



REVISTA

Naval e Oceânica

<https://www.e-publicacoes.uerj.br/index.php/rno>

CORRELAÇÃO ENTRE AS PROPRIEDADES MECÂNICAS E MICROESTRUTURAIS DOS AÇOS NAVAIS - A36

Correlation between mechanical properties and microstructural structures of Naval Steel- A36

Gisele Duarte C. Antolin^a, Mauricio Quelhas Antolin^b & Wesley Oliveira da Silva^c

Recebido em: 20 mai. 2023 | Aceito em: 12 set. 2023

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo realizar uma análise de um aço naval. O aço escolhido foi o A36, que é um aço estrutural, o qual é utilizado com maior frequência na construção do casco de navios, por apresentarem características cabíveis aos ambientes severos que são expostos a estrutura naval. Para tal processo foi realizada a caracterização de uma chapa deste material. Como uma das etapas críticas do processo de fabricação de um navio é o processo de soldagem, este processo foi realizado em uma chapa deste material através do processo Metal ativo Gás (MAG). Após o processo de soldagem foram realizados ensaios mecânicos (ensaio tração, dureza e impacto) de acordo com as normas pertinentes e a correlação com outras propriedades do material, com o intuito de avaliar quaisquer alterações no mesmo em decorrência do processo de soldagem. Para a avaliação microestrutural foi empregada análise metalográfica deste material. Além disso, para avaliar o processo de soldagem foi realizada a inspeção por Líquido Penetrante (LP). Os resultados obtidos mostraram que ocorreu uma alteração microestrutural do material em decorrência do processo de soldagem, tal como um aumento de perlita e o aparecimento de martensita. Isto refletiu nos valores encontrados para as propriedades mecânicas do material que sugerem um aumento de dureza principalmente na Zona Termicamente Afetada (ZTA), na diminuição da energia absorvida no ensaio de impacto e na diminuição da resistência mecânica vista no ensaio tração.

Palavras-chave: Aço A36, Propriedades mecânicas, Soldagem e Microestrutura.

ABSTRACT

This work aims to conduct an analysis of a steel ship. The steel chosen was A36, it is a structural steel which is the most frequently used in the construction of the hull of ships, having applicable characteristics to the harsh environments that are exposed to marine structure. For such process it was held featuring a plate of this material. As one of the critical steps in the manufacturing process of a ship is the welding process, this process was carried out on the plate sheet of this

^aUniversidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), Rio de Janeiro – RJ, Brasil.

^bUniversidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), Rio de Janeiro – RJ, Brasil.

^cInstituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro – RJ, Brasil.



material through the process Metal Active Gas (MAG). After the welding process were performed mechanical tests (Tensile test, Hardness and impact) in accordance with the relevant rules, and correlation with other properties of the material, in order to access any changes to it due to the welding process. For microstructural evaluation was employed metallographic analysis of this material. In addition, the welding process was performed by liquid penetrant inspection (LP). The results showed a microstructural change of the material due to the welding process, such as an increased of pearlite and martensite. This is reflected in the values for the mechanical properties of the material suggest an increased hardness mainly in the heat affected zone (HAZ), in the decreased energy absorbed in the impact test, as well as in a strength seen in the tensile test.

Keywords: Steel, A36, Mechanical properties, Welding and Microstructural.

1. INTRODUÇÃO

A indústria Naval no Brasil teve seu início junto a criação do ministério da marinha em 1736. Com o decorrer da história, a indústria naval se desenvolveu, e nas décadas de 1960 e 1970, experimentou um grande crescimento. No início dos anos 2000, a Petrobrás anunciou a expansão de suas atividades em virtude das demandas surgidas pelo pré-sal.

O rápido crescimento do setor naval neste período promoveu uma importante elevação do número de embarcações brasileiras. Após o grande aumento experimentado pelo setor naval no Brasil entre os anos de 2003 e 2014, o mesmo atravessou uma fase de declínio, que ocorreu principalmente em virtude da grave crise da economia brasileira e da Petrobras a partir do segundo semestre de 2014, ancorada pelos desdobramentos da Operação Lava Jato.

Neste período, em virtude do retrocesso deste setor, houve uma redução da demanda de peças de reposição e manutenção, fazendo com que esta necessidade fosse absorvida por empresas estrangeiras. Desta forma, desde 2014 o setor vem enfrentando um período de estagnação. Devido a isto, o setor naval brasileiro possui um grande *gap** tecnológico, tanto no que diz respeito à construção de novas embarcações quanto às tecnologias e logística para o reparo das mesmas (Sinaval, 2018).

Para as empresas da indústria marítima, a principal preocupação para o setor no futuro, está relacionada ao potencial do impacto e probabilidade de uma crise econômica global. Com os efeitos da pandemia de Covid-19, o setor mostrou-se despreparado para as transformações mundiais causadas pela doença e acredita-se que em 10 anos a indústria vai precisar se preocupar com novas regulamentações para diminuir os impactos causados no ambiente.

*Gap: Palavra originária da língua inglesa, que significa lacuna.

1.1. O processo de soldagem de aços navais

Durante o processo de soldagem dos aços existem vários fatores metalúrgicos que podem afetar a soldabilidade, entre eles: temperabilidade, microestruturas do metal de solda, microestruturas da zona afetada pelo calor etc.

A temperabilidade é usada como um indicador de soldabilidade e atua como guia para a seleção de materiais e processos de forma a evitar um excessivo endurecimento, o qual pode causar trincas na Zona Termicamente Afetada (ZTA). Aços com alta temperabilidade proporcionam uma elevada fração volumétrica de martensita na Zona Fundida (ZF) e na ZTA e essa microestrutura é altamente susceptível a trincas induzidas por hidrogênio (Aguiar, 2001).

A microestrutura do metal de solda é principalmente controlada pela composição química e a taxa de resfriamento. Um dos principais parâmetros que afetam a microestrutura do metal de solda é a adição de elementos de liga que influenciam a microestrutura pelo aumento da temperabilidade, por exemplo. Dessa forma eles inibem a transformação da ferrita de contorno de grão pelo controle da quantidade de oxigênio no metal de solda que afetará a composição e distribuição de inclusões não metálicas (Araújo, 2006).

Os aços estruturais ASTM A36 dependendo da composição química, dos procedimentos/parâmetros de soldagem empregados e da taxa de resfriamento podem se tornar susceptíveis a um ou mais problemas de soldabilidade, dentre eles: trincas induzidas pelo hidrogênio (trincas a frio), trincas de solidificação (trincas a quente), de coesão lamelar, presença de inclusões, porosidades e variações de propriedades mecânicas tanto no metal de solda quanto na ZTA (Moreira, 2008).

A junção das partes de um navio é um processo que pode ser realizado de duas maneiras, uma delas é por rebite e a outra é soldagem, ambas tratam do processo de fabricação do casco do navio utilizando chapas de aço como peças fundamentais em tal processo. As chapas de um navio são peças estruturais fornecidas pelo setor siderúrgico para estaleiros como objetivo de construção do casco e partes de um navio. Estas chapas são definidas como peças retangulares, com espessura pequena em relação a seu comprimento e largura, fabricada em prensas chamadas laminadores.

Outro processo a ser analisado é a rebitagem. As rebitagens podem efetuar-se a frio e a quente. Se for a quente, introduz-se no orifício o rebite aquecido ao rubro. Uma vez rebitado, arrefece, produzindo-se uma contração, a qual provoca um forte aperto sobre as peças ligadas, aumentando assim a resistência ao deslizamento destas (Fonseca, 2005).

O processo de soldagem, analisado neste trabalho, é o outro processo que podemos utilizar para unir as chapas de aço na fabricação de um casco de navio (CHIAVERINI, 1986). A ação de aproximação e aquecimento, plasticidade ou fusão parcial, leva a um fenômeno de difusão na zona soldada, dando como resultado, a junta soldada (solda) que se caracteriza por sua resistência e que se torna perfeitamente coesa depois que o metal resfria.

Na soldagem, os materiais das peças devem ser, se possível, iguais ou, no mínimo, semelhantes em termos de composição. As peças devem ser unidas através de um material de adição, também igual em termos de características, pois os materiais se fundem na região da solda. O metal de adição deve ter uma temperatura de fusão próxima àquela do metal-base ou, então, um pouco abaixo dela, caso contrário, ocorrerá uma deformação plástica significativa.

Este processo pode ser realizado por duas maneiras, sendo elas, pressão ou fusão.

Na área naval, um dos processos mais utilizados para a soldagem é o MAG, que utiliza um gás de proteção ativo, normalmente contendo gás carbônico, oxigênio ou nitrogênio, para a proteção da poça de fusão, e um arame sólido consumível, alimentado continuamente, como eletrodo.

1.2. Aço naval ASTM A36

Na construção do casco do navio são utilizados aços chamados de “aços navais” os quais possuem boa soldabilidade, boa tenacidade, boa ductilidade e resistência mecânica mínima, especialmente nas juntas. Os aços mais comuns utilizados são AH32 e o DH32, o AH36 e o DH36 e AH40 e o DH40 (com presença de 0,18 a 0,25% de carbono e outros elementos de liga como Si, Mn, P, S, Al, Ni, Cr, Mo, Cu, V e Nb).

As propriedades mecânicas dos materiais têm um papel fundamental no comportamento de estruturas tal como projetos navais. Tais propriedades mecânicas como resistência, tenacidade, dureza etc., podem ser entendidas a partir da observação da microestrutura dos materiais. Contudo, as propriedades microestruturais são extremamente dependentes dos processos de fabricação, aos quais está submetida uma estrutura naval. Um destes processos de fabricação é o processo de soldagem.

Este trabalho abordará o tema de estruturas navais com foco específico no processo de soldagem. Pretende-se averiguar possíveis alterações microestruturais que aparecem devido a este processo em um aço naval.

Os aços estruturais navais apresentam boa tenacidade e soldabilidade. São aplicados em navios de médio e grande porte e em plataformas marítimas de extração de petróleo.

O aço ASTM A-36 é a exemplificação mais clássica de um aço estrutural de grãos finos (COLPAERT, 2008). É um aço ferrítico de baixa liga e baixo carbono ligados ao manganês, com teores de fósforo e enxofre controlados, alta resistência e baixa liga (ARBL), utilizado em partes estruturais quando a economia em peso é importante. Além disso, atende a solicitações de tenacidade até -40°C para navegação em regiões frias ou em temperaturas mais baixas mediante consulta e autorização da classificadora.

2. METODOLOGIA

O material utilizado neste trabalho foi fornecido pela empresa USIMINAS. Para o estudo do aço A36, foi necessária a confecção de corpos de prova. O primeiro corpo de prova a ser confeccionado foi um corpo de prova soldado e para isso foram utilizadas duas chapas de aço A36. O segundo corpo de prova confeccionado, obtido a partir do primeiro, foi realizado para a confecção de corpos de prova para ensaio tração, dureza, impacto e metalografia. A descrição destas análises é realizada a seguir:

2.1. Confecção da solda na Instituição Senai de Nova Iguaçu

Antes da realização da soldagem foi feito a usinagem da peça com a preparação do chanfro (amplitude de 45° a 60°) de acordo com a norma NBR-7239. Em seguida foi feita a montagem da junta com as dimensões especificadas na RQPS (Registro de Qualificação do Procedimento de Soldagem). Após o preparo da peça foi realizado o procedimento de solda com o equipamento (MILLER multiprocesso XMT 350 Mpa), utilizando os parâmetros especificados na RQPS (Registro de Qualificação do Procedimento de Soldagem) com (Tensão, Gás e Amperagem) controlados. A soldagem foi executada na posição plana com o arame sólido com 1 mm de diâmetro especificado pela AWS ER 70S-6. Desta forma, foi confeccionado o corpo de prova com a realização de um pré-aquecimento que consiste em aquecer o metal base acima da temperatura ambiente antes da soldagem e tem como objetivo principal a prevenção de nucleação de trincas na zona de fusão e na zona afetada pelo calor (Barbosa, 2007).

2.2. Ensaio de Líquido Penetrante

Todo o procedimento desta etapa do trabalho foi realizado na instituição SENAI de Nova Iguaçu, de acordo com as instruções da norma Líquido Penetrante procedimento de END PR-001 com a norma de referência ASME Seção V, edição 2004. A superfície foi escovada e

em seguida, aplicado um solvente para a limpeza inicial da peça. A secagem da peça foi feita aguardando um tempo de 6 minutos.

Em seguida foi aplicado o Líquido Penetrante. Aguardando um tempo pós-aplicação de 12 minutos. Para a remoção do Penetrante foi utilizado água aplicada na superfície inspecionada a uma temperatura de 35°C a uma pressão de 100kPa. Foi aguardado um tempo de 6 minutos para a evaporação natural após a remoção do penetrante. Objetivando o encontro de discontinuidades como (trincas e poros) foi aplicado o revelador ao material.

2.3. Usinagem para obtenção dos corpos de prova para os ensaios de Tração, Charpy, Dureza e Microdureza

Após a realização do processo de soldagem das chapas, foi realizada a usinagem da mesma para a obtenção dos corpos de prova para os ensaios de Dureza, de Tração e Charpy. Em função da espessura da peça (8mm) o processo de usinagem foi realizado em uma CNC.

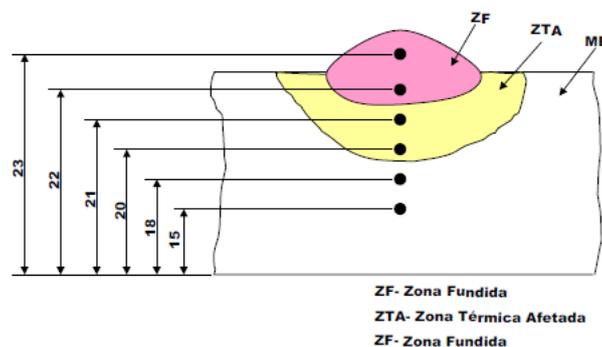
2.4. Ensaio de Tração e Charpy

O ensaio foi realizado com a amostra do aço A36, que tinha as seguintes dimensões: $S_0=12,5\text{mm}$, $L_0=56,5\text{mm}$ e $Esp=8\text{mm}$. Este procedimento foi realizado em uma máquina de ensaio tração (EMIC-DL 10000).

A usinagem do corpo de prova para o ensaio Charpy foi feito mediante a norma ASTM E23 e o dimensionamento na norma ASTM A370. O primeiro passo da usinagem do material foi feito na máquina de corte da UEZO (PanGEC – PANCUT 80). Em seguida foi feito o chanfro de acordo com a faca localizada na brochadeira, que possui dentes graduais para realizar o chanfro na amostra. O corpo de prova possuía dimensões de Largura 10 mm e Espessura 7,5 mm.

2.5. Ensaio de Dureza

Após a macrografia realizada, os CP's foram polidos para que pudessem ser feitos os ensaios de Dureza. A Dureza é a medida da resistência de um material a deformações plásticas localizadas. O ensaio de Dureza foi realizado em uma máquina de dureza Rockwell. O ensaio foi realizado nos parâmetros Rockwell B, na escala vermelha, com uma seleção de carga aplicada de 100Kgf. A Figura 1 mostra as diversas regiões da peça onde foram realizadas as medidas de dureza.

Figura 1 – Disposição dos pontos onde foram realizados ensaios de dureza

2.6. Ensaios Macrográficos e Micrográficos

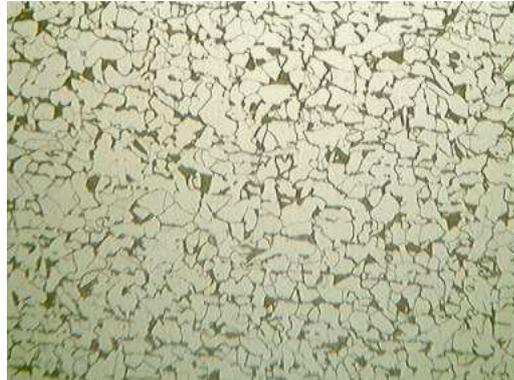
Para as análises macrográficas foi realizado o lixamento com as lixas #80, #120, #180 e #400, e em seguida o polimento das amostras com pasta de diamante, utilizando panos de polimento de 1 e 3 microns. Após o lixamento e o polimento, a amostra foi atacada com Nital 5%. A análise micrográfica teve o mesmo procedimento, contudo foram aplicadas as lixas de #80 a #2400.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos para a amostra de aço A36 são mostrados na Figura 2. A imagem da Figura 2 (a) mostra o material antes do processo de soldagem, onde é possível observar a presença de ferrita (parte clara) e perlita (parte escura).

Na Figura 2 (b), (c), (d) e (e) podem ser observadas as imagens do material após o processo de soldagem na região da ZTA e do metal de base. Na Figura 2 (b) observa-se nitidamente a região entre o metal de base e a ZTA, qualificando assim o processo de soldagem. Na figura 2 (c) é possível observar a ocorrência de uma grande alteração microestrutural em relação a amostra como recebida. Pode-se observar um discreto crescimento de grão à medida que caminhamos do metal de base para a ZTA. Além disso, apesar de antes do processo de soldagem ter ocorrido a realização de um pré-aquecimento antes do processo de soldagem material, o que evitaria a formação de martensita no material (que aumenta a fragilidade), observa-se na micrografia da Figura 2 (d) que a martensita foi formada. A Imagem da Figura 2 (e) mostra uma micrografia da Junta Soldada e o aparecimento de uma trinca no material. Pode-se observar que na zona da ZTA ocorreu uma mudança na microestrutura do material de modo que partindo do metal de base e indo até a ZTA é possível observar um aumento na quantidade de perlita, o que pode indicar um aumento da resistência mecânica e da dureza do material.

Figura 2 (a) - Microestrutura do aço A36 aumentado 20X



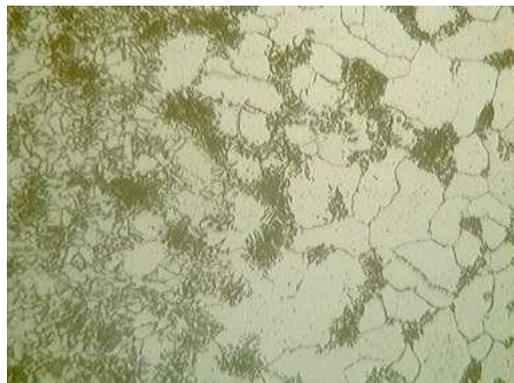
Fonte: Autor (2023)

Figura 2 (b) - Vista transversal. Microestrutura do aço A36 soldado aumentado 20X



Fonte: Autor (2023)

Figura 2 (c) - Vista transversal. Microestrutura do aço A36 soldado aumentado 40X



Fonte: Autor (2023)

Figura 2 (d) - Vista transversal. Microestrutura do aço A36 soldado aumentado 40X

Fonte: Autor (2023)

Figura 2 (e) - Vista transversal. Microestrutura do aço A36 soldado aumentado 20X

Fonte: Autor (2023)

O processo de soldagem apresentou bom acabamento permitindo as avarições por LP e a usinagem de corpos de prova para a realização de ensaios mecânicos. Este processo pode ser avaliado também pela imagem da Figura 2 (b) onde é possível ver uma linha imaginária entre a ZTA e o metal base, o que evidencia a qualidade da solda realizada no material.

Para os aços com baixo teor de carbono a poça de fusão solidifica-se inicialmente como ferrita. Durante o resfriamento, a ferrita transforma-se em austenita. Esta, em função das temperaturas elevadas, sofre um grande crescimento de grão, tendendo a apresentar uma estrutura de grãos colunares e grosseiros, similar à estrutura original de fusão da zona fundida. Em temperaturas mais baixas, inferiores a 900°C, a austenita se decompõe, resultando em diferentes produtos ou constituintes. Assim, a microestrutura da zona fundida do metal de solda de baixo carbono é resultado do crescimento colunar do metal de solda solidificado, sendo influenciada pelo estado inicial da austenita (composição, tamanho de grão, micro segregação,

e estado de deformação), das condições de aquecimento e resfriamento, bem como do defeito dos elementos de liga.

Em uma solda em um só passe, a microestrutura da Zona Fundida será formada pelos produtos da decomposição da austenita em ferrita durante o ciclo de resfriamento contínuo, sendo que a ferrita assume diferentes morfologias, algumas de grande semelhança. Como a solda do material foi feita com 4 passes de solda, a microestrutura será ainda mais complexa, sendo formada por regiões que permaneceram inalteradas.

Na ZTA há uma região que sofre crescimento de grão, o que aumenta a temperabilidade do aço, favorecendo a formação de microconstituintes. Há também na ZTA outra região onde ocorre um refino do grão, nessa região ao contrário da região de crescimento do grão, a temperabilidade diminui. Além destas duas podem ser vistas mais 5 regiões de acordo com a Temperatura de Pico (TP) a que foi aquecida durante a soldagem. Cada uma destas regiões possui características próprias, devido as alterações microestruturais ocorridas. As características desta microestrutura, são fundamentais na determinação das propriedades finais da zona fundida e da ZTA. Na Figura 3 podemos observar as diferentes microestruturas apresentadas pelo material soldado (MODENESI, 2004).

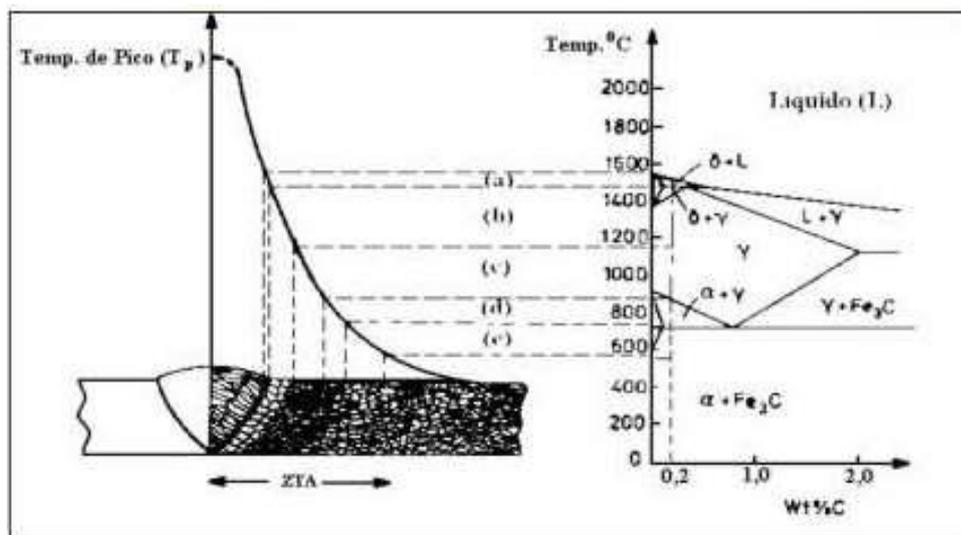
Região (a) – Região parcialmente fundida onde a TP está em torno da temperatura de fusão do aço.

Região (b) – Região de crescimento de grão onde ocorre a transformação de ferrita para austenita, durante o aquecimento.

Região (c) – Região de Refino de grão onde na transformação de ferrita para austenita gera uma deformação menor do grão nesta região a ductilidade e a resistência são elevadas e dependendo do caso pode ser problemático, menos para os revenidos e temperados, onde ela pode apresentar uma menor resistência mecânica que o metal de base.

Região (d) – Região intercrítica onde o material sofre uma transformação parcial sendo assim apenas parte da estrutura é transformada em austenita. Nesta região às áreas com alta dureza e outras macias.

Região (e) – Região subcrítica onde apresenta pequenas alterações microestruturais visíveis ao microscópio ótico. Há uma pequena esferoidização das lamelas de cementita da perlita e como consequência a diminuição da resistência mecânica.

Figura 3 - Diferentes regiões da ZTA (MODENESI, 2004).

Fonte: Autor (2023)

A Tabela 1 foi construída de acordo com os resultados do ensaio de tração e com as informações fornecidas pela empresa que forneceu a peça (material como recebido). Mesmo com o resultado da região da fratura obtido de acordo com o esperado, os valores para o limite de resistência e tensão de escoamento, apresentaram valores menores do que o esperado.

Tabela 1 - Propriedades mecânicas dos materiais

Propriedade (MPa)	Módulo de elasticidade	Tensão de escoamento	Limite de resistência à tração
Material como recebido	Não informado	307	448
CP soldado	7492,52	269	417

Fonte: Autor (2023)

No ensaio de impacto a energia absorvida pelo material antes do processo de soldagem foi (132J) um valor maior do que o da peça soldada (123J). Para o ensaio de impacto quanto menor for a energia absorvida, mais frágil será o comportamento do material a uma determinada temperatura. Isto mostra um aumento da fragilidade do material com o processo de soldagem, que podem estar associadas as alterações microestruturais que foram observadas nas micrografias da peça. Antes da realização do processo de soldagem foi feito um pré-aquecimento para não formação de martensita o que fragiliza o material. Porém, mesmo com o

pré-aquecimento ocorreu a formação de martensita pela austenitização da ferrita e com isso deixando o material mais frágil, o que pode ser visto no resultado do ensaio de impacto.

Esta redução na energia de impacto absorvida pelo material também pode ser atribuída à ferrita formada durante o processo de soldagem, localizada na região de grãos grosseiros da ZTA.

Em relação aos resultados do ensaio de dureza, o material ensaiado apresentou diferentes níveis de dureza. O ensaio foi realizado na extensão da peça nas áreas do metal de base, ZTA (Zona Termicamente Afetada) e na ZTA próximo a junta soldada. Os resultados obtidos foram de 67HRB no metal de base, 70HRB na ZTA e 78HRB na junta soldada. Desta forma, é possível observar que as regiões do metal de base, ZTA e ZTA próxima a junta soldada apresentaram valores crescentes de dureza no avanço a partir do metal de base até a ZTA próxima a junta soldada.

4. CONCLUSÃO

Foi verificado um aumento de perlita e o aparecimento de martensita no material, esta última devido possivelmente a não eficácia do pré-aquecimento realizado antes do processo de soldagem. O ensaio de Impacto mostrou um aumento da fragilidade do material o que pode ser atribuído ao aparecimento da martensita.

Quanto aos ensaios de dureza, verificou-se uma dureza na ZTA superior ao metal de base. Isto se deve as alterações microestruturais ocorridas em decorrência do processo de soldagem. No ensaio tração realizado também foi possível aferir esta mudança microestrutural que resultaram na alteração das propriedades mecânicas do material. Pode-se compreender que o aparecimento de martensita afetou o material deixando o mesmo fragilizado e esta observação pode ser vista no resultado do ensaio de Tração, onde o limite de resistência encontrado foi menor do que no material antes do processo de soldagem.

Os resultados expostos acima mostram que para a obtenção de melhores propriedades mecânicas neste material é necessário um maior estudo dos parâmetros de soldagem e de pré-aquecimento do material.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. (1982). NBR 7239 – Chanfro de Solda Manual para Construção Civil Naval – Tipo Padronização - 07.007. Março 1982.

ABNT. (1987). NBR 10126 - Cotagem em desenho técnico. Rio de Janeiro, Brasil: ABNT.

- ABNT. (2002). NBR 6152 - Materiais metálicos – Ensaio de tração à temperatura ambiente. Maio 2002.
- Aguiar, W. M. (2001). Soldagem do aço ABNT 4140 sem Tratamento Térmico Posterior (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Brasil.
- American Welding Society. (1998). ANSI/AWS A2.4-98 - Standard Symbols for Welding, Brazing and Nondestructive Examination.
- Araújo, M. R. V. de. (2006). Caracterização microestrutural do metal de solda depositado por arco submerso em chapas de aço-carbono estrutural (Dissertação de Mestrado). Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, Brasil.
- Barbosa, R. P. (2007). Tecnologia Mecânica: Metalurgia da Soldagem e Soldabilidade dos Materiais (Material de Apoio). Centro Universitário do Leste de Minas Gerais, Coronel Fabriciano, Brasil.
- Chiaverini, V. (1979). Aços e ferros fundidos: Características gerais; Tratamentos térmicos; Principais tipos (4a ed.). Associação Brasileira de Metais.
- Chiaverini, V. (1986). Tecnologia Mecânica, volume III - Processos de Fabricação e Tratamento (2a ed.). Ed. McGraw-Hill.
- Colpaert, H. (1965). Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns (2a ed.). Editora Edgard Blücher.
- Fonseca, M. M. (2005). ARTE NAVAL Volume I (7a ed.).
- Machado, A. R., Abrão, A. M., Coelho, R. T., & Silva, M. B. (2009). Teoria da Usinagem dos Materiais. Editora Edgard Blücher.
- Modenesi, P. J. (2004). Soldabilidade dos Aços Transformáveis. Material de apoio do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil.
- Modenesi, P. J. (2008). Soldabilidade de Algumas Ligas Metálicas. Material de apoio do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil.

Moreira, A. F. (2008). Influência da atmosfera protetora no cordão de solda obtido através dos processos de soldagem GMAW e FCAW (Dissertação de Mestrado). Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, Brasil.

PETROBRAS. (2003). Ensaio Não-Destrutivo – Líquido Penetrante (Rev. E, Nov. 2003).

PETROBRAS. (2011). Materiais Penetrantes (N-2370, Rev. D, Fev. 2011).

SNQC/END. (2006). PR-001 LÍQUIDO PENETRANTE PROCEDIMENTO DE END. Julho 2006.