

FACULDADES INTEGRADAS DE ARACRUZ

AMANDA LETICIA CARLESSO
CAROL SANTOS BOZETTI
RAFAELLA PRISCILA GERMANA CALAIS MUNIZ

**ANÁLISE COMPARATIVA DOS AÇOS ASTM A131 AH36 E ASTM A36: UM
ESTUDO DE CASO DO USO DE UM DOS AÇOS NO PISO DE UM MÓDULO
PARA FPSO**

Aracruz

2018

AMANDA LETICIA CARLESSO
CAROL SANTOS BOZETTI
RAFAELLA PRISCILA GERMANA CALAIS MUNIZ

**ANÁLISE COMPARATIVA DOS AÇOS ASTM A131 AH36 E ASTM A36: UM
ESTUDO DE CASO DO USO DE UM DOS AÇOS NO PISO DE UM MÓDULO
PARA FPSO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Coordenadoria do Curso de Engenharia Mecânica
das Faculdades Integradas de Aracruz – FAACZ,
como requisito parcial para obtenção do título de
Graduação em Engenharia Mecânica.

Orientador: João Paulo Calixto Silva

Aracruz
2018

AMANDA LETICIA CARLESSO
CAROL SANTOS BOZETTI
RAFAELLA PRISCILA GERMANA CALAIS MUNIZ

**ANÁLISE COMPARATIVA DOS AÇOS ASTM A131 AH36 E ASTM A36: UM
ESTUDO DE CASO DO USO DE UM DOS AÇOS NO PISO DE UM MÓDULO
PARA FPSO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à
Coordenadoria de Engenharia Mecânica das
Faculdades Integradas de Aracruz - FAACZ, como
requisito parcial para obtenção do título de
Graduação em Engenharia Mecânica.

Aprovado em 21 de novembro de 2018

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Me. João Paulo Calixto Silva
Faculdades Integradas de Aracruz
Orientador

Prof. Esp. Patrik Borges do Nascimento Leal
Faculdades Integradas de Aracruz
Examinador interno

Prof. Esp. Ernandes Marcos Scopel
Instituto Federal do Espírito Santo
Examinador externo

AGRADECIMENTOS

Agradecemos primeiramente a Deus por nos dar força e saúde para que pudéssemos alcançar mais este objetivo em nossas vidas.

Ao professor orientador João Paulo Calixto Silva pela dedicação, empenho e competência no auxílio ao nos orientar neste trabalho.

Aos nossos pais e irmãos por toda ajuda nas horas difíceis.

A todas as pessoas, amigos e colegas, que de alguma maneira nos ajudaram nesta caminhada.

RESUMO

Este trabalho é um estudo de caso realizado em uma empresa do setor metalomecânico, cuja premissa é análise de um projeto para construção naval, visando a possibilidade de substituição do aço naval ASTM A131 AH36 pelo aço ASTM A36 no piso da estrutura metálica. O aço A36 possui grande flexibilidade de aplicação e é um aço comum no mercado. Já o aço AH36 é usado particularmente na construção naval e possui um preço mais elevado comparado ao aço A36. A fim de verificar as características mecânicas dos aços foram realizados dois tipos de ensaios destrutíveis: de tração e de tenacidade ao impacto tipo Charpy. Foram comparados os resultados obtidos pelos ensaios e aquele que apresentou os melhores termos estruturais, mecânicos, e melhor custo benefício foi indicado para substituição do aço naval. A conclusão foi de que o aço A36 atende as características estruturais exigidas pelo projeto e em relação ao aço naval tem menor custo, reduzindo assim o custo com material em 19%.

Palavras-chave: Construção naval. ASTM A36. ASTM A131 AH36. Ensaio Mecânicos.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Deslocamento da curva de resistências ao choque-temperatura em função do teor de carbono.	24
Figura 2 - Deslocamento da curva de resistências ao choque-temperatura em função do teor de manganês em um aço Fe-Mn-0,05% C.....	25
Figura 3 - Lista de material da estrutura primária.....	29
Figura 4 - Estrutura Primária Skid de Remoção de Sulfato.	29
Figura 5 - Croqui do corpo de prova retangular para ensaio de tração conforme norma ASTM E 8M.....	30
Figura 6 - Croqui do corpo de prova tipo A ensaio de impacto Charpy.	31
Figura 7 - Corpo de prova para ensaio de tração.....	31
Figura 8 - Corpo de prova ensaio de impacto Charpy.....	31
Figura 9 - Máquina de ensaio de tração do Senai Aracruz.	32
Figura 10 - Máquina de ensaio de Impacto Charpy.....	33
Figura 11 - Espectrometro de emissão ótica.....	34
Figura 12 - Amostra do aço A36 após espectrometria em massa.....	34
Figura 13 - Diagrama tensão deformação dos aços ASTM A36 e ASTM AH36.....	37
Figura 14- Imagem dos corpos de prova do aço ASTM A 131.....	39
Figura 15 - Imagem dos corpos de prova do aço ASTM A 36.....	39
Figura 16 - Corpos de Prova de Aço ASTM A131 GR.A após ensaio de impacto à várias temperaturas.....	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Algumas classificações realizadas pela ASTM.....	16
Tabela 2 – Composição química do aço ASTM A131 AH36. Valores percentuais....	17
Tabela 3 – Propriedades Mecânicas do aço ASTM A131 AH36	18
Tabela 4 – Requisitos do ensaio de Impacto Charpy para os aços de alta resistência.	18
Tabela 5 – Composição do aço ASTM A36. Valores percentuais.	19
Tabela 6 – Propriedades Mecânicas do aço ASTM A36	19
Tabela 7 – Resultado do ensaio de tração nos aços ASTM A36 e ASTM A131 AH 36	36
Tabela 8 – Ensaio de Impacto Charpy nos corpos de prova do Aço ASTM A131 AH36	38
Tabela 9 – Ensaio de Impacto Charpy nos corpos de prova do Aço ASTM A36	38
Tabela 10 – Valores obtidos no aço ASTM A36 no ensaio de impacto Charpy	41
Tabela 11– Comparação de resultados obtidos com outros trabalhos no ensaio Charpy.....	41
Tabela 12 – Composição química do aço ASTM A36 através da espectrometria de massa.....	42
Tabela 13 – Composição química do aço ASTM A131 AH36 através da espectrometria de massa.	43
Tabela 14 – Custos de produção do projeto original e do proposto.	44

LISTA DE SIGLAS

ABNT – Associação brasileira de normas técnicas

ARBL – Alta Resistencia e Baixa Liga

ASME – American Society Mechanic Engineer

ASTM – American Society Testing and Materials

BS – American Bureau official Shipping

CIMM – Centro de Informações Metal Mecânica

CNC – Comando numérico computadorizado

DIN – Deutsche Institut fur Normung

FPSOs – Floating Production Storage and Offloading

IFES – Instituto Federal do Espirito Santo

NBR – Norma brasileira

SINAVAL – Sindicato Nacional da Indústria da Construção e Reparação Naval e Offshore

SRU – Sulphate Removal Unit

SENAI – Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial

TOF – Time of

TRANSPETRO – Petrobras Transporte S.A.

USP – Universidade de São Paulo

UFRJ – Universidade do Rio de Janeiro

LISTA DE SIMBOLOS

f – Tensão do material

f_u – Tensão ultima

f_y – Tensão de escoamento

f_p – Tensão de proporcionalidade

\mathcal{E} – Deformação específica

\mathcal{E}_u – Deformação especifica quando ocorre a última tensão

\mathcal{E}_y – Deformação especifica limite quando ocorre a tensão de escoamento

$\square \mathcal{E}_p$ – Deformação especifica limite quando ocorre a tensão de proporcionalidade

α – Ângulo de inclinação da reta da região elástica

D – Densidade

A – Área

e – Espessura

P – Peso total

γ – Massa específica

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 OBJETIVOS	15
2.1 OBJETIVO GERAL	15
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
3 AÇOS	16
3.1 AÇO NAVAL ASTM A131 AH36.....	17
3.2 AÇO ASTM A36	18
3.3 INFLUÊNCIAS DOS ELEMENTOS DE LIGA NAS PROPRIEDADES DOS AÇOS	19
3.4 PROPRIEDADES DOS AÇOS ESTRUTURAIS.....	21
4 ENSAIOS MECÂNICOS E ESPECTROMETRIA DE MASSA	22
4.1 CONSIDERAÇÕES SOBRE O ENSAIO DE TRAÇÃO	22
4.2 CONSIDERAÇÕES SOBRE O ENSAIO DE IMPACTO CHARPY	23
4.3 FRATURA DÚCTIL-FRÁGIL	24
4.4 CONSIDERAÇÕES SOBRE ESPECTROMETRIA DE MASSA.....	25
5 OTIMIZAÇÃO E REDUÇÃO DE CUSTOS DE MATERIAL DO PROJETO	27
5.1 CUSTOS DE MATERIAL.....	27
6 METODOLOGIA	28
6.1 LEVANTAMENTO DOS DADOS DE PROJETO.....	28
6.2 MATERIAIS	30
6.2.1 Obtenção dos Aços e Preparação do Corpo de Prova	30
6.3 MÉTODOS	32
6.3.1 Ensaio de Tração	32
6.3.2 Ensaio de Impacto Charpy	33
6.3.3 Espectrometria de massa	34
6.3.4 Método de levantamento de custos	35
7 RESULTADOS E DISCUSSÃO	36
7.1 ENSAIO DE TRAÇÃO	36
7.2 ENSAIO DE IMPACTO CHARPY	38
7.3 ESPECTROMETRIA DE MASSA.....	42

7.4 OTIMIZAÇÃO DO CUSTO DE MATERIAL	43
8 CONCLUSÃO	45
REFERÊNCIAS.....	46

1 INTRODUÇÃO

A Transpetro em 2011 contratou estudos da USP e da UFRJ, para iniciar a construção de seus navios. De acordo com este estudo, 60% do custo agregado ao navio pertencem aos materiais, sendo estes subdivididos em 20% com materiais da estrutura e 40% com máquinas e equipamentos. Os principais materiais da estrutura são utilizados na construção naval são: chapas grossas, perfis e laminados (SINAVAL, 2011).

Segundo o Sinaval (2011), no Brasil apenas uma única siderúrgica produz aço naval de chapa grossa, destes os mais conhecidos são os aços ASTM A131. Com isso, o preço do aço perde competitividade no mercado nacional e dependendo do cenário econômico as vezes é necessário importá-los para obter um melhor preço. Portanto, este fator acaba impactando negativamente aos estaleiros nacionais, pois gera atraso na entrega dos navios e aumenta o custo de fabricação. Já outros aços mais comuns são encontrados em larga escala no mercado nacional, como é o caso do aço ASTM A36.

Uma plataforma tipo FPSO* é composta por um número considerável de módulos que desempenham funções específicas. Contudo, cada um destes módulos pode, ou não, ser produzido no mesmo estaleiro que foi feita a conversão do navio para plataforma, por exemplo. Os diferentes componentes do navio podem ser provenientes de diferentes canteiros de obra e até mesmo de diferentes continentes o que pode gerar variadas etapas no transporte destes elementos do seu lugar de origem até sua junção no casco (ATHAYDE D.R., 2013). Um destes componentes foi fabricado por uma indústria metalmecânica na cidade de Aracruz. O componente tratava-se de um skid de remoção de sulfato.

A empresa responsável pelo projeto do skid definiu a utilização do aço ASTM A131 AH 36 para toda a parte estrutural, incluindo os perfis soldados e a chapa usada no piso do módulo. As chapas usadas no piso totalizavam 2 toneladas, o que corresponde a 21% do total de chapa usada na estrutura metálica, tendo grande significância no custo. Estas chapas são aplicadas na passarela do módulo, cuja utilização é para circulação de pessoas.

Este trabalho propõe um método de otimização dos custos de material para a empresa metalmecânica, se a resposta for positiva, para a aplicação do aço ASTM

*FPSO são plataformas oceânicas flutuantes com capacidade de armazenamento do óleo produzido, atendendo áreas de grande lâmina d'água e afastadas da costa.

A36 no piso da estrutura. Vale ressaltar que a utilização do aço ASTM A36, representa ganhos financeiros para a construção, além de uma visão crítica sobre aspectos qualitativos do projeto. Para tal, é necessário comparar as estruturas mecânicas dos aços ASTM A36 e o ASTM A131 AH36, através dos ensaios de tração e impacto.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Analisar a viabilidade técnica e financeira da substituição do aço ASTM A131 pelo ASTM A36 na fabricação do piso de um SKID SRU.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar os ensaios destrutíveis de tração e impacto para estabelecer as propriedades mecânicas dos aços;
- Confrontar os resultados obtidos com os dados das literaturas;
- Analisar a viabilidade financeira de cada aço se aplicado no projeto.

3 AÇOS

O material mais utilizado para estruturas metálicas é o aço, que é uma liga de ferro carbono em que o teor de carbono varia desde 0,008% até 2,11%. Os aços para estruturas são requeridas propriedades de boa ductilidade, homogeneidade e soldabilidade, além de grande elevação entre a tensão resistente e a de escoamento. A resistência à corrosão é também importante só sendo, entretanto, alcançada com pequenas adições de cobre. Para atender a esses requisitos, utilizam-se aços-carbono e os aços em baixo teor de liga ou microligados, ambos com baixos e médios teores de carbono (PFEIL, 2009).

Segundo Shackelford (2008), a importância dos aços estruturais na engenharia moderna se dá por ser um material de construção versátil tendo diversas propriedades que são consideradas metálicas, como por exemplo, ser forte e ser prontamente moldado em formas práticas, obter deformabilidade extensa e permanente ou ductilidade.

Existem diversos tipos de aços e várias formas de classifica-los: aços estruturais, fundidos, ferramentas, inoxidáveis, laminados a quente, microligados, baixo carbono, A36, temperado e revenido, etc (Chiaverini, 2005 e Modenesi, 2001).

Em Modenesi (2001) e no CIMM são apresentadas outras classificações de aços e ligas metálicas produzidas pela American Society for Testing and Materials (ASTM), como alguns exemplos mostrados na Tabela 01.

Tabela 1 – Algumas classificações realizadas pela ASTM

Designação ASTM	Tipo de Aço Especificado
A36	Aço estrutural
A131	Aço estrutural para embarcações
A242	Aço estrutural de alta resistência e baixa liga
A709	Aço estrutural para pontes

Fonte: Silva, F. G.,2010

Aços-carbono representam a maior parcela, em massa de um navio ou uma plataforma de petróleo. Esses materiais são ligas ferro-carbono com adição de elementos de liga (MOURÃO, 2007).

3.1 AÇO NAVAL ASTM A131 AH36

Os aços navais são especificados principalmente pelas entidades classificadoras para construção naval. As principais são: BV-Bureau Veritas, BS-American Bureau of Shipping, LR-Lloyds Register of Shipping, GL-Germnischer Lloyd e a DNV-Det Norske Verits.

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 (MARQUE L. F. N., 2011).

A norma ASTM A131 define dois grupos para dividir o aço em média e alta resistência. O primeiro grupo subdivide-se em classes A, B, D e E conforme os valores de tenacidade do aço, sendo este grupo em aços de média resistência. Já o segundo grupo apresenta uma subdivisão mais detalhada em classes AH, DH, EH e FH de acordo com os valores de tenacidade, seguido dos dígitos 32, 36 e 40 conforme os valores do limite de escoamento do aço. O segundo grupo é definido como aço de alta resistência. (ASTM A131, 2014)

No caso dos aços de resistência elevada, as propriedades mecânicas requeridas pela norma são atingidas por meio da adição de carbono, manganês e alumínio de maneira semelhante aos aços de resistência moderada. No entanto, devido aos maiores limites de resistência e tenacidade requeridos por estes aços, outros elementos ainda devem ser adicionados. O nióbio, o vanádio e o titânio apresentam a mesma função do alumínio e, portanto, agem como refinadores de grão (ASM, 1990). O cobre, o cromo, o níquel e o molibdênio podem ser adicionados com o objetivo de endurecer o aço pelo mecanismo metalúrgico de solução sólida substitucional (ASTM, 2004). A densidade do aço A131 é de 7.8 g/cm³. Sua composição química pode ser observada na tabela 2 e as propriedades mecânicas na tabela 3.

Tabela 2 – Composição química do aço ASTM A131 AH36. Valores percentuais.

Elemento químico	C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu
% máx	0,18	0,90 - 1,60	0,10 - 0,50	0,035	0,035	0,2	0,08	0,4	0,35

Fonte: ASTM A131, 2014.

Tabela 3 – Propriedades Mecânicas do aço ASTM A131 AH36

Grade	Tensile Strength [Mpa]	Yield Point, Min, [Mpa]	Enlogation in [200mm] min %	Enlogation in [50mm] min %
Ordinary strength				
A, B, D, E	400 to 520	235	21	24
Higher strength				
AH32, DH32, EH32, FH32	440 to 590	315	19	22
AH36, DH36, EH36, FH36	490 to 620	355	19	22
AH40, DH40, EH40, FH40	510 to 650	390	19	22

Fonte: ASTM A131, 2014.

Para o ensaio de impacto é recomendado apenas o grupo que classifica os aços de alta resistência (ASTM A131, 2014). A tabela 4 informa os valores mínimos que devem ser obtidos neste ensaio.

Tabela 4 – Requisitos do ensaio de Impacto Charpy para os aços de alta resistência.

Grade	Test temperature [C°]	Avarage Absorbeb Energy [J]					
		t≤50mm		t>50mm t≤70mm		t>70mm t≤100mm	
		Long.	Trans.	Long.	Trans.	Long.	Trans.
AH36	0	34	24	41	27	50	34

Fonte: ASTM A131, 2014.

3.2 AÇO ASTM A36

O aço ASTM A36 é um aço ferrítico de baixa liga e baixo carbono ligados ao manganês, com teores de fósforo e enxofres controlados, alta resistência e baixa liga (ARBL), utilizado em partes estruturais quando a economia em peso é importante (SILVA W. O., 2013), sua densidade é de 7.85 g/cm³. A composição química pode ser observada na tabela 5 e as propriedades mecânicas na tabela 6.

Tabela 5 – Composição do aço ASTM A36. Valores percentuais.

Elemento químico	C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu
% máx	0,26	0,8	0,4	0,04	0,05	0,2	0,2	0,2	0,2

Fonte: ASTM A36, 2014.

Tabela 6 – Propriedades Mecânicas do aço ASTM A36

Densidade [kg/m³]	Coefficiente de Poisson	Coefficiente de Expansão Térmica	Módulo de Elasticidade [GPa]	Limite de Resistência [MPa]	Limite de Escoamento [Mpa]
7850	0,32	12x10 ⁶	200	400 – 550	250 min

Fonte: Hibbeler, 2010, p. 640.

Segundo Silva W. O. em seu trabalho de conclusão de curso que estuda a correlação entre as propriedades mecânicas e microestruturais do aço ASTM A36, este aço atende a solicitações de tenacidade até -40°C para navegações em águas frias, ou em temperaturas mais baixas mediante a consulta e autorização da classificadora.

Porém a ASTM A36 não traz requisitos de tenacidade, isto é, ensaio Charpy. Desse modo, o produtor deste aço não se obriga a atender este requisito. Entretanto, há um item na norma denominado Requisitos Suplementares, que informa sobre a possibilidade de fornecimento deste aço com requisito de tenacidade (p.ex., 27J-20°C). Estes requisitos suplementares são acordados no momento de compra do produto, entre comprador e produtor. Trata-se de uma característica especial que não está prescrita na norma, e implicará em um acréscimo no preço do produto (PROFISSIONAL DO AÇO, 2013).

3.3 INFLUÊNCIAS DOS ELEMENTOS DE LIGA NAS PROPRIEDADES DOS AÇOS

Segundo Bain (1945), existem dois mecanismos fundamentais para realizar as melhorias nas propriedades dos aços: o endurecimento por precipitação, onde durante o resfriamento ou revenimento surgem precipitados de carbonetos; ou então o pelo mecanismo de refino do grão.

Chiaverini (2005) define as influências dos elementos de liga e das impurezas nas propriedades dos aços e as mesmas podem ser vistas abaixo:

ALUMÍNIO (Al): Restringe o crescimento de grão e é desoxidante.

BORO (B): Em teores muito baixos, facilita a têmpera do aço, aumentando a sua resistência.

CARBONO (C): É o elemento de liga mais importante nos aços e muito influente em sua composição. É ele que, ligado com outros elementos, permite uma deformação por forjamento ou laminação, alongamentos e soldabilidade não influenciando na resistência à corrosão com água, ácido e gases, formando compostos que permitem garantir resistência ao desgaste, dureza elevada, etc.

CHUMBO (Pb): Melhora a usinabilidade dos aços.

COBALTO (Co): Aumenta a resistência ao revenimento, ou seja, as ferramentas durante a usinagem aquecem e a presença do cobalto não permite que o calor deixe as durezas caírem, aumentando, portanto, sua eficiência.

COBRE (Cu): Aumenta de forma sensível a resistência à corrosão atmosférica dos aços, em adições de até 0,35%. Aumenta também a resistência à fadiga, mas reduz, de forma discreta, a ductilidade, a tenacidade e a soldabilidade.

CROMO (Cr): Aumenta a resistência à corrosão e à oxidação, eleva a dureza dos aços e a resistência ao desgaste quando junto com carbono em concentrações elevadas. Melhora a resistência mecânica a altas temperaturas. Reduz a soldabilidade.

ENXOFRE (S): É extremamente prejudicial aos aços. Desfavorece a ductilidade, em especial o dobramento transversal, e reduz a soldabilidade. Fragiliza os aços durante o trabalho a quente. Em aços comuns são tolerados valores de até 0,05%. Em alguns aços é adicionado acima destes valores melhorando sua usinabilidade.

FÓSFORO (P): Sua presença nos aços está situada em valores de até 0,1%. Acima desse valor causa fragilidade com redução da resistência ao choque e da tenacidade. Melhora a usinabilidade.

MANGANÊS (Mn): A adição do manganês resulta num aumento da dureza do material e na resistência mecânica do aço, com menor prejuízo para a soldabilidade e para a ductilidade do aço. É desoxidante. O maior teor de Manganês no aço carbono é de 1,6%. Este elemento entra em solução sólida (substancial) no Ferro o que aumenta a resistência do aço, em torno de 33 Mpa por ponto percentual de adição. Elevados ganhos de resistência podem ser obtidos a custa de adição

excessiva (mais de 2%), entretanto isto pode ocasionar uma piora em outras propriedades importantes do aço, tais como tenacidade ao impacto e soldabilidade.

MOLIBDÊNIO (Mo): Ajuda a diminuir o crescimento do grão, aumenta a temperabilidade, eleva a dureza e a resistência à tração.

NIÓBIO (Nb): É um elemento muito interessante, quando se deseja elevada resistência mecânica e boa soldabilidade; teores baixíssimos deste elemento permitem aumentar o limite de resistência e, de forma notória, o limite de escoamento. É um componente quase obrigatório nos aços de alta resistência e baixa liga; além de não prejudicar a soldabilidade, permite a diminuição dos teores de carbono e de manganês, melhorando, portanto, a soldabilidade e a tenacidade. Entretanto, o seu efeito sobre a ductilidade é desfavorável.

NÍQUEL (Ni): Refina o grão. Diminui a velocidade de transformação na estrutura do aço. Aumento da resistência à tração. Aumento da ductilidade. Reduz a soldabilidade.

SILÍCIO (Si): É usado como desoxidante do aço. Favorece sensivelmente a resistência mecânica (limite de escoamento e de resistência a tração) e a resistência à corrosão, reduzindo, porém, a soldabilidade. Melhora a temperabilidade.

A soma de todos esses elementos, inclusive carbono, silício, manganês, fósforo e enxofre não devem ultrapassar 6%. No caso do silício, manganês e alumínio, sempre presentes nos aços-carbono, os aços serão considerados ligados quando seus teores ultrapassarem 0,6%, 1,65% e 0,1% respectivamente. (Chiaverini, 2005)

3.4 PROPRIEDADES DOS AÇOS ESTRUTURAIIS

As propriedades mecânicas aparecem quando o material está sujeito a esforços de natureza mecânica. Isso quer dizer que essas propriedades determinam a maior ou menor capacidade que o material tem para transmitir ou resistir aos esforços que lhe são aplicados.

As propriedades dos aços estruturais são:

- Ductilidade: capacidade do material se deformar sob a ação de cargas.
- Fragilidade: oposto da ductilidade. Os aços podem ter características de elementos frágeis em baixas temperaturas.

- Resiliência: é a capacidade do material de absorver energia mecânica em regime elástico.
- Tenacidade: é a capacidade de o material absorver energia mecânica com deformação elástica e plástica.
- Dureza: resistência ao risco ou abrasão.
- Fadiga: resistência a carregamentos repetitivos.

4 ENSAIOS MECÂNICOS E ESPECTROMETRIA DE MASSA

Os ensaios mecânicos são importantes para verificar as propriedades mecânicas dos materiais. Garcia (2015) define o ensaio mecânico como a observação do comportamento de um material, quando submetidos a esforços provocados pela ação de agentes externos.

Chiaverini (2005) defende que os ensaios mecânicos visam não somente a medir as propriedades mecânicas, mas também em comparar essas propriedades em diversos materiais, constatar a influência das condições de fabricação, de tratamentos e da utilização dos materiais e, finalmente, determinar qual o material que mais se recomenda para uso em determinadas condições.

Os ensaios são executados de acordo com a padronização em geral definidas por norma (ABNT, ASTM, BS, DIN, etc), de forma que seus resultados sejam significativos para cada material e possam se facilmente comparados.

4.1 CONSIDERAÇÕES SOBRE O ENSAIO DE TRAÇÃO

De acordo com Souza (1982), o ensaio de tração consiste na aplicação de uma carga de tração uniaxial em um corpo de prova, geralmente padronizado, onde se pode afirmar que as deformações são uniformemente distribuídas ao longo de todo um corpo de prova específico até a ruptura. A uniformidade da deformação permite ainda obter medições precisas da variação dessa deformação em função da força aplicada.

Segundo Souza (1982) a tensão é definida como a resistência interna de um corpo a uma força externa aplicada sobre ele, por unidade de deformação.

Quando um corpo de prova é submetido a ensaio de tração, a máquina de ensaio fornece o gráfico da tensão x deformação. Por este gráfico poderá ser verificado:

- Limite de proporcionalidade: É o limite no qual as tensões são diretamente proporcionais às deformações;
- Limite de ruptura: correspondente ao ponto de fratura do material;
- Limite de escoamento: Início da deformação plástica;
- Limite de resistência: corresponde a tensão máxima que o material suporta sem se romper;
- Ductilidade: capacidade do material ser deformado plasticamente.
- Fratura.

De acordo com Meyers e Chawla (1999), a separação ou fragmentação de um corpo sólido em duas ou mais partes, pela ação de um esforço, é chamada fratura, e a capacidade de absorver energia até que essa fratura ocorra é a tenacidade do material que constitui este corpo sólido. Em termos de solicitações estáticas, a tenacidade de um material pode ser avaliada correspondendo à área abaixo da curva do gráfico de tensão x deformação, obtida no ensaio de tração.

O ensaio de tração, entretanto, não mostra a resposta do material em condições de impactos abruptos, ou de elevadas taxas de deformação, já que há materiais cujas propriedades são diferentes, dependendo da taxa de deformação aplicada. Se uma carga muito menor for aplicada repentinamente, o que caracteriza uma solicitação dinâmica ou um teste dinâmico, o material pode falhar e aparentar ter menor resistência do que teria caso a mesma carga fosse aplicada de forma gradativa (HORATH, 1995).

4.2 CONSIDERAÇÕES SOBRE O ENSAIO DE IMPACTO CHARPY

Segundo Souza (1982), o ensaio de impacto é um dos ensaios mais empregados para o estudo da fratura frágil nos metais. É um teste dinâmico usado principalmente para materiais utilizados em baixa temperatura, como teste de aceitação de material. Porém para Callister (2008), 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. 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.

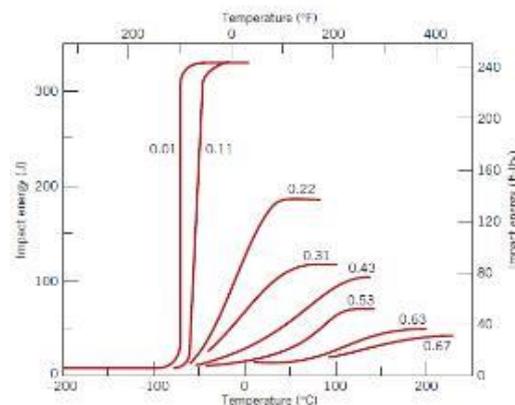
Já Garcia (2015), defende que para situações de solicitações dinâmicas o ensaio de impacto é amplamente utilizado particularmente quando há a necessidade de se estudar o comportamento dos materiais na transição do comportamento de fratura com micromecanismo dúctil para frágil, como função da temperatura.

Askeland e Phulé (2003) também comentam que o ensaio de impacto é uma maneira rápida, conveniente e barata para comparar diferentes materiais, e justificam isso lembrando que nem sempre o valor de energia necessário para ruptura de um material, quando solicitado por tração, é o mesmo valor de energia requerido para ruptura de um material ensaiado por impacto. Além disso, citam que, em geral, é verdade que metais que apresentam alta resistência e alta ductilidade no ensaio de tração apresentam boa tenacidade, mas que isso deixa de ser verdade absoluta quando são consideradas altas taxas de deformação, como é o caso apresentado pelo ensaio de impacto.

4.3 FRATURA DÚCTIL-FRÁGIL

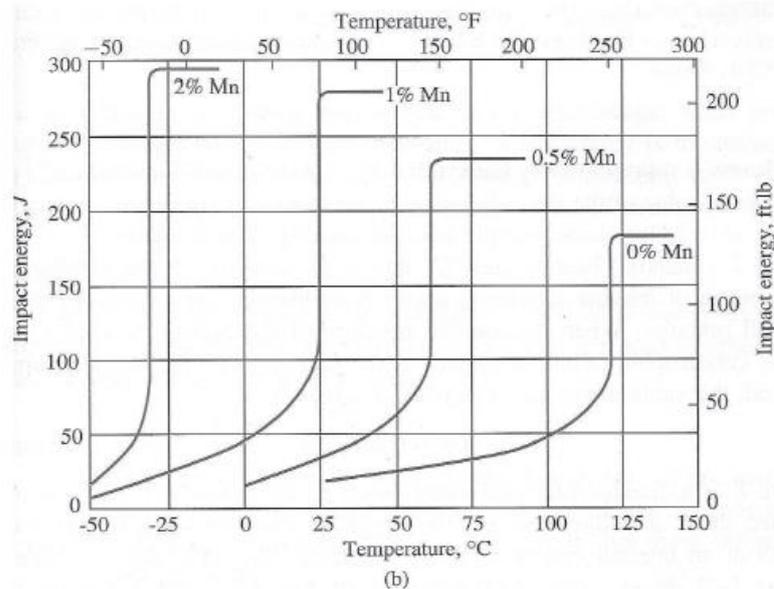
De acordo com Diaz (1998), o teor de carbono em aços carbonos comum influencia na resistência ao choque em uma determinada temperatura, sem adição de elementos de liga. Nas figuras 2 e 3 pode-se observar o deslocamento da curva de resistências ao choque-temperatura em função do carbono e manganês respectivamente.

Figura 1 - Deslocamento da curva de resistências ao choque-temperatura em função do teor de carbono.



Fonte: Callister, 2008.

Figura 2 - Deslocamento da curva de resistências ao choque-temperatura em função do teor de manganês em um aço Fe-Mn-0,05% C.



Fonte: Metals Handbook, 1978.

De acordo com Dieter (1981), o carbono e o manganês são os principais responsáveis por variações na temperatura de transição. O fósforo também exerce um forte efeito em relação ao acréscimo de temperatura de transição. O níquel geralmente é aceito como benéfico à tenacidade ao entalhe quando apresenta quantidade 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 superior a 0,25%, enquanto que o molibdênio aumenta esta transição quase tão rapidamente quanto o carbono e o cromo tem pequeno efeito.

Garcia (2015) cita que são três fatores principais que contribuem para o surgimento de uma fratura frágil em materiais que normalmente são dúcteis à temperatura ambiente: a existência de um estado triaxial de tensões, baixas temperaturas e taxa de deformação elevada.

4.4 CONSIDERAÇÕES SOBRE ESPECTROMETRIA DE MASSA

A espectrometria de massas é uma ferramenta importante para análise estrutural, podendo ser utilizada para identificar ou caracterizar substâncias orgânicas e inorgânicas, por meio da determinação da razão massa/carga em função da

abundância relativa das espécies analisadas (SKOOG, D. A.; HOLLER, F. J.; NIEMAN, T. A., 2009).

Para ser utilizada a espectrometria de massas como método analítico é preciso ter uma fonte de energia para gerar íons, um sistema para transportar eficientemente estes íons para o espectrômetro, onde serão separados e enviados ao detector. O transporte dos íons ocorre em trajetórias dependentes de sua razão massa/carga e pela ação do campo magnético e/ou elétrico (GINÉ-ROSIAS, 1999).

As medidas com espectrometria de massa são realizadas com partículas carregadas porque é mais fácil de controlar o movimento e a direção dos íons pela aplicação de forças elétricas e magnéticas e, portanto, promover a sua separação e detecção. A função de uma fonte de íons é converter as moléculas ou átomos da amostra em espécie iônica em fase gasosa (DASS, 2007).

Qualquer material que possa ser ionizado e cujos íons possam ser transferidos para a fase gasosa pode ser analisado por espectrometria de massas, lembrando que a análise requer pressões extremamente baixas (ex. alto vácuo de aproximadamente 10⁻⁶ Torr) (WILSON E WALKER, 2010).

Todos os espectrômetros de massa são basicamente similares. Eles consistem dos seguintes itens:

- Sistema de alto vácuo. Para isso utiliza-se uma série de bombas (ex. bombas turbomoleculares, etc.);
- Sistema de entrada de amostras (amostras líquidas podem entrar por capilares ou amostras sólidas podem ser colocadas em placas específicas);
- Fonte de ionização onde as amostras são convertidos em íons e transferidos para a fase gasosa;
- Analisador de massas. Podem ser de vários tipos TOF (time-of-flight), quadrupolo, quadrupolo-ion trap, etc.;
- Detector.

5 OTIMIZAÇÃO E REDUÇÃO DE CUSTOS DE MATERIAL DO PROJETO

5.1 CUSTOS DE MATERIAL

A boa gestão dos materiais em uma empresa caracteriza-se como uma das condições fundamentais para o equilíbrio econômico e financeiro dessa (FRANCISCHINI; GURGEL, 2002).

Os setores de compras e gestão de estoques são responsáveis por uma ligação vital entre a empresa e seus fornecedores. Assim, é necessária a compreensão tanto das necessidades de todos os processos da empresa como das características de fornecimento de suas fontes de suprimentos, para que sejam obtidos resultados eficazes (SLACK; CHAMBERS; JOHNSTON, 2002).

De acordo com Ballou (2006), administrar cuidadosamente o nível dos estoques é economicamente sensato, já que o custo de manutenção desses estoques pode representar de 20 a 40% do seu valor por ano.

Para a definição da política de estoque, Ballou (2006) destaca três classes de custos importantes: os custos de aquisição, de manutenção e de falta de estoques. Os custos de aquisição frequentemente incluem:

- Preço do material;
- Custo do processamento de um pedido pelos departamentos de contabilidade e compras;
- Custo do transporte do pedido;
- Custo da conferência e processamento dos materiais no recebimento.

O custo de falta de um item em estoque, de acordo com Francischini e Gurgel (2002), é muito difícil de ser calculado com precisão, já que envolve uma série de estimativas, rateios e valores intangíveis. Transtornos, viagens, auditorias, telefonemas, além da imagem negativa percebida pelo mercado, são alguns exemplos de custos intangíveis de falta de estoque. Outros custos de falta de estoque:

- Ociosidade (mão de obra e equipamentos aguardando materiais);
- Multas;
- Perda de vendas.

6 METODOLOGIA

Neste capítulo, estarão demonstrados as informações do projeto, os equipamentos, materiais e métodos que serão utilizados na realização deste trabalho, a fim de comparar o que apresenta os melhores resultados em termos estruturais e mecânicos, optando por substituição ao material que tem melhor custo benefício.

6.1 LEVANTAMENTO DOS DADOS DE PROJETO

O objeto de análise deste estudo trata-se um skid de remoção de sulfato. Um skid é uma construção compacta que realiza um processo com melhor custo benefício possível. O skid é composto por diversos equipamentos montados em uma única e mais compacta estrutura. Neste caso, o sistema a ser implementado neste skid é formado por filtros, bombas de injeção e a unidade de remoção de sulfato, que usa a permeação em membranas para remover sulfato da água (WOLLNER, G. C., 2016). Foi feito o levantamento dos principais dados do projeto original como parâmetros a serem utilizados no presente trabalho, a fim de trazer informações necessárias para os ensaios de impacto e de tração. Os materiais e a propriedades mecânicas do projeto estão de acordo com os requisitos de regras da sociedade de classificação para estruturas do topside:

- Temperatura de projeto para definição do grau do aço: 0 ° C;
- Tensão de escoamento mínima da estrutura primária;
- Chapas: ASTM A131 (AH36/ DH36/ EH36), F_y (min.) = 355 MPa;
- Perfis Laminados: ASTM A131 (AH36), F_y (min.) = 355 Mpa.
- A escolha dos materiais deve estar de acordo com a diretiva para aquisição de materiais que atendam aos requisitos e especificações técnicas exigidas pela sociedade classificadora. Para itens não cobertos por estes regulamentos, mas que atendam ao padrão da contratada poderá ser permitido, sujeito a aprovação prévia da classificadora.

Na figura 3 estão listados os materiais para a estrutura primária, ou como definida neste trabalho como estrutura metálica.

Figura 3 - Lista de material da estrutura primária

DESCRIÇÃO	MATERIAL	ESP. (mm)	ÁREA (m ²) COMP. (m) QT.	PESO UNITÁRIO (Kg/m ²) (Kg/m) (Kg)	ÁREA DE PINTURA (m ²)	PESO (Kg)
2. CHAPAS						
CH. 8mm	ASTM A131 (AH36)	8,00	33,5	62,80	67	2106
CH. 9,5mm	ASTM A131 (AH36)	9,50	5,6	74,60	11	420
CH. 12,5mm	ASTM A131 (AH36)	12,70	5,4	98,10	11	529
CH. 16mm	ASTM A131 (AH36)	16,00	45,2	125,60	90	5683
CH. 16mm (Z)	ASTM A131 (AH36)	16,00	1,4	125,60	3	171
CH.25mm	ASTM A131 (DH36)	25,00	1,1	196,30	2	212
CH.50mm	ASTM A131 (EH36)	50,00	1,7	392,50	3	648

Fonte: Arquivo do projeto. Adaptado pelos autores

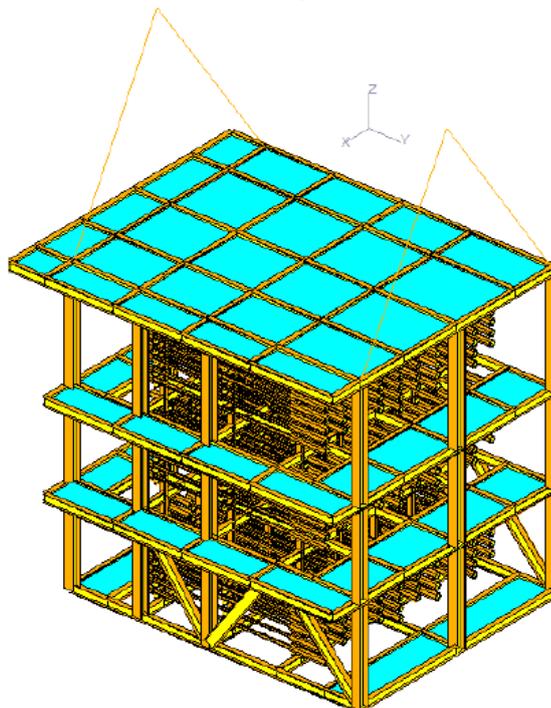
O item destacado de amarelo na figura 3 são as chapas utilizadas no piso da estrutura. Na figura 4, fica mais claro a distinção da chapa do piso (azul) e os outros materiais que constituem a estrutura primária.

Embora na figura 3 foi informado o peso de 2106 kg, para os cálculos de custos este trabalho usará o peso resultante da equação 01.

$$P=A \times e \times \gamma$$

(Equação 01)

Figura 4 - Estrutura Primária Skid de Remoção de Sulfato.



Fonte: Arquivos do projeto. Adaptado autores.

6.2 MATERIAIS

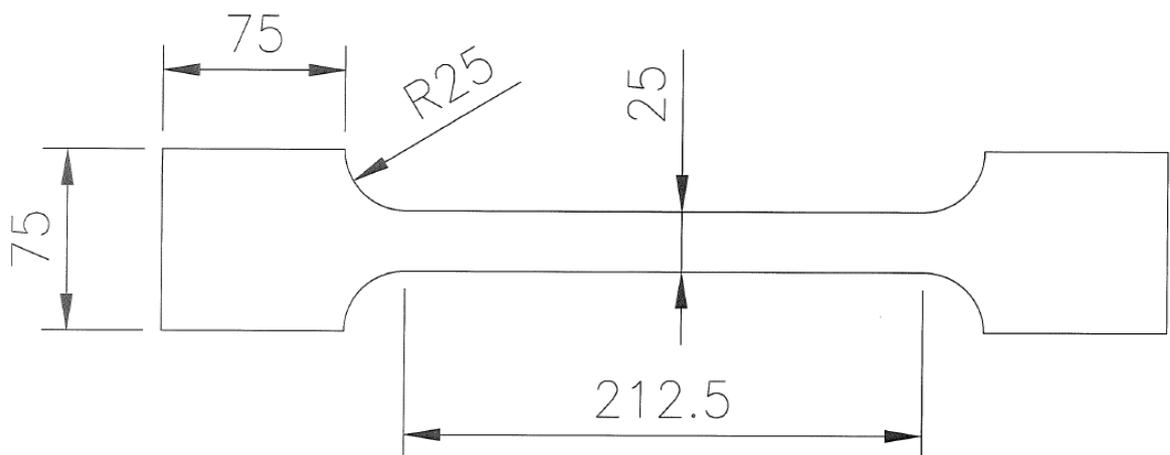
Os materiais utilizados neste trabalho são dois aços ASTM A36 e ASTM 131 AH36, desenvolvidos com características diferentes, e segundo a própria norma ASTM A36 define como aço de média resistência mecânica e a norma ASTM A131 define o grau AH36 como alta resistência mecânica.

6.2.1 Obtenção dos Aços e Preparação do Corpo de Prova

As chapas foram doadas por uma empresa do ramo metalmeccânico de Aracruz, sendo uma peça de aço ASTM A131 AH36 e outra peça de aço ASTM A36, ambas com espessura de 5/16 polegadas (8,00mm), a fim de serem efetuados os ensaios para caracterização mecânica.

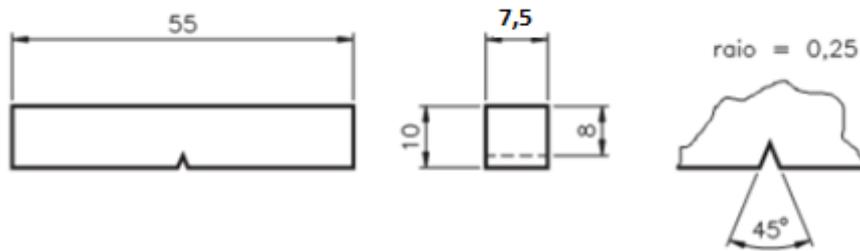
Para a preparação do corpo de prova, foram adotados os desenhos, de acordo com a determinação das normas para cada tipo de ensaio, sendo a norma ASTM E 8M para ensaio de tração e ASTM E-23 para ensaio de impacto. As figuras 5, 6 ilustram os croquis dos corpos de prova, demonstrando o dimensional seguido, respectivamente, para ensaio de tração e impacto.

Figura 5 - Croqui do corpo de prova retangular para ensaio de tração conforme norma ASTM E 8M.



Fonte: Autores.

Figura 6 - Croqui do corpo de prova tipo A ensaio de impacto Charpy.



Fonte: Norma ASTM E23, adaptado autores.

O corte dos corpos de prova para ensaio de tração foi realizado em uma máquina de corte CNC, figura 7. Apenas os corpos de provas para o ensaio de impacto foram usinados, para melhor precisão no corte do entalhe em V.

Figura 7 - Corpo de prova para ensaio de tração.



Fonte: Autores

Figura 8 - Corpo de prova ensaio de impacto Charpy.



Fonte: Autores

Para a realização da espectrometria de massa, foram utilizadas as sobras das chapas e a preparação para o ensaio foi de limpeza da oxidação e lixamento da área necessária para emissão do feixe de luz, deixando-a plana.

6.3 MÉTODOS

Para obtenção dos resultados foram realizados ensaios mecânicos em laboratórios adotando os seguintes métodos de ensaio de tração, impacto Charpy e espectrometria de massa.

6.3.1 Ensaio de Tração

O ensaio de tração foi realizado no laboratório do SENAI Aracruz, em uma máquina modelo Emic DL60000, mostrada na figura 9. A máquina tem capacidade de gerar o gráfico “tensão-deformação” durante o ensaio, permitindo realizar a análise dos resultados.

Figura 9 - Máquina de ensaio de tração do Senai Aracruz.



Fonte: Autores.

O objetivo do ensaio é determinar o limite de escoamento, limite de resistência à tração, o alongamento total na ruptura e a redução da área de ruptura.

6.3.2 Ensaio de Impacto Charpy

O ensaio de impacto Charpy foi realizado no laboratório da empresa Proaqt em Osasco SP, através da máquina modelo “TINIUS OLSEN” MQI 004, IT 406 com capacidade de 408J, certificado 158119-101 de 02/05/2017, ilustrada na figura 10 (Certificado ANEXO I). A temperatura do ensaio foi de 0°C, para atender aos requisitos do projeto. O tipo de entalhe do corpo de prova foi o V-NOTC, conforme norma ASTM A370/2014.

Figura 10 - Máquina de ensaio de Impacto Charpy.



Fonte: IMADA, 2018.

O objetivo do ensaio foi determinar a capacidade do material absorver energia através do impacto provocado por um pêndulo. Este ensaio visa analisar a tenacidade do material em uma determinada temperatura.

6.3.3 Espectrometria de massa

Os elementos químicos dos aços foram identificados através do ensaio de espectrometria em massa, realizado no IFES Vitória-ES em um aparelho espectrômetro de emissão ótica da marca Oxford modelo Foundry Master Pro, figura 11. Um computador é interfaceado ao detector e produz valores numéricos referentes à porcentagem de cada elemento, em função da abundância relativa do íon mais estável, denominados espectros de massa.

Figura 11 - Espectrometro de emissão ótica



Fonte: Autores

Utilizando uma amostra de cada aço, foram realizados 5 testes em cada amostra. Na figura 12 está a amostra do aço A36 após o ensaio.

Figura 12 - Amostra do aço A36 após espectrometria em massa.



Fonte: Autores

6.3.4 Método de levantamento de custos

O levantamento de custo foi realizado através do levantamento de preços envolvendo as principais etapas do processo de fabricação em uma indústria metalmeccânica. Os valores foram obtidos através de cotações do mercado vigente, entre dezembro de 2017 à janeiro de 2018.

A quantidade de chapa necessária neste projeto foi apresentada na figura 3, entretanto o peso adotado na tabela trata-se do peso específico do aço carbono sendo de 7,85 kg/m³. Neste trabalho será usado o peso específico variando a densidade de cada material. O cálculo do peso das chapas A36 e AH36 foram feitos de acordo com a equação 01.

$$P = \gamma \times A \times e \quad (\text{Equação 01})$$

Onde,

γ = massa específico

A = área total da chapa no projeto

e = espessura da chapa

Logo,

$$P_{A36} = 7850 \frac{kg}{m^3} \times 33,5m^2 \times 0,008m$$

$$P_{A36} = 2103,8 \text{ kg}$$

$$P_{AH36} = 7800 \frac{kg}{m^3} \times 33,5m^2 \times 0,008m$$

$$P_{A36} = 2090,4 \text{ kg}$$

Portanto o peso total do aço ASTM A36 é de 2103,8 kg e do aço ASTM A131 AH36 é de 2090,4 kg, logo a diferença entre o peso das chapas é de 13,4kg.

7 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os ensaios de caracterização mecânica foram realizados com o objetivo de comparar e estudar o comportamento do material aço ASTM A 36 com aço ASTM A131 AH36, onde os aços passaram pelos ensaios nas mesmas condições normativas. Os ensaios foram realizados sempre com três amostras de cada material, pois dificilmente se consegue, no mesmo material, e nas mesmas condições de ensaios, resultados totalmente repetitivos.

7.1 ENSAIO DE TRAÇÃO

Observa-se nos resultados obtidos no ensaio de tração, mostrados na tabela 7, que a média dos valores do material ASTM A 131 AH36 referentes às amostras CP-01 e CP-02 nos quesitos, limite de resistência e limite de escoamento, foram superiores aos das Amostras CP-01, CP-02 e CP-03 do material ASTM A36.

Tabela 7 – Resultado do ensaio de tração nos aços ASTM A36 e ASTM A131 AH 36

MATERIAL	CORPO DE PROVA	COMPR. INICIAL [mm]	COMPR. FINAL [mm]	SEÇÃO [mm]	TENSÃO DE ESCOAMENTO [Mpa]	TENSÃO MÁXIMA [Mpa]	ALONG. [%]	ALONGAMENTO MÉDIO [%]
A36	CP1	415	473	221	309	447	14	14,5
	CP2	415	478	224	313	441	15	
AH36	CP1	415	455	208	424	695	10	10,5
	CP2	415	465	230	454	631	11	

Fonte: Autores.

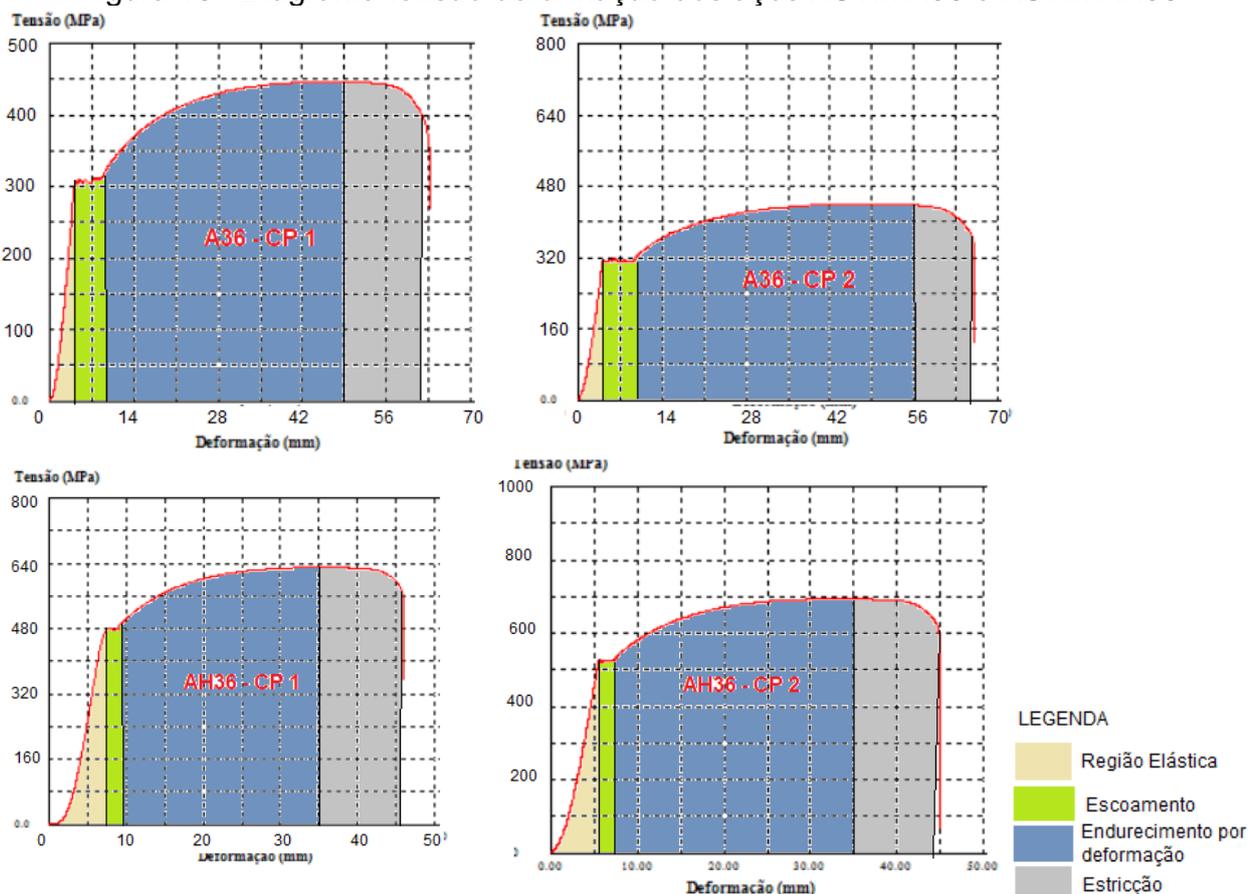
Os valores maiores dos limites de resistência e escoamento das amostras do material AH36 justificam-se pela quantidade de Manganês, presentes em sua estrutura, serem 55% superiores ao do aço A36. A adição do manganês resulta num aumento da resistência mecânica do aço, com menor prejuízo para a ductilidade do aço. Este elemento entra em solução sólida (substancial) no Ferro o que aumenta a resistência do aço, em torno de 33 Mpa por ponto percentual de adição. A adição máxima de manganês no aço carbono é de 1,60%, esta mesma tolerância é presente na norma do aço ASTM A131 AH 36, conforme tabela 02 (teor de

elementos de ligas presente neste aço), embora a amostra obtida no presente trabalho apresente 1,44% de Mn.

Verificando as fraturas das amostras, ambos os materiais obtiveram fraturas dúcteis em temperatura ambiente, ou seja, foram capazes de absorver a energia aplicada com uma boa deformação antes de falhar. Porém o resultado do alongamento do aço ASTM A36 foi levemente superior ao do aço AH36, ou seja, o aço A36 apresentou maior ductilidade que o aço naval AH36. Isso também pode ser justificado pelo alto teor de manganês presente no aço naval, o que prejudicou a sua ductilidade.

A máquina de ensaio também gerou o diagrama tensão x deformação, que podem ser observados na figura 13.

Figura 13 - Diagrama tensão deformação dos aços ASTM A36 e ASTM AH36.



Fonte: Relatório de ensaio de tração SENAI (ANEXO II), adaptado autores.

De acordo com o diagrama tensão deformação gerado pela máquina de ensaio do SENAI, dividimos as áreas abaixo do gráfico de acordo com a região e o tipo de deformação sofrida pelo material. O aço A36 teve uma região elástica menor que a

do aço AH36, ou seja, o limite de proporcionalidade foi maior no aço AH36. Já a área de escoamento do aço A36 foi maior que a do aço AH36, isso se determinou pois o aço A36 sofreu maior alongamento sem acréscimo significativo de força quando iniciou a deformação plástica. A região de endurecimento por deformação que vai da fase plástica até o limite resistência mostrou-se semelhante nos dois aço, embora no aço A36 tenha alcançado maior deformação sob menor tensão e no aço AH36 menor deformação sob maior tensão. Logo após o limite de resistência dos materiais há um decréscimo de carga até chegar ao limite de ruptura. Essa área do gráfico é chamada de estrição, uma vez que há redução da área do material.

7.2 ENSAIO DE IMPACTO CHARPY

Os dois materiais, ASTM A 131 AH36 e ASTM A36, foram submetidos ao ensaio de Impacto Charpy, conforme norma ASTM A370/14, em condições de temperatura de 0°C. Os resultados estão apresentados nas tabelas 8 e 9 e nas figuras 14 e 15.

Tabela 8 – Ensaio de Impacto Charpy nos corpos de prova do Aço ASTM A131 AH36

AMOSTRA	LOCALIZAÇÃO DO ENTALHE	RESULTADOS OBTIDOS [J]	MÉDIA [J]
AH36 (03798/17)	Metal base	CP1	24
		CP2	20
		CP3	18
			21

Fonte: Relatório ensaio charpy, (ANEXO I).

Tabela 9 – Ensaio de Impacto Charpy nos corpos de prova do Aço ASTM A36

AMOSTRA	LOCALIZAÇÃO DO ENTALHE	RESULTADOS OBTIDOS [J]	MÉDIA [J]
A36 (03799/17)	Metal base	CP1	187
		CP2	161
		CP3	172
			173

Fonte: Relatório ensaio charpy, (ANEXO I).

Figura 114- Imagem dos corpos de prova do aço ASTM A 131.



Fonte: Autores

Figura 115 - Imagem dos corpos de prova do aço ASTM A 36.



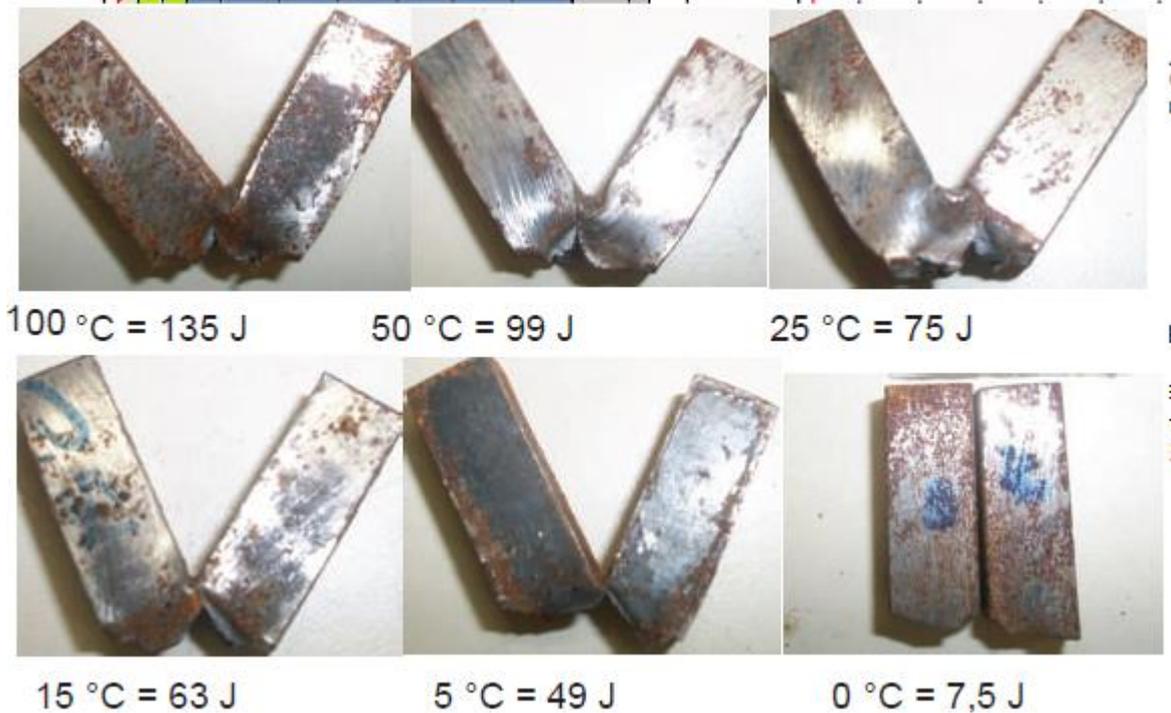
Fonte: Autores

Analisando o resultado do ensaio no aço ASTM A131 AH36, podemos observar que o resultado médio da energia absorvida ao impacto de 21J está dentro do que é estabelecido pela norma ASTM A131, que por sua vez varia entre 20J a 40J à 0°C. Embora este aço utilize ligas dúcteis, na prática, um material dúctil pode romper-se de forma frágil dependendo da temperatura, ou seja, há uma faixa de temperatura na qual a energia absorvida cai apreciavelmente. Essa faixa é chamada de temperatura de transição, onde há mudança no caráter de ruptura do material, passando de dúctil a frágil, ou vice-versa (SOUZA, 1982). Dessa forma, podemos afirmar que à temperatura de 0°C, ocorreu fratura frágil nos corpos de prova do aço ASTM A131 AH36, pois as peças se romperam durante o ensaio.

Esse mesmo comportamento foi observado por Silva J. R (2013) em seu estudo da transição dúctil frágil do aço naval A131 A, onde foi constatado pelo ensaio de impacto Charpy que a temperatura de transição, onde ocorre queda brusca de

energia absorvida, acontece no intervalo entre 0°C e -55 °C. Na figura 16 estão os corpos de provas daquele estudo após a realização do ensaio de impacto em várias temperaturas. É possível observar que até a temperatura de 25 °C o corpo de prova não havia se rompido.

Figura 16 - Corpos de Prova de Aço ASTM A131 GR.A após ensaio de impacto à várias temperaturas.



Fonte: Da Silva, 2013.

No estudo de Silva J. R (2013) concluiu-se que o aço ASTM A131 não é recomendado para uso em temperaturas abaixo de 0 °C.

Analisando agora o resultado do ensaio de impacto no aço ASTM A36, fica claro que não houve fratura frágil devido a grande energia absorvida pelo corpo de prova sem causar o rompimento, conforme observado na figura 14 já apresentada. Como a norma ASTM A36 não trata de requisitos de tenacidade, não foi possível determinar se o resultado obtido no ensaio de impacto está coerente com o que norma estabeleceria, entretanto há um item da norma chamado de Requisitos Suplementares, que possibilita ao comprador exigir o fornecimento deste aço com tenacidade (ex.: 27J a -20°C).

Silva W. O. (2013) realizou ensaio de impacto no aço ASTM A36 para analisar a energia absorvida pelo corpo de prova com solda e sem solda, o resultado do ensaio

para o corpo de prova sem solda foi de 132J, sendo um resultado inferior ao obtido no presente estudo.

No estudo de Silva R. C e Gheno S. M. (2017), que se tratava de realizar a caracterização mecânica dos aços ASTM A131 DH36 e ASTM A36. A fim de comparar os resultados obtidos por Silva no ensaio de impacto para o aço ASTM A36 com os resultados obtidos no presente trabalho, ver a tabela 10. Porém naquele estudo os corpos de prova foram submetidos a tratamento térmico de normalização e a temperatura do ensaio foi de -20 °C, entretanto o aço A36 absorveu grande quantidade de energia, mesmo fato que ocorre no presente estudo.

Tabela 10 – Valores obtidos no aço ASTM A36 no ensaio de impacto Charpy

A36 / TEMPERATURA °C	DIMENSÃO DA AMOSTRA [mm]	TIPO DE ENTALHE	VALOR [J]	MÉDIA [J]
-20°C	10 X 50 mm	CP1	120	126
		CP2	130	
		CP3	130	
20°C	10 X 50 mm	CP4	160	145
		CP5	140	
		CP6	135	

Fonte: Silva; Gheno, 2017.

Para melhor comparação dos resultados obtidos em outros trabalhos acadêmicos citados no presente trabalho, a tabela 11 mostra de forma resumida estas informações.

Tabela 11– Comparação de resultados obtidos com outros trabalhos no ensaio Charpy

AUTORES	AÇO	MÉTODO	OBJETIVO	TEMPERATURA	CONCLUSÃO
Souza, 1982.	AH36	Ensaio Charpy	Estudo da faixa de temperatura em que a energia cai apreciavelmente.	-	Existe uma faixa de temperatura de transição, onde há mudança no caráter do material, passando de dúctil a frágil.

Silva J.R., 2013	AH36	Ensaio Charpy	Estudo da transição ductil frágil do aço ASTM A131.	0°C	A temperatura de transição, onde ocorre queda brusca de energia absorvida, acontece no intervalo entre 0°C e -55 °c. Concluiu-se que o aço ASTM A131 não é recomendado para uso em temperaturas abaixo de 0°C.
Silva W. O. (2013)	A36	Ensaio Charpy	Analisar energia absorvida por um corpo com solda e sem solda.	0°C	O ensaio de impacto mostrou um aumento da fragilidade do material o que pode ser atribuído ao aparecimento da martensita.

Fonte: Autores

7.3 ESPECTROMETRIA DE MASSA

A espectrometria de massa foi realizada de forma a elucidar os elementos químicos presentes em cada aço, pois fornecem dados úteis para identificação e caracterização de compostos como a massa e a fórmula molecular, obtidos pela identificação do íon molecular, além de informações adicionais obtidas pela fragmentação dos mesmos, que podem ser relacionadas com a presença ou ausência de vários grupos funcionais (MEYERS, M., 1999). É uma técnica que pode gerar análises qualitativas (para identificação do espectro de massa), ou análises quantitativas por gerar sinais analíticos proporcionais à concentração dos elementos presentes em cada amostra. Este trabalho utiliza a análise quantitativa para identificar os elementos que constituem os aços A36 e AH36. Os valores quantitativos obtidos na espectrometria estão apresentados nas tabelas 12 e 13.

Tabela 12 – Composição química do aço ASTM A36 através da espectrometria de massa.

TESTE	Fe %	C%	Si%	Mn%	P%	S%	Cr%	Mo%	Cu%
1	98,5	0,163	0,269	0,833	0,0148	0,0044	0,025	0,0011	0,0005
2	98,8	0,163	0,22	0,669	0,022	0,0045	0,0118	0,001	0,0005
3	98,8	0,124	0,22	0,664	0,0244	0,0063	0,0125	0,0013	0,0005
4	98,7	0,143	0,222	0,673	0,0271	0,0099	0,0123	0,0022	0,0005
5	98,8	0,113	0,223	0,674	0,0245	0,0063	0,0131	0,0013	0,0005
MÉDIA	98,7	0,136	0,231	0,703	0,0226	0,0063	0,0149	0,0013	0,0005

Fonte: Autores

Tabela 13 – Composição química do aço ASTM A131 AH36 através da espectrometria de massa.

TESTE	Fe %	C%	Si%	Mn%	P%	S%	Cr%	Mo%	Cu%
1	97,9	0,182	0,205	1,43	0,0272	0,0067	0,0172	0,0025	0,0005
2	97,8	0,174	0,216	1,45	0,0262	0,0038	0,0178	0,0031	0,0005
3	97,9	0,174	0,219	1,48	0,0268	0,0046	0,0186	0,0028	0,0005
4	97,9	0,164	0,216	1,46	0,0256	0,0033	0,0181	0,0022	0,0005
5	97,9	0,163	0,212	1,48	0,0257	0,0033	0,018	0,002	0,0005
MÉDIA	97,9	0,171	0,214	1,46	0,0263	0,0043	0,018	0,0025	0,0005

Fonte: Autores

A média simples dos 5 testes é considerada o resultado da espectrometria de massa. Os resultados foram comparados à composição química dos aços indicadas nas normas ASTM A36 e ASTM A131 e os mesmos foram satisfatórios para todos os elementos, ficando dentro da faixa estabelecida em cada norma.

Comparando os resultados do aço A36 com o AH 36 há muita semelhança na composição de ambos nos elementos Fe, C, Si, P, S, Cr, Mo e Cu, apenas a concentração de Mn é expressivamente superior no aço naval. Também é importante observar que seu percentual chega bem próximo do limite de 1,60% de Mn que pode estar presente em um aço carbono. Portanto este elemento foi o principal fator da caracterização mecânica do aço naval como um aço de alta resistência, pois ligado à alta concentração de Fe pode acrescentar até 33 Mpa por ponto percentual de adição.

Embora a literatura informe que apenas concentrações maiores que 2% de Mn presentes no aço podem ocasionar uma piora em propriedades importantes do aço, como tenacidade ao impacto, isto não foi testificado neste trabalho, pois comparando o resultado do ensaio de impacto do aço A36 com o aço AH36, a tenacidade ao impacto do aço naval à 0°C foi expressivamente menor que a do aço A36. Porém é importante esclarecer que o resultado do ensaio de impacto Charpy do aço AH36 está dentro do limite estipulado pela norma ASTM A131, o que levaria às entidades classificadoras a aprovar o seu uso para a construção naval.

7.4 OTIMIZAÇÃO DO CUSTO DE MATERIAL

O objeto deste levantamento de custo está diretamente ligado à chapa usada no piso da estrutura metálica conhecida como skid de remoção de sulfato.

Para o quantitativo de chapa, nos baseamos na lista de materiais elaborada pela empresa responsável pelo projeto, já apresentada na tabela 07. Os principais fatores de produção envolvidos na fabricação do skid estão apresentados na tabela 14.

Tabela 14 – Custos de produção do projeto original e do proposto.

CUSTOS	ASTM A131 AH36	ASTM A36
PREÇO DA CHAPA (EM AGOSTO 2018)	R\$ 5,00	R\$ 3,95
IPI	5%	5%
NECESSIDADE [kg]	2090,4	2103,8
ENSAIO IMPACTO	-	R\$ 150
VALOR TOTAL	R\$ 10.974,60	R\$ 8.875,50

Fonte: Autores

Referente ao custo com requisitos suplementares presente na composição do custo com o aço ASTM A36 este é alocado ao solicitar ensaio de impacto Charpy, por se tratar de uma característica especial (que não está inicialmente prescrita na norma), portanto há acréscimo no preço do produto.

De acordo com os resultados obtidos, podemos observar que realizando a troca do material da chapa, o custo de material reduz em R\$ 2.099,10, representando uma economia de 19% do que seria gasto com a chapa original do projeto. Já os custos com insumos de solda e pintura não foram levados em consideração por não haver diferença na aplicação de um material ou outro. O custo de frete também não foi levantado pois os dois aços foram cotados no mercado nacional.

Outro estudo, de Silva R. C e Gheno S. M. (2017), chegou à conclusão que o aço ASTM A36 tem um custo de fabricação menor que o aço ASTM A131 DH36, embora não foram apresentados os custos detalhados, conforme estão mostrados no presente trabalho.

8 CONCLUSÃO

Com o estudo das características mecânicas obtidas através dos ensaios de tração e impacto realizados nos aços ASTM A131 AH36 e ASTM A36, constatou-se que o principal fator determinante das diferenças nestes aços é a presença do elemento manganês, mais abundante no AH36 que no A36. Este elemento determinou uma maior resistência mecânica do aço AH36 quando submetido ao ensaio de tração, porém prejudicou na sua ductilidade.

O aço A36 obteve melhor ductilidade e melhor tenacidade ao impacto a zero grau.

O levantamento de custos visando à otimização do projeto obteve resultados de significância para redução de custos com o material e insumos de fabricação envolvendo o material proposto neste trabalho, o ASTM A36. Mesmo que a densidade do aço A36 seja 0,05 g/cm³ maior que o aço AH36, ainda é possível obter uma redução de 19% do custo do material sugerido no lugar do original.

A conclusão é de que a substituição do aço ASTM A131 AH36 pelo aço ASTM A36 torna-se viável, visto que este atende ao requisito mínimo da tensão de escoamento exigido no projeto e tem uma tenacidade ao impacto em baixa temperatura superior ao aço AH36. Outro fator importante é que o aço A36 gerar menor custo de produção e de estoque, visto que é um material que se enquadra nas aplicações estruturais mais variadas. Sendo assim, a substituição do aço naval AH36 pelo aço A36 no piso do skid gera otimização de custos do projeto. Entretanto qualquer substituição de material em projetos navais deve ser analisados e aprovados pelas entidades classificadoras, portanto este estudo de caso dependeria de uma aprovação da entidade classificadora para ser colocado efetivamente em prática.

REFERÊNCIAS

ASKELAND, Donald R.; PHULÉ, Pradeep P. **The science and engineering of materials**. 4.ed. California: Brooks/Cole-Thomson Learning, 2003.

ASTM A131. Disponível em: <<https://www.materiais.gelsonluz.com/2017/10/astm-a131-propriedades-mecanicas-e-composicao-quimica.html>>. Acesso em: 10 Out. 2018.

ASTM A36. Disponível em: <<https://www.materiais.gelsonluz.com/2017/10/astm-a36-propriedades-mecanicas-e-composicao-quimica.html>>. Acesso em: 10 Out. 2018.

ATHAYDE D.R. **Otimização estrutural dos módulos da planta de processo de uma plataforma FPSO**. Rio de Janeiro: UFRJ, 2013.

BAIN, E. C., **Functions of the Alloying Elements in Steel**, U. S. Steel Corporation, Pittsburgh, PA. ASM. Fourth Printing, 1945.

BALLOU, Ronald H.. **Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos/Logística Empresarial**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.

CALLISTER, Jr, William D. **Ciências e Engenharia dos Materiais: Uma Introdução**. 7 ed. Rio de Janeiro: LTC, Livros técnicos científicos, 2008.

CHIAVERINI, Vicente. **Aços e Ferros Fundidos** – Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais – ABM, 7. Ed., 2005.

DASS, C. **Fundamentals of contemporary mass spectrometry**, Wiley-Interscience Series on Mass Spectrometry, 2007.

DIETER, George E. **Metalurgia mecânica**. 2. Ed. Rio de Janeiro: Ed. Guanabara Dois, 1981.

FRANCISCHINI, Paulino G.; GURGEL, Floriano do Amaral. **Administração de Materiais e do Patrimônio**. São Paulo: Thomson Pioneira, 2002.

GARCIA, A.; SPIM, J., A.; SANTOS, C., A. **Ensaio dos Materiais**. 2. Ed., Rio de Janeiro: LTC, 2015.

GINÉ-ROSIAS, M.F. **Espectrometria de massas com fonte de plasma (ICP-MS)**, Piracicaba: CENA, Série Didática, v.4, 1999.

HORATH, L.. **Fundamentals of Materials Science for Technologists: Properties, Testing, and Laboratory Exercises**. N. J: Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1995.

IMADA. **Máquina de Ensaio de Impacto por Pêndulo em Aço, Ferro Fundido**. Disponível em: < <http://www.imada.com.br/produtos/5/Maquina-de-Ensaio-de-Impacto-por-Pendulo-em-Aco-Ferro-Fundido.asp>>. Acesso em: 22 Out. 2017.

MARQUE, 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.

MEYERS, M. A.; CHAWLA, K. K. **Mechanical Behavior of Materials**. Prentice-Hall, New Jersey, 1999.

METALS HANDBOOK, **Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials**, ASM International, volume 2, 1978.

MODENESI, P. J., **Soldagem I: Descontinuidades e Inspeção em juntas Soldadas**, Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Belo Horizonte, p. 9-10, nov. 2001.

MOURÃO, M. **Introdução à Siderurgia**. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2007.

PFEIL, W. **Estruturas de aço: dimensionamento prático**. 8. Ed., 2009.

PROFISSIONAL DO AÇO. **Aço ASTM-A36 e sua utilização**. Disponível em: <<https://www.profissionaldoaco.com.br/materia/aco-astm-a36-e-sua-utilizacao>>. Acesso em: 23 Out. 2017.

SHACKELDFORD, James F. **Ciência dos Materiais**. São Paulo, Pearson Prentice-Hall, Inc., 6. Ed., 2008.

SILVA F. G. **Estudo da Viabilidade do Processo de Soldagem FCAW com Adição de Arame Frio, Aplicado a Indústria Naval**. Universidade Federal do Pará, Belém, 2010.

SILVA R. C. e GHENO S. M. **Caracterização Mecânica e Estrutural do Aço ASTM A131 Classe DH36 em Comparação com Aço ASTM A36 Utilizado para Projetos Estruturais**. Faculdade de Tecnologia Deputado Walcyr Alceu Trigo, Sertãozinho SP, 2017.

SILVA W. O. **Correlação Entre as Propriedades Mecânicas e Microestruturais dos Aços Navais A36**. Centro Univesitário Estadual da Zona Oeste, Rio de Janeiro - RJ, 2013.

SILVA, J. R. **Transição Dúctil-Frágil do Aço Naval ASTM A131**. Universidade Federal do Pará, Marabá, 2013.

SINAVAL: Sindicato Nacional da Indústria da Construção e Reparação Naval e Offshore. **A indústria da construção naval e o desenvolvimento brasileiro**. Disponível em: <<http://sinaval.org.br/wp-content/uploads/IndNaval-DesBrasil-2011.pdf>>. Acesso em: 22 Out. 2018.

SKOOG, D. A.; HOLLER, F. J.; NIEMAN, T. A.; **Princípios de Análise Instrumental**. 6. ed. Bookman: São Paulo, 2009.

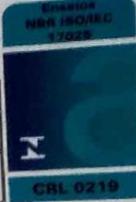
SLACK, Nigel; CHAMBERS, Stuart; JOHNSTON, Robert. **Administração da produção**. 2 ed. São Paulo: Atlas, 2002.

SOUZA, Sérgio Augusto. **Ensaio mecânicos de materiais metálicos**. São Paulo: Ed. Edgard Blücher, 1982.

WILSON, Walker. **Principles and Techniques of Biochemistry and Molecular Biology**. 7. ed., 2010

WOLLNER, G. C. **Arranjos de Convés de FPSOs para Operação no Pré-sal** - Dissertação, UFRJ, Rio de Janeiro, 2016.

ANEXO I

 PROAQT - Empreendimentos Tecnológicos Ltda. Av. Marechal Rondon, 1100 - Osasco - SP - CEP 06093-010 Tel / Fax: (011) 3682-7948 - Tel: (011) 3699-3749 - e-mail: proaqt@proaqt.com.br Em Proi da Alta Qualidade e Tecnologia	CREA-SP N° 1137560 CRQ-IV N° 16915-F	 N CRL 0219
	RELATÓRIO DE ENSAIO TESTING REPORT	
INTERESSADO: CUSTOMER	IMETAME – Metalmecânica Ltda. Rodovia Aracruz x Coqueiral, 966 Bairro Bela Vista – Aracruz – ES.	
	LB. N° 03799/17 Folha: SHEET 1 / 1	

ENSAIO FÍSICO**1.0 Informações fornecidas pelo interessado para execução do ensaio:**

- **Proposta Comercial N°:** PRO-0555/17 de 22/06/2017
- **Aplicação:** Ensaio laboratoriais para enquadramento de matéria prima
- **Material Base:** ASTM A 36 # 5/16"
- **Denominação:** Ensaio de Impacto Charpy, conforme norma ASTM A 370/14.

2.0 Imagem dos Corpos de Prova:**3.0 Ensaio de Impacto Charpy:**

Amostra	Localização do Entalhe	Resultados Obtidos em JOULE		
		1.1	1.2	1.3
03799/17	Metal Base	187	161	Média 173
		172		

- **Temperatura de Ensaio:** 0°C
- **Dimensões:** 10,0 x 7,5 x 55 mm
- **Tipo de Entalhe:** V-NOTCH
- **Preparação do CP:** Conforme Norma ASTM A 370/2014 Fig. 11(b) (Usinado Pelo Cliente)
- **Método de Ensaio:** Conforme Norma ASTM A 370/2014
- Ensaio realizado no laboratório a temperatura ambiente de +21°C, através da Máquina de Ensaio de Impacto na marca "TINIUS OLSEN" MQI 004, IT 406 capacidade 408J Certificado 158119-101 de 02/05/2017.
- Incerteza de medição = ± 1% do valor indicado.

4.0 Observações:

- 4.1 Os resultados obtidos e apresentados no presente relatório têm significação restrita e aplicam-se somente às amostras ensaiadas. A sua reprodução, total ou parcial, só poderá ser feita mediante prévia autorização da Proaqt.
- 4.2 "A incerteza declarada é baseada em uma incerteza padrão combinada, multiplicada pelo fator de abrangência k=2, fornecendo um nível de confiança de aproximadamente 95%. A incerteza padrão de medição foi determinada de acordo a publicação EA-4/02".

Ensaio realizado em 07 de Julho de 2017

&

Emissão de relatório em 07 de Julho de 2017



PROAQT

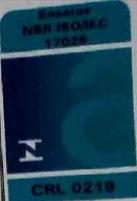
Empreendimentos Tecnológicos Ltda.

 B: 03799/17 Eng° Rodrigo Nunes do Nascimento
 CREA N° 5069279078

Setor de Metalurgia

PROAQT

 Alvaro Blasek Junior
 Técnico Metalúrgico

 PROAQT - Empreendimentos Tecnológicos Ltda. Av. Marechal Rondon, 1100 - Osasco - SP - CEP 06093-010 Tel / Fax: (011) 3682-7946 - Tel: (011) 3699-3749 - e-mail: proaqt@proaqt.com.br Em Prol da Alta Qualidade e Tecnologia	CREA-SP Nº 1137560 CRQ-IV Nº 16915-F	
	RELATÓRIO DE ENSAIO TESTING REPORT	
INTERESSADO: CUSTOMER	IMETAME – Metalmecânica Ltda. Rodovia Aracruz x Coqueiral, 966 Bairro Bela Vista – Aracruz – ES.	
	LB. Nº 03798/17 Folha: 1 / 1 SHEET	

ENSAIO FÍSICO

1.0 Informações fornecidas pelo interessado para execução do ensaio:

- Proposta Comercial Nº: PRO-0555/17 de 22/06/2017
- Aplicação: Ensaios laboratoriais para enquadramento de matéria prima
- Material Base: ASTM A 131 AH36 # 5/16"
- Denominação: Ensaio de Impacto Charpy, conforme norma ASTM A 370/14.

2.0 Imagem dos Corpos de Prova:



3.0 Ensaio de Impacto Charpy:

Amostra	Localização do Entalhe	Resultados Obtidos em JOULE		
		1.1	1.2	1.3
03798/17	Metal Base	24	20	Média 21
		20	18	
		18		

- Temperatura de Ensaio: 0°C
- Dimensões: 10,0 x 7,5 x 55 mm
- Tipo de Entalhe: V-NOTCH
- Preparação do CP: Conforme Norma ASTM A 370/2014 Fig. 11(b) (Usinado Pelo Cliente)
- Método de Ensaio: Conforme Norma ASTM A 370/2014
- Ensaio realizado no laboratório a temperatura ambiente de +21°C, através da Máquina de Ensaio de Impacto na marca "TINIUS OLSEN" MQI 004, IT 406 capacidade 408J Certificado 158119-101 de 02/05/2017.
- Incerteza de medição = ± 1% do valor indicado.

4.0 Observações:

4.1 Os resultados obtidos e apresentados no presente relatório têm significação restrita e aplicam-se somente às amostras ensaiadas. A sua reprodução, total ou parcial, só poderá ser feita mediante prévia autorização da Proaqt.

4.2 "A incerteza declarada é baseada em uma incerteza padrão combinada, multiplicada pelo fator de abrangência k=2, fornecendo um nível de confiança de aproximadamente 95%. A incerteza padrão de medição foi determinada de acordo a publicação EA-4/02."

Ensaio realizado em 07 de Julho de 2017 & Emissão de relatório em 07 de Julho de 2017


 AA-0118800
 07 JUL 2017

PROAQT
 Empreendimentos Tecnológicos Ltda.
 Engº Rodrigo Nunes da Nasciment
 CREA Nº 5069279078

Setor de Metalurgia
 PROAQT
 Alvaro Blasek Junior
 Técnico Metalúrgico

LB: 03798/17

