



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS DE MARABÁ
FACULDADE DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

JULIANA RODRIGUES DA SILVA

TRANSIÇÃO DÚCTIL-FRÁGIL DO AÇO NAVAL ASTM A 131

MARABÁ
2013

JULIANA RODRIGUES DA SILVA

TRANSIÇÃO DÚCTIL-FRÁGIL DO AÇO NAVAL ASTM A 131

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Materiais, Campus de Marabá, Universidade Federal do Pará. Orientador: Prof. M.Sc. Luis Fernando Nazaré Marques.

MARABÁ
2013

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Biblioteca II da UFPA. CAMAR, Marabá, PA

Silva, Juliana Rodrigues da

Transição dúctil-frágil do aço naval ASTM A131 / Juliana Rodrigues da Silva; orientador, Luís Fernando Nazaré Marques. — 2013.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal do Pará, Campus Universitário de Marabá, Faculdade de Engenharia de Materiais, Marabá, 2013.

1. Aço - Metalurgia. 2. Aço - Fratura. 3. Resistência de materiais. 4. Construção naval. I. Marques, Luís Fernando Nazaré, orient. II. Título.

CDD: 21. ed.: 669.1

JULIANA RODRIGUES DA SILVA

TRANSIÇÃO DÚCTIL-FRÁGIL DO AÇO NAVAL ASTM A 131

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Materiais, Campus de Marabá, Universidade Federal do Pará. Orientador: Prof. M.Sc. Luis Fernando Nazaré Marques.

Data de aprovação: 8 de abril de 2013.

Conceito: _____

Banca examinadora:

_____ - Orientador
Prof. M.Sc. Luis Fernando Nazaré Marques / UFPA

_____ - Membro interno
Prof. Esp. Márcio Paulo de Araújo Mafra / UFPA

_____ - Membro externo
Eng. Rodolfo Dias de Lima / SINOBRAS

Aos meus pais Maria Célia e Estanislau Cordeiro, e aos meus irmãos: Adriana, Fernanda e Stanislaw.

AGRADECIMENTOS

À Deus. Aos meus pais, pela dedicação e determinação na minha formação e dos meus irmãos, aos familiares pelo apoio e força.

À todos os amigos e principalmente às minhas queridas e inseparáveis amigas: Camila Konno, Juliana Santos, Rafaela Souza que tanto me ajudaram durante esses cinco “longos” anos de convivência e minha amiga ‘quase’ geóloga Katiane, pelo apoio nessa fase de tensão e correria. Aos colegas da FEMAT, aos colegas de turma, com certeza “futuros excelentes profissionais”, da qual tive orgulho de fazer parte.

Aos funcionários da UFPA, aos técnicos e aos professores da FEMAT, em especial ao prof. Mafra pela disposição em ajudar e ao meu orientador pela paciência e compreensão nesta final e importante fase da minha graduação. À professora Gilmara da FAGEO que, prontamente e sem nenhuma hesitação, disponibilizou o laboratório para que eu pudesse usar os equipamentos. Enfim, minha eterna gratidão à todos que colaboraram e fizeram parte desta inesquecível etapa da minha vida.

RESUMO

A indústria naval se apresenta bastante avançada em termos de construção, desenvolvimento de materiais e em relação ao estudo de novos processos de fabricação. Quando se trata de aços aplicados à indústria naval, claramente é identificado nesse cenário o aço ASTM A131, empregado na construção de plataformas marítimas de extração de petróleo, em embarcações de médio e grande porte, o qual apresenta alta resistência, boa tenacidade, bem como boa soldabilidade. Neste trabalho a transição do comportamento dúctil-frágil do aço naval ASTM A131 Grau A foi levantado realizando ensaios de impacto *Charpy* em variadas temperaturas. O ensaio foi realizado em corpos de prova padronizados, em conformidade com a norma ASTM E23, submetidos a temperaturas, compreendidas entre 200°C e -50 °C. A curva de energia absorvida em função da temperatura possibilitou a determinação de parâmetros do material e dessa faixa de temperatura na qual esse material sofre alteração de dúctil para frágil. A medida da variação da resistência ao impacto com a temperatura e as características da superfície de fratura analisadas, usando a técnica de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Estereomicroscopia, foram utilizadas como uma forma de se determinar a existência dessa transição dúctil-frágil no aço.

Palavras-Chave: Impacto, Transição dúctil-frágil, Aço naval.

ABSTRACT

The shipbuilding industry appears quite advanced in terms of construction, materials development and in relation to the study of new manufacturing processes. When it comes to steel applied to the shipping industry, is clearly identified in this scenario the ASTM A131 steel, used in the construction of offshore oil drilling in vessels of medium and large, which has high strength, good toughness, and good weldability. In this work the transition from ductile-brittle behavior of ship steel ASTM A131 Grade A was lifted performing *Charpy* impact tests at various temperatures. The assay was performed in standardized specimens in accordance with ASTM E23, which were subjected to various temperatures between 200 ° C and -50 ° C. The curve of energy absorbed versus temperature allowed determination of the material parameters and this temperature range at which the material undergoes changes from ductile to brittle. The measured change in impact resistance with temperature, the mechanism of fracture, the fracture surface characteristics analyzed using the technique of Scanning Electron Microscopy (SEM) and stereomicroscopy was used as a way to determine the existence of this transition ductile fragile steel.

Keywords: Impact, Ductile-brittle transition, Shipbuilding Steel.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIMBOLOS

CCC	Cúbica de Corpo Centrado
CFC	Cúbica de Face Centrada
ASTM	American Society for Testing and Materials
J	Joule
MPa	Mega Pascal
F.F	Ferro Fundido
T	Temperatura
C	Carbono
Mn _{min}	Manganês Mínimo
P	Fósforo
S	Enxofre
Cr	Cromo
Cu	Cobre
Mo	Molibdênio
Si	Silício
Ni	Níquel
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
SEM	Scanning Electron Microscopy

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Corpos de Prova para Ensaio de Impacto.....	16
Figura 2 - Procedimento do Ensaio <i>Charpy</i>	17
Figura 3 – Deslocamento das Curvas de Resistência ao Choque em Função do teor de Carbono.....	20
Figura 4 – Influência do teor de Manganês em um aço Fe-Mn-0,05% C	20
Figura 5 – Fluxograma da metodologia empregada para o desenvolvimento do trabalho	22
Figura 6 – Planos de Fratura ao longo dos eixos principais	23
Figura 7 - Corpo de prova <i>Charpy</i> tipo A.....	23
Figura 8 – Máquina de Ensaio de Impacto	24
Figura 9 – Nitrogênio líquido utilizado para o resfriamento dos corpos de prova	25
Figura 10 – Micrografia da face Transversal (a) e seção Longitudinal da chapa (b) .	26
Figura 11 – Corpos de Prova após Ensaio de Impacto	27
Figura 12 – Curva de Transição Dúctil-Frágil do aço ASTM A-131	28
Figura 13 – Superfície do Corpo de Prova Ensaiado à 200 °C	29
Figura 14 – Superfície do Corpo de Prova Ensaiado à 15 ° C	29
Figura 15 – Superfície do Corpo de Prova Ensaiado à 5 °C	29
Figura 16 – Superfície do Corpo de Prova Ensaiado à 0 °C	30
Figura 17 – Superfície do Corpo de Prova Ensaiado à -50 °C	30

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	12
1.1 OBJETIVOS	13
1.1.1 Objetivos Gerais.....	13
1.1.2 Objetivos Específicos	13
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	14
2.1 AÇOS UTILIZADOS NA INDÚSTRIA NAVAL.....	14
2.1.1 Aço ASTM A131 Grau A.....	14
2.2 CONSIDERAÇÕES SOBRE O ENSAIO DE IMPACTO.....	14
2.2.1 Ensaio de Impacto em Corpos de Prova Entalhados.....	15
2.2.2 Influência da Temperatura.....	17
2.3 TIPOS DE FRATURA.....	18
2.3.1 Fatores Básicos para Fratura Frágil	19
2.3.2 Método para Levantamento da Curva Dúctil-Frágil.....	19
3 MATERIAIS E METODOLOGIA.....	22
3.1 MATERIAIS	22
3.2 METODOLOGIA.....	22
3.2.1 Microscopia Óptica.....	23
3.2.2 Usinagem dos Corpos de Prova	23
3.2.3 Ensaio de Impacto.....	24
3.2.4 Estereomicroscopia e Microscopia Eletrônica de Varredura	25
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	26
4.1 MICROSCOPIA ÓPTICA.....	26
4.2 ENSAIOS DE IMPACTO	26
4.2.1 Curva de transição dúctil-frágil do aço ASTM A 131.....	27
4.3 ESTEREOMICROSCOPIA E MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA	28
5 CONCLUSÕES.....	31
SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS.....	32
REFERÊNCIAS	33

1 INTRODUÇÃO

Os aços destinados a construção naval são os aços estruturais com as maiores faixas de espessuras produzidos pelas siderúrgicas. Estes aços precisam possuir uma boa soldabilidade, boa tenacidade (resistência à fratura), boa ductilidade, inclusive ao longo da espessura, e uma resistência mecânica mínima. Porém, os principais requisitos para estes aços recaem sobre a sua resistência à fratura.

Desta forma, aumentar a resistência à iniciação de fratura frágil (clivagem) é um aspecto especialmente importante para navios quebra gelo, que frequentemente enfrentam temperaturas baixas em serviço, podendo chegar à até $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ou menores no caso de navios quebra-gelos [2].

Mesmo utilizando ligas dúcteis, com resistência suficiente para suportar uma determinada aplicação (ensaio de tração, por exemplo) verifica-se na prática que um material dúctil pode romper-se de forma frágil, dependendo do meio. Assim, materiais dúcteis se tornam frágeis à temperaturas mais baixas. Conseqüentemente, isto pode gerar situações desastrosas caso a temperatura de teste do material não corresponda à temperatura efetiva de trabalho. Por isso é importante conhecer a temperatura de transição dúctil-frágil desse tipo de material.

A propósito, um exemplo desse tipo de situação aconteceu com os navios tipo Liberty, da época da Segunda Guerra Mundial, que literalmente quebraram ao meio. Isso porque eram fabricados em aço com baixa concentração de carbono, que tornaram-se frágeis em contato com as águas frias do mar [6]. Por causa disso, durante esse período, os equipamentos bélicos foram levados a solicitações críticas de uso, despertando o interesse dos cientistas pelo assunto.

Deste modo, uma fratura frágil é, pois, instável e propaga-se sem necessidade de aumento de tensão a velocidades elevadas, principalmente quando há possibilidade de a trinca percorrer o material continuamente. Vale ressaltar que, com os metais do sistema CCC, como os aços, mesmo os de baixa e média resistências, ocorre essa dependência bastante acentuada da temperatura. Ou seja, a existência de uma pequena trinca no metal faz com que, dependendo da temperatura, a ductilidade do material caia, de modo que aconteça a ruptura mesmo antes de ser

atingido o seu limite de escoamento [1]. Os metais com estrutura CFC de baixa e média resistência e a maioria dos que possuem estrutura hexagonal compacta, cuja tenacidade ao entalhe é alta, não apresentam fratura frágil.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivos Gerais

Busca-se, de maneira geral, o levantamento da transição dúctil-frágil do aço naval ASTM A131 através da realização de ensaios de impacto *Charpy*.

1.1.2 Objetivos Específicos

Levantamento da curva dúctil-frágil do Aço ASTM A-131;

Análise das superfícies e propagação da trinca através da técnica de microscopia eletrônica de varredura e estereomicroscopia;

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 AÇOS UTILIZADOS NA INDÚSTRIA NAVAL

Os aços comuns, empregados na construção de navios e embarcações, são geralmente classificados de acordo com os valores de resistência mecânica em dois grandes grupos: aços de resistência moderada ou normal e aços de resistência elevada. O primeiro grupo subdivide-se ainda em classes A, B, D e E conforme os valores de tenacidade do aço. Já o segundo grupo apresenta uma subdivisão mais detalhada em classes AH, DH, EH e FH de acordo com os valores de tenacidade, seguidos dos dígitos 32, 36 e 40 conforme os valores do limite de escoamento do aço.

Embora não exista muita novidade em termos de aços fundamentalmente diferente dos tradicionais, existem estudos de melhoria contínua da qualidade e desempenho dos aços para navios. É importante ressaltar ainda que os aços de menor resistência mecânica, aplicados em navios, abrangem graus A, B, D e E, com limite de escoamento mínimo especificado de 315 MPa e com Limite de Resistência de 440-490 MPa [2].

2.1.1 Aço ASTM A131 Grau A

A indústria naval se apresenta bastante avançada em termos de construção, desenvolvimento de materiais e em relação ao estudo de novos processos de fabricação. Desta forma, quando se trata de aços aplicados à indústria naval, claramente é identificado nesse cenário o aço ASTM A131, que é um aço carbono estrutural comum e boa tenacidade, bem como boa soldabilidade. Esse aço é empregado na construção de embarcações de médio e grande porte, em plataformas marítimas de extração de petróleo, e são geralmente classificados em grandes grupos conforme sua norma [3].

2.2 CONSIDERAÇÕES SOBRE O ENSAIO DE IMPACTO

O ensaio de impacto é um ensaio essencialmente comparativo para uso em metais de uso em Engenharia Estrutural de baixa e de média resistências. O resultado do ensaio, isto é, a energia absorvida para romper o corpo de prova, pode ser utilizado como um controle de qualidade do produto desses materiais. O teste é usualmente empregado para metais, mas o princípio pode ser usado para polímeros,

materiais cerâmicos e compostos. Os setores industriais que utilizam estes testes incluem Aeroespacial, Geração de Energia, Automotivo e Nuclear.

Além disso, é um dos primeiros e até hoje um dos ensaios mais empregados para o estudo de fratura frágil nos metais. É, às vezes, denominado *ensaio de choque* ou impropriamente de *ensaio de resiliência*, é um teste dinâmico usado principalmente para materiais utilizados em baixa temperatura, como teste de aceitação do material [1].

No entanto, o resultado do ensaio é apenas uma medida de energia absorvida e não fornece indicações seguras sobre o comportamento do metal ao choque em geral, o que seria possível se pudesse ensaiar uma peça inteira sob as condições da prática. Neste contexto, sabe-se que, a existência de uma pequena trinca no metal faz com que, dependendo da temperatura, a ductilidade do material caia, de modo que aconteça a ruptura mesmo antes de ser atingido o seu limite de escoamento [10].

De qualquer forma, os testes são importantes e fundamentais para a segurança dos materiais. Assim, os tipos de ensaio de impacto mais comum são: Ensaio *Charpy* e Ensaio *Izod*. A diferenciação destes, ocorre pelos tipos de corpos de prova e o tipo de aparato de queda de peso (pêndulo) usado.

Neste sentido, o ensaio de impacto *Charpy*, que foi utilizado neste estudo, é sensível à microestrutura e aos mecanismos de fragilização. A quantidade medida é a Energia absorvida (por ex., em J). Vale lembrar que este valor, em princípio, não possui relação direta com a resistência à fratura. Contudo, o ensaio de impacto pode ser comparativo, estabelecendo um ranking de desempenho entre materiais de mesma classe.

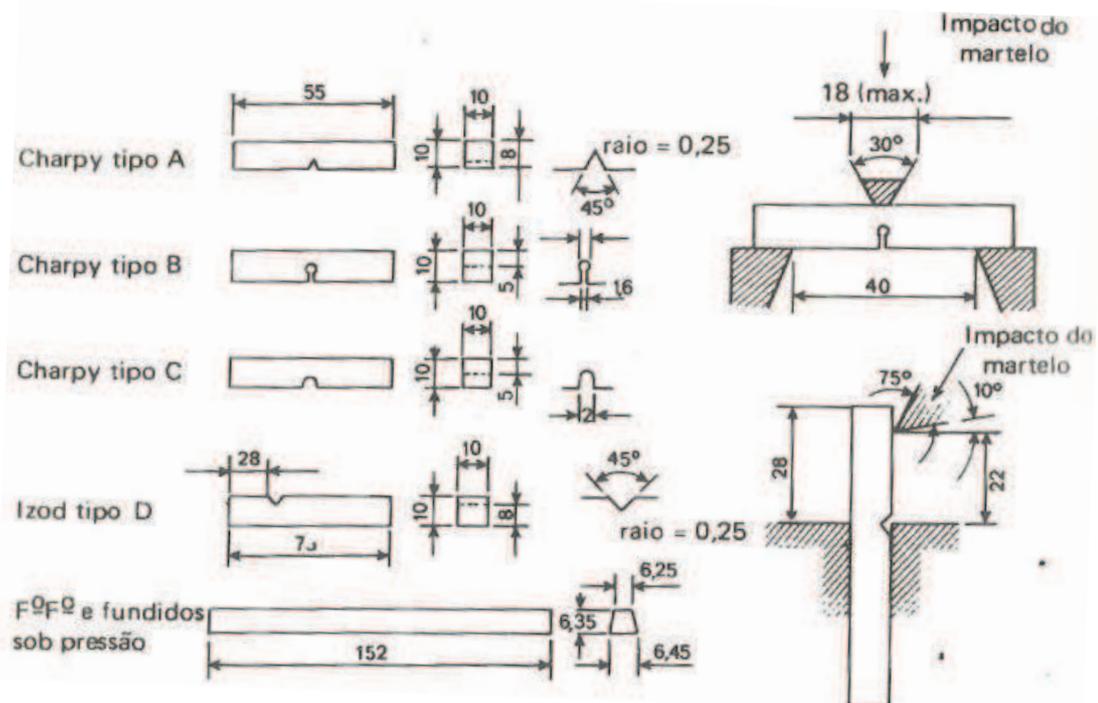
2.2.1 Ensaio de Impacto em Corpos de Prova Entalhados

Geralmente os corpos de prova entalhados para ensaio de impacto são de duas classes: corpo de prova *Charpy* e corpo de prova *Izod*, recomendados pela norma americana E-23 da ASTM. Os corpos de prova *Charpy* podem ainda ser divididos em três tipos, como mostrado na Figura 1, conforme a forma de seu entalhe. Assim, os corpos de prova *Charpy* tipo A apresentam entalhes mais agudos

e são, em geral, usados para mostrar diferenças de energias absorvidas nos ensaios de metais de caráter mais dúctil ou com velocidades menores de ensaios.

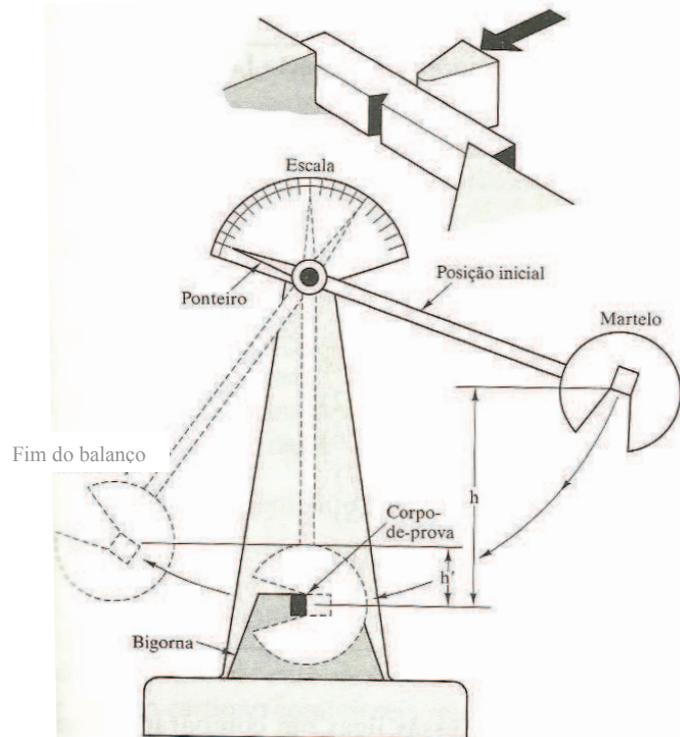
Desta forma, a tendência de um metal de se comportar de uma maneira frágil é medida pelo ensaio de impacto. Ou seja, o corpo de prova é padronizado e provido de um entalhe para localizar a sua ruptura e produzir um estado triaxial de tensões, quando ele é submetido a uma flexão por impacto, produzida por um martelo pendular. Conseqüentemente, a energia que o corpo de prova absorve, para se deformar e romper, é medida pela diferença entre a altura atingida pelo martelo antes e após o impacto, multiplicada pelo peso do martelo. Vale ressaltar que, nas máquinas em geral, essa energia é medida na própria máquina através de um ponteiro que corre numa escala graduada, já convertida em unidade de energia. A Figura 2 mostra o procedimento do ensaio de *Charpy*.

Figura 1 – Corpos de Prova para Ensaio de Impacto



Fonte: Souza, 1982 [1].

Figura 2 - Procedimento do Ensaio Charpy



Fonte: Shackelford, J.F., 2008 [6].

Deste modo, pela medida da área de secção entalhada do corpo de prova, pode-se então obter a energia absorvida por unidade de área, que também é útil. Assim, quanto menor for a energia absorvida, mais frágil será o comportamento do material àquela solitação dinâmica [1].

Neste contexto, é importante esclarecer que o entalhe produz um estado triplo de tensões, suficiente para provocar uma ruptura de caráter frágil. No entanto, não se pode medir satisfatoriamente os componentes das tensões existentes, pois podem mesmo variar conforme o metal usado ou conforme a estrutura interna a que o metal apresenta. Desse modo, o ensaio de impacto em corpos de prova entalhados tem limitada significação e interpretação, sendo útil apenas para comparação de materiais ensaiados nas mesmas condições [10].

2.2.2 Influência da Temperatura

A temperatura de ensaio tem uma influência decisiva nos resultados obtidos e deve, portanto, ser mencionada no resultado, juntamente com o tipo de corpo de prova que foi ensaiado. Assim, a energia medida é um valor relativo e comparativo entre dois ou mais resultados, quando eles são obtidos nas mesmas condições de ensaio, isto é, mesma temperatura, mesmo tipo de entalhe e mesma máquina, para

garantir o mesmo atrito e mesma velocidade do pêndulo. Contudo, pelas razões já mencionadas, não é um dado que possa servir para cálculo em projetos de Engenharia.

Isto porque um corpo de prova a uma temperatura, T_1 , pode absorver muito mais energia de que se ele estivesse a uma temperatura, T_2 , bem menor que T_1 ou pode absorver praticamente a mesma energia a uma temperatura, T_3 , pouco menor ou pouco maior que T_1 . Ou seja, há uma faixa de temperatura relativamente pequena, na qual a energia absorvida cai apreciavelmente. E o tamanho dessa faixa varia com o metal, sendo, às vezes, uma queda bastante brusca [1].

Neste sentido, define-se temperatura de transição, para o aço ou outro metal que a exiba, como a temperatura, onde há mudança no caráter de ruptura do material, passando de dúctil a frágil, ou vice-versa. Entretanto, a passagem não é repentina e o melhor seria definir como intervalo de temperatura de transição. Nessa direção, há vários critérios para determinar qual a temperatura ou intervalo de transição dos metais. E essa determinação é importante porque só é conveniente utilizar um material numa região de temperaturas onde se tenha a certeza de que a fratura frágil não ocorrerá, quando esse material for solicitado a níveis de tensão no seu corpo elástico [1].

Finalmente, vale ressaltar que materiais com menores temperaturas de transição apresentam maior resistência à fratura, ou seja, menor propensão à fratura frágil por um defeito externo.

2.3 TIPOS DE FRATURA

O processo de fratura é normalmente súbito e catastrófico, podendo gerar grandes acidentes. Esse pode assumir dois modos: dúctil e frágil.

Dos ensaios de impacto retira-se, também, informação importante examinando a superfície de fratura, para verificar se essa superfície é fibrosa (fratura por corte), intergranular (fratura por clivagem) ou uma mistura das duas. Estes modos de ruptura distinguem-se facilmente à olho nu. As faces planas de fratura por clivagem produzem um aspecto brilhante e de elevado poder de reflexão, enquanto que a fratura fibrosa dúctil tem um aspecto opaco [11].

No modo de fratura frágil o material se deforma pouco, antes de fraturar, onde o processo de propagação de trinca pode ser muito veloz, gerando situações catastróficas.

2.3.1 Fatores Básicos para Fratura Frágil

A existência de trinca, entalhes, cantos vivos ou poros no material, que produz um estado triaxial de tensões, a baixa temperatura e a alta velocidade de carregamento constituem os fatores básicos para que ocorra uma fratura do tipo frágil nos materiais metálicos.

Assim, ensaios relacionados à fratura frágil visam principalmente correlacionar seus resultados com as fraturas ocorridas na prática e, de uma certa maneira, servem para evitar que aconteçam rupturas de caráter frágil do material em serviço. Isso porque, sabe-se que uma ruptura frágil pode acarretar prejuízos catastróficos, pois acontece sem aviso prévio, ou seja, sem que haja uma deformação plástica visível que prenuncie a fratura [1].

2.3.2 Método para Levantamento da Curva Dúctil-Frágil

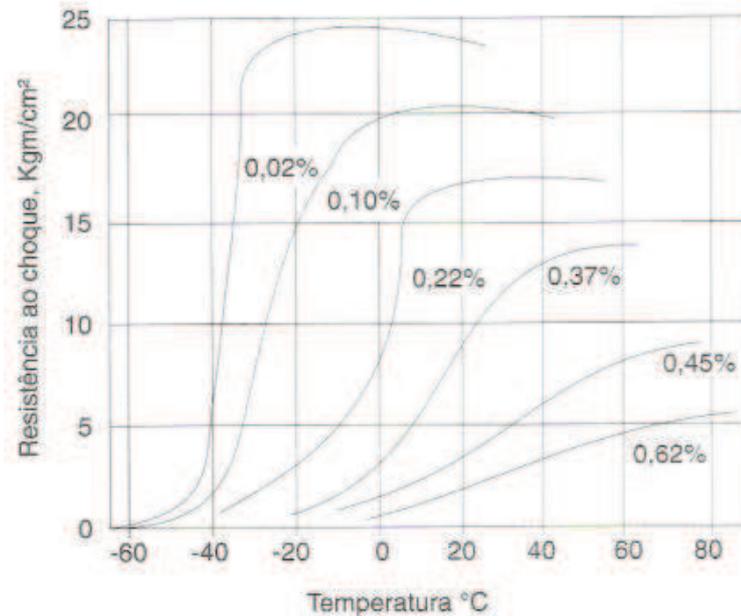
Uma das principais funções dos ensaios de impacto é determinar se um material apresenta transição dúctil-frágil com a diminuição da temperatura. Dessa forma materiais que apresentam esse comportamento devem ser usados somente em temperaturas acima da temperatura de transição para evitar fraturas frágeis catastróficas. Isso porque, sabe-se de antemão que a temperatura de transição é sensível à composição e à microestrutura da liga: quanto menor o tamanho do grão ou quanto menor o teor de carbono, menor a temperatura de transição.

Portanto, fatores que podem provocar uma mudança brusca (indesejável) no modo de fratura para um mesmo material são: fatores microestruturais (mecanismos de fragilização) e fatores externos (associados a sollicitação mecânica).

Os aços-carbono comuns, de estrutura ferrítico ou ferrítico-perlítica, podem apresentar fraturas dúcteis ou frágeis, ou seja, sua deformação pode ocorrer por movimento de discordâncias, com grande deformação e elevada plasticidade, ou por clivagem, com menor plasticidade. A Figura 3 apresenta o deslocamento das curvas resistência ao choque-temperatura, em função do teor de carbono em aços-carbono comuns, sem elementos de liga. A Figura 4 apresenta o deslocamento das curvas

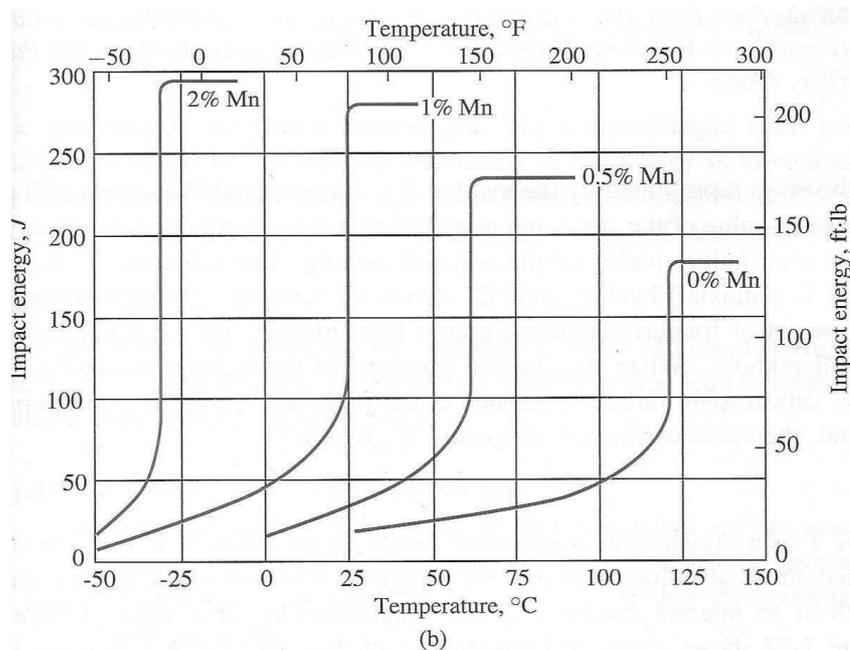
resistência ao choque-temperatura, em função do teor de Manganês em um aço com 0,05% de carbono.

Figura 3 – Deslocamento das Curvas de Resistência ao Choque em Função do teor de Carbono



Fonte: Diaz, 1998.

Figura 4 – Influência do teor de Manganês em um aço Fe-Mn-0,05% C



Fonte: Metals Handbook, 1978.

O carbono e o manganês são os principais responsáveis por variações na temperatura de transição. O fósforo também exerce um forte efeito com relação ao acréscimo da temperatura de transição. O níquel é geralmente aceito como sendo

benéfico à tenacidade ao entalhe quando presente em quantidades de até 2% e aparenta ser especialmente efetivo em abaixar a temperatura de transição da ductilidade. O silício aparentemente aumenta a temperatura de transição quando se apresenta em teores superiores a 0,25 %, enquanto que o molibdênio aumenta esta transição quase tão rapidamente quanto o carbono e o cromo tem pequeno efeito [13].

3 MATERIAIS E METODOLOGIA

3.1 MATERIAIS

A pesquisa foi realizada em uma chapa do aço ASTM A-131 Grau A, utilizado na indústria naval para construção de embarcações, com as dimensões de 10 mm de espessura, 150 mm de largura e 300 mm de comprimento. As chapas foram fornecidas pelo Estaleiro Rio Maguari [3]. A composição química normalizada e a composição química encontrada para o aço utilizado neste trabalho são mostradas na Tabela 1.

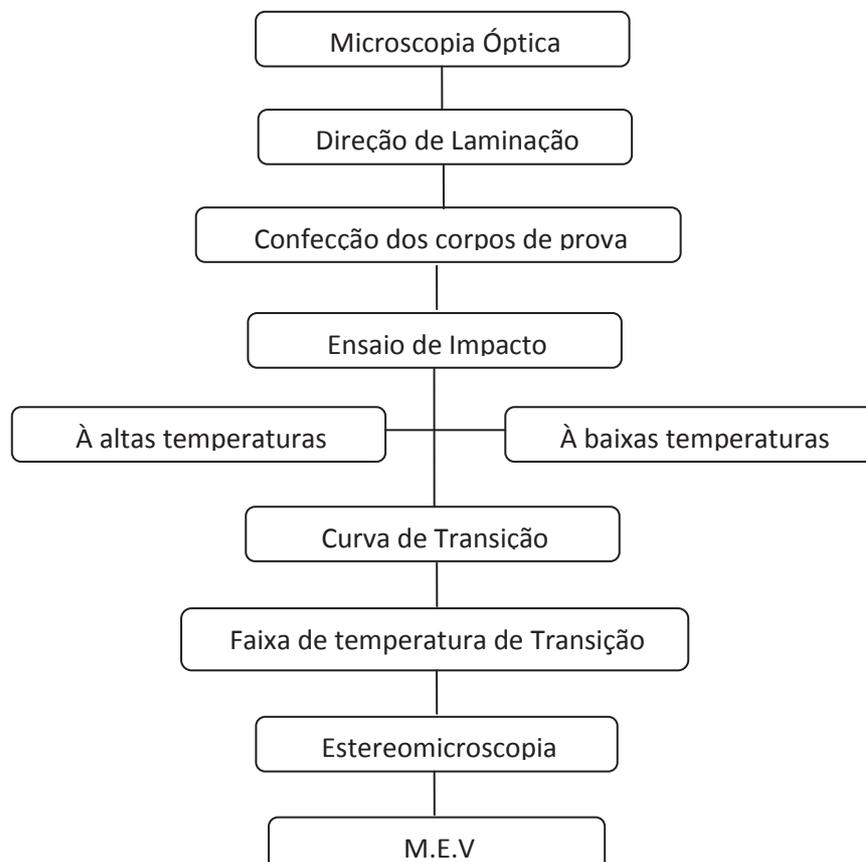
Tabela 1 - Composição química do aço ASTM A - 131 Grau A

Elementos	C	Si	Mn _{min}	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu
% Máx. determinada pela Norma	0,21	0,50	2,5 x C	0,035	0,035	<= 0,02			

Fonte: Norma ASTM A 131 [4].

3.2 METODOLOGIA

Figura 5 – Fluxograma da metodologia empregada para o desenvolvimento do trabalho



Fonte: Autor, 2013

A Figura 5, acima, mostra o fluxograma da metodologia seguida para a execução deste trabalho.

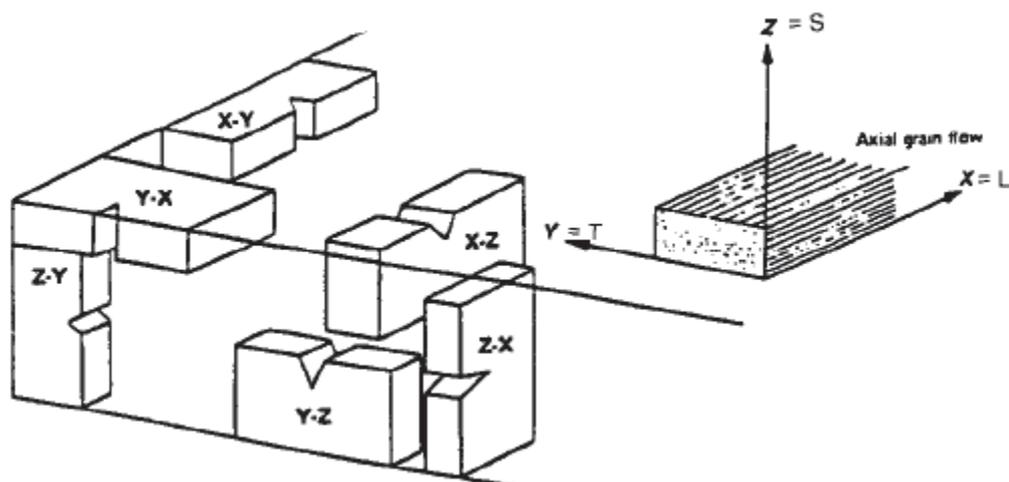
3.2.1 Microscopia Óptica

A microscopia óptica, Microscópio Óptico OLIMPUS® modelo BX 51, foi realizada para determinar a direção de laminação da chapa de aço utilizada, foram analisadas duas faces da chapa: face superior e seção longitudinal. A preparação das superfícies analisadas se deu pelo lixamento e polimento, o ataque foi feito com Nital 2%.

3.2.2 Usinagem dos Corpos de Prova

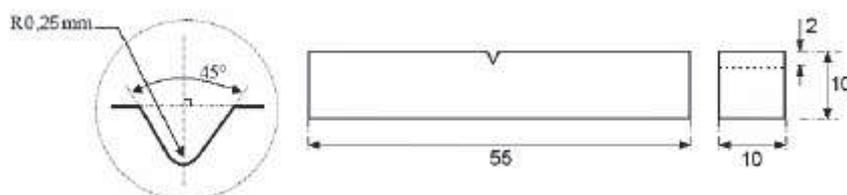
Os corpos de prova foram usinados em conformidade com a norma ASTM E - 23 [5], utilizando uma plaina limadora para cortar e fazer o entalhe. Os corpos de prova foram extraídos no sentido Longitudinal da Chapa, na direção x-y como mostrado na Figura 6, com seção transversal de 10X10 mm e comprimento de 55 mm, o entalhe produzido foi *Charpy* tipo A, mostrado na Figura 7.

Figura 6 – Planos de Fratura ao longo dos eixos principais



Fonte: Norma ASTM E-23 [5].

Figura 7 - Corpo de prova *Charpy* tipo A



Fonte: Sant' Anna. P. C. 2006 [7].

3.2.3 Ensaio de Impacto

A máquina utilizada para a realização dos ensaios de impacto é mostrada na Figura 8. Os ensaios foram feitos em corpos de prova aquecidos e resfriados, em temperaturas que variaram entre 200 °C e -50 °C, utilizando 3 corpos de prova para cada temperatura, afim de se obter uma média dos valores de energia absorvida. Máquina de ensaio de impacto da marca *JINAN SHIDAI SHIJIN INSTRUMENT CO., LTD.*, com escala de 0-300 J (com resolução de 2 J).

O aquecimento dos corpos de prova foi feito no forno, submetendo-os à várias temperaturas de aquecimento, por um tempo de 30 minutos para cada temperatura, em seguida colocados na máquina para a execução do ensaio dentro de um intervalo de tempo de 5 segundos.

Já no resfriamento, os corpos de prova foram submetidos à um banho em nitrogênio líquido, Figura 9, onde foram mantidos durante 1 minuto, em seguida colocados na máquina de ensaio, permanecendo em troca de calor com o meio até que se chegasse à temperatura desejada para que a realização do ensaio, controlando-a utilizando um Termopar ALMEMO® modelo 2590.

Figura 8 – Máquina de Ensaio de Impacto



Fonte: Autor, 2013.

Figura 9 – Nitrogênio líquido utilizado para o resfriamento dos corpos de prova



Fonte: Autor, 2013.

As temperaturas utilizadas para os ensaios foram estabelecidas baseadas em curvas de transição de outros tipos de aço, utilizados na indústria naval, para a observação do comportamento do aço ASTM A131 estudado.

3.2.4 Estereomicroscopia e Microscopia Eletrônica de Varredura

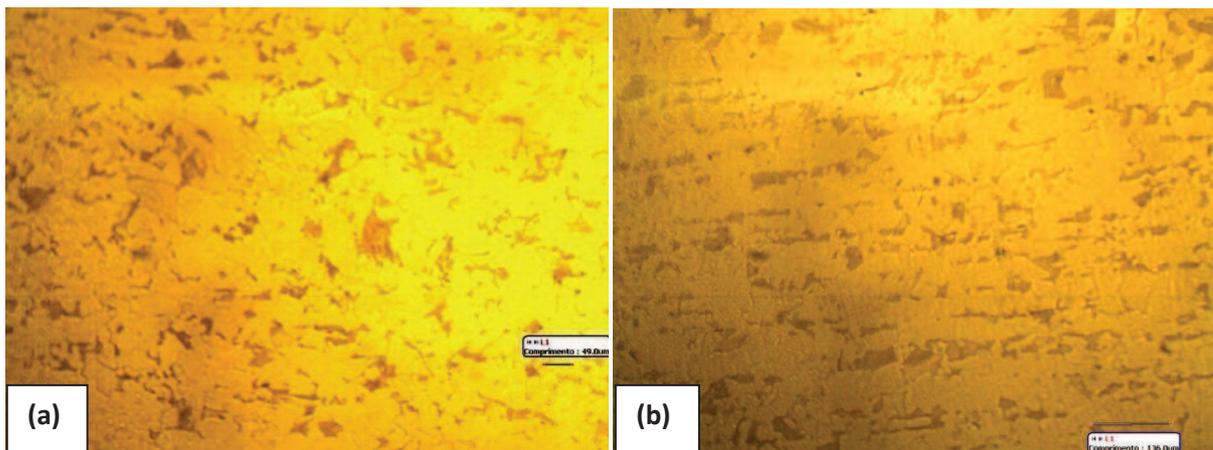
A propagação da trinca nas superfícies de fratura dos corpos de prova foram analisadas, primeiramente, através de imagens macroscópicas obtidas através de um Estereoscópio Trinocular, com zoom, iluminação dupla platina normal, com ampliação de 5x à 40x, modelo SQZ. As imagens obtidas no Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), marca Hitachi modelo TM 3000, complementaram essas análises.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 MICROSCOPIA ÓPTICA

Analisando as micrografias (aumento de 200 X) mostradas na Figura 10, percebe-se claramente, na figura (b), o sentido da laminação empregada na conformação da chapa.

Figura 10 – Micrografia da seção transversal (a) e seção Longitudinal da chapa (b)



Fonte: Autor, 2013.

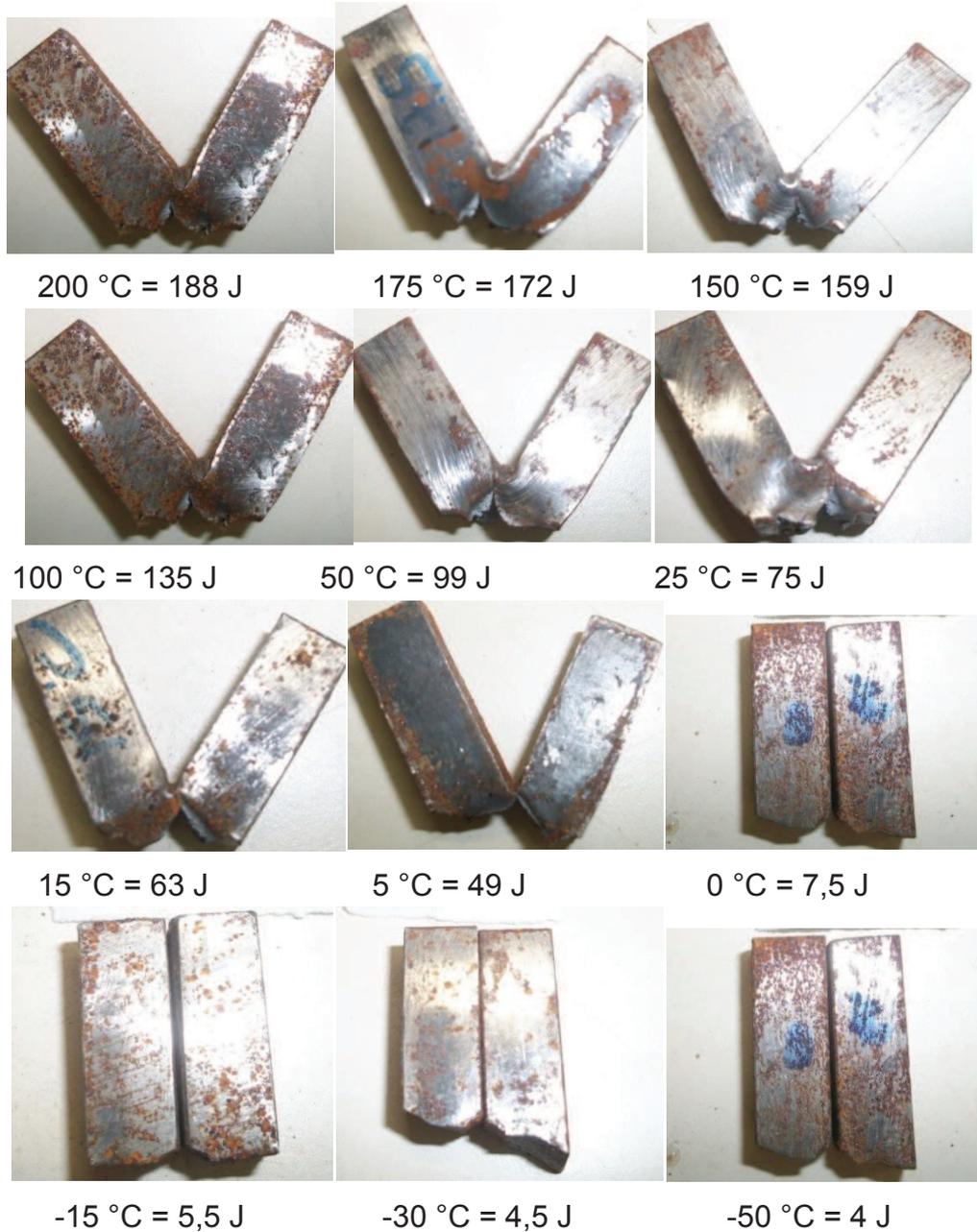
4.2 ENSAIOS DE IMPACTO

As temperaturas de realização dos ensaios foram: 200 °C, 175 °C, 150 °C, 100 °C, 50 °C, 25 °C, 15 °C, 5° °C, 0 °C, -15 °C, -30 °C, -50 °C. A Figura 11 mostra a diferença dos corpos de prova ensaiados a tais temperaturas e seus respectivos valores médios de energia absorvidas.

Analisando o comportamento dos corpos de prova com a variação da temperatura percebe-se que esse aço se comporta de maneira dúctil à temperaturas mais elevadas, porém apresenta uma mudança de comportamento à medida que se diminui a temperatura de trabalho.

À temperaturas acima de 100 °C os corpos de prova apresentam fraturas predominantemente dúctil e a força com que o pêndulo colide com as amostras não é suficiente para rompe-las separando-a em duas partes. E à temperaturas abaixo de -15 °C a energia necessária para o romper as corpos de prova é baixíssima, menor que 5,5 J.

Figura 11 – Corpos de Prova após Ensaio de Impacto

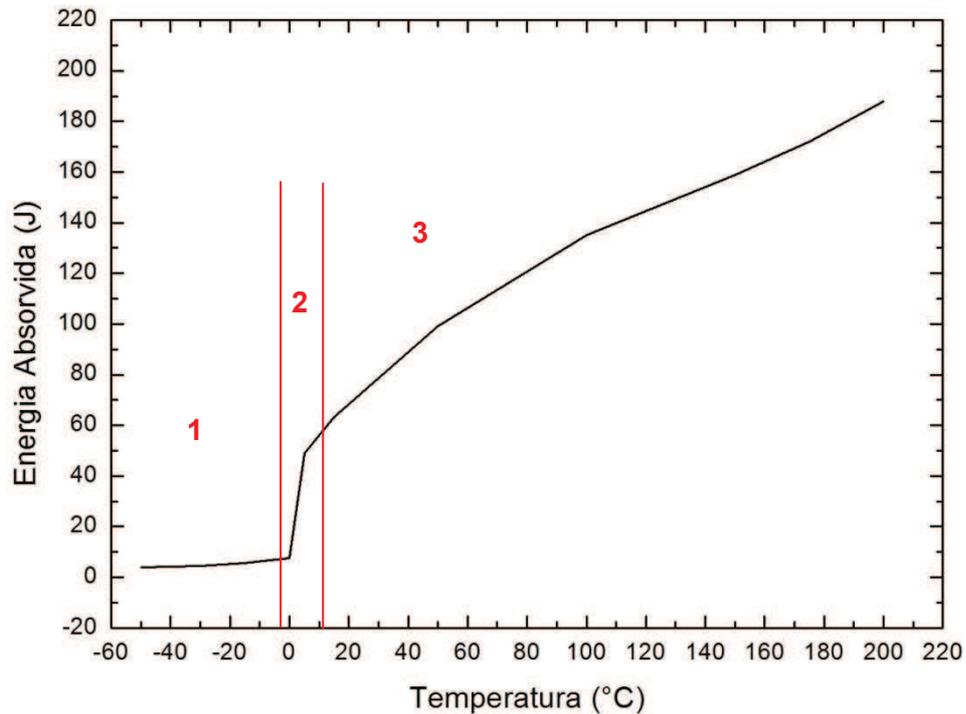


Fonte: Autor, 2013.

4.2.1 Curva de transição dúctil-frágil do aço ASTM A 131

Com o resultado de energia absorvida, necessária para romper os corpos de prova submetidos ao ensaio de impacto, à tais temperaturas foi possível levantar a curva de transição dúctil-frágil do aço ASTM A-131, mostrada na Figura 12. O 1 representa a região de fratura frágil, o 2 representa a região de transição e o 3 representa a região de fratura dúctil.

Figura 12 – Curva de Transição Dúctil-Frágil do aço ASTM A-131



Fonte: Autor, 2013.

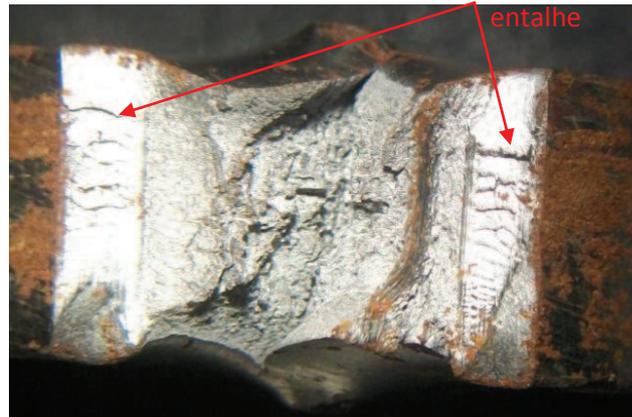
Durante a realização do ensaio observou-se que em temperaturas entre 0 °C e - 50 °C a variação de energia absorvidas, apresentou valores muito próximos, por isso ensaios abaixo de - 50 °C não foram realizados, já que, o a faixa de temperatura de transição foi encontrada entre 0 °C e 15°C.

4.3 ESTEREOMICROSCOPIA E MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA

Através do levantamento da curva de transição dúctil-frágil pode-se perceber que a transição brusca de energia absorvida acontece no intervalo de temperatura de 0 °C à 15 °C. Portanto, as superfícies de fratura dos corpos de prova submetidos à estas temperaturas foram capturadas e analisadas por estereomicroscopia e microscopia eletrônica de varredura (MEV). A região de propagação e o modo de fratura são mostradas nas Figuras 14 e 15 e 16. As Figuras 13 e 17 mostram as superfícies de fratura dos corpos de prova submetidos às temperaturas de 200 °C e -50 °C, respectivamente.

No modo de fratura dúctil o material se deforma substancialmente antes de fraturar, onde o processo se desenvolve de forma relativamente lenta à medida que a trinca se propaga.

Figura 13 – Superfície do Corpo de Prova Ensaiado à 200 °C



Fonte: Autor, 2013.

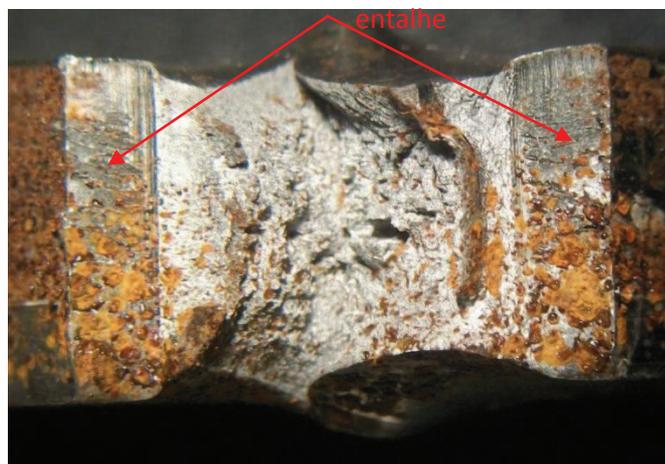
Quanto ao aspecto, nota-se a fratura foi fibrosa (dúctil), na amostra de temperatura de 200 °C.

Figura 14 – Superfície do Corpo de Prova Ensaiado à 15 ° C



Fonte: Autor, 2013.

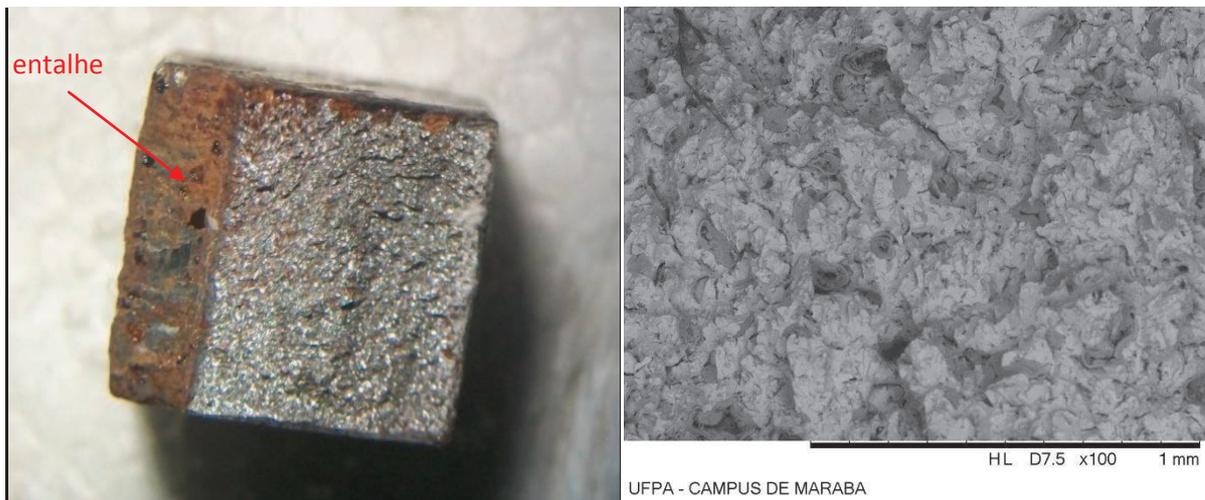
Figura 15 – Superfície do Corpo de Prova Ensaiado à 5 °C



Fonte: Autor, 2013.

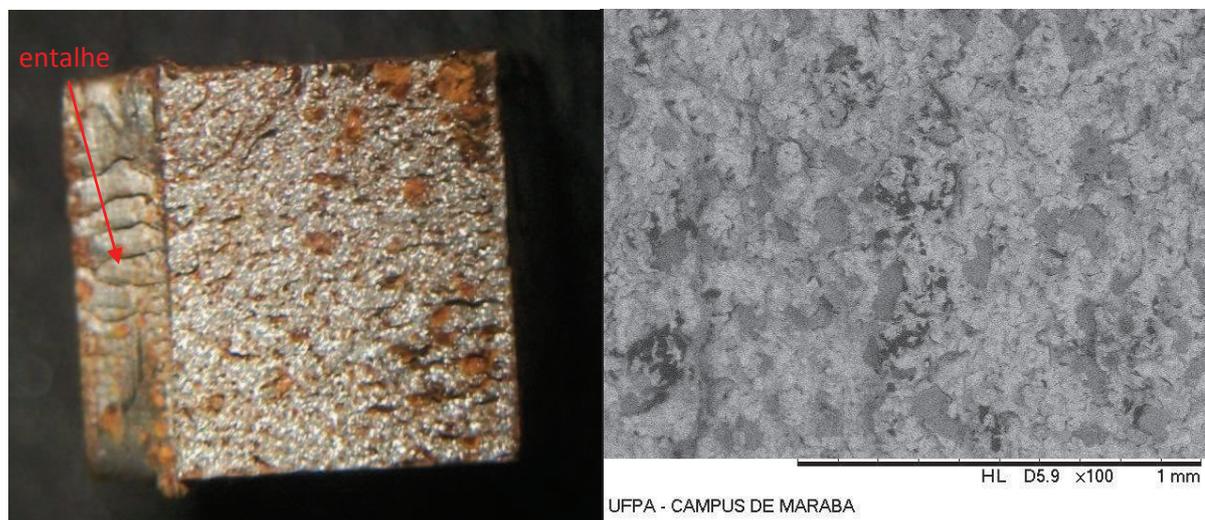
À 15 °C apresenta características predominantemente dúctil e à 5 °C a fratura observada apresenta caráter misto. Apenas as amostras submetidas à 0°C e -50°C foram analisadas no MEV, devido ao fato de que estas apresentaram fratura totalmente frágil e se romperam durante o ensaio. Suas superfícies de fratura são do tipo granular ou cristalina, que é característica da fratura frágil.

Figura 16 – Superfície do Corpo de Prova Ensaiado à 0 °C



Fonte: Autor, 2013.

Figura 17 – Superfície do Corpo de Prova Ensaiado à -50 °C



Fonte: Autor, 2013.

À temperaturas abaixo de 0° C, observa-se que não há diferenças muito grandes no valor de energia absorvida no ensaio de impacto, assim como no modo de fratura, onde grande parte dos corpos de prova ensaiados a tais temperaturas romperam-se no sentido paralelo à direção de propagação da trinca e perpendicular ao plano contém o entalhe.

5 CONCLUSÕES

Para cada metal específico, existe uma temperatura crítica, abaixo da qual a fratura é frágil. O campo de transição define a passagem do comportamento frágil para o dúctil. O conhecimento do comportamento de cada material é essencial para objetivos de projeto. A temperatura de transição, em termos simples, é a temperatura abaixo da qual a fratura do material é frágil. Essa mudança brusca de fratura dúctil para fratura frágil, ocorrendo à temperaturas normais, se torna muito grave.

Com o estudo do comportamento do aço ASTM A 131, sob variadas condições de trabalho, em função da temperatura, nota-se que ele começa a se comportar de maneira frágil à temperaturas abaixo de 15 °C, tornando-se totalmente frágil, abaixo de 0° C. O que o torna não recomendado para o uso sob tais condições.

6. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Realizar ensaios de impacto em corpos de prova extraídos de diferentes direções da chapa;

Levantar a curva dúctil frágil para outros aços aplicados na indústria naval.

7. REFERÊNCIAS

- [1] SOUZA, S. A. **Ensaio mecânicos de materiais metálicos - fundamentos teóricos e práticos**. 5. ed. São Paulo, 1982
- [2] BOTTI, I.S. **Tendências e Inovações em Aços**. CGEE - Centro de Gestão e Estudos Estratégicos: Ciência, Tecnologia e Inovação. ABM. Rio de Janeiro, 2008.
- [3] MARQUES, L. F. N. **Estudo da Fadiga de Juntas Soldadas do Aço Naval**. Dissertação - Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Federal do Pará. Belém, 2011.
- [4] ASTM 131. **Standard Specification for Structural Steel for Ships**.
- [5] ASTM E – 23. **Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials**.
- [6] SHACKELFORD, J. F. **Ciência dos Materiais**. 4ª Edição. São Paulo-SP, 2008.
- [7] SAINT' ANNA, P. C. **Influência de tratamentos térmicos intercríticos na microestrutura e propriedades mecânicas do aço API 5L X65**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2006.
- [8] DIAS, L. A. M. **Estruturas de aço: conceitos, técnicas e linguagem**. 2. ed., São Paulo: Ziguarte Editora, 1998.
- [9] ASKELAND, D. R.; PHULÉ, P. P. **Ciência e Engenharia de Materiais**. Cengage Learning, 4ª Edição. São Paulo, SP. 2008.
- [10] CALLISTER. W.D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma introdução**; LTC – Livros técnicos científicos. 7 ed. Rio de Janeiro, 2008.
- [11] BRANCO, C. **Mecânica dos Materiais**. Fundação Calouste Gulbenkian. 5 ed. Lisboa, 2011.
- [12] American Society for Metals. **Metals Handbook**, 9º ed. Vol.1 Ohio, 1978.

[13] DIETER, G. E. **Metalurgia Mecânica**, 2ª Edição, Editora Guanabara Dois, Rio de Janeiro, 1982.