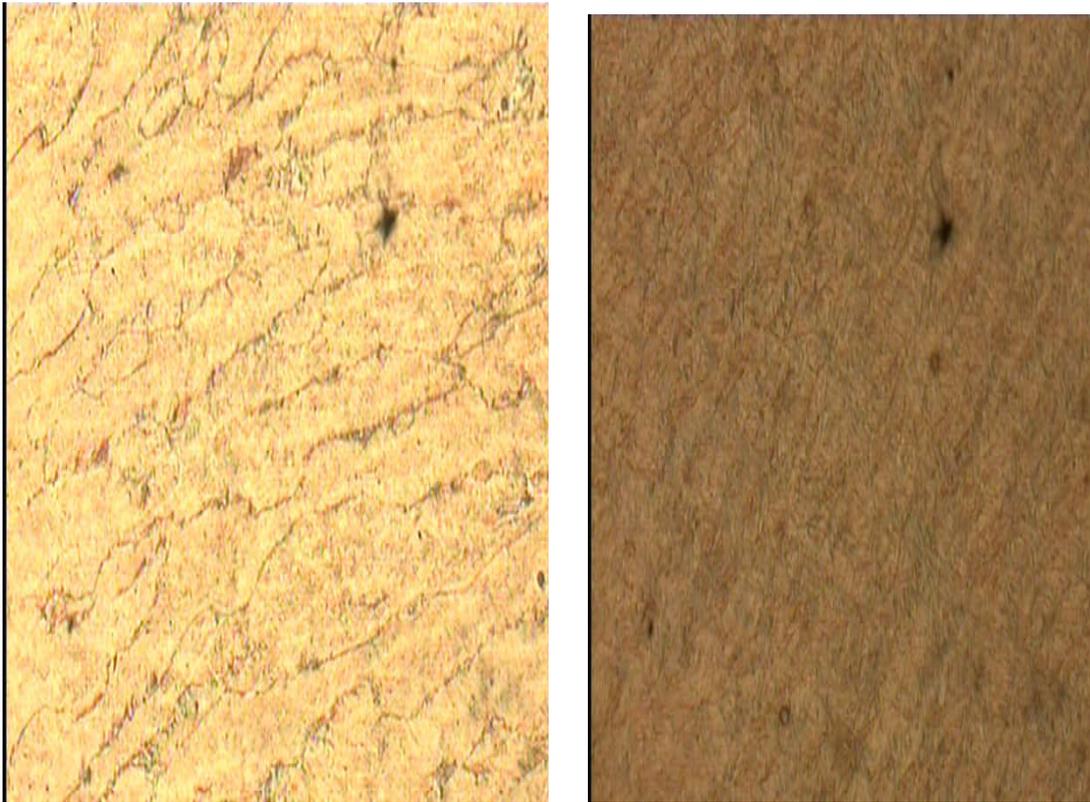


Figura 3.26 e 3.27 - Ilustra a poça de fusão fora de ZTA, resfriada em água a 25°C e o sub-estrato, após a deposição amostral, 160 X, Nital 2%.

Embora o aspecto reflita heterogeneidade microestrutural, não é observado trincas, porém na imagem da esquerda há tensões internas, na base de SAE 1020, contida nos eletrodos E-6013.

As trincas observadas nas fig. 3.26 e 3.27 se assemelham às trincas causadas pelo fenômeno da corrosão intergranular catalisando pela presença do elemento de liga Ni e Cr, desenvolvidas nos contornos de grão sobre a matriz martensítica.

O aço empregado para a extração da amostra, contém alto teor de Cr e 0,38% de C, os ensaios demonstram que o tratamento térmico não foi de acordo com os métodos normalmente adotados para este material. As demais trincas apresentadas resultam de material temperado e não revenido, como ocorre nos casos e resfriamento ao ar, no processo de soldagem de aços ferramentas. Tais como os usados para construção de moldes matrizes e outros dispositivos de conformações: Plásticas, Elásticas e de Cisalhamentos.

CAPÍTULO IV

CONCLUSÕES, SUGESTÕES

4.1. CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos inicialmente pela metalografia do Aço SAE 1020 podemos constatar as transformações causadas pelo superaquecimento do arco elétrico da solda e as interferências nas microestruturas dos materiais. Em análise qualitativa, as zonas de inspeção, apresentam variações na microdureza, conforme conferidas na zona de fusão - ZF, na zona termicamente atacada – ZTA e no metal base das uniões soldadas. As diferenças são distintas nas condições: a técnica recozimento pleno e a técnica do normalizado tal como laminada a quente.

A amostra recozida com parâmetro de máquina: 500 g, 30 s. Foi conferindo a microdureza em Dureza Vickers igual a 160,66 HV na zona de fusão - ZF em seguida, conferindo a zona termicamente afetada – ZTA em Dureza Vickers igual a 173,66 HV Comparando-se as grandezas em percentagem, a ZTA é 7,48% mais dura do que a ZF. No metal base verificou-se a Dureza Vickers igual a 166 HV, definida com acerca de 4,41% mais dúctil do que ZTA.

Conferindo as microdureza na Amostra SEM o devido tratamento térmico - recozimento pleno, com parâmetro de maquina: 1000 g, 30 s. Pode-se conferir que: Na ZTA igual a 317 HV, ZF igual 199,66 HV e No metal Base 194,66 HV. Admite-se que o quantitativo de dureza da ZF é 62,98% mais dúctil do que ZTA. Com relação ao metal base ZTA é 61,40% mais dura do que o metal base. Portanto, no aço baixo carbono as variações são consideráveis, no aço médio carbono as variações poderão ocorrer de modo proporcional. O comportamento do aço SAE 1020 em consideração a sua soldabilidade confirma-se que é facilmente soldável e por isto, a indústria de consumíveis oferecem ao mercado, núcleos de eletrodos construídos com o mesmo. Eis o motivo pelo qual se decidiu o uso do eletrodo E 6013 neste trabalho, o qual advém da condição de que protege a zona de fusão - ZF e não compromete a estrutura do metal. Para confirmar a estabilidade, quanto à agressão do metal afirma-se que se deve ao fato de que as microdurezas estão sempre próximas em valor numérico para um mesmo parâmetro, tal como considerado na Tabela 4.1., estado normalizado – resfriado ao ar livre.

Tabela 4.1 – Torre Cilíndrica de Absorção a Baixa Pressão

Característica do material	Energia absorvida	Energia absorvida esperada
Tal como Laminado	9	8
Normalizado a 900° C	155	148
Normalizado a 800° C	74	75
Recozido	12	12

Fonte: Journal Failure Analysis and Prevention – School of Mechanical and– China 2009.

Os ensaios de impacto CHARPY, em seus resultados indicam que a energia absorvida pelas amostras extraídas do Cilindro em questão, absorveu energia das amostras originais – Tais como laminadas e recozidas são divergentes como os limites nominais especificadas pelo padrão Chinês. Portanto, os materiais normalizados apresentam maiores valores do que os valores especificados. Sendo assim, os resultados revelam que os processos de tratamentos térmicos interferem e podem melhorar o desempenho do material soldado após ampla submissão ao processo metalúrgico da soldagem. Em análise aos resultados obtidos nos ensaios de Charpy, de amostras extraídas dos aços SAE 1020 e AISI 4340 expressos na Tabela 4.2 abaixo.

Tabela 4.2 - Energia Absorvida no ensaio do SAE 1020 – Soldado Chanfro em V

Amostras	Energia Absorvida Joule	Carga, Joule a 160°	Observação
01	30,64	50	Fratura Dúctil
02	38,85	50	Fratura Dúctil
03	35,98	50	Fratura Dúctil
04	37,44	50	Fratura Dúctil
05	31,64	50	Fratura Dúctil

Os resultados obtidos com o aço SAE 1020 são em média 32,91 Joules, e a superfícies das amostras ensaiadas são brilhante, significando que o material apresenta ductibilidade, consistente com o aumento da absorção de energia durante o teste.

Em virtude da pouca diferença entre as microdurezas de ZTA recozida e ZTA normalizada a erma do aço SAE 1020 após a soldagem: em estudo preliminar como este, não é possível admitir que a ZTA de um material seja igual à ZTA de outro material, como se admite nos cálculos estruturais em que se considera trata-se de uma mesma peça com continuidade única. Outros pontos críticos são: os elementos de ligas, as impurezas da interação gás metal, a unidade relativa do ar em que a operação é aplicada.

Conferindo os resultados obtidos nas operações destinadas aos rompimentos de dez amostras, na máquina de ensaio Pêndulo de Charpy.

Os ensaios de Charpy revelam que a energia absorvida foi muito maior do que o esperado para um aço SAE 1020 estrategicamente soldados, cujas dimensões atendem as normas ASTM do tipo B, conforme tabulação contidas na Tabela 4.1. , dos resultados obtidos (MA, Gang;LING,Xinahg;SHANG,Lijing;YU,Xiaoguang, 2009). Pela comparação com os trabalhos de análise de falha para uma torre cilíndrica usando como material – Padrão Chinês 16MnR a 0°C, adotando-se como carga padrão 31 Joule,

4.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Aconselha-se a adotar, uma sistemática de que todos os ensaios mecânicos sejam aplicados.
- Estudos para melhorar os processos de soldagem, de tal modo que se reduza o impacto na microestrutural do material.
- Intensificar os estudos dos tubos com costura, para reduzir a susceptividade a fratura na solda por fadiga.
- intensificar os estudos da recuperação de molde e dispositivos de conformação plástica.
- Estudos de controle da unidade relativa do ar no ambiente de soldagem.
- Estudar as interações do estado a plasmático, peculiar as soldagem.

Pelos estudos, pode-se admitir que haja necessidade de propor novos métodos de soldagem.

CAPÍTULO V

REFERÊNCIAS

5.1. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSIS, L. F. Industria Naval Brasileira Renasce Forte. *Revista ABENDI*, 2010.

ALTAN, T. *Comformação de Metais: Fundamentos e Aplicações*. Sao Carlos: Publicação EESC-USP, 1999.

AZEVEDO, C. R., & CESCUN, T. *Metalografia e Analise de Falhas - Casos 1933-2003*. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnologicas – IPT, 2004.

BRANCO, C. A. *Fadiga de Estruturas Soldadas*. 2. ed. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1999.

BRANCO, C. Moura, FERNANDES, A. Augusto, CASTRO, Paulo M. S. Tavares de – *Fadiga de Estruturas Soldadas*- Ed. Fundação Calouste Gulbenkian – Lisboa, 1999.

BRESCIANI, E. F. *Seleção de Materiais Metalicos*. Campina -SP: Unicamp, 1991.

CAHN, R. W., & HAASEN, P. *Physical Metallurgy*. Amsterdam, 1996.

CALLISTER, W. D. *Ciencais e Engenharia de Materiais uma Introdução*. Rio de Janeiro: LTC Livros Tecnicos Cientificos Editora, 2002.

CHIAVERINI, V. *Tecnologia Mecnica*. Sao Paulo: McGraw Hill, 1986.

DOBIGNIES, A. A. Estudo do rendimento de deposição de material na soldagem. *Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Parana* (p. 148). Curitiba: Universidade Federal do Parana, 2008.

GANG Ma, X. L. Fracture Analysis on a Cylindrical Shell Section of the Low-Pressure Absorption Tower. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 2009, Volume 9, Number 3, 2009.

HOFFMAN, W. A. Martins. Congresso Anual da Sociedade Brasileira de Gestão do Conhecimento. Workshop Brasileiro de Inteligencia Competitiva e Gestão do Conhecimento/Prospecção tecnologica sobre fabricacao de moldes de injeção de Plasticos. Sao Paulo, 2002.

MARQUES, Paulo Villani; MODENESI, Paulo José; BRACARENSE, Alexandre Queiroz – *SOLDAGEM: Fundamentos e Tecnologia – 3. Edição Atualizada*. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2010.

MONTEIRO, Alberto de Castro. *Relatorio de Ensaio de Impacto*. Manaus: Mestrado Interinstitucional em Engenharia Mecânica e de Materiais - Minter Manaus- Universidade Tecnológica Federal do Parana – UTPr, 2008.

NEMECEK, S.;Novy, Z. ; STANKOVA, H. (2006). Optimization of Heat Treatments of TRIP Steels. *La Metallurgia Italiana*, 2006.

OHNO, ATSUMI – Solidificação dos Metais – Livraria Ciências e Tecnologia – São Paulo, 1988.

PADILHA, A.F., CICILIANO, F. Encruamento, Recristalização, Crescimento de Grãos e Textura – Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Minas – ABM – São Paulo-SP 2005.

ROMANIV, O. Strutral Fracture Mechanics And Control Of The Properties of Strutral Alloys. *Mateirial Sacience* , Vol. 41 No. 4, 2005.

TANANKO, I.A.,BELOZEROV,V.V.;MAKHATILOVA. (2010, Novembro 03). *Struture of High-Carbon Steel Hardening Martensite And The Change in During Low-Temperature Tempering*. Retrieved novembro 03, 2010, from [www.springerlink.com: http://www.springerlink.com/content/j684544x69724030/fulltext.pdf](http://www.springerlink.com/content/j684544x69724030/fulltext.pdf)

TSCHIPTSCHIN, Andre Paulo; GOLDENSTEIN, Helio; SINATORA, Amilton – Metalografia dos Aços – Associação Brasileira de Metais- ABM, São Paulo, 1988.

WAINER, Emilio; BRANDI, Sergio Duarte; MELLO, Fábio Dècourt Homem de- SOLDAGEM: Processos e Metalurgia – 7ª. Edição Revisada - Edgad Blucher LTDA - São Paulo, 2010.

www.answers.com/topic/rutile. (2010, julho 30). www.google.com. Retrieved jul 30, 2010, from answer: www.google.com

www.esab.com.br/br/por/podutos/consumiveis/eletordos/inox.cfm. (2010, jul 30). *eletrodos açõs inoxidaveis*. Retrieved jul 30, 2010, from www.esab.com.br: <http://www.esab.com.br>

YU Hua Tan; DE CHANG Zeng; XI CHUN Dong; YUE HUI He and Shu Qin Hu. (1992, may volume 23A). New Observatio of Martensite Morphology and Substructure Using Trnasmission Electron Microscopy. *Metallurgical Transactions A* , 1992.

ZAMPANO, P. J., HIPERT, E. J., DONATO, V., & KASPARY, T. B. Especificações Técnicas para Critérios Alternativos Baseados na Mecanica da Fratura para Soldagem de Dutos Submarinos. *Revista ABENDI* , 2010.