



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS AMBIENTAIS E TECNOLÓGICAS
BACHARELADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

FRANCISCO XAVIER GRANJEIRO JUNIOR

**RELAÇÃO ENTRE ENERGIA DE SOLDAGEM, TENACIDADE E DUREZA NA ZONA
AFETADA PELO CALOR DO AÇO ESTRUTURAL**

MOSSORÓ - RN

2017

FRANCISCO XAVIER GRANJEIRO JÚNIOR

**RELAÇÃO ENTRE ENERGIA DE SOLDAGEM, TENACIDADE E DUREZA NA ZONA
AFETADA PELO CALOR DO AÇO ESTRUTURAL**

Monografia apresentada à Universidade Federal Rural do Semi – Árido - UFERSA, Campus Mossoró, para a obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Orientador: Prof. Dr. Francisco Edson Nogueira Fraga – DCAT/UFERSA.

MOSSORÓ-RN

2017

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

G756r Granjeiro Júnior, Francisco Xavier.
RELAÇÃO ENTRE ENERGIA DE SOLDAGEM, TENACIDADE
E DUREZA NA ZONA AFETADA PELO CALOR DO AÇO
ESTRUTURAL / Francisco Xavier Granjeiro Júnior. -
2017.
53 f. : il.

Orientador: Francisco Edson Nogueira Fraga.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia
Mecânica, 2017.

1. Zona Afetada pelo Calor. 2. Energia de
Soldagem. 3. Dureza. 4. Tenacidade. I. Nogueira
Fraga, Francisco Edson, orient. II. Título.

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

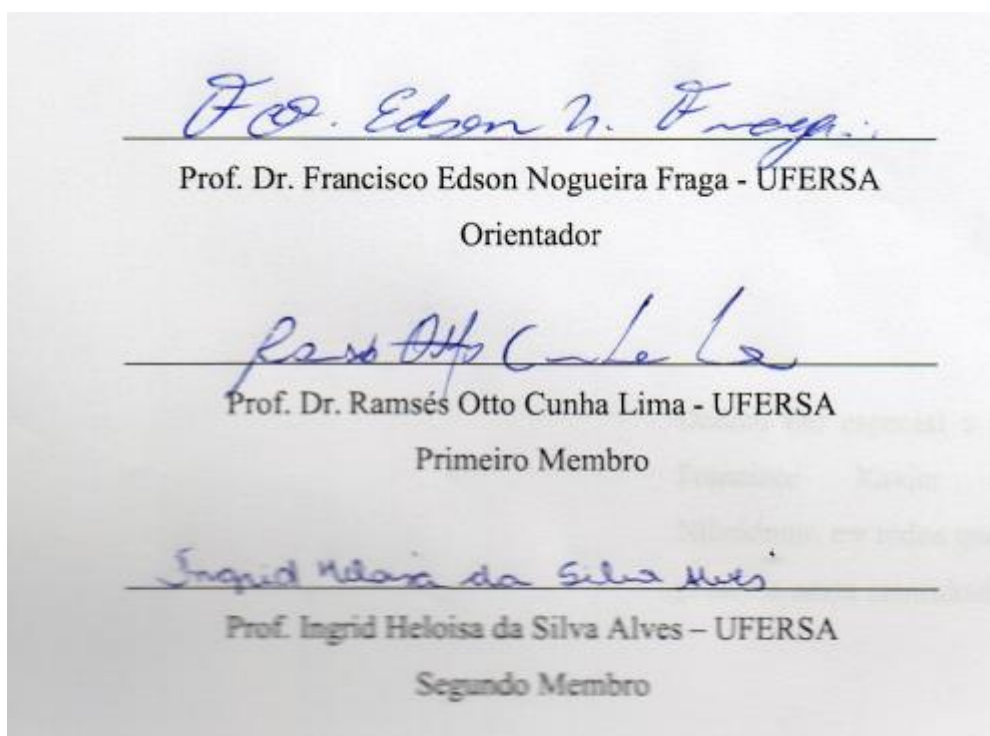
FRANCISCO XAVIER GRANJEIRO JÚNIOR

**RELAÇÃO ENTRE ENERGIA DE SOLDAGEM, TENACIDADE E DUREZA NA ZONA
AFETADA PELO CALOR DO AÇO ESTRUTURAL**

Monografia apresentada à Universidade
Federal Rural do Semi – Árido - UFERSA,
Campus Mossoró, para obtenção do título de
Engenheiro Mecânico.

Aprovado em: 19/05/2017

BANCA EXAMINADORA



DEDICATÓRIA

Dedico em especial a meus pais,
Francisco Xavier e Maria
Niheidmar, e a todos que estiveram
presente nesta caminhada.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus.

A meus pais e familiares, que mesmo com toda dificuldade que a vida nos propôs, nunca deixaram de acreditar no meu sonho, e hoje se fazem presente em uma etapa importante da minha vida.

A todos os amigos que fiz na universidade, que juntos trilhamos esse caminho árduo e gratificante que é o universo acadêmico, além de termos divididos nossas alegrias, angústias e aprendizados.

Ao Professor orientador Francisco Edson Nogueira Fraga, por ter acreditado no meu potencial, demonstrando sua total atenção e apoio no desenvolvimento deste trabalho.

A todos os professores do curso de Engenharia Mecânica, que foram capazes de transmitir, além do conhecimento necessário, as diretrizes essenciais que um bom profissional de engenharia é preciso ter no seu trabalho.

A Instituição UFERSA pela oportunidade de uma formação acadêmica.

“Não confunda derrotas com fracasso nem vitórias com sucesso. Na vida de um campeão sempre haverá algumas derrotas, assim como na vida de um perdedor sempre haverá vitórias. A diferença é que, enquanto os campeões crescem nas derrotas, os perdedores se acomodam nas vitórias.”

(Autor Desconhecido)

RESUMO

A tenacidade e dureza, são bastantes importantes na área da indústria, principalmente em situações em que há processo de soldagem, onde qualquer variação de um parâmetro de soldagem, como tensão, corrente ou velocidade de soldagem, altera a energia de soldagem, podendo acarretar no aumento ou diminuição dos valores dessas propriedades. Nesse caso, a região de mais interesse em uma junta soldada é a da zona afetada pelo calor (ZAC), já que nele acontece mudança microestruturais em diferentes sub-regiões, variando o valor da tenacidade ou dureza ao longo dessa região. Além da energia de soldagem, outros fatores podem contribuir na variação dessas propriedades, como o tamanho de grão, composição química, temperatura de pré-aquecimento e velocidade de resfriamento. Por isso este trabalho teve como objetivo estudar a influência da energia de soldagem na dureza da região grosseira da ZAC em um aço estrutural, bem como a variação do tamanho grão nessa região, e comparar o resultado da dureza com o da tenacidade, feita por um outro trabalho para mesma região de interesses nas mesmas condições de soldagem. Para que os objetivos sejam alcançados, foi feita medições de dureza na região da junta soldada de interesses para duas energias de soldagem diferentes, e comparar os resultados com a micrografia, analisando a influência do grão, e depois foi feita a comparação desses resultados com a de tenacidade, feita por outro autor. No final deste trabalho pode-se perceber que o aumento da energia de soldagem de 109,38 kJ/cm para 139,91 kJ/cm, a dureza na região grosseira da ZAC teve uma diminuição de 78,3 HRB para 71,3 HRB.

Palavras – Chave: Zona Afetada pelo Calor (ZAC). Energia de Soldagem. Dureza. Tenacidade.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Relação entre dureza e o limite de resistência à tração para aço, latão e ferro fundido	13
Figura 2: Variação da dureza ao longo da região da ZAC.	15
Figura 3: Regiões onde foram feitas as medições de dureza.	18
Figura 4: Distribuição do perfil de dureza das juntas, para cada energia de soldagem.....	18
Figura 5: Perfis de dureza no metal de base, da ZAC e do metal de solda, em função da distância, para diferentes energias de soldagem: (a) 0,3 kJ/mm; (b) 0,6 kJ/mm; (c) 0,9 kJ/mm; (d) 1,2 kJ/mm; (e) 1,4 kJ/mm; (f) 1,6 kJ/mm.....	19
Figura 6: Navio Liberty na Segunda Guerra Mundial.	20
Figura 7: Corpos de prova para ensaio de impacto, conforme a norma ASTM E23 (a) Localização do corpo de prova no equipamento para ser ensaio Charpy (b) e Izod (c).	22
Figura 8: Representação esquemática de um equipamento utilizado para o ensaio de impacto.	23
Figura 9: Faces da fratura de um material ensaiado por ensaio Charpy e diversas temperaturas.	24
Figura 10: Gráfico genérico de energia absorvida x temperatura obtido pelo ensaio de impacto Charpy.	24
Figura 11: Representação esquemática da região da solda. (a) Região de refino de grão e (b) região de granulação grosseira da ZAC.....	26
Figura 12: Ciclo Térmico de soldagem, onde T_p – Temperatura de pico; T_c – Temperatura crítica; t_c – Tempo de permanência acima da T_c	26

Figura 13: Microestruturas nas diferentes regiões da ZAC	27
Figura 14: Distribuição da temperatura do aporte térmico nas transformações microestruturais da ZAC de uma junta soldada, tendo como referência as temperaturas de transformação do diagrama Fe-C	28
Figura 15: Repartição térmica para diferentes energias de soldagem H_1 e H_2	29
Figura 16: Ripas típicas de ferrita acicular a partir de inclusões (pontos negros) em um depósito de solda	32
Figura 17: Abertura da ponta da Trinca (CTOD).	33
Figura 18: Ilustração do afastamento da ponta da trinca (CTOD)..	33
Figura 19: Representação do processo de abertura na ponta da trinca.....	34
Figura 20: Macrografias dos corpos de prova com diferentes energias de soldagem.	36
Figura 21: Estado superficial dos corpos de prova antes e depois da limpeza	38
Figura 22: Regiões do corpo de prova onde foram feitas as medições de dureza.....	39
Figura 23: Resultados das médias com os desvios padrões do ensaio de dureza.....	41
Figura 24: Comportamento da dureza ao longo da ZAC.....	42
Figura 25: Macrografia ilustrando os locais de medições de dureza.....	42
Figura 26: Micrografias das regiões dos grãos grosseiros para as duas energias de soldagem	43
Figura 27: Gráfico de distribuição normal com o valor de “t crítico bi-caudal”.....	45
Figura 28: Localização dos pontos de endentação para obtenção de microdureza em uma junta soldada.	48
Figura 29: Perfil de dureza ao longo de uma junta soldada.....	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Diminuição do valor da dureza causada pelo retardamento da velocidade de resfriamento.	16
Tabela 2: Valores médios dos parâmetros e da energia de soldagem.	37
Tabela 3: Valores das medições de dureza para os corpos de prova soldados com a energia de soldagem de 109 kJ/cm.	40
Tabela 4: Valores das medições de dureza para os corpos de prova soldados com a energia de soldagem de 139,91 kJ/cm.	40
Tabela 5: Comparação entre a dureza e a energia absorvida quando há um aumento da energia de soldagem.	44
Tabela 6: Tabela “t-student” para diferente energias de soldagem.	45

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
2	OBJETIVOS	11
2.1	OBJETIVO GERAL	11
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	11
3	REFERENCIAL TEÓRICO	12
3.1.	MEDIÇÃO DE DUREZA	12
3.1.1.	Fatores que Influenciam na Dureza na Região da ZAC	14
3.1.1.1.	Aporte Térmico	14
3.1.1.2.	Composição Química e Temperabilidade.....	15
3.1.1.3.	Velocidade de Resfriamento e Pré-Aquecimento	16
3.1.1.4.	Energia de Soldagem	17
3.2.	SURGIMENTO DO ENSAIO DE IMPACTO CHARPY	20
3.2.1.	Ensaio de Impacto	22
3.2.2.	Transição Dúctil-Frágil.....	23
3.3.	IMFLUÊNCIA DO APORTE TÉRMICO NA TENACIDADE DA ZAC DO AÇO ESTRUTURAL	25
3.4.	INFLUÊNCIA DA TENACIDADE NO CORDÃO DE SOLDA.....	30
3.4.1.	Tamanho do grão.....	31
3.4.2.	Inclusões não-metálicas	31
3.4.3.	Produtos de transformação.....	32
3.5.	ENSAIO CTOD – CRACK TIP OPENING DISPLACEMENT	33
3.5.1.	Comparação entre o Ensaio Charpy e o CTOD	35

4. MATERIAL E MÉTODOS.....	36
4.1. PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA	38
4.2. ENSAIO DE DUREZA	39
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	41
5.1. ANÁLISE DOS RESULTADOS DA MEDIÇÃO DE DUREZA	41
5.2. ESTATÍSTICA	46
6. CONCLUSÕES	48
7. PROPOSTA DE UM TEMA PARA UMA FUTURA PESQUISA	49
REFERÊNCIAS	51

1 INTRODUÇÃO

Projetar estruturas e monumentos históricos com a intenção de evitar a sua falha não é uma novidade. Desde a antiguidade o homem busca atingir esse objetivo, compreender e analisar uma eventual falha no projeto e buscar soluções cabíveis. Mas foi a partir da revolução Industrial que o homem pôde realizar grandes feitos, devido ao surgimento de novos metais, como a produção em massa de ferro e aço, possibilitando o aparecimento de aços ligas, e também o desenvolvimento e aperfeiçoamento de novas técnicas de processo de fabricação.

Todavia, o uso desses novos metais nas construções trouxe consequências inesperadas, como a quebra e falha de componentes de forma repentina, ainda na região de cargas admissíveis de projeto. Assim fez necessário um estudo e um entendimento das propriedades dos materiais quando utilizados em diferentes situações de trabalho.

O processo de soldagem e suas variáveis de processo é um exemplo de que a mudança da situação de trabalho pode interferir nas propriedades mecânicas da junta soldada, principalmente na região da zona afetada pelo calor (ZAC).

Dentre outras propriedades mecânicas, será aprofundado e estudo a dureza e a tenacidade em um aço estrutural, bem como todos os fatores que podem influenciar nos seus valores, como a microestrutura, composição química e aporte térmico, especialmente na região da ZAC. Para comprovar a teoria, será realizado um ensaio de dureza na região dos grãos grosseiros e outra na região dos grãos refinado, em corpos de prova com duas energias de soldagem diferentes, e verificar a influência da variação da energia de soldagem na dureza da ZAC.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Estudar a relação da energia de soldagem com a tenacidade e dureza da zona afetada pelo calor (ZAC) em um aço estrutural.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Relacionar dureza com tamanho de grão na ZAC de juntas soldadas com diferentes energias de soldagem;
- Relacionar dureza com os resultados de energia de impacto Charpy na ZAC, obtido em trabalho anterior, para o mesmo aço e condições de soldagem.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1. MEDIÇÃO DE DUREZA

Segundo Bertoldi (2014) a dureza de um material é um conceito relativamente complexo de definir, dadas as diferentes interpretações que lhe podem ser atribuídas. Alguns estudiosos definem dureza como sendo a resistência do material ao desgaste, outros conceituam como sendo a resistência à abrasão ou até mesmo como sendo a capacidade do material de resistir a esforços. Mas Bertoldi (2014) diz que a definição de dureza pode ser compreendida de “resistência à penetração”, ou seja, resistência oferecida pelos sólidos à penetração de uma ponta.

Geralmente, a dureza é determinada pela resistência à penetração, como nos ensaios de dureza Brinell, Rockwell e Vickers. Para isso, utiliza-se um “penetrador”, na forma de esfera ou pirâmide, confeccionado de aço temperado, metal duro ou diamante, o qual é forçado a penetrar no material cuja dureza se quer medir pela aplicação de uma carga, resultando numa deformação plástica (impressão) na superfície do material. As dimensões ou profundidades relativas dessa impressão constituem a base para a apuração de valores representativos da dureza.

Em princípio pode-se dizer que dureza é uma propriedade mecânica do material a qual está relacionada à facilidade ou dificuldade de deformação plástica localizada, ou seja, é a resistência que o material oferece às pequenas impressões ou riscos.

Para Bertoldi (2014) a determinação da dureza constitui um método simples e barato, pois os corpos de prova não precisam ter uma preparação complexa para o ensaio, no máximo lixar e polir, e o equipamento é relativamente barato. O ensaio é considerado não destrutivo, pois os corpos de prova não são fraturados nem, tampouco, são excessivamente deformados, apenas uma pequena impressão é imposta no material. Além disso, outra vantagem do ensaio de dureza é a possibilidade de outras propriedades mecânicas poderem ser estimadas a partir dos dados de dureza, tal como o limite de resistência à tração.

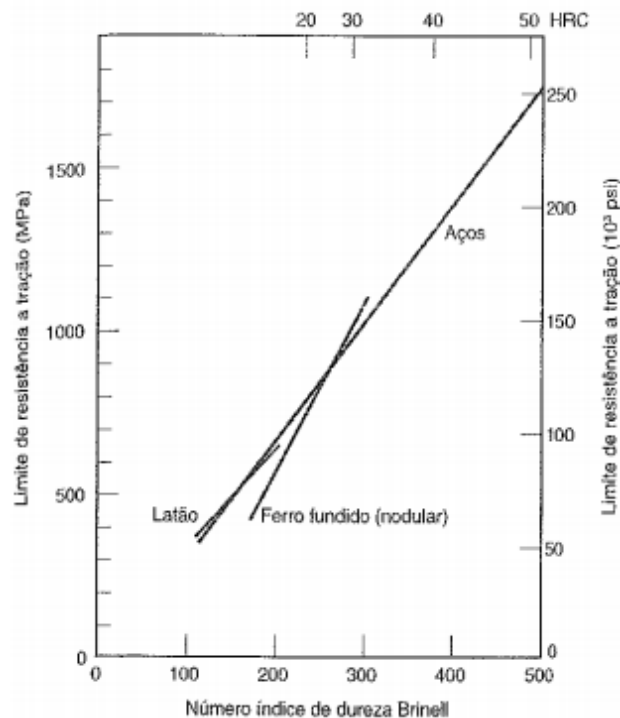
Tanto o limite de resistência à tração quanto a dureza são indicadores da resistência de um metal à deformação plástica. Consequentemente, eles são aproximadamente proporcionais, como é mostrado na Figura 1, essa relação para o ferro fundido, o aço e o latão. Essa relação é muito útil também sob o ponto de vista prático, entre a dureza Brinell e a

resistência à tração (CALLISTER, 2013). Como regra geral para a maioria dos aços, a dureza Brinell (HB) e o limite de resistência à tração estão relacionados de acordo com as equações.

$$LRT(MPa) = 3,45 \times HB$$

$$LRT(psi) = 500 \times HB$$

Figura 1: Relação entre dureza e o limite de resistência à tração para aço, latão e ferro fundido.



Fonte: Callister (2013)

Essa relação de proporcionalidade indicada na Figura 1 não ocorre para todos os metais, e são na verdade muito aproximadas, como vários estudos e pesquisas a respeito comprovaram. Assim, as curvas apresentadas devem ser analisadas com certa reserva, ao mesmo tempo que sua aplicação é limitada apenas a aços estruturais, (CALLISTER, 2013).

Portanto, a determinação da dureza dos metais é um método de controle de qualidade muito importante na engenharia e na indústria, para verificação das condições de fabricação, tratamentos térmicos e uniformidade dos materiais. Além disso, o ensaio de dureza está bem difundido e fundamentado, pois há vários estudos nesta área a fim de caracterizar o material

nas mais diversas vertentes, ou seja, o ensaio de dureza está sendo utilizada para determinar outras propriedades mecânicas do material.

3.1.1. Fatores que Influenciam na Dureza na Região da ZAC

Segundo Gomes (2016) a soldagem é o mais importante processo de união de metais utilizado industrialmente. Ele é definido como sendo um processo de união entre duas partes metálicas, usando uma fonte de calor, com ou sem aplicação de pressão. Contudo, o processo de soldagem gera consigo regiões diferentes ao longo da junta soldada, onde as mesmas apresentam propriedades mecânicas diferentes, tornando um risco para uma futura quebra, quando submetida a um esforço.

Dentre essas regiões a ZAC é que apresenta uma grande diferença de microestrutura entre pontos separados de uma pequena distância, devido à grande variação nos ciclos térmicos destes pontos. Como consequência, suas propriedades variam de região para região, dificultando a determinação destas para uma certa região particular e favorecendo uma elevada dispersão de resultados em certos ensaios. Para estudar as propriedades mecânicas da ZAC podem ser usados diferentes métodos. As propriedades de maior interesse da ZAC são, em geral a dureza e a tenacidade.

O estudo de Rocha (2004) diz que vários fatores podem influenciar na medida de dureza em junta soldada, principalmente na região da ZAC. Fatores como a microestrutura, o tamanho de grão, a temperabilidade, a composição química, a velocidade de resfriamento e tratamentos térmicos são exemplos destes. Mas o principal fator que acarreta numa grande variação de valores de dureza numa ZAC é com relação ao aporte térmico gerado pelo processo de soldagem, inclusive, o aporte térmico está intimamente ligado com o restante dos fatores causadores.

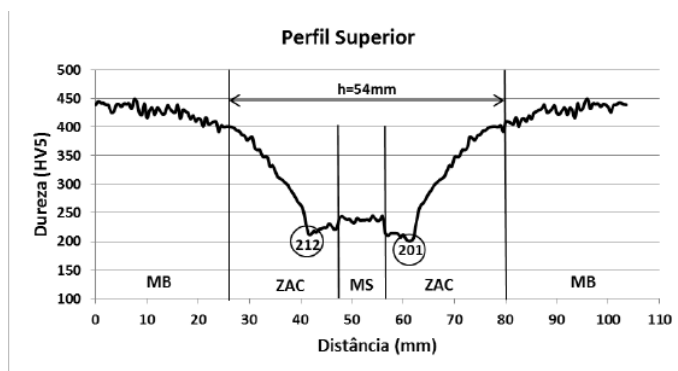
3.1.1.1. Aporte Térmico

No processo de soldagem, parâmetros de soldagem, tais como voltagem, corrente, velocidade de soldagem, podem ser expressos em termos de aporte térmico, que é a quantidade de energia fornecida por unidade de comprimento, pela fonte de calor que se move ao longo da junta. Qualquer mudança em algum destes fatores, acarretará em mudança na velocidade de resfriamento da ZAC, logo, alteração microestrutural. E dependendo da

severidade dos ciclos térmicos, a ZAC apresentará diferentes características metalúrgicas e propriedades mecânicas, como a dureza, ao longo das suas sub-regiões.

O trabalho feito por Costa (2014) teve como objetivo analisar a dureza ao longo de uma junta soldada. A Figura 2 mostra bem o resultado de sua pesquisa, que a dureza varia ao longo da ZAC.

Figura 2: Variação da dureza ao longo da região da ZAC.



Fonte: Costa (2014)

Pode-se notar que partindo do metal de solda, o gráfico apresentou um pico de dureza na região de grãos grosseiros. Este pico de dureza pode ser atribuído à exposição a altas temperaturas, seguido de um resfriamento brusco, ocasionando a formação de uma microestrutura com elevada dureza, como a martensita. Conforme o perfil se distancia, a dureza diminui, como na região de refino do grão. A dureza diminui até um valor mínimo, que corresponde a região subcrítica. Esta região caracteriza-se por um pico de temperatura abaixo da temperatura de austenitização, podendo ocasionar o revenimento da martensita, e fazendo com que a dureza diminua. A partir da região subcrítica a dureza aumenta até atingir a dureza do metal.

3.1.1.2. Composição Química e Temperabilidade

Um outro fator importante no comportamento da dureza ao longo da ZAC é com respeito a temperabilidade do aço. A temperabilidade é a capacidade do aço formar martensita a uma determinada profundidade, e que pode ser influenciada pelo teor de carbono e da

composição química do metal de base. Este fator está intimamente ligado com o valor de dureza na ZAC, principalmente da região de grãos grosseiros.

Na maioria dos casos, a região de grãos grosseiros sofre uma fragilização mais intensa durante a soldagem. Processos de baixa energia de soldagem, que causam velocidades de resfriamento relativamente baixa, geram uma estrutura mais fina e, portanto, de menor fragilidade em aços de baixa temperabilidade. Já para aços de temperabilidade mais elevada, a formação de martensita pode mascarar essa tendência. Nessas condições, quanto maior for o teor de carbono mais frágil será a estrutura a ser formada.

3.1.1.3. Velocidade de Resfriamento e Pré-Aquecimento

O trabalho de Rocha (2004) diz que para um aço de determinada composição química, a microestrutura e dureza da ZAC dependem basicamente da velocidade de resfriamento. Esta é influenciada por vários fatores, entre eles a espessura da chapa, da condutibilidade térmica da peça, da geometria da junta e da energia de soldagem.

A velocidade de resfriamento é um parâmetro importante na determinação da microestrutura em materiais como os aços estruturais, que podem sofrer transformações de fase durante o resfriamento. A microestrutura final e as propriedades mecânicas de uma solda e das regiões vizinhas afetadas pelo calor, como a ZAC, depende da velocidade de resfriamento. As taxas de resfriamento, quando muito elevadas, proporcionam microconstituintes metaestáveis de alta dureza, porém, taxas muito lentas conduzem à formação de estruturas ferríticas grosseiras e frágeis. Ambas as situações ocorrem principalmente na região de grãos grosseiros da ZAC. A Tabela 1 mostra bem a influência da velocidade de resfriamento na dureza na região de grãos grosseiros da ZAC.

Tabela 1: Diminuição do valor da dureza causada pelo retardamento da velocidade de resfriamento.

CORPO DE PROVA	ÁREA CORDÃO (mm ²)	MÁXIMA MICRODUREZA ZAC (HV)	TEMPO RESF. 800°-500°C (s)	ENERGIA SOLDAGEM (KJ/mm)
CP-01	64,4	483,6	5,7	1,0
CP-02	102,2	461,8	11,4	2,0
CP-03	131,1	447,1	17,0	3,0
CP-04	149,9	402,3	22,7	4,0

Fonte: Matos (2014)

Como pode ser visto na Tabela 1, a dureza ela diminui à medida que a velocidade de resfriamento aumenta, ou seja, são inversamente proporcionais. A máxima dureza no primeiro corpo de prova se deve muito pelo menor tempo de resfriamento e consequentemente formação da microestrutura martensita, logo, o aumento dessa taxa impossibilita a obtenção dessa microestrutura, porém aumenta o tempo de permanência dessa região a temperaturas elevadas, gerando assim um aumento do tamanho de grão, aspecto este que diminui o valor de dureza.

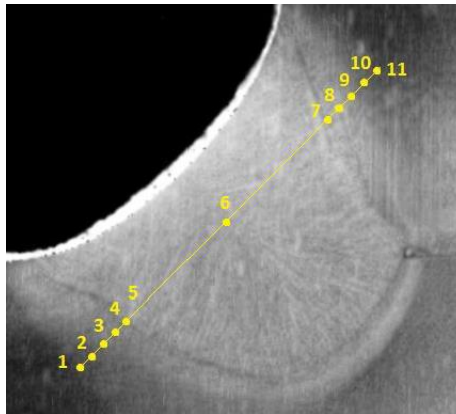
Segundo Matos (2014) uma forma de reduzir essa máxima dureza na região dos grãos grosseiros na ZAC seria o uso de um preaquecimento antes da soldagem, isso diminuiria a possibilidade da formação da martensita. Define-se como temperatura de preaquecimento, a temperatura a que a região onde a solda será realizada é submetida.

Os metais, em sua maioria, são bons condutores de calor, por isso, durante o processo de soldagem, este calor gerado na junta se dissipa para as regiões vizinhas na peça, resfriando a rapidamente. Portanto, justifica-se o uso do preaquecimento pela diminuição da diferença de temperatura entre o local da solda em si e o restante da peça, reduzindo os gradientes térmicos e, finalmente, a velocidade de resfriamento. Porém deve-se tomar cuidado com essa temperatura de preaquecimento, pois velocidades de resfriamento muito lenta tende a forma microestrutura ferríticas grosseiras e frágeis.

3.1.1.4. Energia de Soldagem

Para Dalcin (2016) a energia de soldagem é um parâmetro importante na obtenção das propriedades mecânicas desejadas em uma junta soldada, principalmente na ZAC. Ela influencia diretamente na dureza da região, e é considerada um aspecto inversamente proporcional a esta propriedade, ou seja, quanto maior a energia de soldagem, menor é o valor de dureza, devido ao longo tempo em que o material se encontra em resfriamento, permitindo o aumento do tamanho de grão e consequentemente a diminuição das propriedades mecânicas na ZAC. A pesquisa de Matos (2014) teve como um dos objetivos analisar essa influência da energia de soldagem na dureza da ZAC de um metal, a Figura 3 mostra bem as onde foram feitas as medições de dureza num aço 1045.

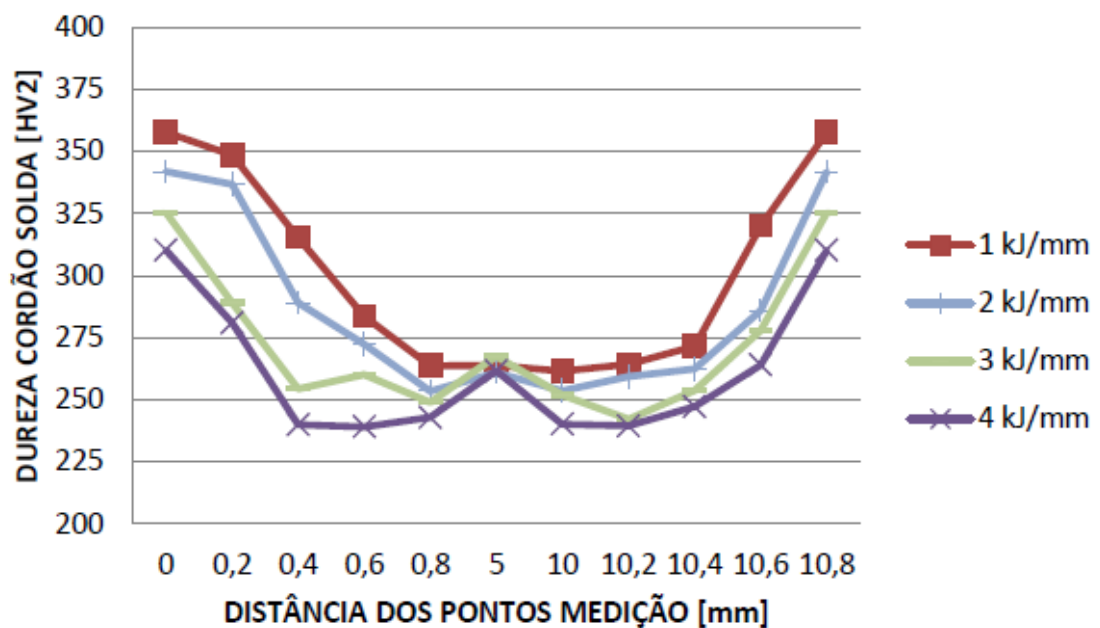
Figura 3: Regiões onde foram feitas as medições de dureza.



Fonte: Matos (2014)

E através da Figura 4, pode ver que a medida que se aumentou a energia de soldagem, a dureza na região da ZAC foi diminuindo.

Figura 4: Distribuição do perfil de dureza das juntas, para cada energia de soldagem.



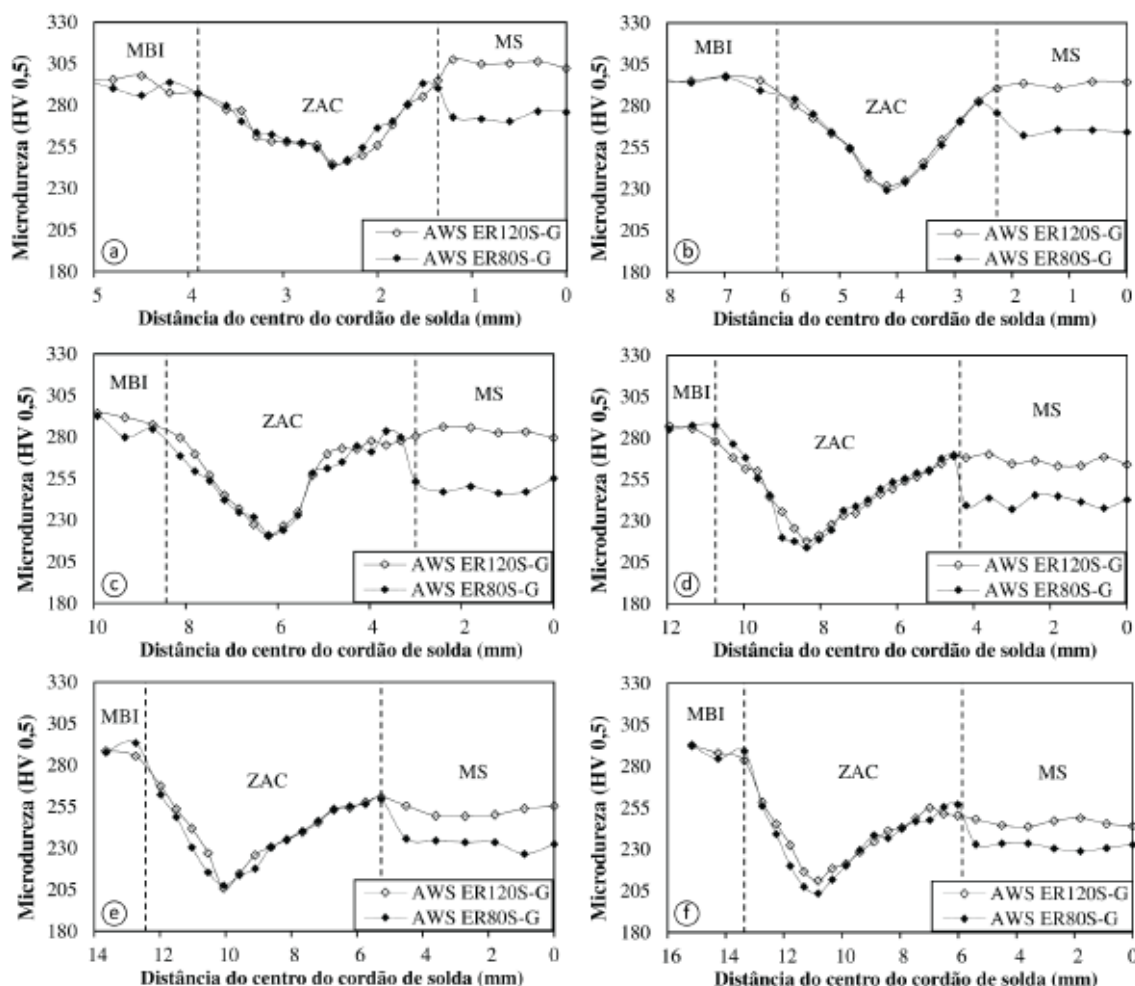
Fonte: Matos (2014)

A Figura 4 mostra que à medida que energia de soldagem foi aumentada, a dureza diminuiu, pois com o aumento da energia, a peça soldada teve uma elevação de temperatura,

além de ter diminuído a velocidade de resfriamento, possibilitando o aumento do tamanho de grão, fator este que resulta na diminuição de dureza.

Segundo Dalcin (2016) um outro aspecto relevante que pode ser atribuída a energia de soldagem é com respeito a largura da ZAC. A medida que se aumenta a energia de soldagem, mais calor é inserido na junta soldada, então, maior será a zona afeta pelo calor, além disso, maior é a região de grãos grosseiros na ZAC. A Figura 5 representa bem esse aumento da largura da ZAC pelo aumento da energia de soldagem.

Figura 5: Perfis de dureza no metal de base, da ZAC e do metal de solda, em função da distância, para diferentes energias de soldagem: (a) 0,3 kJ/mm; (b) 0,6 kJ/mm; (c) 0,9 kJ/mm; (d) 1,2 kJ/mm; (e) 1,4 kJ/mm; (f) 1,6 kJ/mm.



Fonte: Dalcin (2016)

3.2. SURGIMENTO DO ENSAIO DE IMPACTO CHARPY

Para Silva (2001) a definição dos padrões e procedimentos do ensaio Charpy percorreu um longo caminho de estudo até chegar o que é conhecido atualmente. Ainda que o uso real do ensaio Charpy só veio após o episódio dos navios Liberty na Segunda Guerra Mundial, o ensaio Charpy já era relatado por Russel, em 1898, de maneira semelhante com o que é conhecido atualmente.

Nas pesquisas de Castro (2013) o interesse de estudar o comportamento dúctil ou frágil dos materiais se deu ainda no século XIX, pois nessa época houve um grande número de acidentes envolvendo falhas em trilhos das estradas de ferro, causando acidentes, uma vez que não havia deformação aparente que anunciasse a falha iminentes do componente.

O caso mais famoso ocorreu no período da Segunda Guerra Mundial, quando os EUA projetavam e construíam os navios Liberty para a Grã-Bretanha. Porém, algo deu errado na construção das embarcações, pois vários navios fraturaram completamente em dois enquanto navegavam entre a Sibéria e o Alasca, como é mostrado na Figura 6.

Figura 6: Navio Liberty na Segunda Guerra Mundial.



Fonte: Silva (2001)

Nesses acidentes, as investigações revelaram que as falhas nos navios Liberty foram causadas por uma combinação de três fatores:

- As soldas foram realizadas por pessoal sem qualificação ideal, e por isso continham muitas trincas;

- A maioria das fraturas iniciadas no convés foram em cantos de escotilhas quadradas, onde havia uma concentração de tensão local;
- O aço a partir do qual os navios foram construídos tinham tenacidade pobre.

Após o acontecido com os navios Liberty pesquisas e estudos foram feitos ao longo dos anos sobre a Mecânica da Fratura, e normas de controle de qualidade em soldagem foram desenvolvidas, inclusive um grupo de pesquisadores do Laboratório de Pesquisas Naval em Washington DC estudou o ramo da fratura de materiais em detalhe, no qual o campo da Mecânica da Fratura nasceu nesse laboratório (SILVA, 2001).

Em 1898, o pesquisador norte-americano SB Russell desenvolveu um teste que pudesse ensaiar diversos materiais e estudar seu comportamento em diferentes aplicações industriais. Em seu trabalho, ele descreve como deveria ser a máquina de ensaio de impacto, este trabalho foi nomeado como *“Experiments with a New Machine for Testing Materials by Impact”*. Nesse trabalho também consta os resultados de vários testes de ensaio de impacto para diferentes materiais e diversos tipos de provas, justificando e descrevendo a aplicação para cada caso. Este trabalho foi pioneiro e trouxe conhecimento diferenciado para a comunidade científica (GOUVEIA, 2013).

Para Gouveia (2013) outro cientista que colaborou significativamente foi o francês Georges Charpy. Apesar de não ter sido o pioneiro em tratar do assunto, ele ficou reconhecido pelas suas contribuições e empenho para o desenvolvimento de um procedimento que tornasse este ensaio uma robusta ferramenta da engenharia. No seu trabalho, em 1901, Charpy citou várias metodologias anteriormente utilizadas para a realização de ensaio de diferentes estudiosos e inclusive a utilizada por Russel, comentando as suas principais diferenças, e então comentando que a comparação dos resultados obtidos pelos diferentes estudiosos não seria possível, já que não havia reprodutibilidade do ensaio. Então esse trabalho iniciou a discussão de como a mudança de variáveis do ensaio afetaria no seu resultado em diversas condições.

Em 1905 Charpy apresentou a comunidade científica uma proposta de máquina, similar àquela que é utilizada nos dias atuais, que tornasse possível a realização do ensaio de impacto de maneira padronizada, e a partir desse ano começa-se a encontrar as referências “Ensaio Charpy” e “Método Charpy”. Em 1906 Charpy foi responsável pelas atividades inerentes ao ensaio de impacto realizadas pela *International Association for Testing of Materials* (IATM) e presidiu discussões visando estabelecer um procedimento suficientemente reprodutível e que

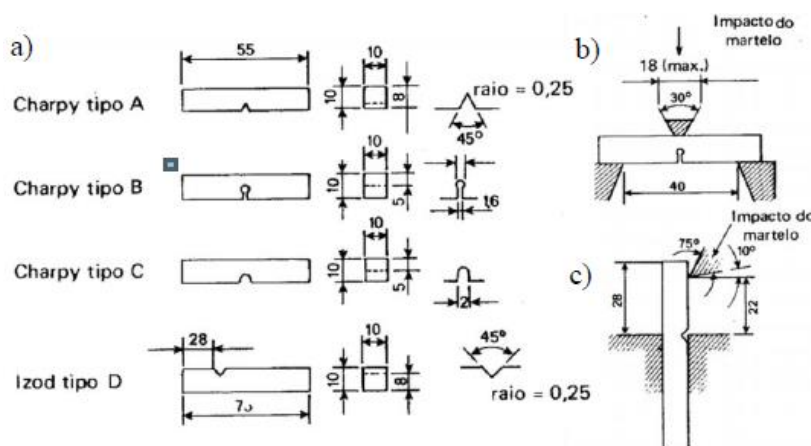
pudesse se tornar um ensaio padrão. A importância da geometria do entalhe, da velocidade de impacto, do tamanho do corpo de prova e as condições da máquina foram temas longamente discutidos a partir de 1906.

3.2.1. Ensaio de Impacto

As pesquisas de Costa (2014) o ensaio de impacto é um ensaio dinâmico, utilizado para análise do comportamento dos materiais. Esse ensaio fornece a energia necessária para fraturar uma amostra padronizada, ou seja, o ensaio fornece a tenacidade do material, que é uma medida de quantidade de energia que um material pode absorver antes de fraturar.

Existem duas formas de ensaio de impacto, o Charpy e o Izod, sendo esse último raramente utilizado. Ambos os ensaios são padronizados pelas normas ASTM E23 e BS EM ISSO 148-1:2010. As diferenças fundamentais entre os ensaios Charpy e Izod residem na forma em que o corpo-de-prova é montado, do tipo do entalhe, da localização do entalhe no corpo-de-prova e da face do corpo-de-prova onde o martelo é golpeado (EMYGDIO, 2012). A Figura 7 apresenta as diferenças dos corpos de prova utilizados nesses dois métodos.

Figura 7: Corpos de prova para ensaio de impacto, conforme a norma ASTM E23 (a) Localização do corpo de prova no equipamento para ser ensaio Charpy (b) e Izod (c).

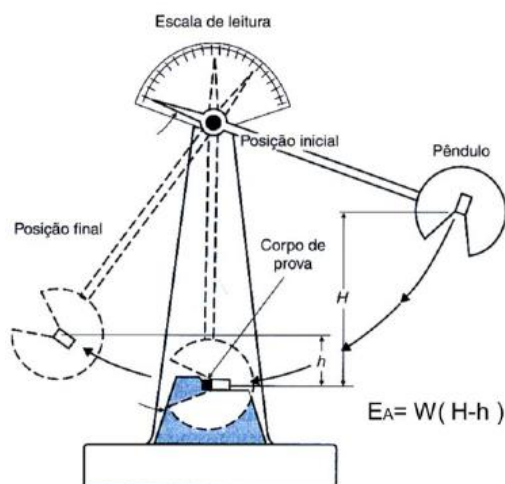


Fonte: Costa (2014)

Conforme Moraes (2016) o ensaio consiste em uma carga que é aplicada pelo impacto de um martelo pendular, liberado a partir de uma posição padronizada e uma altura fixa H. O martelo choca-se e fratura o corpo-de-prova no entalhe, que atua como concentrador de

tensões. O pêndulo continua o seu movimento até uma altura h , menor que altura inicial. A energia absorvida no impacto é determinada a partir da diferença entre as alturas. A Figura 8 faz uma representação esquemática do ensaio de impacto.

Figura 8: Representação esquemática de um equipamento utilizado para o ensaio de impacto.



Fonte: Costa (2014)

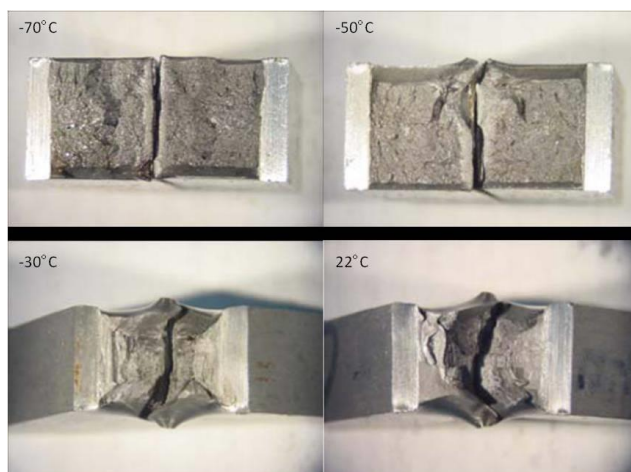
3.2.2. Transição Dúctil-Frágil

As pesquisas de Mello (2005) mostram que um material pode se comportar de duas maneiras: dúctil ou frágil. Um material dúctil antes de fraturar apresenta deformações plásticas, visíveis, ou seja, o material se deforma mais antes de romper, demonstrando assim um material com boa tenacidade. Já um material frágil, não apresenta ou tem pouca deformação plástica, fraturando de maneira repentina, sem aviso prévio, demonstrando assim um material de baixa tenacidade. Porém alguns materiais dúcteis podem se comportar de maneira frágil, devido a ação de temperaturas baixas. A essa temperatura se deu o nome de Temperatura de Transição Dúctil-Frágil dos materiais.

Portanto, uma junta soldada com boa tenacidade, tem a possibilidade de apresentar uma fratura frágil, que seria ineficiente em algumas estruturas e componentes de máquinas soldadas. Por isso é importante considerar esse comportamento dos materiais e analisar a tenacidade dos mesmos na fabricação de certas estruturas soldadas.

O estudo de Moraes (2016) diz que uma das principais funções do ensaio Charpy está em determinar se um material apresenta ou não uma transição dúctil-frágil com a variação da temperatura de ensaio e, caso isso ocorra, qual a faixa de temperatura que acontece este fenômeno. Essa transição dúctil-frágil é mostrada na Figura 9.

Figura 9: Faces da fratura de um material ensaiado por ensaio Charpy e diversas temperaturas.

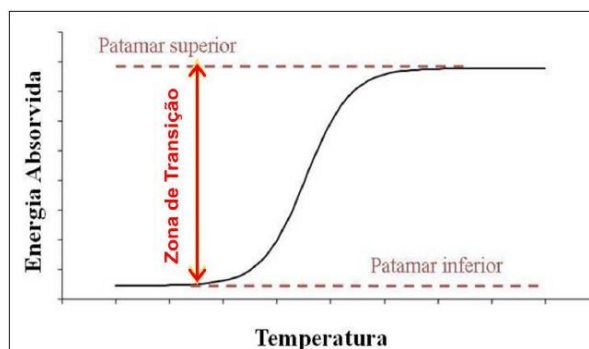


Fonte: Gouveia (2013)

A Figura 9 mostra bem a influência da temperatura na energia de impacto, no qual à medida que a temperatura foi caindo o corpo de prova apresentou pouca deformação, característica básica de um material frágil.

De acordo com Mello (2005) essa transição dúctil-frágil em materiais é demonstrado através do gráfico Curva de Transição Dúctil-Frágil, mostrada na Figura 10, e ela está relacionada com a dependência da energia absorvida pelo corpo de prova Charpy em relação à temperatura.

Figura 10: Gráfico genérico de energia absorvida x temperatura obtido pelo ensaio de impacto Charpy.



Fonte: Gouveia (2013)

Normalmente, a curva apresenta dois patamares, um é o patamar superior, em que a fratura ocorre de modo dúctil, o outro é o patamar inferior, caracterizado por uma fratura frágil, entre eles existe uma região de transição dos modos de fratura.

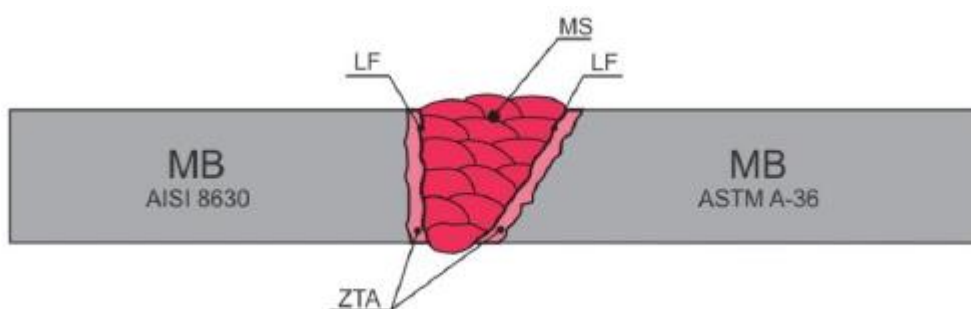
Porém, existe uma difícil tarefa, que é determinar a temperatura de transição dúctil-frágil, para isso, pode-se utilizar a metodologia indicada na norma ASTM E23 (2012). No método mais simples, a temperatura de transição é determinada a partir da curva de energia absorvida em função da temperatura, onde se considera que a temperatura de transição é a temperatura onde se atinge a média de energia entre os patamares superior e inferior da curva (COSTA, 2014).

3.3. IMFLUÊNCIA DO APORTE TÉRMICO NA TENACIDADE DA ZAC DO AÇO ESTRUTURAL

Como foi visto por Gouveia (2013), a tenacidade de um material é a sua resistência a fratura e é expressa em termos de quantidade de energia absorvida no processo de fratura. Esta propriedade depende de alguns fatores como a microestrutura do material, da velocidade de deformação, do meio ambiente e principalmente da temperatura. Esses fatores estão bastante relacionados com a soldagem, já que peças soldadas estão sujeitas a diferentes tipos de esforços, podendo variar a sua intensidade, estando sujeitas também a diferentes temperaturas de trabalho, e como a soldagem é a união de peças através do uso de calor, podendo na maioria dos processos de soldagem ocorrer a fusão dos metais, ocorrer transformações metalúrgicas e assim apresentar diferentes tipos de microconstituintes.

Entre todos os processos de fabricação de união de metais, a soldagem é o que mais provoca mudanças nas propriedades dos materiais, isso se deve em decorrência dos ciclos térmicos inerentes ao processo. A Figura 11 apresenta a distribuição das regiões de uma junta soldada:

Figura 11: Representação esquemática da região da solda. (a) Região de refino de grão e (b) região de granulação grosseira da ZAC.

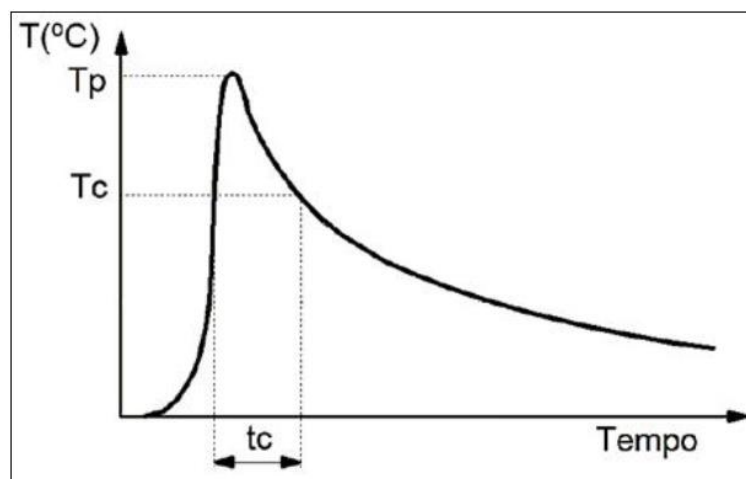


Fonte: Almeida (2014)

De acordo com Godoy (2008) as regiões do MB (metal de base), da ZAC (zona afetada pelo calor) e do MS (metal de solda) possuem propriedades mecânicas e microestruturas diferentes, sendo que a ZAC é a região da junta soldada que sofre maiores modificações nas propriedades, e isso se deve muito pelo aporte de calor da soldagem.

Monteiro (2014) afirma que o ciclo térmico é consequência da quantidade de calor fornecido à junta soldada pelo arco elétrico. Esse ciclo também contempla os seguintes fatores: tempo de aquecimento, tempo de permanência acima de uma determinada temperatura, temperatura máxima atingida e velocidade de resfriamento, como é visto pela Figura 12.

Figura 12: Ciclo Térmico de soldagem, onde T_p – Temperatura de pico; T_c – Temperatura crítica; t_c – Tempo de permanência acima da T_c .

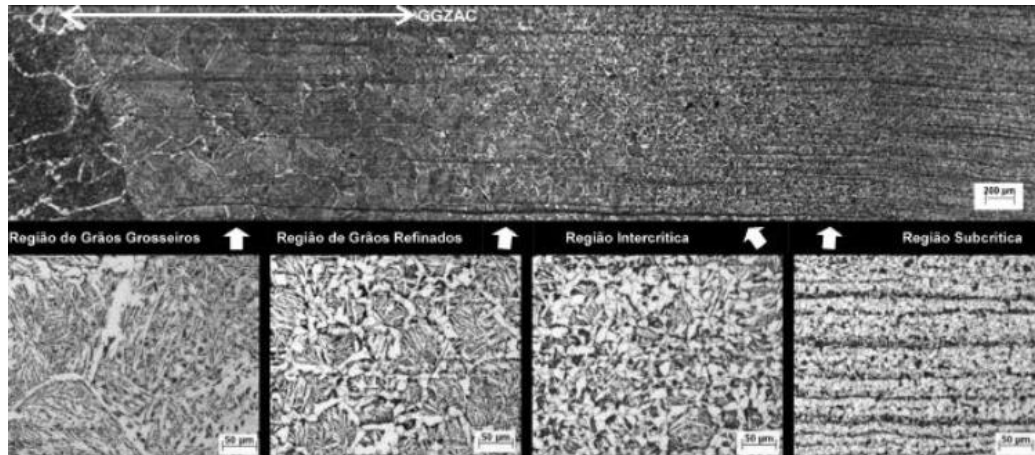


Fonte: Monteiro (2014)

A influência dos ciclos térmicos de soldagem nos aços, surge como um dos principais fatores de redução da tenacidade em componentes e estruturas inicialmente tenazes, já que com a grande quantidade de calor gerada na peça pelo processo de soldagem, ocorre transformações metalúrgicas em determinadas regiões do material, como crescimento de grãos e até mesmo tratamentos térmicos, dependendo da temperatura atingida. Em vista disso, o ensaio Charpy torna-se mais difícil na medição da energia de impacto nessas regiões.

Nos estudos de Silva (2015) a ZAC é a região da junta que apresenta maior sensibilidade, apresentando uma grande diferença de microestruturas entre pontos separados de uma pequena distância, e com isso, suas propriedades variam de região para região, dificultando a determinação de certas propriedades, devido ao grau de dispersão de resultados dos ensaios mecânicos. A Figura 13 mostra essa variação de microestrutura e tamanho de grão ao longo da ZAC.

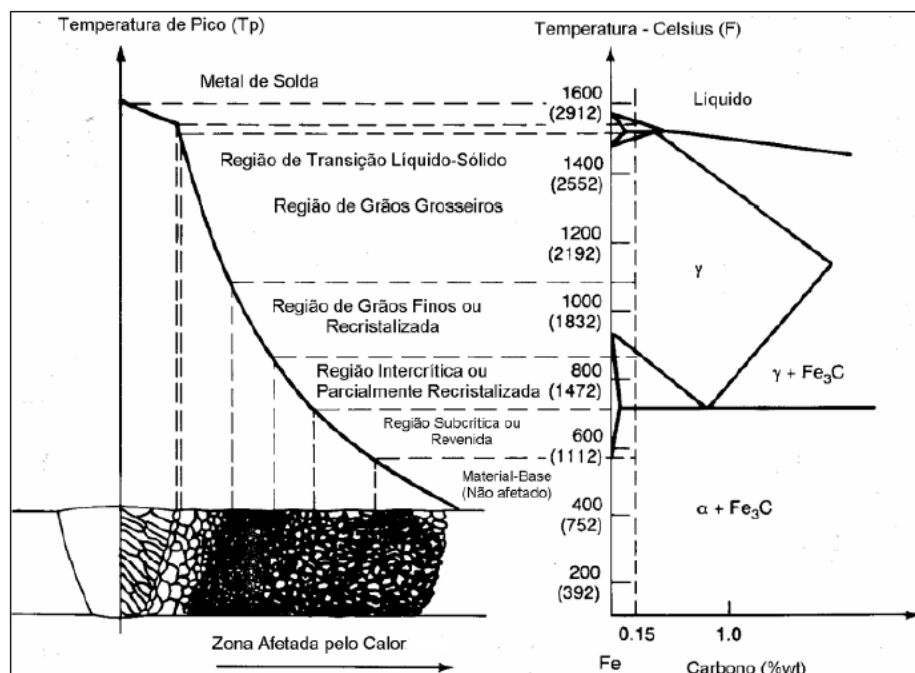
Figura 13: Microestruturas nas diferentes regiões da ZAC.



Fonte: Silva (2015)

Essa diferença de propriedades pode ser explicada pela Figura 14, que representa as transformações microestruturais de uma junta soldada de um aço carbono, tendo como referência as temperaturas de transformação do diagrama Fe-C.

Figura 14: Distribuição da temperatura do aporte térmico nas transformações microestruturais da ZAC de uma junta soldada, tendo como referência as temperaturas de transformação do diagrama Fe-C.

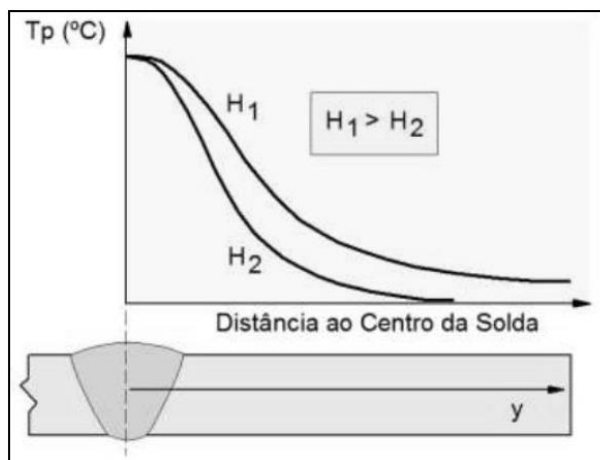


Fonte: Almeida (2014) apud Toyoda (1989)

Pela Figura 14 pode-se perceber o efeito das transformações estruturais causado pelo aporte térmico, e a região que sofreu mais com esse parâmetro, que foi a ZAC. Na região da ZAC pode ser visto uma acentuada transformação microestrutural e, consequentemente, geração de fases altamente fragilizantes (baixa tenacidade) nesta região da solda. A região da ZAC pode ser subdividida em 4 sub-regiões: a Região de Grãos Grosseiros – RGG, a Região de Grãos Finos – RGF, a Região Intercrítica – RIC e a Região Subcrítica. Na região subcrítica, onde a temperatura de pico está abaixo da linha crítica não há transformação microestrutural, mas há um tratamento térmico na região que diminui o limite de escoamento e a dureza do material, porém há um ganho de ductilidade e tenacidade. Na região intercrítica há um efeito de recristalização parcial nos grãos, então, existe uma melhora na tenacidade. A região de grãos finos acontece um refinamento dos grãos, diminuindo a granulometria, e aumentando a tenacidade. Todavia, a região de grãos grosseiros é a zona mais crítica da junta soldada, pois os grãos grosseiros causam grande perda da tenacidade do material, por isso, a grande referência nos estudos de fragilização dos aços estruturais.

Como foi visto, a tenacidade na ZAC é bastante influenciada pelo aporte térmico, quanto maior esse aporte, maior será as consequências da baixa tenacidade em um material soldado. Com isso, a energia de soldagem tem papel crucial nesse caso, já que a energia de soldagem está ligada a quantidade de calor gerada durante o processo de soldagem. Esse efeito da energia de soldagem pode ser entendido na Figura 15.

Figura 15: Repartição térmica para diferentes energias de soldagem H_1 e H_2 .



Fonte: Monteiro (2014)

Quanto maior a energia de soldagem do processo, mais calor vai ser inserido na peça, com isso, maior será a zona afetada pelo calor e menor será a taxa de resfriamento, permitindo o crescimento de grão, assim, diminuindo as propriedades do material, como a tenacidade.

3.4. INFLUÊNCIA DA TENACIDADE NO CORDÃO DE SOLDA

A engenharia moderna requer, em escala crescente, soldagens com elevados níveis de resistência mecânica e tenacidade, sem comprometimento do custo, produtividade e confiabilidade do processo de soldagem (VILCHEZ, 2005).

Como regra geral, os cordões de solda produzidos pelos processos de soldagem apresentam grãos relativamente grosseiro, e durante a solidificação da poça de fusão poderá ocorrer o aprisionamento de partículas de escória ou a formação de porosidade. Esses fatores prejudicam consideravelmente na tenacidade ao impacto do cordão de solda.

De acordo com Vilchez (2005) os fatores mais críticos que podem influenciar a tenacidade do cordão de solda são os diferentes aspectos da microestrutura da solda, ou seja:

- Tamanho do grão;
- A presença e distribuição de inclusões não-metálicas;
- A natureza do produto final das transformações microestruturais.

3.4.1. Tamanho do grão

De acordo com Vilchez (2005) a tenacidade ao impacto nos cordões de solda está diretamente ligada com a granulometria do metal de solda. A diminuição do tamanho do grão haverá um aumento da energia de impacto pelo fato dos contornos de grão inibirem a fratura por clivagem.

Clivagem é o mecanismo de fratura frágil, onde há uma ruptura sucessiva e repetida de ligações atômicas ao longo dos planos cristalográficos. Esse mecanismo é também conhecido como transgranular, pois a trinca de fratura se propaga através dos grãos. Em outras palavras, o material com granulação refinada conterà mais contornos de grão, onde os mesmos serviram de barreiras para impedir a propagação da trinca (MELLO, 2005).

Uma outra resposta do porquê que a diminuição do tamanho do grão do cordão de solda melhora a sua tenacidade é explicado por Vilchez (2005), ele diz que os contornos de grãos são as regiões de alta energia, devido à sua alta densidade de defeitos cristalinos, como as discordâncias, e de ser locais preferenciais para o acúmulo de impurezas, com isso, eles constituem obstáculos ao deslizamento de discordâncias, responsável pela deformação plástica, e a propagação de trincas. Dessa forma, quanto mais contornos de grão, mais resistente à deformação e mais tenaz fica o material metálico.

Segundo Almeida (2014) existe alguns procedimentos que se pode ser utilizado para reduzir a granulometria do cordão de solda. Uma delas é a utilização de uma baixa energia de soldagem, fazendo com que sejam produzidos grãos mais finos. Uma outra maneira seria o rápido resfriamento, impedindo o crescimento do grão, porém a possibilidade de formar uma estrutura dura e de baixa tenacidade como a martensítica é bem maior.

3.4.2. Inclusões não-metálicas

As inclusões contidas no cordão de solda exercem uma forte influência no patamar de energia da curva de transição da tenacidade, a qual representa a energia que causa a fratura dúctil. Pois, os materiais dúcteis falham normalmente como o resultado da nucleação, crescimento e à coalescência de vazios microscópicos que se iniciam em inclusões (DIAZ, 2016).

Além disso, as inclusões podem nuclear vazios e também iniciar uma fratura por clivagem. Entretanto, as inclusões não-metálicas podem desempenhar uma função bastante importante, podendo inclusive melhorar a tenacidade do cordão de solda ao exercerem influência sobre os produtos de transformação como, por exemplo, a ferrita acicular, que é uma microestrutura desejável no cordão de solda.

Mas para Vilchez (2005) nem todas as inclusões não-metálicas servirão de forma eficaz para a transformação do microconstituente acicular, o qual dependerá sobre tudo de sua natureza, morfologia e tamanho da inclusão.

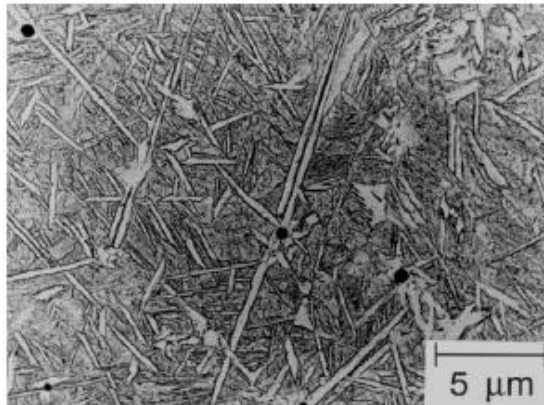
Portanto, supondo a natureza e quantidade de determinadas inclusões presentes em um cordão de solda sejam favoráveis. A sua energia de impacto será melhorada através da obtenção de um microconstituente que tenha boa tenacidade, como, por exemplo, a ferrita acicular.

3.4.3. Produtos de transformação

Segundo Castro (2012) dependendo da composição química (elementos de liga) e da condição de fabricação (fundido, forjado, tratado termicamente, etc), os aços podem ter uma grande variedade de microestruturas.

A característica microestrutural da ferrita acicular é a que apresenta maior energia de impacto, os seus contornos de grão de alto ângulo e tamanhos de grãos pequenos fazem-na uma excelente barreira no bloqueio da propagação das trincas, pois sua morfologia de ripas entrelaçada dificulta a continuação destas, necessitando assim um gasto adicional de energia para que ocorra a propagação da mesma. A Figura 16 apresenta a micrografia de um metal de solda que contém essa microestrutura.

Figura 16: Ripas típicas de ferrita acicular a partir de inclusões (pontos negros) em um depósito de solda.



Fonte: Vilchez (2005)

Porém a energia de impacto da microestrutura ferrita acicular é influenciada pelo tamanho de grão. Segundo Vilchez (2005) a tensão necessária para a propagação de um defeito depende da granulação da microestrutura, sendo menor para estruturas mais grosseiras. Deste modo, a tenacidade será maior em uma estrutura acicular fina.

Os elementos de ligas também podem colaborar para a formação da ferrita acicular, como o manganês, o titânio, o zircônio e o boro. Geralmente, o oxigênio é nocivo para a tenacidade da solda, entretanto, alguns resultados experimentais indicam a existência de um teor ótimo de oxigênio para o qual a tenacidade é maximizada, tendendo a se reduzir tanto para teores superiores como inferiores (VILCHEZ, 2005).

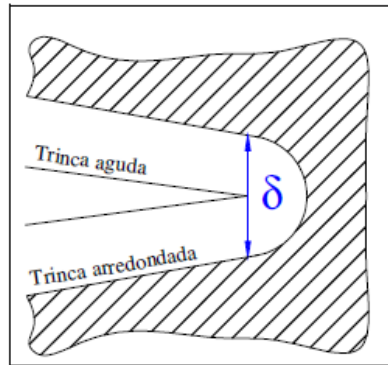
3.5. ENSAIO CTOD – CRACK TIP OPENING DISPLACEMENT

Além do Charpy, outro ensaio relevante atualmente para o estudo de tenacidade dos materiais metálicos, inclusive tenacidade de juntas soldadas, é o ensaio CTOD, é importante ressaltar que o CTOD mede tenacidade à fratura e o Charpy mede tenacidade ao impacto. A seguir, é feita uma breve explicação sobre esse ensaio, seguido de uma comparação deste com o ensaio Charpy destacando vantagens e desvantagens de ambos.

O trabalho de Gumieri (2011) afirma que o CTOD é um parâmetro que representa o deslocamento da abertura da ponta de uma trinca, e esse método foi introduzido como uma medida da tenacidade a fratura. A tenacidade a fratura de um material é definida como a habilidade inerente de resistir a um certo valor de tensão na ponta de uma trinca nele presente sem que ocorra a fratura, ou seja, é a resistência do material à propagação de uma trinca pré-existente.

Este parâmetro foi proposto ao observar o deslocamento dos flancos da trinca seguido do arredondamento de sua ponta sem que a mesma se propagasse, fenômeno conhecido como embotamento. A Figura 17 mostra o efeito do embotamento na ponta da trinca:

Figura 17: Abertura da ponta da Trinca (CTOD).

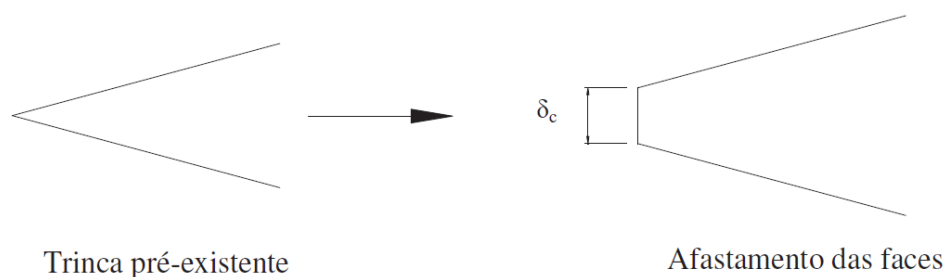


Fonte: Silva (2009)

Esta técnica possibilita calcular o tamanho de um defeito crítico e a análise desse defeito para adequação do seu uso, ou seja, o CTOD – (δ) permite a determinação do comprimento crítico da trinca e da tensão de projeto de um material.

Gumieri (2011) afirma que este parâmetro pretende descrever a capacidade do material, situado na vizinha da extremidade da trinca, deformar-se antes que a trinca se estenda, ou melhor, o CTOD procura caracterizar a capacidade do material deformar-se plasticamente antes da fratura, medindo o afastamento da extremidades de duas faces da trinca pré-existente, como ilustrado da Figura 18.

Figura 18: Ilustração do afastamento da ponta da trinca (CTOD).

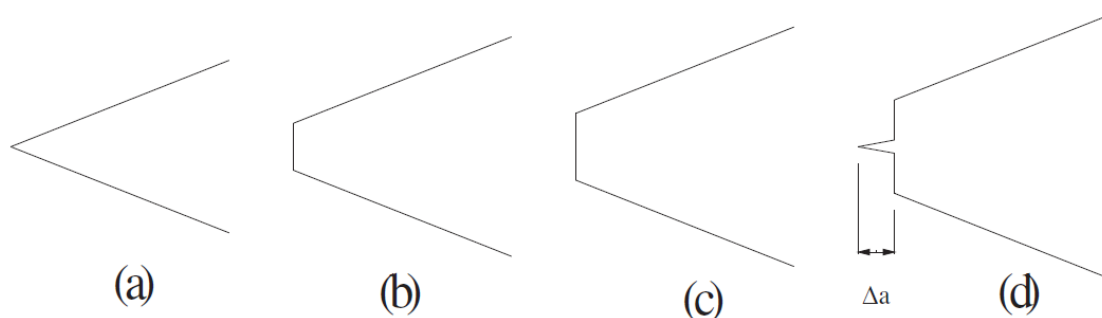


Fonte: Gumieri (2011)

Segundo Silva (2009) e Costa (2014) o uso do ensaio CTOD na avaliação da tenacidade de materiais baseia-se na hipótese de que existe, para cada material um valor

crítico de δ correspondente ao início da propagação da trinca pré-existente. Essa hipótese mostra-se na Figura 19, onde em (a) representa-se a trinca pré-existente, em (b) e (c) valores sucessivamente crescentes do CTOD (correspondente as cargas aplicadas sucessivamente crescente). Em (d) está representada a propagação da trinca (Δa). O valor crítico do CTOD é, portanto, o valor de δ que imediatamente antecede o início da propagação da trinca pré-existente.

Figura 19: Representação do processo de abertura na ponta da trinca.



Fonte: Gumieri (2011)

3.5.1. Comparação entre o Ensaio Charpy e o CTOD

O ensaio Charpy não é somente utilizado quando se deseja medir a energia absorvida pelo material, mas também distinguir se um material é dúctil ou frágil. Além disso, esse método possibilita encontrar a temperatura ou a faixa de temperatura em que um material dúctil se comportará de modo frágil, ou seja, transição dúctil-frágil. Ou ainda, pode-se obter a quantidade de expansão lateral em cada lado do corpo de prova após a fratura.

Para Costa (2014) o ensaio CTOD fornece medidas mais precisas. O CTOD é um parâmetro que representa o deslocamento de abertura da ponta da trinca, ou seja, ele se baseia na hipótese de que exista, para cada material, um valor crítico para esse deslocamento, que imediatamente antecede o início da propagação da trinca.

Portanto, nesse método CTOD considera-se que o material apresenta defeitos, como uma trinca, e o ensaio consiste em “trabalhar” em cima disso, medindo a resistência dessa trinca para que ela não se propague. Porém, um dos maiores problemas do ensaio CTOD é sem dúvida a dispersão dos resultados obtidos, especialmente no caso de juntas soldadas. Esta dispersão é atribuída à variação de estruturas metalúrgicas e da forma e distribuição das zonas frágeis na vizinha da trinca.

Além disso, o CTOD possibilita também encontrar a temperatura de transição dúctil-frágil, bem como distinguir um material dúctil de um material frágil. Porém, esse ensaio tem suas desvantagens em relação ao Charpy: embora muito útil, esse método é demorado e caro, o que justifica sua utilização de forma limitada. Já o Charpy, o método é mais simples e mais barato, e o resultado é obtido de forma bem mais rápida.

4. MATERIAL E MÉTODOS

A partir daqui são apresentados os materiais e procedimentos necessários para a realização do trabalho, bem como os parâmetros e os ensaios mecânicos propostos para que os objetivos da pesquisa sejam alcançados.

O trabalho foi desenvolvido utilizando como material de estudo experimental amostras retiradas dos corpos de prova de Silva (2016), no qual o mesmo estudou o comportamento da tenacidade de um aço estrutural, na região da ZAC, com a variação da energia de soldagem. Já nessa pesquisa, o parâmetro a ser analisado é justamente a dureza na região da ZAC em função dessa energia, a fim de poder associar esses resultados de dureza com tenacidade da junta. A Figura 20 mostra bem as macrografias dos dois tipos de corpos de prova, ilustrando onde foram feitos os entalhes para o ensaio Charpy, utilizados por Silva (2016).

Figura 20: Macrografias dos corpos de prova com diferentes energias de soldagem.



Fonte: Silva (2016)

Além disso, a Figura 20 indica de fato onde foram feitos os entalhes para as medições de tenacidade, próximo à linha de fusão, na região dos grãos grosseiros na ZAC. Como o tema deste trabalho é analisar a dureza também nessa mesma região, então, foram utilizados os mesmos corpos de prova fraturados pelo ensaio Charpy, porém, ensaiados na outra região da ZAC intacta pelo ensaio.

Os corpos de prova foram soldados pelo processo de soldagem a arco elétrico com eletrodo revestido, utilizando o eletrodo E7018. Para que estudasse a influência da energia de soldagem, foram alterados os parâmetros de soldagem, como a corrente elétrica, variando de 110 ampères para 150 ampères. A Tabela 2, apresenta os valores das energias de soldagem, bem como os parâmetros que a influenciaram.

Tabela 2: Valores médios dos parâmetros e da energia de soldagem.

Corrente (A)	Velocidade de soldagem média (mm/s)	Tensão média (V)	Energia de soldagem (kJ/cm)
--------------	-------------------------------------	------------------	-----------------------------

110	1,77	22	109,38
150	2,23	26	139,91

Fonte: Silva (2016)

Portanto, para o ensaio de dureza foram utilizados 5 corpos de prova para cada energia de soldagem. Além disso, toda a preparação e limpeza dos corpos de prova, e dos ensaios de dureza a serem realizados, foram realizados pelos equipamentos e ferramentas do Laboratório de Ensaaios da UFERSA.

Para testar a veracidade da influência da energia de soldagem com os dados obtidos pelo ensaio de dureza foi utilizado a área da estatística como base para a avaliação. Com isso, foi realizado o teste de hipóteses, onde duas situações (hipóteses) distintas, foram testadas para saber qual é a verdadeira. Para esse trabalho, as duas hipóteses são:

- Hipótese nula (H_0): não existe diferença estatística entre as médias das variáveis de interesse;
- Hipótese alternativa (H_a): existe diferença entre as médias das variáveis de interesse.

Portanto, só existe diferença entre as médias das durezas para diferentes energias de soldagem se a hipótese alternativa for verdadeira e consequente a hipótese nula for falsa. Para isso o “t stat” calculado em função dos desvios padrões tem que ser maior que o “t crítico”, que é encontrado em função do grau de liberdade e o nível de significância adotada, que foi de 5%.

A junção dos resultados encontrados por Silva (2016) mais os obtidos deste trabalho, foi possível obter um resultado mais completo e satisfatório sobre a influência da energia de soldagem nas propriedades mecânicas na região da ZAC, especialmente a tenacidade e a dureza, já que elas duas são bastantes influenciadas pelo calor no processo de soldagem.

4.1. PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Devido ao fato da realização do ensaio Charpy, os corpos de prova de Silva (2016) foram fraturados em um dos lados da região da ZAC, além disso, esse ensaio possibilitou o surgimento de deformações plásticas no cordão de solda. Contudo, antes da realização do ensaio de dureza, fez-se necessário a preparação e limpeza dos corpos de prova. A presença

de óxido, óleos ou qualquer outro tipo de sujeira na superfície do material poderia comprometer o ensaio, levando a valores fora do valor verdadeiro. A Figura 21 apresenta como estavam os corpos de prova antes e depois da limpeza superficial.

Figura 21: Estado superficial dos corpos de prova antes e depois da limpeza



Fonte: Autoria própria (2017)

Para a limpeza foram utilizadas lixas d'água com granulometria 180, 220, 320, 400 e 600, através de uma máquina de lixamento. Além de remover o óxido presente na superfície do material, o lixamento possibilitou a remoção da parte deformada plasticamente, retirando pontas e arestas, e assim, garantindo a simetria entre as duas faces do corpo de prova. Após o lixamento foi feito o ataque químico com Nital 2% para que pudesse ser revelado, macroscopicamente, as regiões do cordão de solda e da ZAC, e com um auxílio de uma caneta permanente de ponta fina foi feita a marcação das duas regiões.

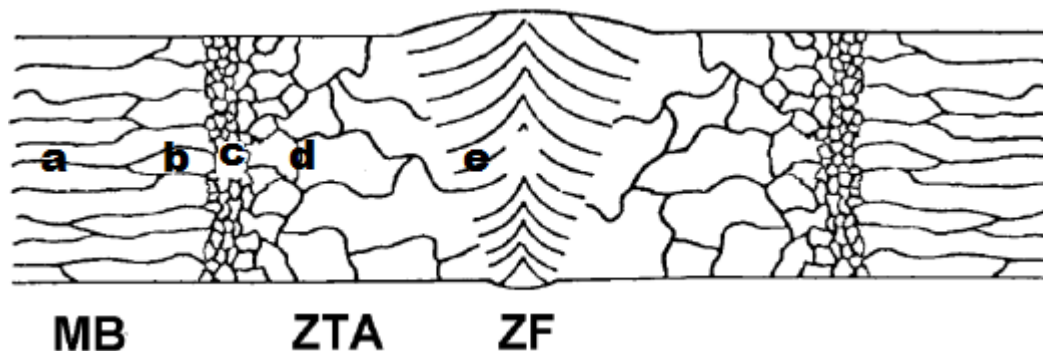
4.2. ENSAIO DE DUREZA

Após a preparação dos corpos de provas, foram realizados o ensaio de dureza pelo método Rockwell na escala B, que é um método de medição direta e simples de ser realizado. Como imprecisões podem ocorrer caso a impressão seja próxima de um canto da amostra ou próxima de outra impressão, foi adotado a recomendação da Norma ASTM E18-15, que é a norma que regulamenta o ensaio de dureza Rockwell, e diz que a impressão deve ser feita a uma distância mínima equivalente a três vezes o diâmetro da calota impressa.

Além disso, como o ensaio de dureza fornece um diâmetro de impressão relativamente grande, e a região da ZAC ser pequena, não seria possível efetuar várias medições ao longo da mesma. Então, para o estudo do caso, foi adotada 5 regiões para medição de dureza: duas medições na região da ZAC, sendo uma próxima da linha de fusão, que seria a região dos

grãos grosseiros, e a outra medição em uma área mais afastada, que seria a região subcrítica, além do cordão de solda e duas no metal de base. A Figura 22 representa bem os locais onde foram realizadas as medições.

Figura 22: Regiões do corpo de prova onde foram feitas as medições de dureza.



Fonte: Silva (2011), Adaptada

O procedimento do ensaio se desenvolveu da seguinte maneira: primeiramente, fez uma pré-carga de 10 kgf, para garantir um contato firme entre o penetrador e o material a ser ensaiado, e depois aplicou-se a carga do ensaio propriamente dita, que foi de 100 kgf. Depois de alguns segundos foi retirada a carga, e feito a leitura da dureza daquela região do material. Esse procedimento se configurou para as cinco regiões do corpo de prova para as duas energias de soldagem.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. ANÁLISE DOS RESULTADOS DA MEDIÇÃO DE DUREZA

As Tabelas 3 e 4 apresentam todos os dados obtidos no ensaio de dureza para as duas energias de soldagem, além das médias das durezas e respectivos desvios padrões para cada região da junta soldada ensaiado.

Tabela 3: Valores das medições de dureza para os corpos de prova soldados com a energia de soldagem de 109 kJ/cm.

Energia de soldagem de 109,38 kJ/cm					
Corpo de prova	Metal de Solda (HRB)	ZAC - Região dos Grãos Grosseiros (HRB)	ZAC - Região Subcrítica (HRB)	Metal de Base 1 (HRB)	Metal de Base 2 (HRB)
CP – 1	88	78,8	71,3	70,6	74,5
CP – 2	89,9	76,8	76,3	74,8	75,7
CP – 3	95	81,2	72,9	73,2	74,9
CP – 4	83,6	77,9	73,8	73	76,1
CP – 5	94,2	76,8	75,3	72,2	74,7
Médias	90,1	78,3	73,9	72,7	75,1
Desvio Padrão	4,6	1,8	1,9	1,5	0,6

Fonte: Autoria própria (2017)

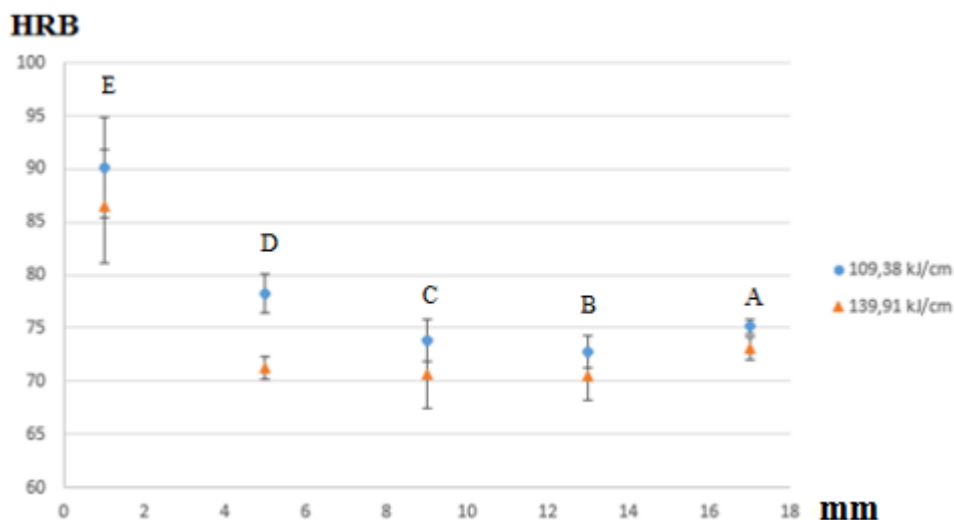
Tabela 4: Valores das medições de dureza para os corpos de prova soldados com a energia de soldagem de 139,91 kJ/cm.

Energia de soldagem de 139,91 kJ/cm					
Corpo de prova	Metal de Solda (HRB)	ZAC – Região dos Grãos Grosseiros (HRB)	ZAC - Região Subcrítica (HRB)	Metal de Base 1 (HRB)	Metal de Base 2 (HRB)
CP - 1	83,7	72,5	65,3	66,9	72,6
CP – 2	93	70,3	71,4	69,7	73,5
CP – 3	91,6	72,2	70,8	71,6	73
CP – 4	82,2	70,1	72,4	71,2	74,5
CP – 5	82	71,5	73,7	73	71,8
Médias	86,5	71,3	70,7	70,4	73,1
Desvio Padrão	5,3	1,1	3,2	2,3	1

Fonte: Autoria própria (2017)

Com os dados obtidos nas Tabelas 3 e 4 foi possível fazer um gráfico relacionando as médias das durezas com os respectivos desvios padrões para as diferentes regiões ensaiadas, como mostra a Figura 23.

Figura 23: Resultados das médias com os desvios padrões do ensaio de dureza.

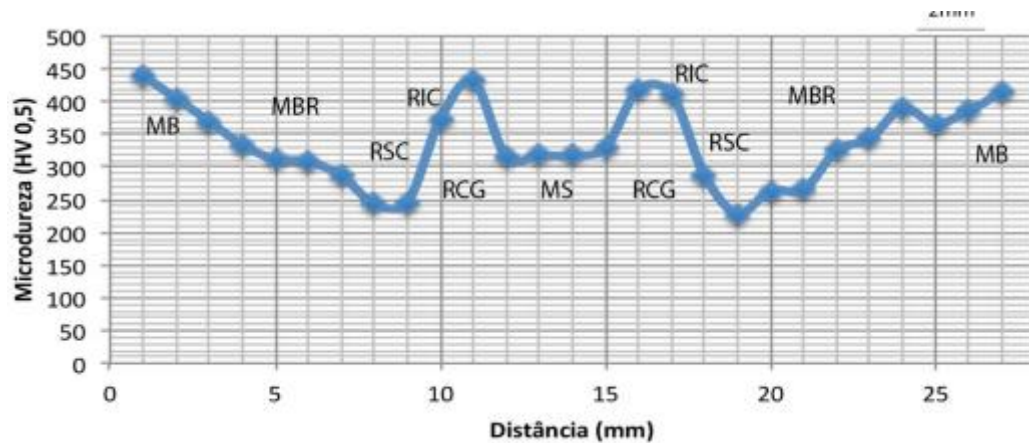


Fonte: Autoria própria (2017)

Como a dureza está relacionada com a energia de soldagem, quanto maior a energia de soldagem, menor será a dureza da junta soldada. Assim, os corpos de prova que foram soldados com uma energia de soldagem de 109,38 kJ/cm apresentaram uma maior dureza nas diferentes regiões.

A Figura 25 apresenta os valores médios de dureza de cada região do corpo de prova para cada condição, e nisso alguns dados obtidos foram questionáveis em relação a teoria. Os valores de dureza não condizem com a literatura, a tendência da dureza ao longo da ZAC era de diminuir no início da região e logo em seguida aumentar à medida que se aproximasse no final da ZAC, como aconteceu no trabalho de Mantovani (2015), a Figura 24 apresenta como deveria se comportar a dureza ao longo da ZAC.

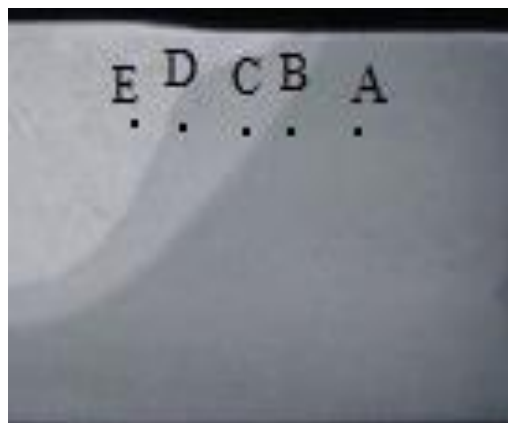
Figura 24: Comportamento da dureza ao longo da ZAC.



Fonte: Mantovani (2015).

Esses valores incoerentes com a teoria podem ser explicados pela técnica utilizada para medição. Para esse tipo de análise, de observar o comportamento da dureza ao longo ZAC, o método mais recomendado seria a de microdureza, pois esse ensaio possibilitaria a obtenção das medidas de durezas em todas as sub-regiões da ZAC, já que a impressão na peça provocada pelo ensaio é muito pequena, e assim, tendo a possibilidade de efetuar várias medições dentro da região da ZAC. Uma outra explicação seria no método utilizado para determinar as regiões a serem medidas pelo ensaio de dureza. A Figura 25 mostra uma macrografia de um corpo de prova apresentando os locais onde foram medidos a dureza.

Figura 25: Macrografia ilustrando os locais de medições de dureza.



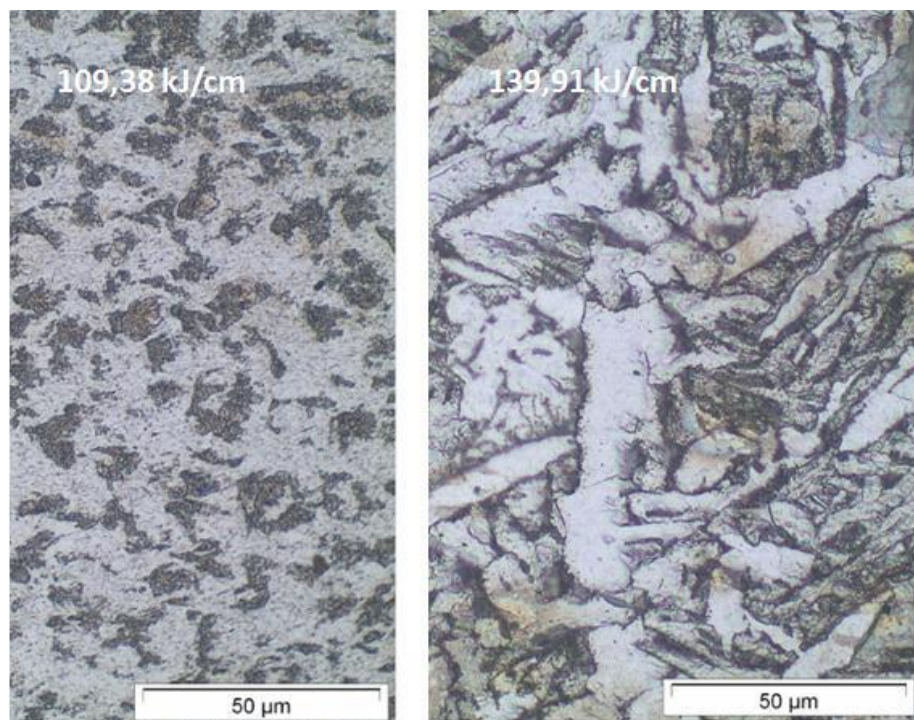
Fonte: Ferreira (2015), Adaptada

Pela Figura 25 é possível perceber que as medições nos corpos de prova tiveram como referência a “penumbra” da ZAC (região vista macroscopicamente que delimita a parte final da ZAC e início do metal de base). Esse método de referência pode ter sido uma das causas da incoerência dos valores medidos. Pelo fato de que a medição no metal de base 1, ponto B do gráfico, pode ter sido feito ainda na região da ZAC, por estar tão próximo da ZAC, e também pelo fato do ensaio de dureza, onde ao ser aplicado uma impressão em um determinado ponto, o mesmo provoca uma deformação ao redor da calota impressa, interferindo na dureza próxima a esse ponto.

Contudo, o propósito do trabalho era analisar a influência da energia de soldagem somente na região dos grãos grosseiros na ZAC, ponto D do gráfico. Por isso, os resultados obtidos nessa região condizem com teoria, onde os valores de dureza tenderiam a diminuir com o aumento da energia de soldagem.

De acordo com os estudos de Almeida (2014), a dureza na região dos grãos grosseiros na ZAC é bastante influenciada pelo aporte térmico, nessa região os valores de temperaturas provocam mudanças na microestrutura e no tamanho de grão, e conseqüentemente, variando a dureza.

Figura 26: Micrografias das regiões dos grãos grosseiros para as duas energias de soldagem.



Fonte: Silva (2016)

Conforme a Figura 26, os grãos se apresentam em maiores tamanhos para uma maior energia de soldagem, assim a dureza é menor com o aumento do tamanho de grão. A dureza média na região dos grãos grosseiros para uma energia de soldagem de 109,38 kJ/cm foi de 78,3 HRB, enquanto que para uma energia de 139,91 kJ/cm foi de 71,3 kJ/cm. Portanto, à medida que se aumenta a energia de soldagem, mais calor foi inserido na peça e consequentemente menor foi a velocidade de resfriamento, provocando assim um aumento do tamanho do grão.

Com base nos resultados de dureza na região dos grãos grosseiros apresentados nesse trabalho e nos resultados de tenacidade para essa mesma região apresentados no trabalho de Silva (2016) foi possível montar a Tabela 5, que faz a comparação das duas propriedades com o aumento da energia de soldagem.

Tabela 5: Comparação entre a dureza e a energia absorvida quando há um aumento da energia de soldagem.

Energia de soldagem ¹	Dureza (HRB) ²	Energia absorvida (Joules) ¹
109,38 kJ/cm	78,3	98
139,91 kJ/cm	71,3	78

Fonte: Silva (2016)¹ e Autoria própria (2017)²

Geralmente, o aumento da dureza provoca a diminuição da tenacidade do material, como acontece em um tratamento térmico, onde, dependendo das variáveis do tratamento pode-se obter uma microestrutura mais dura em relação a outra, porém, com a diminuição da tenacidade, e vice-versa.

Entretanto, neste trabalho houve tanto a redução da dureza como da tenacidade. Mas neste caso, essas duas propriedades estão ligadas pela granulometria nessa região da peça, o qual o aumento da energia de soldagem possibilitou o aumento do tamanho de grão, provocando a redução da dureza e da energia absorvida do material. A Tabela 5 e a Figura 26 permite identificar essa relação entre refino de grão e essas duas propriedades.

5.2. ESTATÍSTICA

A Tabela 6 apresenta os dados para “t-student” (exportado do Excel).

Tabela 6: Tabela “t-student” para diferente energias de soldagem.

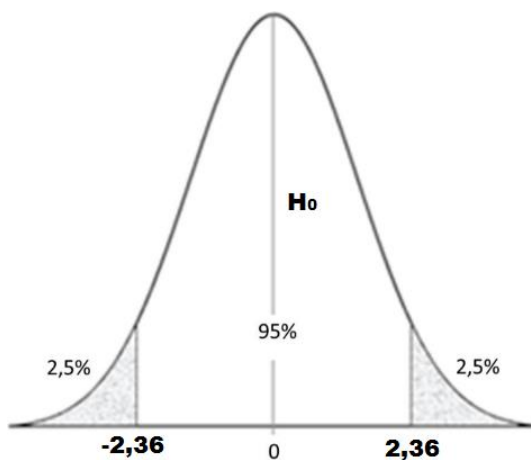
Teste-t: duas amostras presumindo variâncias diferentes

	109,38 kJ/cm	139,91 kJ/cm
Média	78,3	71,3
Variância	3,33	1,182
Observações	5	5
Hipótese da diferença de média	0	
Gl	7	
Stat t	7,347775511	
P(T<=t) uni-caudal	7,81141E-05	
t crítico uni-caudal	1,894578605	
P(T<=t) bi-caudal	0,000156228	
t crítico bi-caudal	2,364624252	

Fonte: Autoria própria (2017)

Para o trabalho foi adotado um nível de significância de 5%. Então, para avaliação do teste é preciso analisar o valor de “t” encontrado (t crítico bi-caudal) e o valor de “t” calculado (Stat t) em um gráfico de distribuição normal. A Figura 27 representa um gráfico de distribuição normal com o valor de “t crítico bi-caudal” do trabalho.

Figura 27: Gráfico de distribuição normal com o valor de “t crítico bi-caudal”.



Fonte: Monteiro (2014), Adaptada

Para uma confiabilidade de 95% ($\alpha = 0,05$), o valor de “Stat t” é maior que o “t crítico bi-caudal”, rejeitando a hipótese nula. Assim, aceitando a hipótese alternativa e comprovando que a dureza da região dos grãos grosseiros depende sim da energia de soldagem, sendo elas diferentes.

6. CONCLUSÕES

Ao fim desse trabalho, ficou evidente a influência da energia de soldagem em uma junta soldada, principalmente na região da ZAC, por conta da variação dos parâmetros de soldagem.

Foi possível no final deste trabalho afirmar, para uma confiabilidade de 95%, que para a energia de soldagem de 109,38 kJ/cm a dureza média da região dos grãos grosseiros foi de 78,3 HRB, e para uma energia de 139,91 kJ/cm a dureza média para mesma região foi de 71,3 HRB.

Os resultados obtidos neste trabalho puderam constatar que o aumento da energia de soldagem de 109,38 kJ/cm para 139,91 kJ/cm houve uma redução da dureza na região grosseira da ZAC.

Outra constatação observada nesse trabalho, foi em relação a dureza ao longo da junta soldada, na qual a mesma varia ao longo da peça soldada, principalmente na região da ZAC, onde o efeito do aporte térmico é evidente.

Além disso, foi possível observar neste trabalho que os resultados de absorção de energia ao impacto, e os resultados de dureza, ambos na região dos grãos grosseiros, estão diretamente relacionados com o tamanho de grão, no qual o aumento da granulometria dessa região provocou a diminuição dos valores dessas duas propriedades.

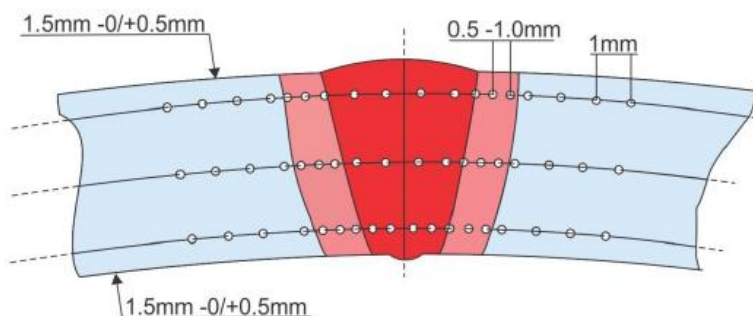
7. PROPOSTA DE UM TEMA PARA UMA FUTURA PESQUISA

Como já foi dito anteriormente, as propriedades mecânicas da região da ZAC podem ser modificadas com a variação da energia de soldagem e com isso, efeitos indesejáveis nessa modificação podem surgir. E esse tema abordado teve como área de estudo somente a região dos grãos grosseiros e uma área mais afastada, ainda na ZAC, supostamente a região dos grãos refinados.

Porém, o ensaio de dureza, neste caso, tem suas desvantagens devido ao fato de como área de impressão ser relativamente grande, ter a possibilidade da marcação da calota impressa, na região dos grãos grosseiros, encobrir parte da região da solda, e influenciando no resultado de medição. E como a distância de uma endentação para outra tem que ser no mínimo três vezes o diâmetro da impressão, a segunda endentação na ZAC torna-se difícil de ser realmente na região dos grãos refinados.

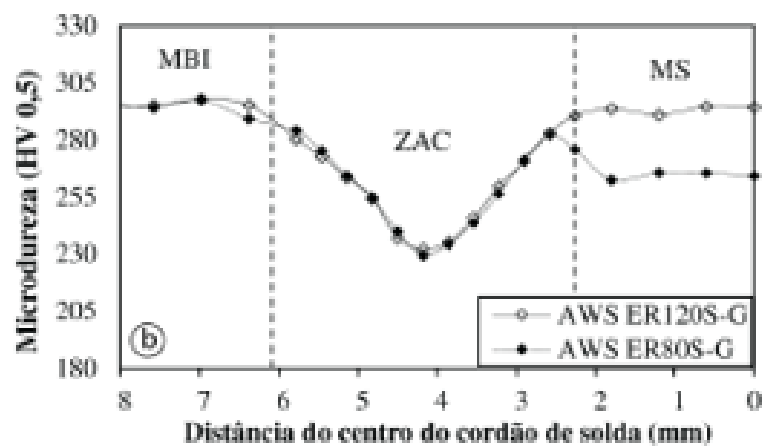
Portanto, é possível perceber que o ensaio de dureza para estas situações gera muitas incertezas, principalmente no que se refere à precisão dos resultados em função da espessura das peças a ensaiar e à necessidade de medir a dureza de pequenas áreas então, como proposta para uma pesquisa futura é justamente analisar essa influência da variação da energia de soldagem na dureza ao longo da ZAC, mas neste caso, o ensaio a ser realizado é o de microdureza Vickers, que é normatizado pela norma ASTM E92. Como a necessidade dessa pesquisa é realizar várias medições ao longo da ZAC, a norma NACE MR0-175:03 padroniza este tipo de situação. Esse método pode ser visto pela Figura 28.

Figura 28: Localização dos pontos de endentação para obtenção de microdureza em uma junta soldada.



Além disso, esse trabalho possibilitaria traçar o perfil de dureza na ZAC, que seria um gráfico em função da dureza e a distância, mostrando a medida dessa propriedade à medida que se afasta ao longo da ZAC, englobando todas as sub-regiões. Esse gráfico serviria também para comprovar a ideia de que o aumento da energia de soldagem, diminui a dureza da região. E uma outra vantagem desse perfil, seria uma das formas de enfatizar o fato de que há um aumento da largura da ZAC com o aumento dessa energia. A Figura 29 apresenta um perfil de dureza ao longo de uma junta soldada de um aço.

Figura 29: Perfil de dureza ao longo de uma junta soldada.



Fonte: Dalcin (2016), Adaptada

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, José Gonçalves de. **Análise da Influência do Hidrogênio na Tenacidade Quase Estática de Juntas Soldadas de Aços ARBL**. 2014. 230 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2014.

BERTOLDI, Evandro. **Análise de Ensaios de dureza Brinel e Rockwell em Corpo de Prova**. In: SEMANA INTERNACIONAL DE ENGENHARIA E ECONOMIA FAHOR, 4., 2014, Horizontina. Anais... . Horizontina: Sief, 2014. p. 56 - 67.

CALLISTER, William D; RETHWISCH, David G. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 8. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2013. 817 p.

CASTRO, Filipe Ribeiro de. **Avaliação do Comportamento Mecânico e Tenacidade a Fratura do Aço SAE/AISI 4140 Submetido a Tratamento Térmico Criogênico**. 2013. 137 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia e Ciência dos Materiais, Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campo dos Goytacazes, 2013.

COSTA, Vagner Machado. **Análise da Tenacidade de uma Junta Soldada de um Aço Resistente à Abrasão da Série 450 HB**. 2014. 92 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

DALCIN, Rafael Luciano et al. **Efeitos da Energia de Soldagem e Consumíveis sobre a Resistência à Flexão Simples de Juntas Soldadas em Perfis Tubulares de Aço TMCP**. Soldagem e Inspeção, Porto Alegre, v. 21, n. 1, p.92-102, mar. 2016.

FERREIRA, Jorge Carlos et al. Propriedades Mecânicas e Microestruturais de Juntas Soldadas pelo Processo a Arco Submerso com Elevado Aporte Térmico. **Soldagem e Inspeção**, Rio de Janeiro, v. 3, n. 20, p.347-358, 08 out. 2015.

GODOY, Wagner Lopes de. **Efeito da Temperatura de Pré-Aquecimento e Características do Pulso na Microestrutura de Aço Estrutural de Alta Resistência e Baixa Liga Soldado com Arco Elétrico e Proteção Gasosa**. 2008. 178 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2008.

GOMES, José Marcos. **Efeito da Temperatura de Interpasse de Soldagem sobre a Microestrutura, Dureza e Resistência à Corrosão do Aço Inoxidável Superduplex**. In:

CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 22., 2016, Natal. Anais... . Silveiras: Sbeb, 2016. p. 4861 - 4872.

GOUVEIA, Kátia Cristina. **Investigação dos Métodos de Determinação da Temperatura de Transição Dúctil-Frágil (TTDF) Utilizando Ensaio de Impacto Charpy**. 2013. 162 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Centro Universitário da Fei, São Bernardo do Campo, 2013.

GUMIERI, Thierry Henrique Machado. **Avaliação da Tenacidade à Fratura em Juntas Soldadas Circunferenciais de Tubulações de Processo**. 2011. 74 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2011.

MANTOVANI, Anderson Casanova. **Efeito da Energia de Soldagem e dos Parâmetros de Bake Hardening sobre Juntas de Aço DP1000 Soldadas por MAG**. 2015. 47 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

MATOS, Bruno Biazetto Rodrigues de. **Influência da Variação do Ciclo Térmico sobre a Máxima Dureza na ZAC na Soldagem por Arco Submerso de Aço SAE 1045**. 2014. 21 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

MELLO, André Luís Nunes. **Análise Experimental da Vida em Fadiga de Trincas Propagadas em Placas de Alumínio Reparadas com Material Compósito**. 2005. 131 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Oceânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

MONTEIRO, Joel Lemos Dias. **Influência do Procedimento de Soldagem na Relação Tenacidade/Microestrutura de Metal de Solda de Aço de Alta Resistência Obtido pelo Processo GMAW**. 2014. 85 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Sucknow da Fonseca, Rio de Janeiro, 2014.

MORAIS, Vinicius Souza. **Projeto e Construção de Charpy Utilizando a Modelagem Numérica da Plataforma Ansys no Estudo Comparativo Entre Ensaios Numéricos e práticos a Partir de Diferentes Propriedades Mecânicas de Materiais Compósitos**. 2016. 179 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciência dos Materiais, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2016.

NACE MR0175/ISSO 15156-2:2003 – *Petroleum and natural gas industries – Materials for use in H₂S-containing environments in oil and gas production – Part 2: Cracking-resistant carbono and low alloy steels, and the use of cast irons.*

ROCHA, Ianto Cáceres Leite. **Propriedades Mecânico/Metalúrgicas de Juntas Soldadas de DP1000 e o Efeito de Bake Hardening.** 2004. 95 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

SILVA, Aylson Allan de Medeiros. **Influência da Energia de Soldagem na Tenacidade da Zona Afetada Pelo Calor em uma Junta de um Aço Estrutural Soldado por Eletrodo Revestido E7018.** 2016. 61 f. TCC (Graduação) – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2016.

SILVA, Ericson José da. **Análise das Características Microestruturais das Juntas Soldadas com Eletrodos Básicos e Impermeáveis.** 2015. 60 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2015.

SILVA, José Geraldo Araújo. **Avaliação Comportamental de Juntas Soldadas de um Aço Estrutural do Tipo SAC 50 Sob Fadiga.** 2001. 106 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2001.

SILVA, Maurício de Carvalho. **Determinação Experimental da Tenacidade à Fratura da zona Termicamente Afetada de Junta Soldada de Aço API X80S.** 2009. 134 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

VILCHEZ, Carlos Alexandre Zárate. **Influência de Ciclos Térmicos na Microestrutura e Propriedades Mecânicas de Junta Soldada do Aço COS Civil 300.** 2005. 123 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Materiais e Processos de Fabricação, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2005.

+